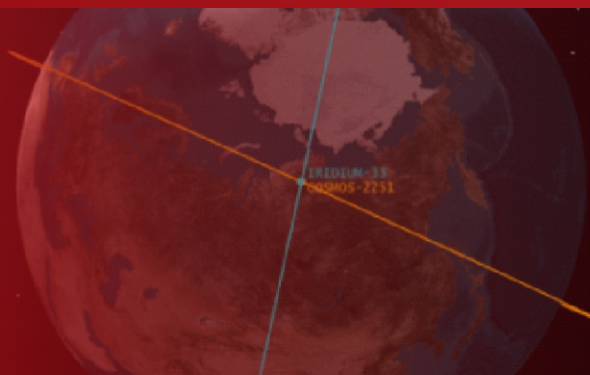


Editor:
Thomas Djamaluddin
Fitri Nuraeni

Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa Sains dan Teknologi



Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa Sains dan Teknologi



Diterbitkan pertama pada 2025 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: penerbit.brin.go.id



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0).

Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Editor:

Thomas Djamaluddin

Fitri Nuraeni

Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa Sains dan Teknologi



Penerbit BRIN

© 2025 Editor & Penulis

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi/Thomas
Djameluddin & Fitri Nuraeni (Ed.)–Jakarta: Penerbit BRIN, 2025.

xx + 409 hlm.; 14,8 × 21 cm

ISBN 978-602-6303-86-8 (*e-book*)

1. Antariksa
3. Teleskop

2. Ionosfer
4. Astronomi

523.1

Editor Akuisisi	: Indah Susanti
<i>Copy editor</i>	: Anggy Denok Sukmawati
<i>Proofreader</i>	: Martinus Helmiawan
Penata isi	: Meita Safitri
Desainer sampul	: Meita Safitri
Edisi pertama	: Desember 2025



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, Anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie, Jl. M.H. Thamrin No. 8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
WhatsApp: +62 811-1064-6770
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id
 PenerbitBRIN
 @Penerbit_BRIN
 @penerbit.brin

Daftar Isi

Daftar Gambar.....	vii
Daftar Tabel.....	xv
Pengantar Penerbit.....	xvii
Kata Pengantar Kepala Organisasi Riset Penerbangan dan Antariksa..	xix
Bab I Tantangan dan Perkembangan Keantariksaan Indonesia	1
Fitri Nuraeni	
Bab II Sejarah, Teknis, dan Kontribusi Pengamatan <i>Sunspot</i> di Indonesia.....	23
Silmie Vidiya Fani, Rian Pramudia Salasa, dan Siska Filawati	
Bab III Teleskop Radio dan Rencana Pengembangannya di Indonesia.....	59
Farahhati Mumtahana, Ibnu Nurul Huda, Sahlan Ramadhan, Retno Dyah Hapsari, Mario Batubara, Timbul Manik, Musthofa Lathif, Peberlin Parulian Sitompul, Rasdewita Kesumaningrum, dan Taufiq Hidayat	

Bab IV	Sampah Antariksa dan Peran Indonesia dalam Mitigasinya	105
	Abdul Rachman, Judhistira Aria Utama, dan Aditya Abdilah Yusuf	
Bab V	Asteroid 99942 Apophis Berpotensi Menabrak Bumi?	147
	Thasman Aditya Singh, Praza Gumilang Kembaren, David Maulana Raihan, dan Christian Vieri	
Bab VI	Medan Magnet Bumi dan Peranannya Melindungi Bumi....	181
	Siska Filawati, Mira Juangsih, Visca Wellyanita, Setyanto Cahyo Pranoto, Anwar Santoso, Elvina Ayu Ratnasari, Rizal Suryana, dan La Ode Muhammad Musafar	
Bab VII	Dinamika Ionosfer Regional Indonesia: Perkembangan Riset dalam Empat Dekade Terakhir	223
	Agri Faturahman, Sefria Anggarani, Annis Siradj Mardiani, Jiyo, dan Rezy Pradipta	
Bab VIII	Penguasaan Teknik Pelapisan Nosel Roket Padat Penting bagi Pengembangan Teknologi Roket.....	251
	Setiadi, Ahmad Novi Muslimin, dan M. Dito Saputra	
Bab IX	Upaya Mewujudkan Propelan Padat Komposit Andal	285
	Kendra Hartaya, Luthfia Hajar Abdillah, dan Retno Ardianingsih	
Bab X	Batas Jendela Pengamatan Hilal pada Bulan Sabit.....	313
	Zaid Nasrullah	
Bab XI	Epilog: Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi	343
	Thomas Djamaluddin	
	Glosarium.....	361
	Daftar Singkatan.....	371
	Indeks.....	375
	Tentang Editor.....	379
	Tentang Penulis	383

Daftar Gambar

Gambar 2.1	<i>Sunspot</i> pada Permukaan Matahari.....	25
Gambar 2.2	Kelompok Sunspot pada Klasifikasi Cortie.....	31
Gambar 2.3	Kelompok Sunspot pada Klasifikasi Zurich.....	33
Gambar 2.4	Tiga Komponen Klasifikasi McIntosh	34
Gambar 2.5	Grafik <i>Sunspot Number</i> Tahun 1700 hingga 2024	38
Gambar 2.6	Indeks-k (atas) dan Jumlah Pengamatan Harian per Tahun dari BRIN Pasuruan yang Dikirim ke WDC-SILSO (bawah). Dalam daftar stasiun WDC-SILSO, BRIN Pasuruan disebut sebagai Watukosek Observatory Indonesia (WK103).....	46
Gambar 2.7	Nilai R dari Pengamatan Sunspot BRIN Pasuruan yang Menggambarkan Siklus Matahari ke-22 hingga Awal Siklus Matahari ke-25	46
Gambar 2.8	Teleskop <i>Sunspot</i> Sketch	47
Gambar 2.9	Sketsa <i>Sunspot</i>	48
Gambar 2.10	Data Olahan Sketsa <i>Sunspot</i>	50
Gambar 2.11	Pengamatan Harian Sunspot dari Arsip BRIN Pasuruan.....	51

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Gambar 2.12	Rekonstruksi Hasil Pengamatan <i>Sunspot</i> pada Koordinat Heliografik menggunakan Komputer.....	52
Gambar 2.13	Teleskop Matahari Digital.....	53
Gambar 2.14	Contoh Hasil Pengamatan Sunspot di BRIN Pasuruan..	54
Gambar 3.1	Jendela pengamatan astronomi landas bumi.....	61
Gambar 3.2	Skema teleskop radio	63
Gambar 3.3	Analogi cara kerja teleskop radio interferometri	65
Gambar 3.4	Interferometer dua elemen antena.....	66
Gambar 3.5	Sebaran teleskop radio VLBI.....	67
Gambar 3.6	Stasiun EHT 2017 dan citra bayangan lubang hitam M87.....	68
Gambar 3.7	Sensitivitas beberapa teleskop radio terancang di dunia.	70
Gambar 3.8	Resolusi sudut yang dapat dicapai oleh beberapa teleskop besar generasi saat ini, baik optik maupun radio	70
Gambar 3.9	Beberapa teleskop radio di Observatorium Bosscha.....	72
Gambar 3.10	Pengamatan HI dengan menggunakan TRB.	73
Gambar 3.11	Spektrum hidrogen dari Teleskop Radio Hidrogen.....	74
Gambar 3.12	Semburan Matahari dari teleskop radio JOVE.....	75
Gambar 3.13	Pola <i>fringe</i> lengan galaksi	76
Gambar 3.14	Beberapa teleskop radio di BPAA Sumedang LAPAN....	77
Gambar 3.15	Semburan radio tipe II pada SN-4000.....	78
Gambar 3.16	Data pengamatan CALLISTO Sumedang.....	78
Gambar 3.17	<i>Master Plan</i> pembangunan Observatorium Nasional Timau.....	84
Gambar 3.18	<i>Master Plan</i> lokasi teleskop Observatorium Nasional Timau.....	84
Gambar 3.19	Hasil simulasi cakupan UV dan objek.....	85
Gambar 3.20	Peta pengamatan radio di kawasan observatorium nasional dan sekitarnya.	86
Gambar 3.21	Hasil pengukuran RFI pada 68-680 MHz.....	88
Gambar 3.22	Hasil pengukuran RFI berdasarkan pengukuran F5-F10.	88

Gambar 3.23	Antena 32-m di Jatiluhur	89
Gambar 3.24	Spektrum RFI seluruh frekuensi dalam polarisasi horizontal	90
Gambar 3.25	<i>Waterfall</i> diagram RFI di Jatiluhur	91
Gambar 3.26	Spektrum RFI pada pita CH ₃ OH di Jatiluhur	91
Gambar 3.27	Diagram <i>wind-rose</i> profil kecepatan angin rata-rata pada arah tertentu.	92
Gambar 3.28	Plot parameter cuaca di Jatiluhur	93
Gambar 3.29	Antena VGOS di China.....	95
Gambar 3.30	Antena VGOS di China.....	97
Gambar 4.1	Pemandangan benda-benda buatan yang dilihat dari atas kutub utara bumi menggunakan data dari US Space Command Satellite Catalog pada tanggal 1 Januari 2019. Ini adalah seluruh benda antariksa buatan (termasuk sampah) berukuran di atas 10 cm yang terdapat dalam katalog tersebut.	107
Gambar 4.2	Kerapatan spasial benda-benda buatan berdasarkan US Space Command Satellite Catalog tahun 1994. Ini adalah seluruh benda antariksa buatan (termasuk sampah) berukuran di atas 10 cm yang terdapat dalam katalog tersebut.	108
Gambar 4.3	Komposisi dalam populasi benda buatan terkatalog yang berada di orbit. Ini adalah seluruh benda antariksa buatan (termasuk sampah) berukuran di atas 10 cm yang terdapat dalam katalog tersebut....	109
Gambar 4.4	Proporsi sampah antariksa yang berupa serpihan (breakup debris) terkatalog yang berada di orbit. Ini adalah seluruh sampah berukuran di atas 10 cm yang terdapat dalam katalog tersebut.	110
Gambar 4.5	Ilustrasi tabrakan antara IRIDIUM 33 dan COSMOS 2251 di atas Rusia bagian utara pada 10 Feb 2009	113
Gambar 4.6	Piringan antena Hubble Space Telescope yang ditembusi sampah antariksa berukuran kecil.	114
Gambar 4.7	Histori manuver yang dilakukan ISS agar terhindar dari tabrakan dengan sampah antariksa hingga Nov 2013	116

Gambar 4.8	Jumlah benda jatuh antariksa sejak awal peluncuran satelit hingga tahun 2024. Payload menandakan satelit bekas, rocket body menandakan roket bekas, dan debris menandakan serpihan. Data diperoleh dari Space Track.	119
Gambar 4.9	Foto Angkasa yang Dipenuhi Konstelasi Satelit Starlink	120
Gambar 4.10	Jumlah efektif benda antariksa buatan di orbit bumi dalam katalog SSN. LEO menandakan orbit rendah, MEO orbit menengah, GEO orbit geosinkron.....	122
Gambar 4.11	Jumlah efektif benda antariksa buatan yang per ketinggian 10 km antara 200 hingga 2000 km pada empat waktu yang berbeda yang ada dalam katalog SSN.....	123
Gambar 4.12	Jumlah efektif benda antariksa buatan di orbit LEO berukuran di atas 10 cm yang diperoleh dari simulasi komputer berdasarkan asumsi tidak ada peluncuran baru	124
Gambar 4.13	Ilustrasi remediasi dengan menggunakan jaring dan tali untuk menjatuhkan sampah antariksa.	127
Gambar 4.14	Sampah antariksa bekas tabung bahan bakar roket Uni Sovyet/Rusia yang jatuh di Gorontalo 1981 (kiri) dan di Lampung 1988 (kanan).....	128
Gambar 4.15	Pemantauan benda jatuh antariksa yang dilakukan pemerintah Indonesia setelah tahun 2010. Ketiga benda antariksa yang dipantau ini berbobot beberapa ton ketika <i>reentry</i>	131
Gambar 4.16	Sebagian dari instrumen yang digunakan untuk pengamatan satelit dan sampah antariksa oleh pemerintah Indonesia sejak tahun 2020.....	132
Gambar 4.17	Perbandingan kurva cahaya satelit COSMOS 2141.....	133
Gambar 4.18	Wilayah geografis Indonesia yang lebar di sepanjang ekuator memungkinkan dilakukannya pengamatan dalam tiga periode orbit secara berturut-turut atas suatu benda di orbit rendah yang melintasi Indonesia.	135

Gambar 4.19	Allsky camera yang dikembangkan di ITERA.	137
Gambar 4.20	ITERA Robotic Telescope (IRT).	138
Gambar 4.21	Utopia III untuk pengamatan satelit.	139
Gambar 4.22	Contoh citra hasil pengamatan sampah antariksa dengan Utopia III yang diamati pada 9 Mei 2024. Terlihat benda yang diamati dan diikuti gerakannya yakni 2 nd stage booster dari salah satu roket FALCON 9 berbentuk titik sedangkan bintang-bintang berbentuk garis. Waktu paparan yang digunakan adalah 1 detik.	140
Gambar 4.23	Kurva cahaya 2 nd stage booster dari FALCON 9 yang diamati pada 9 Mei 2024 dengan Utopia III. Durasi pengamatan adalah 100 detik.	140
Gambar 5.1	Kelompok Asteroid Dekat Bumi.	148
Gambar 5.2	Jumlah kumulatif penemuan Asteroid Dekat Bumi. ...	150
Gambar 5.3	Ilustrasi asteroid 99942 Apophis.	152
Gambar 5.4	Koreksi eror bentuk orbit.	153
Gambar 5.5	Elemen orbit.	157
Gambar 5.6	Plot jarak geosentrik 99942 Apophis terhadap Bumi ..	161
Gambar 5.7	Plot Lintasan Orbit 99942 Apophis Selama 100 Tahun.	164
Gambar 5.8	Dinamika Elemen Orbit Asteroid 99942 Apophis Selama 100 Tahun ke Depan.	165
Gambar 5.9	Papasan Dekat Apophis dengan Bumi Tahun 2029.	166
Gambar 5.10	Hasil Prediksi Proyeksi pada Permukaan Bumi Lintasan Orbit Asteroid 99942 Apophis pada Tanggal 13 April 2029.	167
Gambar 5.11	Lintasan orbit asteroid 99942 apophis 13 Maret 2036.	168
Gambar 5.12	Skala Torino.	171
Gambar 6.1	Sketsa Magnetosfer pada sisi siang (kiri) dan malam (kanan).	184
Gambar 6.2	Ilustrasi Angin Matahari sampai ke Medan Magnet Bumi.	189

Gambar 6.3	Fase Badai Geomagnet.....	190
Gambar 6.4	Perjalanan <i>Sunspot</i> 5395 Melintasi Permukaan Matahari antara Tanggal 7 dan 17 Maret 1989	192
Gambar 6.5	Proyeksi komponen medan magnet Bumi.....	196
Gambar 6.6	Magnetometer Jenis Skalar.....	197
Gambar 6.7	Magnetometer Vektor Tipe Fluxgate.....	198
Gambar 6.8	Peta Jaringan Stasiun Magnetometer LAPAN	201
Gambar 6.9	Peta Jaringan Stasiun MAGDAS/CPMN.	201
Gambar 6.10	Satelit Mikro LAPAN-A3	202
Gambar 6.11	Plot Medan Magnet Rekaman Magnetometer.....	203
Gambar 6.12	Pengembaraan/Pergerakan Lokasi Titik Kutub Utara..	204
Gambar 6.13	Distribusi Wahana Antariksa di Orbit Bumi.....	209
Gambar 6.14	Komponen Lingkungan Antara pada Setiap Ketinggian	210
Gambar 8.1	Konfigurasi Komponen Roket	253
Gambar 8.2	Kegagalan yang terjadi pada <i>divergent</i> nosel roket saat uji <i>static</i>	255
Gambar 8.3	Morfologi ketebalan deposisi hasil proses pembakaran pada permukaan substrat nosel roket.....	255
Gambar 8.4	Konfigurasi nosel roket Pusat Riset Teknologi Roket-BRIN	256
Gambar 8.5	Morfologi ketebalan lapisan Cr-Si-O ,Ti-O dan hasil pengukuran kekerasan lapisan	266
Gambar 8.6	Morfologi ketebalan lapisan SiC dengan aktivator	272
Gambar 8.7	Morfologi lapisan Al_2O_3 /YSZ pada permukaan substrat dengan menggunakan teknik <i>thermal spray</i> HVOF.....	278
Gambar 9.1	Struktur kimia HTPB dan TDI.....	287
Gambar 9.2	Peralatan untuk pembuatan propelan padat komposit	289
Gambar 9.3	Reaksi antara HTPB (diol) dengan Diisosianat (TDI)	295
Gambar 9.4	Kurva <i>Statistic Student</i>	303
Gambar 9.5	Kurva F.....	306
Gambar 9.6	Impuls spesifik (Isp) sebagai fungsi %AP, %PB, %Al ..	310

Gambar 10.1	Gerak revolusi Bumi mengitari Matahari dan bulan mengitari bumi menyebabkan terjadinya fase-fase Bulan.	318
Gambar 10.2	Beragam fase-fase bulan berdasarkan gerak revolusinya mengelilingi Bumi.	319
Gambar 10.3	Urutan ketampakan Hilal dengan kondisi	322
Gambar 10.4	Kondisi topografi di masjid Nabawi ke arah Barat yang terhalang bukit.	324
Gambar 10.5	Grafik sensitivitas warna pada kerucut S, M, dan L panjang gelombang visual.	328
Gambar 10.6	Kartu sensitivitas kontras Pelli-Robson	329
Gambar 10.7	Kartu sensitivitas kontras Pelli-Robson	330
Gambar 10.8	Tampak barisan pegunungan dari yang paling dekat hingga jauh dengan kontras yang berbeda-beda.	332
Gambar 10.9	Jalur cahaya dari benda langit antara di kaki langit cukup panjang dibandingkan di atas kepala.....	333
Gambar 10.10	Tampak selongsong panjang berwarna biru yang dipasang di depan teleskop.....	335
Gambar 10.11	Hasil pemotretan dilakukan secara manual dengan satu kali potret dalam satu frame.....	336
Gambar 10.12	Hasil olah citra sabit bulan yang terdeteksi yang didominasi oleh awan dan terdapat gelembung-gelembung kecil oleh debu.....	337
Gambar 10.13	Ilustrasi gerak Matahari ketika musim panas dan musim dingin pada kawasan Kutub Utara cenderung berada dekat ufuk Utara maupun ufuk Selatan.....	338

Daftar Tabel

Tabel 3.1	Kode pengamatan gelombang radio berdasarkan rentang frekuensi.	87
Tabel 3.2	Komparasi antena VLBI konvensional dan VGOS.....	95
Tabel 5.1	Elemen Orbit	159
Tabel 5.2	Data waktu dan jarak geosentrik saat peristiwa asteroid 99942 Apophis papasan dekat Bumi 100 tahun ke depan.....	161
Tabel 5.3	Skala Torino	169
Tabel 6.1	Spesifikasi Ideal Fluxgate Magnetometer	199
Tabel 6.2	Daftar Lokasi Stasiun Pengamatan Magnetometer LAPAN200	
Tabel 9.1	Impuls spesifik (Isp) Propelan dengan %Al.....	296
Tabel 9.2	Kombinasi Susun Segmen Propelan	300
Tabel 9.3	Kekuatan Korelasi	308
Tabel 10.1	Sebaran data posisi Bulan Sabit awal bulan Syawal.....	324

Pengantar Penerbit

Sebagai penerbit ilmiah, Penerbit BRIN mempunyai tanggung jawab untuk terus berupaya menyediakan terbitan ilmiah yang berkualitas. Upaya tersebut merupakan salah satu perwujudan tugas Penerbit BRIN untuk turut serta membangun sumber daya manusia unggul dan mencerdaskan kehidupan bangsa sebagaimana yang diamanatkan dalam pembukaan UUD 1945.

Kumpulan tulisan dalam bunga rampai ini ditujukan untuk mendiseminasikan sains dan teknologi Antariksa bagi pembaca dengan latar belakang akademik yang tidak terkait keantariksaan atau mahasiswa tingkat awal. Oleh karena itu, dengan membaca buku ini untuk memulai ‘perjalanan’ nya di bidang keantariksaan, juga memberikan wawasan mengenai benda-benda dan fenomena Antariksa dan kebumihan yang berpengaruh pada kehidupan di Bumi.

Buku *Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi* hadir untuk hadir untuk membuka, menginformasikan, dan memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang keantariksaan. Buku ini sangat lengkap membahas dan disertai dengan teori ilmiah.

Buku ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber referensi bagi peneliti atau akademisi serta masyarakat luas untuk pembelajaran terkait antariksa.

Kami berharap hadirnya buku ini dapat menjadi referensi bacaan untuk menambah wawasan dan pengetahuan bagi seluruh pembaca. Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu proses penerbitan buku ini.

Penerbit BRIN

Kata Pengantar

Kepala Organisasi Riset

Penerbangan dan Antariksa

Buku dengan judul “Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi” adalah bunga rampai yang pertama yang ditulis oleh civitas Organisasi Riset Penerbangan dan Antariksa, sejak terbentuknya Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Kumpulan tulisan semi populer ini ditujukan untuk mendiseminasikan sains dan teknologi Antariksa bagi pembaca dengan latar belakang akademik yang tidak terkait keantariksaan atau mahasiswa tingkat awal. Sehingga selain membawa pembaca untuk memulai ‘perjalanan’ nya di bidang keantariksaan, juga memberikan wawasan mengenai benda-benda dan fenomena Antariksa dan kebumian yang berpengaruh pada kehidupan di Bumi. Pada bunga rampai ini juga terdapat bab mengenai teknologi yang digunakan untuk memanfaatkan wilayah Antariksa.

Penghargaan kami berikan bagi tim editor dan penulis, atas kerja kerasnya dalam mewujudkan bunga rampai ini. Semoga dapat

memberikan wawasan pengetahuan bagi Masyarakat Indonesia, yang karena geografi negerinya tidak mungkin dapat menggapai kesejahteraan dan keamanan tanpa menggunakan teknologi dan sains antariksa.

Robertus Heru Triharjanto

Bab I

Tantangan dan Perkembangan Keantariksaan Indonesia

Fitri Nuraeni

A. Lingkup Kegiatan Keantariksaan Indonesia

Dalam Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 21 tahun 2013 tentang Keantariksaan, keantariksaan didefinisikan sebagai segala sesuatu tentang antariksa dan yang berkaitan dengan eksplorasi dan pendayagunaan antariksa. Selain itu dinyatakan pula bahwa antariksa merupakan ruang beserta isinya yang terdapat di luar ruang udara yang mengelilingi dan melingkupi ruang udara serta merupakan ciptaan Tuhan Yang Maha Esa yang dipergunakan untuk sebesar-besarnya kemakmuran rakyat sebagaimana diamanatkan dalam Undang-Undang Dasar Negara Republik Indonesia Tahun 1945. Dengan definisi ruang udara adalah ruang yang mengelilingi dan melingkupi seluruh permukaan bumi yang mengandung udara yang bersifat gas, maka ruang lingkup dari Undang-Undang ini di antaranya adalah

F. Nuraeni

Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail*: fitr008@brin.go.id

© 2025 Editor & Penulis

Nuraeni, F. (2025). Tantangan dan Perkembangan Keantariksaan Indonesia. Dalam T. Djamaluddin & F. Nuraeni (Ed.), *Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi* (1–21). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1425.c1484 E-ISBN: 978-602-6303-86-8

kegiatan keantariksaan; penyelenggaraan keantariksaan; keamanan dan keselamatan; penanggulangan benda jatuh antariksa; serta pencarian dan pertolongan antariksawan. Cakupan dari kegiatan keantariksaan termasuk di dalamnya adalah penguasaan sains dan teknologi keantariksaan. Penguasaan teknologi keantariksaan yang dimaksud meliputi penguasaan dan pengembangan teknologi roket; penguasaan dan pengembangan teknologi satelit; serta penguasaan dan pengembangan teknologi aeronautika dan transfer teknologinya.

Dengan menyimak cakupan kegiatan keantariksaan tersebut, maka mempelajari dan mengembangkan sains dan teknologi keantariksaan dan pemanfaatannya untuk masyarakat adalah hal yang wajib dan diamanatkan oleh Undang-Undang. Saat ini, keantariksaan menjadi salah satu aspek penting dalam kehidupan masyarakat baik secara global maupun lokal suatu negara. Upaya-upaya menghubungkan Bumi dengan antariksa kemudian memunculkan isu ekonomi antariksa (*space economy*), kelestarian antariksa (*space sustainability*), dan keamanan antariksa (*space security*) secara global (Palmroth, et al., 2021)

Indonesia sebagai negara yang terletak di khatulistiwa dengan bentangan terlebar yang dikelilingi oleh lautan, diketahui sebagai daerah konvektif yang cukup aktif dan memiliki daerah ruang udara yang cukup lebar. Selain itu, secara geomagnetik, Indonesia berada di daerah lintang rendah, yang menyebabkan wilayahnya memiliki ionisasi yang cukup signifikan. Faktor-faktor tersebut menjadi argumen mendasar bagi Indonesia untuk mengembangkan keantariksaan. Beberapa contoh kegiatan keantariksaan yang telah berjalan adalah pengembangan instrumen pengamatan dan teknologi wahana antariksa, baik berupa roket, pesawat, ataupun satelit. Hal tersebut tentunya tidak bisa lepas dari pengembangan sains keantariksaan yang dibutuhkan untuk mendukung teknologi antariksa. Selain, itu sains antariksa juga dapat menjadi penentu misi wahana-wahana antariksa untuk dapat mengeksplorasi antariksa.

Beberapa hasil riset dalam bidang sains antariksa menunjukkan bahwa dengan potensi geografis dan geomagnet yang ada Indonesia memiliki potensi ekonomi antariksa yang sangat terbuka, melalui pemanfaatan satelit untuk navigasi, komunikasi, dan bahkan pertahanan dan kegiatan keantariksaan lainnya. Posisi Indonesia pun sangat baik untuk pembuatan bandar antariksa karena wahana yang diluncurkan dari daerah ekuator akan lebih cepat dan efisien dari segi pembiayaan (Korwa, 2024). Hal ini dapat dijelaskan melalui beberapa perhitungan, contohnya perhitungan kebutuhan bahan bakar peluncur. Selain itu, untuk mengurangi ketergantungan terhadap negara lain dalam penyelenggaraan peluncuran wahana antariksa, berdirinya bandar antariksa membuka lapangan kerja baru serta memiliki potensi untuk menarik investasi dari negara lain, seperti Cina, Rusia, Korea Selatan, dan India. Tentunya, hal ini membuka tantangan tersendiri bagi Indonesia.

Meskipun begitu, Indonesia menghadapi beberapa tantangan dan persoalan yang krusial terkait kondisi keantariksaan, salah satunya adalah posisi dan bentangan Indonesia menyebabkan Indonesia rentan terhadap bencana antariksa serta kemungkinan terkena jatuhnya sampah antariksa maupun asteroid menjadi lebih tinggi. Selain itu, beberapa fenomena antariksa yang menyangkut kehidupan di Bumi, perlu terus diamati dan dipelajari, seperti cuaca ekstrem antariksa, badai Matahari, badai geomagnet, gangguan ionosfer yang menimbulkan gangguan terhadap teknologi manusia di Bumi, ataupun lingkungan antariksa dekat Bumi. Dinamika yang ada di antariksa tersebut perlu diamati dan dipahami agar dapat memitigasi potensi bencana yang mungkin muncul.

B. Tantangan Riset dan Teknologi Keantariksaan

Indonesia dituntut untuk berkontribusi dalam kegiatan keantariksaan. Kewajiban ini didasarkan pada beberapa konvensi internasional seperti Liability Convention 1972 dan Undang-Undang Nomor 21 Tahun 2013 tentang Keantariksaan (Supancana, 2023). Namun, menjalankan peran tersebut tidaklah mudah. Perlu ada beberapa strategi

untuk memperkuat peran Indonesia dalam bidang keantariksaan. Beberapa upaya yang mungkin dapat dilakukan adalah:

- 1) Perlu mendorong perkembangan dan penguasaan teknologi pengamatan antariksa.

Untuk dapat memanfaatkan antariksa bagi masyarakat global maupun regional secara optimal, perlu pemahaman mengenai objek, fenomena, dan dinamika juga interaksi yang terjadi di antariksa. Untuk itu diperlukan suatu teknologi pengamatan antariksa yang canggih dan mampu memperoleh informasi maupun data yang valid.

- 2) Perlu sistem manajemen yang baik untuk pengelolaan potensi bencana dan mitigasi objek antariksa alami dan buatan.

Perkembangan teknologi akhir-akhir ini tidak hanya berdampak positif, tapi juga mengandung dampak negatif dan berpotensi mengalami gangguan dalam pemanfaatannya. Hal ini terkait dengan isu mengenai kelestarian antariksa dan keamanan antariksa yang menjadi perhatian dunia. Indonesia, seperti banyak negara lain, menghadapi potensi risiko dari bencana yang berhubungan dengan antariksa. Berikut ini beberapa masalah utama:

- a. Sampah antariksa. Meningkatnya jumlah sampah antariksa menimbulkan risiko bagi satelit dan aset antariksa lainnya. Tabrakan dengan sampah antariksa dapat merusak atau menghancurkan satelit, yang memengaruhi komunikasi, navigasi, dan prakiraan cuaca.
- b. Objek antariksa yang jatuh. Ada risiko benda antariksa, seperti satelit yang tidak berfungsi atau roket, memasuki kembali atmosfer Bumi dan berpotensi jatuh di daerah berpenduduk. Meskipun kemungkinannya rendah, hal itu tetap menjadi perhatian.
- c. Badai Matahari. Badai matahari dapat mengganggu operasi satelit, sistem komunikasi, dan jaringan listrik. Indonesia,

sebagai negara tropis, sangat rentan terhadap dampak badai Matahari pada sistem komunikasi dan navigasinya.

- d. Dampak Asteroid. Meskipun jarang terjadi, kemungkinan dampak asteroid tidak dapat sepenuhnya dikesampingkan. Peristiwa semacam itu dapat menimbulkan konsekuensi yang dahsyat, tergantung pada ukuran dan lokasi dampaknya.
- 3) Perlu terus mendorong riset dan pemanfaatan sains dan teknologi pengamatan lingkungan antariksa.

Sejak era antariksa, yaitu ketika mulai banyak diluncurkan satelit dan wahana antariksa untuk mendukung teknologi di Bumi terkait komunikasi, serta navigasi dan pengelolaan sumber daya, maka pemahaman mengenai lingkungan antariksa dekat Bumi sangat diperlukan. Matahari sebagai sumber energi dalam Tata Surya kita, setiap saat memancarkan partikel berenergi dalam bentuk plasma yang disebut dengan angin Matahari ke ruang antarplanet termasuk ke arah Bumi, bahkan hingga ke tepi tata surya. Bombardir plasma angin Matahari ini dapat sangat berbahaya dan mengancam kehidupan manusia jika langsung mengenai Bumi. Akan tetapi, Bumi memiliki medan magnet yang cukup kuat yang dapat melindungi Bumi dari plasma angin Matahari. Untuk memperoleh pemahaman ini jelas membutuhkan dukungan riset.

Riset antariksa memiliki peran penting dalam melindungi Bumi dari berbagai ancaman dan mendukung keberlanjutan lingkungan. Berikut beberapa kebutuhan riset antariksa yang krusial.

- a. Pemantauan cuaca antariksa. Aktivitas Matahari sebagai sumber energi bagi Bumi, seperti badai Matahari dan lontaran massa korona, dapat memengaruhi teknologi di Bumi, termasuk satelit, komunikasi radio, dan jaringan listrik (Marov dan Kuznetsov, 2014). Riset untuk memprediksi dan memitigasi dampak cuaca antariksa sangat penting.
- b. Pemantauan Perubahan Iklim. Satelit pengamatan Bumi digunakan untuk memantau emisi gas rumah kaca, deforestasi, perubahan permukaan laut, dan indikator iklim

lainnya. Data ini membantu ilmuwan dalam merespons krisis iklim dengan lebih efektif.

- c. Deteksi dan Mitigasi Asteroid. Riset untuk mendeteksi asteroid yang berpotensi menabrak Bumi dan mengembangkan teknologi untuk mengalihkan jalurnya sangat penting untuk mencegah bencana besar.
- d. Pengembangan teknologi energi bersih. Teknologi antariksa, seperti panel surya dan turbin angin yang dikembangkan untuk misi luar angkasa, dapat diterapkan di Bumi untuk menghasilkan energi bersih dan mengurangi emisi gas rumah kaca.
- e. Pengembangan sistem peringatan dini. Sistem peringatan dini untuk berbagai ancaman antariksa, seperti jatuhnya benda antariksa atau ledakan matahari, dapat membantu meminimalkan dampak negatif terhadap kehidupan di Bumi.

Riset-riset ini tidak hanya membantu melindungi Bumi dari ancaman luar angkasa, tetapi juga mendukung keberlanjutan lingkungan dan kesejahteraan manusia.

4) Adanya kebutuhan untuk mendorong perkembangan teknologi roket di Indonesia.

Teknologi roket memiliki peran yang sangat penting dalam keantariksaan, di antaranya sebagai wahana peluncur satelit dan mengirimkan astronot, sebagai kargo ke Stasiun Luar Angkasa Internasional (ISS). Roket juga dapat difungsikan untuk penelitian ilmiah di atmosfer atas dan ruang angkasa seperti gravitasi mikro, radiasi kosmik, dan fenomena atmosfer. Untuk menunjang fungsinya, teknologi roket terus dikembangkan, yang memungkinkan misi yang lebih kompleks dan efisien di masa depan.

Untuk menjawab isu mengenai keamanan dan kelestarian antariksa, roket menjadi salah satu teknologi yang dibutuhkan oleh bangsa Indonesia. Ditambah lagi dengan adanya Undang-undang Republik Indonesia Nomor 21 Tahun 2013 tentang Keantariksaan, yang menjadi landasan hukum bagi bangsa Indonesia untuk mengeksplorasi dan memanfaatkan ruang angkasa untuk digunakan dalam meningkatkan kesejahteraan, pertahanan, dan keamanan nasional, maka penguasaan dan pengembangan teknologi roket menjadi salah satu kunci untuk mendukung eksplorasi dan pemanfaatan antariksa tersebut.

5. Perlu memperkuat aplikasi sains dan teknologi antariksa untuk menjawab kebutuhan masyarakat.

Sains dan teknologi antariksa memiliki banyak aplikasi yang dapat menjawab berbagai kebutuhan masyarakat, di antaranya untuk komunikasi dan navigasi, sistem pemantauan cuaca dan lingkungan Bumi, kesehatan, pertahanan dan keamanan, serta untuk edukasi dan inspirasi. Satelit komunikasi memungkinkan kita untuk mengakses internet, televisi, dan layanan telepon di seluruh dunia, termasuk di daerah terpencil yang sulit dijangkau oleh infrastruktur darat. Sistem navigasi satelit seperti GPS (*Global Positioning System*) membantu dalam berbagai aktivitas sehari-hari, mulai dari navigasi kendaraan hingga pelacakan pengiriman dan manajemen lalu lintas. Selain itu, satelit cuaca mampu memberikan data yang akurat dan *real-time* tentang kondisi atmosfer, membantu dalam prediksi cuaca dan perubahan iklim, peringatan dini bencana alam, untuk memantau perubahan lingkungan, seperti deforestasi, pencemaran air, dan perubahan permukaan tanah.

Di bidang kesehatan, teknologi antariksa digunakan dalam *tele-medicine*, memungkinkan dokter untuk memberikan konsultasi medis jarak jauh kepada pasien di daerah terpencil. Di bidang keamanan dan pertahanan, satelit digunakan untuk pengawasan

dan pemantauan keamanan, membantu dalam deteksi ancaman dan manajemen bencana. Adapun dalam bidang edukasi dan inspirasi, program antariksa menginspirasi generasi muda untuk mengejar karier di bidang sains, teknologi, teknik, dan matematika (STEM). Selain itu, penelitian antariksa juga memberikan wawasan baru tentang alam semesta dan tempat kita di dalamnya. Aplikasi-aplikasi ini menunjukkan bagaimana sains dan teknologi antariksa dapat memberikan manfaat nyata bagi masyarakat dan membantu mengatasi berbagai tantangan global.

C. Perkembangan Sains dan Teknologi Pengamatan Antariksa

Indonesia, melalui BRIN (dulu LAPAN) dan beberapa institusi pendidikan, aktif melakukan kegiatan keantariksaan. Buku ini menghadirkan beberapa perkembangan riset, pengamatan, dan perekayasaan untuk menopang kegiatan keantariksaan Indonesia. Dalam buku ini, para penulis menguraikan beberapa potensi jawaban dari isu keantariksaan yang muncul, yang harapannya dapat menguatkan peran Indonesia dalam bidang keantariksaan di lingkup nasional, regional, dan internasional. Secara umum, bab-bab dalam buku ini dibagi menjadi 3 bagian, yaitu: perkembangan sains antariksa; perkembangan wahana antariksa, dan aplikasi keantariksaan dalam masyarakat.

1. Perkembangan Sains Antariksa

Pada Bab II yang berjudul “Sejarah, Teknis, dan Kontribusi Pengamatan *Sunspot* di Indonesia”, Silmie Vidiya Fani, Rian Pramudia Salasa, dan Siska Filawati menjelaskan mengenai pengamatan bintik matahari (*sunspot*) yang merupakan indikator penting dalam penentuan siklus Matahari. Pengamatan *sunspot* ini perlu dilakukan karena kemudian dapat digunakan untuk mengetahui tren peningkatan ataupun penurunan aktivitas Matahari yang tentunya berdampak pada kondisi cuaca antariksa dan Bumi. Penjelasan mengenai kaitan *sunspot* dan aktivitas Matahari mengawali tulisan pada bab ini. Kemudian dilanjut-

kan dengan sejarah pengamatan *sunspot* sejak masa awal sebelum menggunakan teleskop hingga ke pengamatan menggunakan teleskop yang semakin canggih yang dilakukan di abad 21. Paparan selanjutnya adalah penjelasan mengenai karakteristik *sunspot* serta perkembangan dan jenis indeksasi *sunspot* global. Terakhir ditutup dengan penjelasan mengenai metode dan teknis pengamatan *sunspot* termasuk bagaimana pengamatan *sunspot* di Indonesia juga telah berkontribusi pada perhitungan nilai Wolf (R) global sejak 1984 hingga 2023.

Bab berikutnya pada buku ini masih menjelaskan mengenai teknologi pengamatan antariksa yaitu teleskop radio. Bab III yang berjudul “Teleskop Radio dan Rencana Pengembangannya di Indonesia” ini ditulis oleh Farahhati Mumtahana, Ibnu Nurul Huda, Sahlan Ramadhan, Retno Dyah Hapsari, Mario Batubara, Timbul Manik, Musthofa Lathif, Peberlin Sitompul, Rasdewita Kesumaningrum, dan Taufiq Hidayat. Pemanfaatan emisi radio benda langit dengan menggunakan teleskop radio sejak abad ke-20 telah membantu para astronomer untuk lebih memahami alam semesta. Penjelasan dasar astronomi radio dan teleskop radio mengawali bab ini sebagai pengantar bagi pembaca untuk memahami jenis-jenis teleskop radio dan perkembangan teknologi pengamatan antariksa menggunakan teleskop radio yang dijelaskan pada subbab selanjutnya. Kemudian, kontribusi Indonesia dalam perkembangan teknologi pengamatan antariksa global dengan melengkapi fasilitas pengamatan antariksa dengan teleskop radio di beberapa kawasan dijelaskan secara terperinci berikut jenis dan contoh hasil pengamatannya. Selain untuk kemajuan astronomi radio, dijelaskan juga bahwa pengembangan teleskop radio ini dapat menjadi sarana pengembangan multidisiplin ilmu. Terakhir sebagai penutup dipaparkan beberapa rencana pengembangan teleskop radio di Indonesia yang terletak di sekitar garis khatulistiwa yang tentunya berpotensi untuk penelitian dan kolaborasi global.

Pemahaman mengenai potensi bencana antariksa baik yang disebabkan oleh objek antariksa alami dan buatan, serta bagaimana mitigasinya dengan memanfaatkan teknologi pengamatan berupa teleskop dan model simulasi diulas dalam Bab IV dan V. Bab IV

memaparkan isu terkini mengenai dampak perkembangan teknologi antariksa berupa sampah antariksa. Abdul Rachman, Judhistira Aria Utama, dan Aditya Abdilah Yusuf dalam bab yang berjudul “Sampah Antariksa dan Peran Indonesia dalam Mitigasinya” ini, membahas secara lengkap tentang sampah antariksa. Bab ini diawali dengan pengertian dan deskripsi sampah antariksa lalu apa saja dampak negatif yang bisa ditimbulkannya. Setelah itu dibahas tentang cara manusia mengamati sampah antariksa dan mempelajari populasinya. Dipaparkan pula bagaimana perkembangan populasi tersebut dan beberapa upaya yang telah dan akan dilakukan oleh dunia untuk memitigasi dampak sampah antariksa. Pembahasan selanjutnya beralih pada konteks negara kita. Dimulai dengan memaparkan sampah antariksa yang pernah jatuh di wilayah Indonesia lalu ditutup dengan pemaparan upaya yang telah dan akan dilakukan oleh bangsa kita dalam mitigasi sampah antariksa.

Adapun pada Bab V, Thasman Aditya Singh, Praza Gumilang Kembaren, David Maulana Raihan, dan Christian Vieri menjelaskan mengenai objek antariksa alami yang berpotensi menimbulkan ancaman bagi kehidupan di Bumi. Di dalam bab yang berjudul “Analisis Potensi Tabrakan Asteroid 99942 Apophis sampai 100 Tahun Mendatang” ini dijelaskan mengenai asteroid dan lebih detail lagi apakah Asteroid 99942 Apophis itu. Kemudian dipaparkan juga mengenai potensi bencana yang mungkin ditimbulkan oleh Asteroid 99942 Apophis. Untuk dapat melakukan mitigasi terkait potensi bencana akibat objek antariksa alami berupa asteroid perlu dipahami dan diprediksi orbit dan potensi bahaya lainnya dari asteroid tersebut. Setelah dipahami barulah dapat diputuskan strategi mitigasi yang cocok, baik dengan misi defleksi asteroid ataupun peringatan dini. Sementara itu, untuk kasus khusus yaitu potensi bencana Asteroid 99942 Apophis dijelaskan lebih mendetail berdasarkan analisis orbit dan analisis potensi tumbukannya dengan Bumi dengan menggunakan simulasi dan pemodelan. Setelah dilakukan simulasi dan pemodelan untuk memprediksi lintasan dan potensi bencana tabrakan dengan Bumi, tetap perlu dilakukan pengamatan dengan instrumen radar

maupun optik sehingga diperoleh data terbaru untuk perhitungan dan simulasi lanjut sehingga dapat diperkirakan potensi bahaya terbaru apakah semakin meningkat ataukah menurun. Penutup pada bab ini adalah rekomendasi kajian lanjutan untuk lebih memahami dinamika orbit benda kecil tata surya seperti asteroid, peningkatan kemampuan simulasi dengan memasukkan parameter perturbasi objek-objek lain dalam tata surya dan gaya non-gravitasional, penyiapan strategi mitigasi dengan pertimbangan dampak tabrakan dengan Bumi menggunakan skala Torino dan Palermo, dan tentunya peningkatan kolaborasi internasional. Pemahaman mengenai potensi bencana antariksa, baik yang disebabkan oleh objek antariksa alami maupun buatan, dapat menyiapkan kita untuk mengambil langkah mitigasi yang tepat dan berkontribusi dalam menjawab isu keamanan dan kelestarian antariksa.

Bumi memiliki medan magnet yang cukup kuat yang dapat melindungi Bumi dari plasma angin Matahari. Hal ini dibahas oleh Siska Filawati, Mira Juangsih, Visca Wellyanita, Setyanto Cahyo Pranoto, Anwar Santoso, Elvina Ayu Ratnasari, Rizal Suryana, dan La Ode Muhammad Musafar dalam Bab VI berjudul “Medan Magnet Bumi dan Peranannya Melindungi Bumi”. Bab ini diawali dengan pengenalan mengenai medan magnet Bumi, pembentukan dan strukturnya, kemudian bagaimana struktur medan magnet Bumi berubah seiring interaksinya dengan angin Matahari. Perubahan pada aktivitas Matahari pun menimbulkan respons yang berbeda pada magnet Bumi. Dalam bab ini terdapat pembahasan mengenai akibat dari peningkatan aktivitas Matahari dan interaksi antara medan magnet Bumi dengan angin Matahari yang kemudian dapat menyebabkan gangguan pada medan magnet Bumi yang dikenal sebagai badai magnet. Proses terjadinya badai magnet disebabkan oleh berbagai faktor yang diulas dengan mendetail termasuk juga besaran gangguan geomagnet yang diterjemahkan sebagai tingkat aktivitas geomagnet berdasarkan indeks-indeks medan magnet Bumi yang diperoleh dari stasiun-stasiun pengamatan medan magnet global maupun lokal/regional.

Selanjutnya dipaparkan beberapa peristiwa badai geomagnet sangat kuat dalam 20 tahun terakhir yang berdampak signifikan pada teknologi di Bumi. Karena dampaknya yang dapat memengaruhi sistem teknologi di Bumi, maka diperlukan suatu pengamatan yang kontinu untuk mempelajari dan memonitor peristiwa-peristiwa ekstrem yang mungkin terjadi dimasa yang akan datang. Pengamatan medan magnet Bumi dijelaskan mulai dari dasar teori, jenis-jenis instrumen, dan jaringan pengamatan yang ada di Indonesia. Kemudian dibahas pula kontribusi pengamatan di Indonesia dengan jaringan pengamatan medan magnet Bumi global. Selain pengamatan berbasis landas Bumi, Indonesia telah melakukan pengamatan medan magnet Bumi berlandas antariksa dengan menggunakan satelit yang saat ini masih merupakan misi eksperimen untuk mempelajari pengukuran medan magnet Bumi *in situ*.

Terkait pengamatan yang kontinu ini, diketahui juga bahwa selama kurun waktu geologi telah terjadi beberapa kali perubahan pada medan magnet Bumi. Isu mengenai pembalikan medan magnet Bumi ini menjadi perhatian masyarakat karena kekhawatiran menurunnya atau bahkan menghilangnya medan magnet Bumi yang selama ini melindungi Bumi dari aliran plasma angin Matahari. Dalam bab ini dijelaskan dengan ringkas mengenai kebenaran keberadaan fenomena pembalikan kutub medan magnet Bumi tersebut dan penjelasan para ahli mengenai hal ini. Paparan selanjutnya terkait dampak dinamika lingkungan antariksa terutama dinamika medan magnet Bumi terhadap teknologi antariksa terutama lingkungan orbit satelit. Dinamika di orbit satelit ini sangat memengaruhi rencana pemanfaatan dan mitigasi terkait ketiga isu antariksa yang disebut sebelumnya, yaitu isu ekonomi, kelestarian, dan keamanan antariksa. Terakhir, paparan ditutup dengan perkembangan riset medan magnet Bumi di Indonesia, baik yang sudah dilakukan selama ini maupun di masa yang akan datang, sebagai kontribusi solusi untuk isu keantariksaan global maupun lokal/regional.

Lingkungan antariksa dekat Bumi yang juga memiliki dinamika terkait dengan aktivitas Matahari dan atmosfer adalah ionosfer.

Ionosfer yang merupakan lapisan atmosfer atas yang didominasi oleh gas terionisasi dan elektron bebas memiliki dinamika dan variabilitas dengan efek signifikan pada infrastruktur teknologi baik landas Bumi maupun landas antariksa. Pada bab VII yang berjudul “Dinamika Ionosfer Regional Indonesia: Perkembangan Riset dalam Empat Dekade Terakhir”, Agri Faturahman, Sefria Anggarani, Annis Siradj Mardiani, Jiyo, dan Rezy Pradipta memaparkan pentingnya pemahaman dinamika dan variabilitas Ionosfer dan perkembangan risetnya di Indonesia.

Pemaparan diawali dengan penjelasan mengenai lapisan Ionosfer serta bagaimana pembentukan dan strukturnya yang dikarakterisasi berdasarkan ketinggian berupa struktur vertikal dan karakterisasi berdasarkan lintang geomagnet. Interaksi plasma ionosfer dengan atmosfer bawah, lapisan medan magnet Bumi, dan aktivitas Matahari dapat memengaruhi dinamika dan variabilitasnya. Kemampuan ionosfer dalam mentransmisikan gelombang radiolah yang menjadi daya tarik penyelidikan ionosfer pada awalnya, terutama ketika mulai berkembang teknologi radio pada abad 18. Hal tersebut yang melandasi perkembangan riset ionosfer secara umum yang kemudian muncul kebutuhan untuk melakukan pengamatan ionosfer secara lebih sistematis.

Instrumen awal yang digunakan untuk pengamatan ionosfer secara sistematis adalah radar HF yang disebut ionosonde. Kemudian, dengan semakin kompleksnya pertanyaan yang muncul terkait dinamika ionosfer, dikembangkan juga instrumen-instrumen lain yang dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik dan dinamika ionosfer. Perkembangan instrumen pengamatan ionosfer tidak terbatas pada instrumen landas Bumi, tetapi juga berkembang ke arah pengamatan landas antariksa menggunakan satelit ataupun roket. Hal ini mengarah pada semakin banyak parameter ionosfer yang dapat diukur semakin memungkinkan pengembangan model ionosfer yang lebih komprehensif.

Sebagai salah satu parameter cuaca antariksa yang perlu diperhatikan untuk memitigasi bencana antariksa akibat peristiwa ekstrem

cuaca antariksa, pengembangan model dan prediksi ionosfer semakin diperlukan. Di Indonesia sendiri, riset ionosfer telah dilakukan sekitar tahun 1980 di Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) yang pada saat itu dibentuk sebagai lembaga penelitian sekaligus badan antariksa yang salah satu tugasnya adalah melakukan penelitian, pengembangan, pengkajian, dan penerapan dalam bidang sains antariksa. Pada awalnya riset ionosfer di Indonesia lebih ditujukan untuk memberikan prediksi frekuensi komunikasi radio HF yang kemudian berkembang ke arah karakterisasi ionosfer di regional Indonesia. Hal ini didukung juga dengan semakin banyaknya peralatan ionosonde yang dipasang tersebar di beberapa wilayah Indonesia.

Selain itu, kerja sama dengan mitra luar negeri semakin memperbesar dan mempercepat perkembangan riset ionosfer terutama untuk penyelidikan kekhususan wilayah Indonesia yang berada di daerah *Equatorial Ionization Anomaly* (EIA) dan juga merupakan wilayah dengan proses konveksi yang cukup aktif. Beberapa kerja sama dengan mitra luar negeri pada masa LAPAN masih dilanjutkan hingga saat ini ketika LAPAN bergabung dengan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) pada 2021. Riset ionosfer di Indonesia yang selama dua dekade sebelumnya lebih pada dukungan untuk prediksi frekuensi komunikasi radio HF, dalam dua dekade terakhir semakin berkembang ke arah dinamika ionosfer regional Indonesia, terutama pada interaksi magnetosfer-ionosfer-atmosfer. Dengan begitu diharapkan riset ionosfer regional Indonesia dapat memberikan kontribusi solusi pada isu keantariksaan global maupun lokal/regional.

2. Perkembangan Teknologi Wahana Antariksa

Isu terkait perkembangan teknologi wahana antariksa di Indonesia yang diangkat dalam buku ini adalah perkembangan teknologi roket di Indonesia. Pada bab VIII yang berjudul “Penguasaan Teknik Pelapisan Nosel Roket Padat Penting bagi Pengembangan Teknologi Roket”, para penulis yaitu Setiadi, Ahmad Novi Muslimin, dan M. Dito Saputra membahas perkembangan teknologi roket di Indonesia, terutama dalam hal pelapisan nosel roket padat. Penguasaan

teknik pelapisan nosel ini diperlukan karena masih ditemukan kendala pada nosel, berupa kerusakan pada bagian *divergent nosel* yang disebabkan oleh tekanan, hantaman ablasi, dan suhu tinggi. Selain itu, nosel juga dapat mengalami deposisi yang bisa memengaruhi sifat aerodinamis roket.

Dengan latar belakang tersebut, pembahasan pada bab ini diawali dengan penjelasan mengenai konfigurasi komponen roket dan kegunaannya sebagai wahana antariksa untuk berbagai misi, di antaranya sebagai wahana transportasi ke orbit Bumi, wahana peralatan ilmiah, dan juga digunakan dalam bidang militer. Berikutnya dijelaskan mengenai beberapa teknik pelapisan nosel yang secara umum digunakan dan perkembangannya sejak pertengahan abad ke-20. Penguasaan teknologi pelapisan nosel roket padat tidak hanya menitikberatkan pada perkembangan teknis pelapisan, tetapi juga pada perkembangan teknologi material yang digunakan untuk pelapisan. Beberapa teknik pelapisan pada era modern yang mulai menggantikan pelapisan *electroplating* konvensional di antaranya adalah *Chemical Vapor Deposition* (CVD), *Physical Vapor Deposition* (PVD), dan *Thermal Spray*. Perkembangan teknik pelapisan nosel yang telah dilakukan oleh Pusat Riset Teknologi Roket-BRIN dijelaskan sangat detail beserta kelebihan dan kekurangan dari masing-masing teknik tersebut. Inti dari teknik pelapisan nosel ini adalah pemilihan metode dan material yang tepat meningkatkan kekuatan nosel sehingga diperoleh performa yang baik dan masa pakai yang lebih panjang dalam kondisi operasional yang ekstrem.

Pengembangan teknologi pelapisan nosel di Indonesia hingga saat ini bukannya tanpa kendala, terutama karena teknologi roket merupakan teknologi sensitif sehingga tidak mudah untuk dapat berbagi informasi, teknologi, maupun sumber daya dengan negara-negara lain yang sudah lebih maju. Meskipun begitu, kendala terkait teknologi, sumber daya, dan kepakaran dapat diatasi dengan cara meningkatkan investasi dalam penelitian dan pengembangan teknologi roket dengan ikut melibatkan pihak swasta, di samping peran aktif instansi pemerintahan terkait. Selain itu, diperlukan juga kerja sama yang lebih kuat

dengan pihak perguruan tinggi dalam maupun luar negeri untuk meningkatkan kapasitas sumber daya manusia yang terlibat dalam pengembangan teknologi ini. Kolaborasi internasional yang selama ini sudah dilakukan masih perlu diperkuat melalui sistem-sistem kemitraan riset dengan negara-negara yang lebih maju, dan tak kalah pentingnya adalah mendorong pengembangan industri dalam negeri dalam bidang manufaktur dan teknologi material. Dengan begitu harapan Indonesia dalam memperkuat penguasaan teknologi roket dan wahana antariksa yang bermanfaat untuk bangsa dapat tercapai.

Bagian penting lainnya dari suatu roket adalah sistem motor atau pendorongnya sehingga roket dapat meluncur ke luar angkasa sesuai misi yang diembannya. Bab IX dengan judul “Upaya Mewujudkan Propelan Padat Komposit Andal” yang ditulis oleh Kendra Hartaya, Luthfia Hajar Abdillah, Retno Ardianingsih memaparkan bagian pendorong roket terutama mengenai bahan pendorongnya, yaitu propelan. Perkembangan dan keandalan propelan padat komposit untuk motor roket adalah hal yang penting dan perlu dipertimbangkan dengan baik karena menyangkut keberhasilan misi roket tersebut. Beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam merancang spesifikasi daya roket yaitu misi roket, termasuk di dalamnya adalah rencana orbit dan beban satelit.

Pembahasan dalam bab ini diawali dengan penjelasan bahwa propelan yang andal akan memengaruhi kinerja motor roket secara keseluruhan, karena pengembangan propulsi dan struktur akan bergantung pada propelan yang digunakan. Untuk memperoleh propelan yang andal diperlukan suatu proses yang baku dan terstandarkan sehingga dapat memastikan konsistensi performa propelan yang diproduksi dengan material dan proses yang sama meskipun pada waktu berbeda. Selain pada proses pembuatan, pengujian propelan juga perlu standardisasi yang baik untuk mewujudkan propelan yang andal. Pembakuan proses dan pengujian propelan juga dapat mempermudah evaluasi kinerja roket secara keseluruhan dan membantu pengembangan teknologi roket dengan lebih efisien. Dengan tujuan tersebut, penjelasan lebih lanjut adalah tentang komposisi dari

propelan padat, komposisi kimia, dan proses pembuatannya yang melibatkan proses pencampuran (*mixing*), pencetakan (*molding*), dan pemadatan dengan cara dipanaskan di dalam oven pada suhu dengan jangka waktu tertentu. Untuk mengetahui apakah propelan yang dibuat adalah propelan yang andal, selanjutnya dilakukan uji karakteristik di laboratorium di Pusat Riset Teknologi Roket-BRIN dan uji kinerja propelan dengan cara melihat hubungan antara komposisi propelan dengan impuls spesifiknya.

Pada masa lalu, data hubungan antara komposisi propelan dengan impuls spesifik ini tampak tidak memiliki tren hubungan yang kurang jelas sehingga menyulitkan riset dan pengembangan lebih lanjut. Oleh karena itu, pengembangan produksi propelan yang andal di Pusat Riset Teknologi Roket diarahkan pada pembakuan proses dan evaluasinya. Upaya menuju pembakuan proses tersebut telah menghasilkan kekayaan intelektual dalam bentuk paten yang dikabulkan. Paten yang telah dikabulkan mengenai uji homogenitas pada propelan padat komposit yang menggunakan data densitas dan kekerasan lebih menitikberatkan pada proses uji homogenitasnya.

Perkembangan berikutnya terwujud dalam bentuk paten mengenai uji homogenitas dengan menggunakan film sinar-X dan pemindaian digital yang dalam pengambilan sampelnya tidak merusak sampel sehingga propelan yang diuji dapat digunakan untuk uji lainnya. Pengembangan dari paten ini adalah ke arah pembuatan perangkat lunak untuk uji homogenitas terkomputerisasi. Paten berikutnya adalah paten pembakuan proses produksi propelan padat komposit dengan menyajikan langkah-langkahnya secara runut dan sistematis. Dengan pembakuan proses pembuatan propelan dalam bentuk paten diharapkan propelan padat komposit yang andal dapat diproduksi dalam artian propelan dibuat kapan pun akan memiliki kinerja yang sama selama komposisi dan kualitas bahan baku sama.

Tantangan selanjutnya yang muncul adalah homogenitas yang sulit mencapai 100% dan propelan yang utuh tidak cacat secara fisik. Oleh karena itu, telah dikabulkan paten mengenai penggunaan dua jenis pelumas untuk melapisi *mandrel* dan cetakan, dengan begitu

cacat fisik pada propelan yang dihasilkan dapat dihindari agar tidak menimbulkan masalah pada pembakarannya saat uji statik. Upaya lainnya adalah pengajuan paten yang telah dikabulkan mengenai pentingnya penambahan filamen dengan nilai tahanan (resistor) yang sama secara paralel pada *squib* untuk memperbesar kemungkinan menyala bagi penyalat awal (*igniter*) pembakaran motor roket. Hal ini berkaitan dengan homogenitas dari suatu propelan. Propelan yang homogen akan mempermudah evaluasi kinerja alat penyalat awal pembakaran motor roket karena telah mengeliminasi salah satu faktor kegagalan nyala akibat komposisi Al yang tidak homogen dalam propelan, sehingga pengembangan dapat fokus ke arah alat penyalat awal pembakaran pada motor roket. Setelah itu untuk mengetahui ataupun membandingkan kinerja satu motor roket dengan kinerja motor roket yang lain pada komposisi propelan yang sama, telah diajukan suatu paten yang memaparkan langkah-langkahnya. Kemudian dapat dilanjutkan dengan analisis lebih mendetail mengenai perbedaan yang muncul pada parameter-parameter yang dibandingkan.

Upaya-upaya untuk memperoleh propelan padat komposit yang andal dalam hal pembakuan proses telah diwujudkan dalam bentuk paten, selanjutnya adalah upaya dalam hal pembakuan pengujian. Uji yang digunakan adalah uji statistik dan penggunaan model regresi untuk optimalisasi kinerja propelan yang diproduksi dan memastikan perkiraan nilai kinerja propelan (Impuls spesifik [I_{sp}]) yang lebih akurat dan hasil yang lebih konsisten untuk pengujian motor roket. Hal ini juga dapat dikembangkan ke arah perkiraan I_{sp} propelan dari roket yang diluncurkan.

Bab ini diakhiri dengan kesimpulan upaya pembakuan proses dan pengujian propelan padat komposit telah dilakukan. Dengan pertimbangan bahwa teknologi peroketan masih terus berkembang, baik dalam hal material komposisi penyusun propelan maupun teknis produksinya, maka pembakuan proses dan pengujian ini akan menjadi dasar yang krusial untuk pengembangan propelan andal selanjutnya yang dapat meningkatkan kinerja roket dalam berbagai misi untuk keperluan bangsa Indonesia.

3. Aplikasi Sains Antariksa

Sains antariksa yang di antaranya adalah astronomi dapat berdampak langsung pada kehidupan manusia. Sebagai contoh, dalam buku ini terdapat pembahasan mengenai “Batas Jendela Pengamatan Hilal pada Bulan Sabit” yang ditulis oleh Zaid Nasrullah yang fokusnya adalah pada teknis pengamatan bulan sabit dan batasannya dengan aplikasi untuk ibadah masyarakat Indonesia yang mayoritas muslim. Bab X ini diawali dengan konteks sejarah mengenai waktu pada lintas kebudayaan di dunia. Beberapa kebudayaan tertua telah memiliki kalender masing-masing untuk mendefinisikan waktu yang berkaitan dengan perkembangan sosial budayanya. Sebagai contoh, dikenal adanya kalender Cina, Julian, Gregorian, Yahudi, Hindu, dan Islam. Pembagian waktu dalam kalender tersebut adalah berdasarkan pada pengamatan astronomi yang berkaitan dengan peristiwa-peristiwa besar yang terjadi pada masing-masing kebudayaan.

Dalam konteks Indonesia, sehari-hari digunakan penanggalan Masehi yang merujuk pada kalender Gregorian dan berbasis pada perputaran Bumi mengelilingi Matahari. Namun, untuk penentuan waktu beribadah, terutama pada umat Islam sebagai mayoritas agama yang dianut oleh masyarakat Indonesia, digunakan kalender Hijriah yang berbasis pada rotasi Bulan. Polemik acap kali terjadi karena adanya perbedaan dalam penentuan awal dan akhir pelaksanaan ibadah puasa. Hal ini disebabkan adanya miskonsepsi pemaknaan hilal pada bulan sabit baik secara bahasa, istilah, dan metode penentuannya. Dengan tujuan mengurai miskonsepsi tersebut, pemaparan mengenai batasan jendela pengamatan hilal pada bab ini akan fokus dalam konteks keperluan umat Islam.

Selama ini telah dikenal metode penentuan hilal dengan cara rukyat yang didasarkan pada pengamatan langsung ketampakan bulan sabit baru, kemudian juga metode *hisab* yang merupakan penentuan hilal berdasarkan pada perhitungan astronomi, serta metode *imkan* rukyat yang merupakan gabungan kedua metode tersebut. Dalam astronomi, pergerakan Matahari dan Bulan menjadi dasar untuk pembagian waktu. Orbit Bulan menyebabkan fase-fase Bulan dapat

diamati termasuk juga hilal yang menandai waktu masuknya bulan baru pada penanggalan Hijriah. Pada masa keemasan cendekiawan muslim, fase-fase Bulan telah dihitung menggunakan instrumen seperti astrolab dan kemudian seiring berkembangnya keilmuan astronomi dan fisika terutama mengenai optik maka instrumen yang digunakan untuk mengamati fase-fase Bulan semakin canggih sehingga perhitungan orbit Bulan menjadi semakin akurat dan dapat diperkirakan.

Meskipun demikian, kendala dalam pengamatan hilal masih tetap ada. Kendala tersebut disebabkan oleh faktor topografi, kondisi atmosfer, dan kecerahan langit senja di daerah pengamatan yang dapat menyebabkan interpretasi yang berbeda dan bahkan kegagalan pengamatan. Selain itu, perbedaan posisi lintang daerah pengamatan juga memengaruhi keberhasilan pengamatan hilal. Sebagai contoh, masyarakat yang tinggal di daerah lintang tinggi ataupun kutub-kutub Bumi akan mengalami kesulitan untuk mengamati fase-fase Bulan sebagaimana yang tampak di daerah ekuator ataupun lintang rendah.

Saat ini perkembangan instrumen optik dan pengolahan citra semakin canggih sehingga penggunaan kamera video astronomi CCD (*Charge-Coupled Device*) atau CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) untuk merekam gambar memungkinkan pengamatan yang lebih baik lagi. Selain kecanggihan instrumen pengamatan, masih ada beberapa faktor lain yang memengaruhi keberhasilan pengamatan menggunakan instrumen modern, yaitu penggunaan filter, *setting* teleskop yang bertujuan untuk menyelaraskan gerak teleskop dengan gerakan benda langit dan pembuatan *pointing* model, serta pemanfaatan perangkat lunak untuk pengolahan citra sehingga mempertajam hasil pengamatan. Dengan metode pengamatan dan peralatan yang semakin canggih ditambah juga pengetahuan mengenai gerak benda langit yang semakin berkembang, maka penentuan hilal baik dengan metode rukyat maupun *hisab* menjadi lebih mudah dan dimungkinkan untuk memperoleh hasil yang baik.

Di akhir bab ini, penulis memaparkan bahwa dengan adanya perbedaan definisi antara melihat dan mendeteksi serta didukung

dengan kemajuan teknologi pengamatan, pembatasan jendela hilal yang masih dapat diterima dalam hukum Islam yaitu pada panjang gelombang visual dengan ketampakan objek apa adanya sesuai yang ada di lapangan tanpa adanya pengolahan citra. Hal ini memberikan sorotan penting pada penyelarasan metode ilmiah dengan yurisprudensi yang berlaku dalam masyarakat yang memanfaatkannya, dalam hal ini adalah hilal untuk penentuan awal dan akhir waktu ibadah dalam Islam.

Sebagai penutup dari buku bunga rampai ini, Bab XI adalah epilog yang merangkum hal-hal utama dari setiap bab yang dipaparkan sebelumnya. Diharapkan uraian-uraian yang telah dipaparkan dapat memberikan referensi mengenai bagaimana sains dan teknologi antariksa di Indonesia telah berkembang dan dapat dimanfaatkan untuk peningkatan kemakmuran dan keselamatan seluruh bangsa Indonesia terkait isu ekonomi, kelestarian, dan keselamatan antariksa.

Daftar Pustaka

- Palmroth, M., Tapio, J., Soucek, A., Perrels, A., Jah, M., Lönnqvist, M., Nikulainen, M., Piaulokaite, V., Seppälä, T., Virtanen, J. (2021). Toward sustainable use of space: economic, technological, and legal perspectives. *Space Policy*, Volume 57, 101428, ISSN 0265-9646, <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2021.101428>.
- Korwa, J. R.V., Sinaga, M., Renyoet, C.C., Amenes, A.A., Darwis, D. (2024). Indonesia's first spaceport plan in Biak Island: a view from international relations. *Jurnal Hubungan Internasional* Vol. 12, No. 2. <https://doi.org/10.18196/jhi.v12i2.18563>
- Supancana, I.B.R. (2023). *Atma Jaya Studies on Aviation, Outer Space and Cyber Laws; SPACE LAW DEVELOPMENT IN RETRO AND PROSPECT*. Penerbit Bintang Kejora. <https://www.atmajaya.ac.id/en/media/mh-buku-undang-undang-keantariksaan.pdf>.
- Marov, M.Y., Kuznetsov, V.D. (2014). Solar flares and impact on earth. In Allahdadi, F., Pelton, J. (eds) *Handbook of Cosmic Hazards and Planetary Defense*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02847-7_1-1
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 21 tahun 2013 tentang keantariksaan

Bab II

Sejarah, Teknis, dan Kontribusi Pengamatan *Sunspot* di Indonesia

Silmie Vidiya Fani, Rian Pramudia Salasa, dan Siska Filawati

A. *Sunspot* dan Aktivitas Matahari

Matahari merupakan bintang yang paling dekat dengan Bumi, memiliki diameter 109 kali Bumi, dan massa 333 kali Bumi. Sebagai sebuah bintang, Matahari memiliki permukaan yang tersusun dari gas, terutama hidrogen dan helium. Inti Matahari memiliki temperatur dan tekanan yang ekstrem dan hal ini menyebabkan terjadinya reaksi nuklir yang menghasilkan cahaya dan panas yang kita rasakan sebagai sinar Matahari. Reaksi nuklir tersebut menyebabkan terjadinya gerakan konvektif material pada inti dan lapisan luar Matahari. Gerakan ini menghasilkan medan magnet yang bervariasi dan saling berinteraksi sehingga konfigurasi magnetik pada permukaan Matahari terus berubah dalam waktu yang singkat.

S. V. Fani*, R. P. Salasa & S. Filawati

*Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail*: silm001@brin.go.id

© 2025 Editor & Penulis

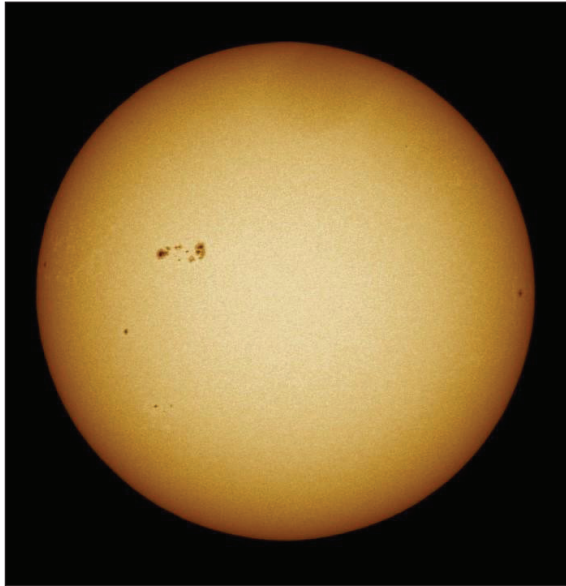
Fani, S. V., Salasa, R. P. & Filawati, S. (2025). Sejarah, Teknis, dan Kontribusi Pengamatan *Sunspot* di Indonesia. Dalam T. Djamaluddin & F. Nuraeni (Ed.), *Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi* (23–57). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1425.c1485
E-ISBN: 978-602-6303-86-8

Aktivitas Matahari secara berkelanjutan menciptakan sebuah kondisi dinamis pada wilayah antarplanet yang disebut dengan cuaca antariksa. Cuaca antariksa memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kehidupan di Bumi. Pengamatan terhadap cuaca antariksa dilakukan secara kontinu oleh berbagai badan antariksa, lembaga penelitian, dan organisasi di seluruh dunia. Pengamatan cuaca antariksa melibatkan berbagai jenis kegiatan dan instrumen untuk mengamati fenomena yang terjadi di Matahari yang terkait dengan kondisi di wilayah antarplanet seperti angin Matahari dan medan magnet antarplanet.

Salah satu fenomena pada Matahari yang dapat diamati dari Bumi adalah bintik matahari (*sunspot*). Sunspot merupakan wilayah yang tampak gelap di permukaan Matahari (Gambar 2.1). Aktivitas magnetik yang terjadi di bagian dalam Matahari dapat muncul ke permukaan sebagai daerah unipolar maupun bipolar. Daerah dengan ukuran yang cukup besar biasanya akan muncul sebagai *sunspot*, sebuah fitur gelap pada fotosfer yang menandakan bahwa medan magnet sangat terkonsentrasi di lokasi-lokasi tersebut di permukaan Matahari (Solanki, 2003).

Pengamatan *sunspot* merupakan hal yang penting dalam penelitian Matahari. Kemunculannya sudah lama digunakan sebagai indikator utama aktivitas Matahari karena mudah diamati, bahkan dengan mata telanjang atau dengan bantuan alat sederhana. Penampakan *sunspot* pernah digunakan oleh tokoh astronomi dunia Johannes Kepler (1571-1630) untuk mengkonfirmasi teorinya tentang Matahari yang berotasi (Casanovas, 1997). Jumlah *sunspot* digunakan sebagai penanda siklus Matahari dapat menjadi peringatan awal terjadinya badai geomagnet dan masih banyak manfaat lainnya dalam melakukan pengamatan *sunspot*.

Jumlah *sunspot* digunakan sebagai penanda siklus Matahari yang dapat menggambarkan aktivitas Matahari. Aktivitas Matahari berkaitan dengan gangguan Matahari ke Bumi. Sunspot dengan medan magnet kompleks dapat memicu suar matahari, sedangkan flare dapat memicu *Coronal Mass Ejection* (CME). Pada 10 Maret 1989, terdapat flare yang memicu CME dan terjadi badai geomagnet



Sumber: Dok. BRIN Pasuruan (22 Juni 2022)

Gambar 2.1 *Sunspot* pada Permukaan Matahari

pada 12 Maret 1989 yang mengakibatkan aurora terlihat di wilayah Florida dan Cuba yang merupakan lintang rendah. Pada hari berikutnya, terjadi gangguan listrik di Quebec, Canada yang menyebabkan gangguan listrik selama 12 jam sehingga aktivitas ekonomi, bisnis, sekolah, dan aktivitas transportasi seperti kereta bawah tanah dan bandara terganggu. Pada era teknologi dan komunikasi seperti saat ini, dampak aktivitas Matahari menjadi semakin penting untuk diantisipasi. Komunikasi pada aktivitas penerbangan, kebergantungan pada koneksi internet dan sistem GNSS, aktivitas astronot di luar angkasa, induksi pada pembangkit listrik, hingga sistem kabel bawah laut dapat terdampak oleh aktivitas Matahari (Boteler, 2019). Oleh karena itu, pengamatan *sunspot* yang dapat menggambarkan aktivitas Matahari merupakan hal yang krusial untuk dilakukan dalam rangka mitigasi risiko dari dampak-dampak aktivitas Matahari terhadap kehidupan di Bumi.

B. Sejarah Pengamatan Sunspot

Catatan tentang kemunculan *sunspot* telah ditemukan pada dokumen-dokumen masa lampau dari China pada tahun 200 SM. Sebelum era teleskop, diyakini bahwa para astronom oriental melihat *sunspot* dengan mata telanjang, melalui filter pelemahan batu kristal atau batu giok yang dipoles, atau dengan refleksi melalui genangan cairan berwarna (Eddy et al, 1989). Sejak zaman sejarah hingga abad ke-16, hanya ditemukan sedikit catatan terkait *sunspot* dengan rata-rata satu *sunspot* per dekade. Laporan kemunculan *sunspot* sebelum era teleskop sering ditafsirkan sebagai tanda-tanda puncak siklus Matahari pada masanya, dengan premis bahwa *sunspot* yang terlihat adalah *sunspot* yang berukuran cukup besar yang secara statistik lebih umum terjadi pada masa puncak siklus Matahari.

Baru pada abad ke-17, ketika teleskop telah ditemukan dan dijual secara komersial, muncul ketertarikan terhadap pengamatan *sunspot*. Pada rentang waktu antara tahun 1610-1612, dalam kurun waktu yang hampir bersamaan terdapat beberapa astronom amatir dan ilmuwan yang mengamati Matahari menggunakan teleskop dan menemukan area gelap di permukaan Matahari. Thomas Harriot (1560–1621), seorang matematikawan asal Inggris, diketahui memiliki manuskrip yang berisi 199 sketsa *sunspot* yang observasi pertamanya dilakukan pada Desember 1610. Johan Fabricius (1587–1616), astronom amatir asal Belanda, menemukan bintik hitam yang bergerak secara perlahan dari pinggir ke tengah piringan Matahari. Fabricius mengamati *sunspot* menggunakan berbagai jenis teleskop dan kemudian *camera obscura* untuk memastikan bahwa bintik tersebut merupakan sebuah objek yang nyata, bukan kesalahan penglihatan. Pengamatan pertama Fabricius dilakukan pada Februari 1611, dan hasil observasinya dipublikasi dalam sebuah buku pada Juni 1611. Christoph Scheiner (1576–1650) menyadari penampakan bintik hitam pada saat melakukan observasi Matahari pada Maret 1611. Scheiner kemudian mempersiapkan teleskop dengan filter berwarna untuk mempelajari fenomena tersebut. Baru pada akhir 1611 Scheiner mempublikasikan hasil observasinya terkait *sunspot* melalui tulisan

anonim. Sementara itu, pada awal 1612 Galileo Galilei (1564–1642) mengklaim telah mengobservasi *sunspot* sejak 18 bulan sebelumnya. Namun, tidak ditemukan dokumen yang mendukung klaim tersebut selain dari catatan korespondensi Galileo dengan seorang rekan ilmuwan pada September 1611. Baru pada pertengahan 1612 Galileo mempublikasi hasil observasinya terkait *sunspot* secara komprehensif.

Sejak saat itu, observasi terkait *sunspot* mulai berkembang luas, meski belum dilakukan secara sistematis. Para ilmuwan maupun astronom amatir di berbagai belahan dunia melakukan observasi terhadap kemunculan *sunspot*. Salah satunya adalah Johann Caspar Staudach, seorang astronom amatir yang menggambar kemunculan *sunspot* dalam rentang waktu antara 1749–1796 dengan total lebih dari 1.000 hari pengamatan. Gambar-gambar Staudach ini kelak menjadi peninggalan penting yang menghubungkan hasil pengamatan *sunspot* era Galileo dengan data pengamatan *sunspot* era modern. Sebelumnya, pada pertengahan abad ke-17 hingga awal abad ke-18 tidak banyak catatan mengenai *sunspot* yang terlihat, meskipun terdapat banyak catatan terkait pengamatan *sunspot* yang dilakukan. Periode ini kelak disebut dengan Maunder minimum, berdasarkan pada penelitian Edward Walter Maunder pada tahun 1894.

Pada abad ke-19, Samuel Heinrich Schwabe (1789–1875) melakukan pengamatan *sunspot* selama 42 tahun dan menghasilkan 8.486 gambar serta 3.699 laporan tertulis (Arlt and Vaquero, 2020). Schwabe memulai pengamatan pada 1825 dan 17 tahun setelahnya menemukan bahwa siklus kemunculan *sunspot* memiliki periode sekitar 11 tahun. Siklus ini disebut dengan siklus Matahari (*solar cycle*).

Pada era yang sama dengan Schwabe, Rudolf Johann Wolf (1816–1893), astronom asal Swiss yang tertarik dengan publikasi Schwabe terkait siklus Matahari melakukan penelitian lebih lanjut tentang siklus tersebut. Wolf melakukan pengamatan *sunspot* di Observatorium Zurich untuk memastikan adanya siklus *sunspot* dalam jangka waktu lama dan menyempurnakan penentuan periodenya. Wolf menciptakan indeks yang digunakan untuk karakterisasi tingkat aktivitas *sunspot* yang disebut sebagai *Wolf Number*. Pada waktu yang

sama, Wolf mengumpulkan data historis pengamatan *sunspot* yang pernah dilakukan oleh ilmuwan-ilmuwan sebelumnya. Hasil observasi Staudach dan Schwabe menjadi dasar pencatatan *sunspot* yang dilakukan oleh Wolf. Ia juga melakukan perjalanan mengelilingi Eropa untuk melengkapi data historis observasi *sunspot* dari tahun 1700. Kompilasi data historis ini disebut dengan Wolf Sunspot Number. Observasi Wolf kemudian dilanjutkan oleh para penerusnya di Observatorium Zurich, yaitu Alfred Wolfer, William Otto Brunner, dan Max Waldmeier.

Setelah era Wolf, kegiatan pengamatan *sunspot* di seluruh dunia menjadi lebih institusional. Pada akhir abad ke-19, sejumlah 12 stasiun pengamatan bekerja sama dengan observatorium Zurich untuk menerbitkan buletin yang memuat hasil observasi di seluruh stasiun pengamatan. Jumlah ini kemudian bertambah hingga 40 stasiun pada pertengahan abad ke-20 (Clette, 2018). Sementara itu, pengamatan *sunspot* juga mengikuti kemajuan teknologi dengan melibatkan penggunaan teknologi canggih. Pada pertengahan abad ke-20 perkembangan teknologi ruang angkasa telah memungkinkan untuk melakukan pengamatan Matahari menggunakan satelit dalam berbagai panjang gelombang dan melakukan pemantauan yang kontinu pada aktivitas Matahari. Pada abad ke-21, pengamatan *sunspot* terus berkembang dengan adopsi teknologi baru seperti interferometri dan teleskop Matahari berkinerja tinggi. Selain itu, pemodelan dan analisis data komputer telah menjadi semakin penting dalam memahami perilaku kompleks dari *sunspot* dan aktivitas Matahari secara keseluruhan.

C. Karakteristik Sunspot

Sunspot merupakan area yang memiliki temperatur lebih dingin dibandingkan dengan permukaan Matahari di sekitarnya. Hal ini terjadi karena medan magnet yang kuat mencegah konveksi panas dari dalam Matahari. Temperatur rata-rata permukaan Matahari adalah sekitar 5.800K, sedangkan temperatur pada area *sunspot* berkisar antara 4.000 hingga 5.000K. Perbedaan inilah yang mengakibatkan

sunspot terlihat sebagai bintik-bintik hitam kecil di permukaan Matahari. Sunspot ditandai dengan inti gelap yang disebut dengan umbra dan dikelilingi sebagian atau seluruhnya oleh daerah yang lebih terang yang disebut dengan penumbra. Umbra adalah lokasi utama dari medan magnet vertikal dan penumbra terjadi pada daerah yang terdapat medan magnet horizontal yang kuat (McIntosh, 1981). Baik umbra maupun penumbra memiliki bentuk yang tidak beraturan serta intensitas kecerahan yang tidak seragam. Karakter khas dari formasi umbra-penumbra inilah yang digunakan untuk membedakan antara *sunspot* dengan fitur Matahari lainnya.

Muncul dan menghilangnya *sunspot* disebabkan oleh perubahan pada medan magnet Matahari. Pada awal terbentuknya, *sunspot* terlihat seperti bintik kecil yang disebut pori. Tidak semua pori-pori berkembang menjadi *sunspot* yang lengkap. Pori-pori tersebut mengalami evolusi dalam jangka waktu beberapa jam hingga berhari-hari. Saat proses evolusi tersebut, ukuran pori membesar dan membentuk bagian umbra serta penumbra. Selain itu, sejumlah pori-pori lain dapat muncul di sekelilingnya dan berevolusi menjadi *sunspot* lainnya. Sebuah *sunspot* dapat berumur beberapa hari hingga beberapa bulan dengan ukuran yang berubah-ubah selama masa kemunculannya.

Kemunculan *sunspot* pada Matahari memiliki siklus yang disebut siklus Matahari. Setiap sekitar 11 tahun medan magnet Matahari mengalami perubahan total, ketika kutub utara dan kutub selatan Matahari mengalami pertukaran tempat dan untuk kembali pada posisi kutub-kutub semula dibutuhkan waktu 11 tahun kemudian. Ketika medan magnet berubah, jumlah aktivitas di permukaan Matahari juga berubah. Sunspot akan muncul pada awal siklus di lintang tinggi (lebih dari 40°). Setelah itu, secara perlahan *sunspot* akan bergeser ke arah lintang lebih rendah dan terdistribusi pada lintang rendah ($0-25^\circ$). Awal siklus Matahari dapat diketahui dengan cara menghitung jumlah *sunspot*. Saat *sunspot* yang muncul sedikit berarti aktivitas Matahari berada pada kondisi minimal. Periode ini disebut dengan *solar minimum*, yang biasanya terjadi di awal siklus. Seiring berjalannya waktu jumlah *sunspot* yang muncul akan meningkat. Di pertengahan siklus, Matahari berada di siklus maksimum yang

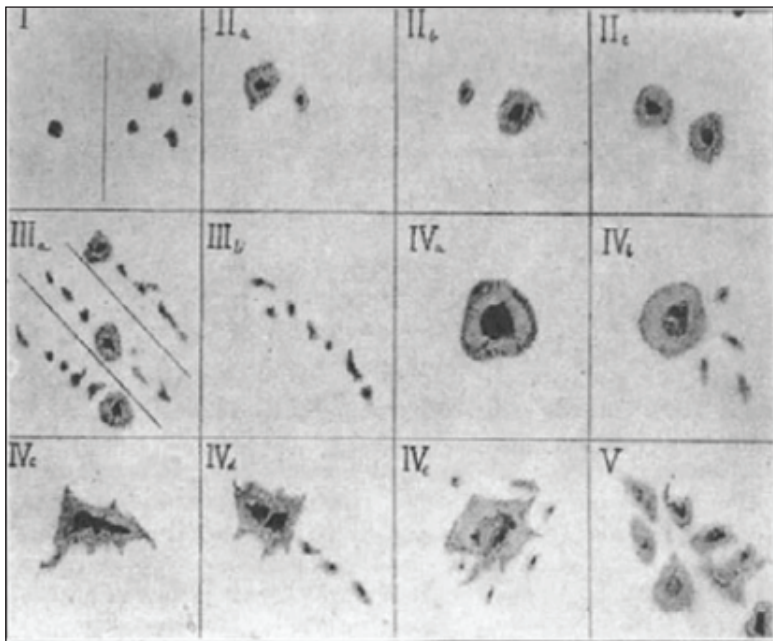
ditandai dengan mulai munculnya banyak *sunspot*. Periode ini disebut dengan *solar maximum*. Ketika siklus berakhir, aktivitas Matahari kembali ke titik minimum dan kemudian siklus baru dimulai. Selama puncak siklus, jumlah *sunspot* yang terlihat bisa lebih dari 100 dalam satu waktu. Meski rata-rata periode sebuah siklus diperkirakan sekitar 11 tahun, tetapi pergantian dari satu siklus ke siklus selanjutnya tidak dapat diketahui secara langsung. Rata-rata jumlah kemunculan *sunspot* pada *solar maximum* suatu siklus dapat berbeda dengan rata-rata pada *solar maximum* siklus-siklus sebelumnya. Begitu juga pada saat *solar minimum*. Suatu *solar minimum* baru dapat diketahui beberapa waktu setelahnya ketika jumlah kemunculan *sunspot* telah kembali meningkat, sehingga waktu pergantian satu siklus ke siklus selanjutnya baru dapat dipastikan beberapa waktu setelahnya, antara beberapa bulan hingga satu tahun.

Sunspot memiliki berbagai macam bentuk dan ukuran. Sunspot dapat terlihat secara soliter maupun berada dalam kumpulan yang berdekatan yang disebut dengan grup *sunspot*. Sebuah *sunspot* tunggal biasanya teramati sebagai sebuah umbra dan dikelilingi oleh penumbra. Namun, pada grup *sunspot* berukuran besar dengan struktur yang kompleks, *sunspot* dapat memiliki beberapa umbra di dalam penumbra. Dalam proses evolusinya, umbra dapat menghilang dan hanya menyisakan penumbra. Meskipun demikian, daerah penumbra tanpa umbra ini biasanya tidak bertahan lebih lama dari satu hari (McIntosh, 1981).

Beberapa grup *sunspot* memiliki struktur magnet yang lebih kompleks dibandingkan grup *sunspot* lainnya. Hal ini juga memungkinkan *sunspot* pada grup tersebut menghasilkan semburan matahari (*flare*). Untuk mengetahui apabila grup *sunspot* memiliki potensi menjadi *flare*, maka ada aturan untuk mengklasifikasikan grup *sunspot*. Pengklasifikasian ini juga bertujuan untuk melihat tingkat kompleksitas grup *sunspot* dan juga aktivitasnya. Ketika grup *sunspot* yang terbentuk cukup besar dengan jumlah umbra banyak dan penumbra yang luas, sering kali grup tersebut dapat memicu suar matahari yang signifikan. Setiap grup *sunspot* memiliki bentuk (susunan *sunspot*) yang berbeda-beda, dan perbedaannya cenderung

beragam pada grup *sunspot* yang lebih besar. Di sisi lain, ada rentang ukuran dan struktur yang terbatas di antara grup *sunspot*, sehingga ukuran dan struktur ini digunakan sebagai fitur untuk melakukan klasifikasi.

Pengamatan *sunspot* dilakukan menggunakan instrumen, metode, dan pada lokasi yang berbeda-beda, sehingga skema klasifikasi yang digunakan juga berbeda. Cortie (1901) membuat klasifikasi grup *sunspot* berdasarkan bentuk dan evolusinya. Klasifikasi Cortie dibentuk berdasarkan studi yang dilakukan pada sekitar 3.500 gambar *sunspot* yang dihasilkan selama dua puluh tahun terakhir di Observatorium Perguruan Tinggi Stonyhurst. Di antara gambar yang diteliti oleh Cortie, terdapat 296 grup yang dipilih untuk didiskusikan, termasuk 117 grup yang menghasilkan gangguan yang besar. Tujuan dari klasifikasi ini adalah menggambarkan fase-fase berbeda yang telah dilalui



Sumber: Carrasco et al. (2015)

Gambar 2.2 Kelompok Sunspot pada Klasifikasi Cortie

sekelompok *sunspot* selama masa evolusinya. Berikut merupakan definisi tipe grup *sunspot* Cortie (Gambar 2.2).

1. Tipe I: satu atau sekelompok bintik kecil.
2. Tipe IIa: kelompok yang mengandung dua bintik yang bintik terdepannya merupakan bintik utama.
3. Tipe IIb: kelompok yang memiliki dua bintik, di mana bintik belakangnya adalah bintik utama.
4. Tipe IIc: kelompok yang mengandung dua bintik dengan kedua bintik merupakan bintik utama.
5. Tipe IIIa: kumpulan bintik-bintik dengan bintik-bintik utama yang jelas.
6. Tipe IIIb: kumpulan bintik-bintik penumbra, di mana umbra tidak beraturan dan bintik utama tidak jelas.
7. Tipe IVa: bintik tunggal dengan bentuk yang beraturan.
8. Tipe IVb: bintik tunggal dengan bentuk yang beraturan dan terdapat bintik kecil sebagai pendamping.
9. Tipe IVc: bintik tunggal dengan bentuk tidak beraturan.
10. Tipe IVd: bintik tunggal dengan bentuk tidak beraturan dan terdapat sekumpulan bintik kecil lainnya.
11. Tipe IVe: bintik tunggal dengan bentuk tidak beraturan dan terdapat pendamping kecil tetapi tidak berada dalam bintik tunggal.
12. Tipe V: kelompok tidak beraturan dengan bintik-bintik besar.

Pada tahun 1947, Waldmeier mengembangkan metode klasifikasi grup *sunspot* yang disebut dengan klasifikasi Zurich dengan cara memodifikasi skema klasifikasi Cortie. Klasifikasi Zurich dikorelasikan dengan adanya suar matahari, tetapi untuk kelas Zurich besar belum tentu menghasilkan kelas suar matahari yang besar (Krivsky, 1972). Klasifikasi Zurich menggunakan dua kriteria, yaitu 1) bentuk dan ukuran grup; 2) morfologi dan evolusinya. Klasifikasi ini memiliki sembilan kelas untuk setiap variasi grup *sunspot* (Gambar 3). Berikut definisi dari sembilan kelas yang dikembangkan oleh Waldmeier.

A				
B				
C				
D				
E				
F				
G				
H				
J				

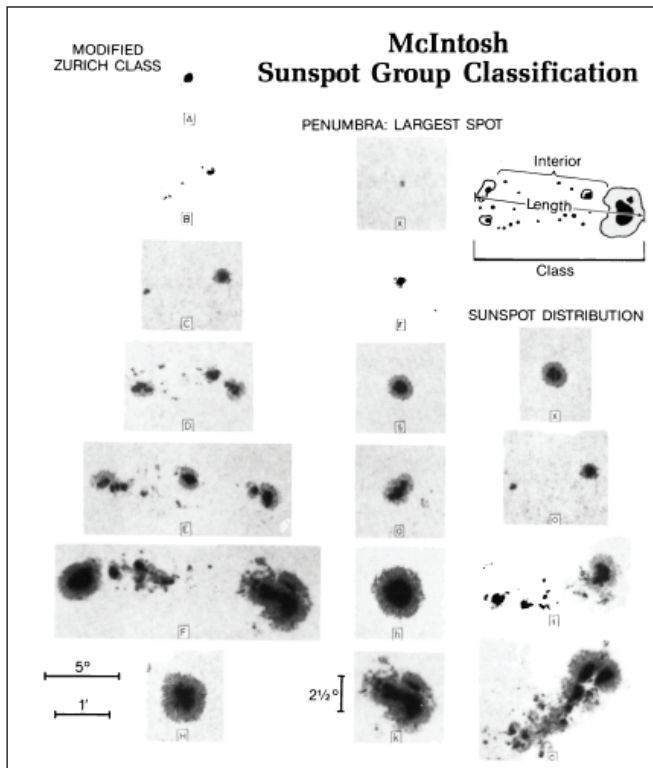
Sumber: (Carrasco et al., 2015)

Gambar 2.3 Kelompok Sunspot pada Klasifikasi Zurich

- 1) Kelas A: terdapat satu atau lebih bintang tanpa penumbra dan tanpa konfigurasi bipolar.
2. Kelas B: kelompok bintang penumbra tanpa konfigurasi bipolar.
3. Kelas C: kelompok bipolar yang memiliki satu bintang dengan penumbra.
4. Kelas D: kelompok bipolar, di mana bintang utamanya memiliki penumbra yang panjang kelompoknya $<10^\circ$.
5. Kelas E: kelompok bipolar yang bintang utamanya mempunyai penumbra dengan panjang antara 10° dan 15° .
6. Kelas F: kelompok bipolar yang sangat besar dengan panjang $>15^\circ$.

7. Kelas G: kelompok bipolar yang memiliki penumbra dan tidak ada bintik kecil di antara kelompok utama, dengan panjang $>10^\circ$.
8. Kelas H: bintik unipolar dengan penumbra dan berdiameter $>2,5^\circ$.
9. Kelas J: bintik unipolar dengan penumbra dan berdiameter $<2,5^\circ$.

Pada tahun 1990, Patrick S. McIntosh (1940-2016) membuat klasifikasi McIntosh yang merupakan modifikasi dari klasifikasi Zurich. Klasifikasi McIntosh memiliki tiga komponen, yaitu kelas Zurich yang dimodifikasi, kelas penumbra, dan distribusi *sunspot* (Gambar 2.4).



Sumber: (McIntosh, 1990)

Gambar 2.4 Tiga Komponen Klasifikasi McIntosh

Modifikasi kelas Zurich ditentukan berdasarkan apakah ada penumbra, distribusi penumbra, dan panjang kelompok. Modifikasi Zurich dibagi menjadi dua kelompok, yaitu kelompok bipolar dan unipolar. Kelompok unipolar terjadi apabila satu titik atau sekelompok titik dengan jarak antar titik terbesar 3° , sedangkan kelompok bipolar terjadi apabila panjang keseluruhan grup titik $>3^\circ$. Modifikasi kelas Zurich memiliki tingkat kelas *sunspot* dari A hingga H, kelompok unipolar meliputi kelas A dan H, sedangkan kelompok bipolar adalah kelas B, C, D, E, dan F.

Penentuan kelas penumbra dilakukan menggunakan simetri dan ukuran penumbra terbesar suatu *sunspot* dalam satu grup. Apabila menggunakan kriteria diameter penumbra maka dapat diukur sumbu utara-selatan (N-S) titik tersebut. Notasi yang dipakai pada penentuan kelas penumbra ini adalah x: tidak ada penumbra; r: penumbra belum sempurna merupakan penumbra yang tidak beraturan dan biasanya lebih terang dari penumbra normal; s: penumbra simetris merupakan penumbra dewasa, berwarna gelap melingkar dengan struktur halus berserabut memiliki diameter $<2,5^\circ$; a: penumbra tidak simetris merupakan penumbra dewasa, berwarna gelap, tidak beraturan dan berstruktur halus memiliki diameter $<2,5^\circ$; h: penumbra simetris dengan diameter $>2,5^\circ$; k: penumbra tidak simetris dengan diameter $>2,5^\circ$ diukur pada arah N-S.

Distribusi *sunspot* menunjukkan kepadatan populasi bintik internal suatu grup *sunspot*. Notasi yang digunakan adalah x: *individual spot*; o: *open distribution* (distribusi terbuka) yaitu tidak ada bintik atau hanya sedikit sekali di zona tengah kelompok; i: *intermediate distribution* (distribusi menengah) yaitu banyak bintik terletak diantara zona kelompok, tetapi tidak memiliki penumbra yang matang; c: *compact distribution* (distribusi rapat) yaitu distribusi yang memiliki bintik besar dan terdapat penumbra yang matang.

D. Indeks Sunspot Global

1. International Sunspot Number

Keberhasilan Wolf dalam melakukan kompilasi data historis *sunspot* dapat dikatakan sebagai awal dari pengamatan *sunspot* era modern. Wolf berhasil mendapatkan nilai *Sunspot Number* (SN) sejak tahun 1749, menghitung *epoch* untuk *solar maximum* dan *solar minimum* dari tahun 1610, serta menyempurnakan siklus *sunspot* milik Schwabe menjadi 11,1 tahun dari sebelumnya 10 tahun. Parameter yang digunakan adalah *Wolf Number*, yaitu sebagai berikut.

$$W = 10 N_g + N_s \quad (1)$$

Pada rumus tersebut, W adalah Wolf Number, N_g adalah jumlah grup *sunspot*, dan N_s adalah jumlah *sunspot* yang teramati. Wolf kemudian melanjutkan deret data historis tersebut menggunakan data dari pengamatan yang dilakukannya sendiri. Wolf menyadari pentingnya mencocokkan hasil pengamatannya sendiri dengan pengamatan yang dilakukan oleh pengamat-pengamat lain demi konsistensi data, mengingat lokasi, instrumen, dan kondisi penglihatan setiap pengamat dapat berbeda. Oleh karena itu, ia lantas mengenalkan faktor reduksi k yang nilainya spesifik untuk tiap-tiap pengamat. Dengan demikian, nilai indeks *sunspot* yang dihasilkan oleh seorang pengamat adalah sebagai berikut.

$$R = k (10g + f) \quad (2)$$

Pada rumus tersebut, R adalah nilai SN, k adalah koefisien pengamat, g adalah jumlah grup *sunspot*, dan f adalah jumlah umbra dan penumbra. Dengan dikenalkannya koefisien k , Wolf dapat mengisi kekosongan data pengamatan dari Observatorium Zurich menggunakan data pengamatan dari stasiun-stasiun pengamatan lain. Nilai koefisien k untuk tiap-tiap stasiun diperoleh dari rasio antara pengamatan *sunspot* dari stasiun tersebut dengan pengamatan dari Observatorium Zurich sebagai stasiun referensi. Nilai SN yang kosong pada Observatorium Zurich kemudian diisi dengan rata-rata nilai R dari semua stasiun tambahan (Clette, 2018).

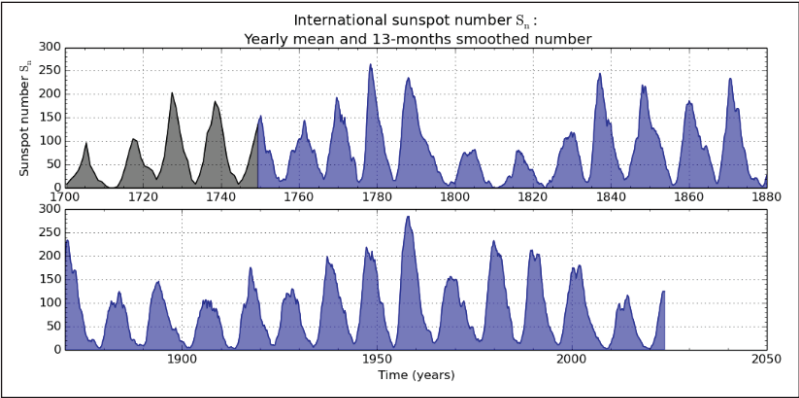
Pengamatan *sunspot* mengalami peningkatan kualitas dengan digunakannya peralatan yang lebih baik oleh penerus Wolf, yaitu Alfred Wolfer. Berbeda dengan sistematika pengamatan Wolf yang mengeliminasi *sunspot* kecil berumur pendek dari perhitungan SN, Wolfer menghitung seluruh *sunspot* yang terlihat oleh pengamat. Hal ini dilakukan untuk mengurangi faktor subjektivitas pengamat. Kemudian untuk menjaga konsistensi dengan deret *sunspot* historis asli milik Wolf, Wolfer membandingkan data pengamatannya dengan data pengamatan Wolf selama 17 tahun (1878-1893) dan mendapatkan nilai k yang konstan sebesar 0,6. Nilai ini kemudian disebut dengan koefisien reduksi Zurich, dinotasikan sebagai k_z , dan digunakan sebagai referensi pada perhitungan *sunspot* setelah tahun 1893. Indeks *sunspot* yang dihasilkan disebut dengan Zurich Sunspot Number (ZSN) dan dinotasikan sebagai R_z .

Metode Wolfer ini selanjutnya digunakan dalam pengamatan *sunspot* setidaknya hingga tahun 1925. Kemudian pada tahun 1961 diketahui bahwa Max Waldmeier memberi bobot pada *sunspot* sesuai dengan ukuran dan struktur umbra pada perhitungan R_z yang diyakini telah diimplementasi sejak era William Otto Brunner, penerus langsung Wolfer. Perubahan metode ini memengaruhi nilai R_z setelah tahun 1945, terlihat dari lonjakan nilai rata-rata R_z sekitar 1,21 kali lebih tinggi dari yang diharapkan (Clette et al., 2014). Sementara itu, pada 1957 stasiun tambahan Zurich dibangun, berlokasi di Locarno. Metode pembobotan Waldmeier juga diaplikasikan pada pengamatan di stasiun ini dan bertahan hingga saat ini. Di tahun yang sama Observatorium Zurich secara resmi dinobatkan sebagai World Data Center (WDC) untuk produksi dan distribusi nilai *sunspot* secara internasional oleh International Union of Radio Sciences (URSI).

Penggunaan ZSN sebagai indeks *sunspot* internasional berlangsung hingga tahun 1980, saat Observatorium Zurich ditutup. Selanjutnya, aktivitas WDC dipindahkan ke Observatorium Kerajaan Belgia dengan nama Sunspot Index Data Center (SIDC) dibawah pengawasan URSI, International Astronomical Union (IAU), dan International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG). Indeks

sunspot SIDC ini dikenal dengan nama International Sunspot Number (ISN) yang nilainya dinotasikan sebagai R_I . ISN menggunakan nilai dari ZSN untuk data sebelum tahun 1980 dan menggunakan metode perhitungan baru untuk pengamatan setelahnya, efektif dimulai sejak 1982. Nilai R_I tidak bergantung pada pengamatan dari satu stasiun utama melainkan diturunkan dari data pengamatan semua stasiun yang berkontribusi setelah melalui proses pengecekan kelayakan. Untuk menjaga keberlanjutan dengan ZSN, Locarno ditunjuk sebagai stasiun referensi dalam perhitungan nilai k tiap-tiap stasiun dan nilainya diperbarui setiap satu bulan. Seluruh proses perhitungan dilakukan menggunakan pemrosesan komputer (Clette et al., 2007).

Pada tahun 2011, SIDC berganti nama menjadi Sunspot Index and Long-term Solar Observations (SILSO). Misi SILSO adalah mengembangkan dan menyebarkan pengetahuan tentang variasi aktivitas Matahari dalam jangka panjang, sebagai referensi dalam mempelajari mekanisme siklus Matahari dan pengaruh terhadap iklim Bumi. Revisi besar pada ISN dilakukan oleh SILSO pada tahun 2015, dengan dipilihnya k_z sebagai koefisien referensi baru. Hal ini berarti menghilangkan nilai k_z sebesar 0,6 dari perhitungan , yang menghasilkan kenaikan nilai untuk seluruh SN pada ISN (Clette et al., 2016). Deret ini diberi nama ISN versi 2.0.



Sumber: (SILSO, 2024a)

Gambar 2.5 Grafik *Sunspot Number* Tahun 1700 hingga 2024

Dari data yang dipublikasi oleh SILSO (2024b), tercatat lebih dari 700 stasiun pengamat telah berkontribusi pada ISN. Jumlah ini termasuk peninggalan catatan pengamatan era Galileo, dengan pengamatan dari Thomas Harriot dicatat sebagai kontribusi pertama. Pengamatan dilakukan dengan rata-rata 180 hari pengamatan per tahun, dan sebagian besar kontributor berlokasi di Eropa Barat, kemudian diikuti oleh Eropa Timur, Asia, Amerika Selatan, Amerika Utara, dan Afrika. Kontribusi terbanyak berasal dari Observatorium Kerajaan Belgia yang sudah berjalan selama 102 tahun dengan jumlah 37.465 pengamatan pada 2010 dan masih terus berlangsung hingga saat ini. Dari Indonesia tercatat dua buah stasiun pengamat pernah menjadi kontributor ISN, yakni Balai Pengamatan Antariksa dan Atmosfer (BPAA) LAPAN Pasuruan dan Balai Pengamatan Antariksa dan Atmosfer (BPAA) LAPAN Sumedang. Pada tahun 2021 LAPAN mengalami perubahan organisasi, bergabung dengan instansi riset lainnya menjadi BRIN. Sejak saat itu, BPAA LAPAN Pasuruan dan BPAA LAPAN Sumedang menjadi BRIN Pasuruan dan BRIN Sumedang. Dalam catatan SILSO, BRIN Sumedang dan BRIN Pasuruan memiliki nama stasiun yaitu TANJUNGSARI dan WATUKOSEK OBSERVATORY. BRIN Sumedang berkontribusi pada rentang waktu 1984–1989 dengan total 1.358 pengamatan. Sementara itu, BRIN Pasuruan berkontribusi pada rentang waktu 1987–2004 dan kemudian pada 2021–2023.

2. Sunspot Group Number

Di akhir abad ke-20, Hoyt dan Schatten (1998) melakukan rekonstruksi data historis *sunspot* untuk 350.000 observasi dari rentang waktu 1610-1993 hanya berdasarkan jumlah grup *sunspot*. Kompilasi data historis versi Hoyt ini dikenal dengan nama *Sunspot Group Number* (GN), nilainya dinotasikan sebagai R_G . Konstruksi GN menggunakan metode yang sama sekali baru. Skala referensi dihitung dari hasil pengamatan modern, sedangkan pengamatan-pengamatan sebelumnya menggunakan nilai referensi ini untuk menghitung faktor reduksi k masing-masing pengamat. Dengan metode ini nilai k dirangkai secara berurutan, terpropagasi mundur ke pengamatan-pengamatan

sebelumnya. Indeks ini menghitung jumlah rata-rata grup *sunspot* dari beberapa pengamat dan mengoreksi angka-angka tersebut ke ISN menggunakan rumus berikut.

$$R_G = \frac{12,08}{N} \sum_{i=1}^N k_i G_i \quad (3)$$

R_G adalah nilai jumlah grup relatif, N adalah jumlah pengamat, k_i adalah faktor koreksi pengamat ke- i , G_i adalah jumlah kelompok *sunspot* yang teramati oleh pengamat i , dan nilai konstan 12,08 untuk normalisasi angka tersebut ke ISN. Nilai konstan tersebut merupakan asumsi jumlah rata-rata *sunspot* dalam sebuah grup.

Pada awalnya koefisien referensi GN diturunkan dari koleksi foto dari katalog milik Observatorium Kerajaan Greenwich pada rentang waktu 1874–1976 dan perhitungan grup dari U.S. Air Force/Solar Observing Optical Network (USAF/SOON) untuk interval 1975–1995. Namun belakangan diketahui bahwa terdapat perbedaan tren jumlah grup *sunspot* antara katalog Observatorium Kerajaan Greenwich dengan hasil pengamatan visual. Katalog tersebut menunjukkan kenaikan jumlah grup *sunspot* sekitar 40% setelah tahun 1880. Hal ini dimungkinkan terjadi karena pengaruh kualitas piringan fotografis yang membaik seiring waktu ataupun karena kemajuan pada metode-metode pengamatan manual (Clette, 2018). Untuk memperbaiki kelemahan ini, Svalgaard & Schatten (2016) mengalihkan perhitungan skala referensi pada lima deret pengamatan utama yaitu pengamatan milik Staudach, Schwabe, Wolfer, Hisako Koyama (1916–1997) dalam rentang 1945–1996, dan Observatorium Locarno. Revisi dari Svalgaard & Schatten kemudian disebut dengan deret Group Number versi 2.0.

Jika dibandingkan dengan ISN, indeks GN memiliki beberapa keunggulan antara lain basis data historis yang lebih banyak, nilainya tidak terlalu bergantung pada visibilitas *sunspot-sunspot* kecil terutama pada pengamatan-pengamatan masa lampau, dan diproses sekaligus oleh ilmuwan yang sama sehingga menghindari kemungkinan *bias* akibat perubahan metode seiring berjalannya waktu.

3. American Sunspot Number

Pada masa Perang Dunia ke II, kebutuhan data indeks *sunspot* untuk komunikasi militer Amerika Serikat meningkat. Periode rilis ZSN dirasa tidak cukup cepat untuk memenuhi kebutuhan tersebut. Oleh karena itu, Interservice Radio Propagation Laboratory (IRPL) meminta Institut Carneige Washington untuk membuat indeks *sunspot* seperti ZSN. Indeks ini dikenal dengan sebutan American Sunspot Number (ASN), nilainya dinotasikan sebagai R_A .

Pada awalnya dua orang pengamat ditugaskan untuk menentukan aktivitas *sunspot* bulanan, kemudian pada Desember 1944 American Association of Variable Star Observers (AAVSO) mengambil alih tugas tersebut dengan jumlah pengamat sebanyak 20 hingga 40 orang. Namun, tidak tersedianya data baru dari Zurich ini, mereka kesulitan untuk menjaga kesinambungan American Sunspot Number dengan ZSN. Hingga pada tahun 1949 terlihat jelas bahwa American Sunspot Number telah menyimpang dari Zurich Sunspot Number (Shapley, 1949; Berghmans et al, 2006). Selama bertahun-tahun setelahnya, berbagai usaha dilakukan untuk memperbaiki kesesuaian R_A dengan R_Z seperti menggunakan pengolahan statistik dan menambahkan pembobotan, tetapi masih terjadi variasi yang cukup banyak. Penyebabnya baru teridentifikasi pada akhir tahun 1990an (Schaefer, 1997; Hossfield, 2002), ketika ditemukan kelemahan metodologis dalam pemrosesan stasiun AAVSO. Metode ini kemudian diperbaiki dan pemrosesannya semakin ditingkatkan setelah tahun 2008 (Clette, et al., 2018).

ASN tersedia dari tahun 1944 hingga saat ini, dan mulai tahun 1951 hasil observasi yang telah dilakukan oleh AAVSO dikurangi menurut prosedur baru, indeks yang dibangun hanya dengan menggunakan hasil observasi yang berkualitas tinggi saja. Koefisien reduksi pengamat dikalkulasi ulang untuk data 1948-1950, dan deret baru ini dinotasikan sebagai R_A' (NOAA, 2024).

4. Boulder Sunspot Number

Boulder Sunspot Number diturunkan dari Solar Region Summary (SRS) harian yang dihasilkan oleh USAF/NOAA berupa data citra yang diperoleh melalui situs SOON sejak tahun 1977. Boulder Sunspot Number kemudian diperoleh dengan menggunakan persamaan (2) dengan nilai koefisien reduksi $k = 1$. Boulder Sunspot Number ini sekitar 55% lebih besar dari ISN, sesuai dengan faktor koreksi $k = 0,65$ (Hathaway, 2015). Keunggulan Boulder Sunspot Index dibandingkan dengan ISN adalah indeks ini dirilis setiap hari, sementara ISN dirilis setiap bulan.

E. Metode Pengamatan Sunspot

Data hasil pengamatan *sunspot* dapat digunakan untuk berbagai macam kebutuhan. *Flare* dapat muncul dari *sunspot* yang berukuran besar dan mengakibatkan kerugian secara materiel pada Bumi. Catatan jumlah dan lokasi *sunspot* berperan penting dalam mengetahui siklus Matahari. Data *sunspot* juga dapat digunakan untuk mempelajari hubungan antara aktivitas Matahari dan Bumi dengan memperkirakan kekuatan medan magnet dan radiasi Matahari. Identifikasi *sunspot* dapat membantu dalam melakukan prediksi cuaca antariksa, mempelajari rotasi diferensial, radiasi Matahari, dan fenomena lainnya (Djafer et al., 2012). Data yang dihasilkan dari identifikasi *sunspot* dapat digunakan sebagai sumber penting untuk memahami variasi aktivitas Matahari dalam waktu jangka panjang (Vaquero, 2007).

Di zaman modern seperti saat ini, Matahari tidak hanya diamati dari observatorium landas-bumi tapi juga dengan menggunakan satelit. Pengamatan menggunakan satelit dapat dilakukan tanpa terganggu oleh cuaca. Sementara itu, pengamatan landas-bumi sering kali terkendala kondisi pandang yang berkurang akibat cuaca yang buruk atau gangguan pada atmosfer Bumi, yang karenanya membutuhkan banyak lokasi pengamatan. Selain itu, pengamatan satelit dapat

berlangsung selama 24 jam sehingga dapat mengamati Matahari secara jauh lebih intensif dibandingkan dengan pengamatan landas-bumi.

Dari sisi teknik pengamatan, secara umum pengamatan *sunspot* dapat dikategorikan menjadi dua, yaitu pengamatan secara manual dan pengamatan secara digital. Pada pengamatan secara manual observasi dilakukan oleh pengamat, kemudian hasil pengamatan dicatat secara manual dalam bentuk sketsa dan/atau catatan. Sementara itu, pada pengamatan secara digital hasil pengamatan direkam dalam bentuk citra atau video digital, yang biasanya dilakukan secara otomatis oleh mesin. Perekaman secara digital memungkinkan untuk mendapatkan data pengamatan dengan jumlah yang besar dalam waktu singkat. Selain itu, resolusi spasial yang didapatkan dari pengamatan secara digital jauh lebih baik dibandingkan dengan pengamatan secara manual, serta pemrosesan datanya dapat dilakukan dengan lebih cepat menggunakan metode-metode otomatisasi komputer. Deteksi *sunspot* secara digital juga memungkinkan perhitungan *sunspot* secara objektif dan memungkinkan pengamatan dengan sedikit tenaga kerja.

Meskipun begitu, hingga saat ini komunitas internasional sepakat bahwa pengamatan *sunspot* secara manual tetap penting untuk dilakukan. Data historis pengamatan *sunspot* yang digunakan sebagai standar internasional adalah data yang dihasilkan dari observasi secara manual. Meskipun pengamatan digital mampu menghasilkan gambar lebih baik dan mengurangi subjektivitas, tetapi terdapat beberapa permasalahan yang muncul terkait penggunaan data digital. Data digital biasanya diambil menggunakan perangkat dengan spesifikasi teknis yang berbeda-beda. Sebagai contoh, penggunaan kamera CCD pada pengamatan landas-bumi dapat memiliki resolusi, ukuran gambar, bidang pandang, bahkan tipe sensor yang berbeda-beda untuk tiap-tiap lokasi pengamatan. Hal itu kemudian mengakibatkan munculnya ketidakseragaman data antarpengamat meskipun dilakukan pada saat yang sama. Hingga saat ini belum ada standarisasi untuk pengamatan digital.

Permasalahan lain dapat muncul akibat perubahan teknologi yang sangat cepat. Perangkat digital yang digunakan cenderung

mengikuti kemajuan teknologi dari waktu ke waktu. Ketika perangkat sudah tidak layak pakai, maka akan digantikan dengan perangkat yang lebih modern karena perangkat dengan jenis yang sama sudah tidak lagi beredar di pasaran. Hal ini justru dapat mengurangi konsistensi data secara jangka panjang. Berbeda dengan pengamatan manual yang mengandalkan kemampuan penglihatan manusia yang secara umum akan terus konsisten dari generasi ke generasi. Dengan kondisi seperti itu, akan sangat sulit bagi pengamatan digital untuk menjaga konsistensi data dalam rentang waktu yang sangat panjang. Sebagai tambahan, ketersediaan data historis untuk teknologi digital sangat terbatas sehingga tidak dimungkinkan untuk merangkai deret data historis hingga ratusan tahun ke belakang.

Beberapa permasalahan terkait data pengamatan digital tersebut membuat pengamatan manual masih dibutuhkan, karena menjadi satu-satunya metode yang dapat memberikan keberlangsungan dan konsistensi data sejak lebih dari 400 tahun yang lalu. Dalam konteks pengamatan jangka panjang yang terpenting adalah konsistensi data, bukan terkait resolusi gambar pengamatan. Pengamatan *sunspot* menggunakan metode sketsa menghasilkan data jangka panjang yang telah terbukti dapat diandalkan. Di sisi lain, keunggulan-keunggulan yang dimiliki metode digital dapat memberi pengaruh signifikan untuk riset yang lebih mendetail dalam bingkai waktu yang pendek dan terfokus.

F. Teknis Pengamatan Sunspot

1. Pengamatan Sunspot Manual

Sunspot merupakan fitur aktivitas Matahari yang paling mudah untuk diamati. Sebagian *sunspot* berukuran cukup besar untuk dapat dilihat dengan mata telanjang, bahkan dalam kondisi tertentu, tanpa alat bantu apapun. Misalnya pada saat Matahari baru saja terbit atau dalam proses tenggelam, atau saat sedang tertutup awan tipis. Meskipun begitu metode ini sangat tidak dianjurkan karena akan menyebabkan kerusakan permanen pada retina mata hingga kebutaan. Dalam

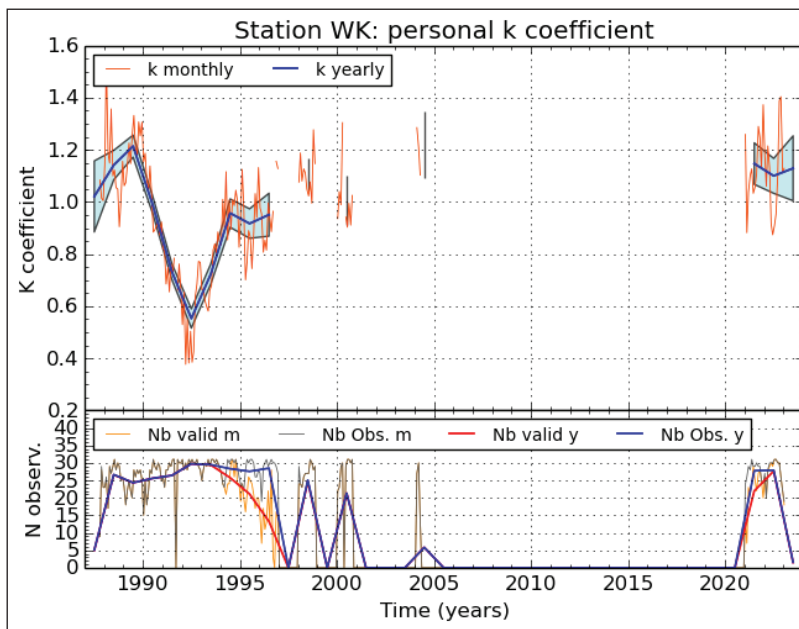
kondisi pengamatan yang baik, pengamat dapat mendeteksi *sunspot* dengan umbra sekecil 0,3 menit busur dengan mata telanjang, hanya dengan bantuan filter Matahari (Mossman, 1989). Metode yang paling umum digunakan adalah dengan cara mengamati langsung menggunakan teleskop. Selain pengamatan langsung, metode proyeksi juga sering digunakan untuk mengamati kemunculan *sunspot*, misalnya menggunakan *camera obscura* atau helioskop.

Untuk dapat mengamati *sunspot* secara aman, baik secara langsung maupun melalui instrumen optik, diperlukan filter khusus yang dapat mereduksi sebagian besar intensitas cahaya Matahari. Filter yang secara khusus digunakan untuk mengamati *sunspot* dalam spektrum cahaya tampak disebut filter *white-light*. Filter jenis ini dapat mereduksi intensitas cahaya yang datang dari Matahari hingga 99,9%.

Berdasarkan catatan sejarah, ada beberapa metode yang pernah digunakan untuk mencatat hasil pengamatan *sunspot* secara manual. Di masa lampau beberapa pengamat hanya menggambar secara detail bagian piringan matahari yang diperbesar, beberapa melaporkan dalam bentuk catatan tanpa gambar (Clette, 2018), tetapi metode yang paling banyak digunakan adalah menggambar sketsa piringan Matahari dengan menggunakan metode proyeksi. Pada metode ini, bayangan piringan matahari diproyeksikan pada kertas, kemudian *sunspot* digambar sesuai dengan bayangan yang ada pada kertas.

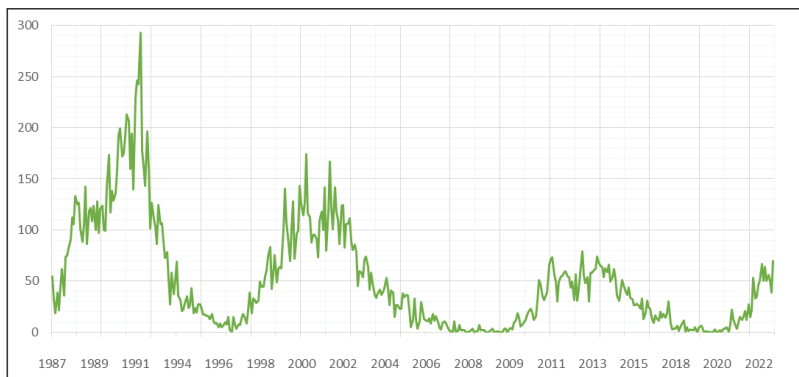
Pengamatan *sunspot* menggunakan metode sketsa pernah dilakukan BRIN Pasuruan sejak di tahun 1987 yang telah bergabung dengan SILSO untuk berperan aktif dalam perhitungan indeks-*k sunspot*. Gambar 2.6 merupakan grafik dari WDC-SILSO yang dikirim melalui akun stasiun pengamatan. Dari hasil indeks-*k* tersebut dihitung nilai *R* BRIN Pasuruan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7.

Untuk bagian selanjutnya pada subbab ini metode sketsa ditulis berdasarkan teknis operasional pengamatan *sunspot* yang pernah dilakukan di BRIN Pasuruan selama lebih dari 35 tahun. Pengamatan manual di BRIN Pasuruan dilakukan menggunakan teleskop proyeksi yang memiliki lensa utama dengan panjang fokus 2.250 mm dan



Sumber: (SILSO, 2024c)

Gambar 2.6 Indeks-k (atas) dan Jumlah Pengamatan Harian per Tahun dari BRIN Pasuruan yang Dikirim ke WDC-SILSO (bawah). Dalam daftar stasiun WDC-SILSO, BRIN Pasuruan disebut sebagai Watukosek Observatory Indonesia (WK103).



Gambar 2.7 Nilai R dari Pengamatan Sunspot BRIN Pasuruan yang Menggambarkan Siklus Matahari ke-22 hingga Awal Siklus Matahari ke-25

diameter 150 mm (Gambar 2.8). Teleskop dilengkapi dengan motor penggerak yang dapat menggerakkan teleskop secara otomatis sehingga mampu mengarah ke Matahari secara terus-menerus. Di ujung teleskop pada sisi pengamat telah terpasang bidang proyeksi untuk meletakkan kertas sketsa. Kertas sketsa adalah kertas khusus yang memiliki pola lingkaran yang digunakan sebagai tempat untuk jatuhnya bayangan Matahari hasil proyeksi.



Foto: Dok. BRIN Pasuruan

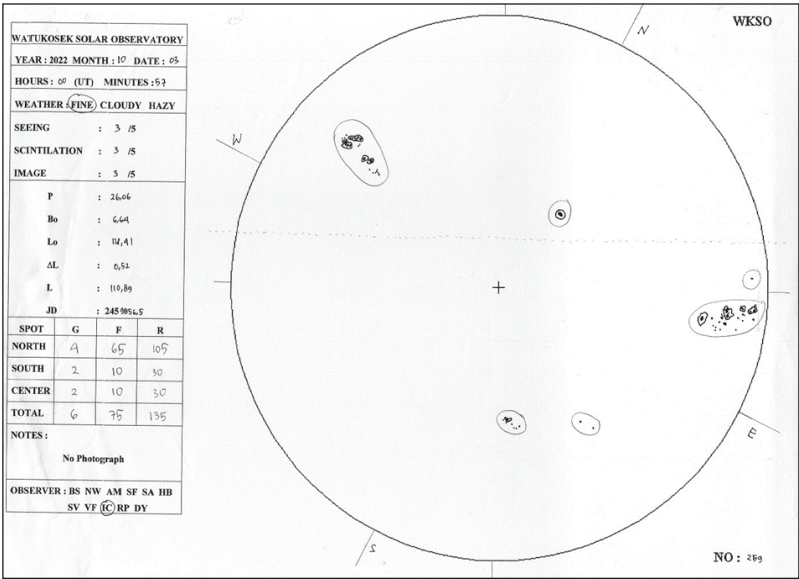
Gambar 2.8 Teleskop *Sunspot Sketch*

Pengamatan dengan metode sketsa diawali dengan mengarahkan teleskop ke Matahari hingga bayangan Matahari terproyeksi tepat ke pola lingkaran pada kertas sketsa yang telah dipasang. Pemasangan kertas sketsa disesuaikan dengan arah mata angin lokasi pengamatan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Bayangan Matahari akan terbentuk di pola lingkaran dengan bintik-bintik hitam yang mengindikasikan *sunspot*. Pengamat kemudian menggambar *sunspot* pada kertas sketsa sesuai dengan bentuk *sunspot* yang terproyeksi menggunakan pensil 2B.

Setelah semua *sunspot* selesai digambar, langkah selanjutnya adalah mengetahui orientasi Bumi terhadap Matahari. Hal yang dilakukan adalah menandai lintasan *sunspot* dari timur ke barat dengan cara menggerakkan teleskop sedemikian sehingga proyeksi *sunspot* jatuh pada kertas sketsa di sisi timur lalu mematikan motor penggerak. Setelah motor dimatikan, proyeksi bayangan *sunspot* akan terlihat bergerak seiring waktu akibat bergesernya posisi Matahari relatif terhadap Bumi, kemudian lintasannya ditandai dengan titik-titik. Setelah bayangan *sunspot* sampai di sisi barat pola lingkaran, akan tergambar garis putus-putus yang menandakan orientasi Bumi terhadap Matahari. Gambar 2.9 merupakan hasil pengamatan pada tanggal 03 Oktober 2022.



Sumber: Dok. BRIN Pasuruan (13 Januari 2022)

Gambar 2.9 Sketsa *Sunspot*

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Kotak sebelah kiri pada Gambar 9 merupakan keterangan kondisi Matahari pada hari observasi, meliputi tanggal pengamatan; jam pengamatan (UTC); weather: kondisi cuaca saat pengamatan, diisi dengan nilai fine (cerah), hazy (berkabut), atau cloudy (berawan); seeing, scintillation, dan image, yang menjelaskan tangkapan bayangan Matahari pada kertas sketsa, masing-masing diisi dengan skala 1 hingga 5 dari kualitas buruk hingga sangat baik tergantung cuaca saat pengamatan; P: perputaran Matahari terhadap sumbu x; Bo: perputaran Matahari terhadap sumbu y; Lo : perputaran Matahari terhadap sumbu z; ΔL : ketelitian perputaran Matahari terhadap sumbu z tergantung waktu pengamatan; $L = Lo - \Delta L$; JD: Julian Date); G: jumlah group *sunspot*; F: jumlah *sunspot*; R: nilai Wolf Number. Nilai G, F dan R dipisahkan berdasarkan utara (North), selatan (South), dan pusat (Center).

Langkah selanjutnya adalah melakukan pengolahan data koordinat Matahari berdasarkan P, Lo , ΔL . Untuk itu pengamat mempersiapkan kertas data olahan. Kertas data olahan adalah kertas tempat menuliskan data hasil olahan yang didapatkan dari data pengamatan pada kertas sketsa. Kertas data olahan memiliki tampilan yang serupa dengan kertas sketsa. Untuk mengisi kertas data olahan, pengamat memproyeksikan kertas sketsa pada sebuah lembaran peta koordinat heliografik matahari (garis lintang dan bujur Matahari) menggunakan perangkat meja proyeksi. Selanjutnya pengamat menandai posisi grup *sunspot* pada peta koordinat heliografik, kemudian mencatat hasilnya pada kertas data olahan.

Selanjutnya pengamat menentukan grup *sunspot* dari hasil sketsa yang telah dibuat dengan cara menganalisis jarak antar *sunspot*. Apabila dua buah *sunspot* berjarak $<5^\circ$, maka kedua *sunspot* tersebut masuk dalam satu grup. Setelah semua grup *sunspot* ditentukan, pengamat mengklasifikasi kelas masing-masing grup *sunspot* berdasarkan klasifikasi Zurich, kemudian menentukan nomor grup *sunspot*. Nomor grup *sunspot* adalah nomor yang diberikan pada sebuah grup *sunspot* pada saat kemunculannya pertama kali. Nomor ini digunakan untuk mengidentifikasi sebuah grup selama masa kemunculannya.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Pada langkah selanjutnya, pengamat mengarsipkan data yang telah diolah ke dalam basis data komputer. Data disimpan dalam bentuk teks yang disimpan dalam berkas berformat ASCII. Terdapat



50

dua jenis informasi yang disimpan pada *file* tersebut, yaitu (A) kondisi pengamatan dan (B) grup *sunspot* (Gambar 2.10). Kolom A berisi tanggal pengamatan, Julian Date, waktu pengamatan (UTC), kondisi cuaca, skala *seeing-scintillation-image*, nilai *P*, *Bo*, *Lo*, dan *L*, NP adalah 'No Photograph', yaitu pengamatan tidak direkam secara digital, BS adalah inisial pengamat, 001 adalah urutan pengamatan yang dimulai setiap tahun. Kolom B berisi informasi jumlah grup *sunspot* harian, nomor grup *sunspot*, jumlah spot dalam grup, kelas Zurich, dan lokasi dalam koordinat heliografik. Pada kolom B ini tiap-tiap grup yang teramati ditulis pada baris yang berbeda.

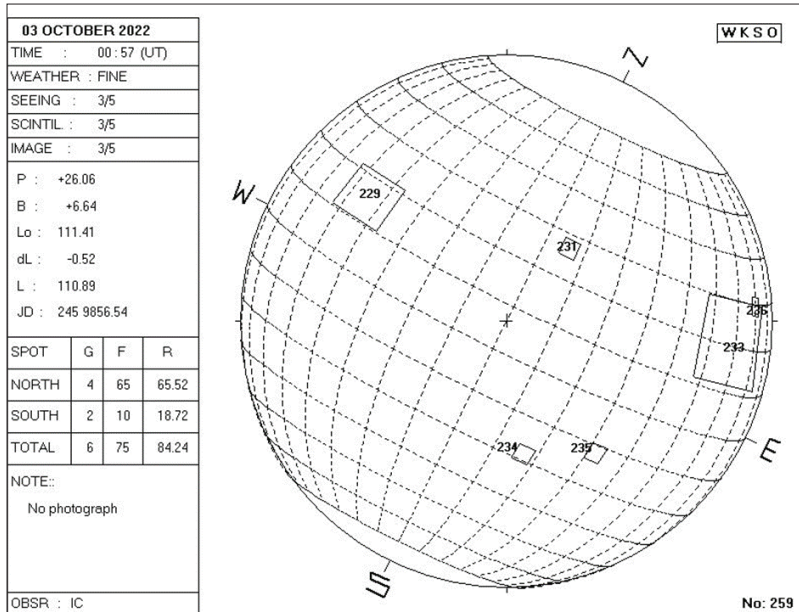
@01 2451910.5 0024 FINE 334 +2.01 -3.04 217.29 217.07 NP BS 001																A
#05 0604 14 C -47.4 -7.0 -43.5 -11.0 -39.9 -13.6																
0612 54 E +9.0 -7.0 +15.0 -7.0 +22.7 -6.0																
0614 9 C -22.2 +27.4 -18.0 +28.0 -14.8 +28.0																
0615 9 C +2.0 -12.0 +5.0 -11.8 +8.0 -12.0																
0001 2 J +80.0 +20.9																

Sumber: Dok. BRIN Pasuruan (1 Januari 2001)

Gambar 2.11 Pengamatan Harian Sunspot dari Arsip BRIN Pasuruan

Data pengamatan disimpan dalam satu berkas yang terdiri dari pengamatan selama satu bulan. Pengarsipan data dalam bentuk teks ini dilakukan agar data hasil pengamatan dapat dengan mudah diolah secara komputerisasi untuk digunakan dalam berbagai kebutuhan. Sebagai contoh, pada Gambar 2.12 dapat dilihat hasil rekonstruksi posisi grup *sunspot* dalam visualisasi tiga dimensi menggunakan perangkat lunak yang telah dirancang sebelumnya. Grup *sunspot* ditandai dengan bentuk kotak lengkap dengan nomor grup *sunspot*. Komputer akan membaca berkas, melakukan perhitungan numerik, dan hasilnya ditampilkan dalam bentuk digital.

Data pengamatan kemudian dikirim ke SILSO melalui website <https://www.sidc.be/WOLF>. Data yang dikirim meliputi waktu pengamatan, kualitas pengamatan, jumlah grup *sunspot*, jumlah *sunspot*, serta nilai *R* (Wolf Number) berdasarkan posisi utara, selatan, dan pusat.



Sumber: Dok. BRIN Pasuruan (13 Januari 2023)

Gambar 2.12 Rekonstruksi Hasil Pengamatan *Sunspot* pada Koordinat Heliografik menggunakan Komputer

2. Pengamatan Sunspot Digital

Selain melakukan pengamatan secara manual, BRIN Pasuruan juga melakukan pengamatan secara digital. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan dua buah teleskop dengan filter yang berbeda untuk merekam data pada panjang gelombang yang berbeda, yaitu pada cahaya tampak dan 656 nm. Teleskop pertama adalah teleskop refraktor dengan spesifikasi serupa dengan teleskop yang digunakan untuk sketsa, yaitu dengan panjang fokus 2.250 mm dan diameter 150 mm. Teleskop ini dilengkapi dengan filter *white-light* untuk mengamati Matahari pada panjang gelombang cahaya tampak (400-700 nm). Teleskop kedua adalah teleskop dengan filter H-Alpha, dengan spesifikasi panjang fokus 800 mm dan diameter 90 mm. Teleskop ini dapat mengamati berbagai fitur Matahari, termasuk *sunspot* (Gambar 2.13).

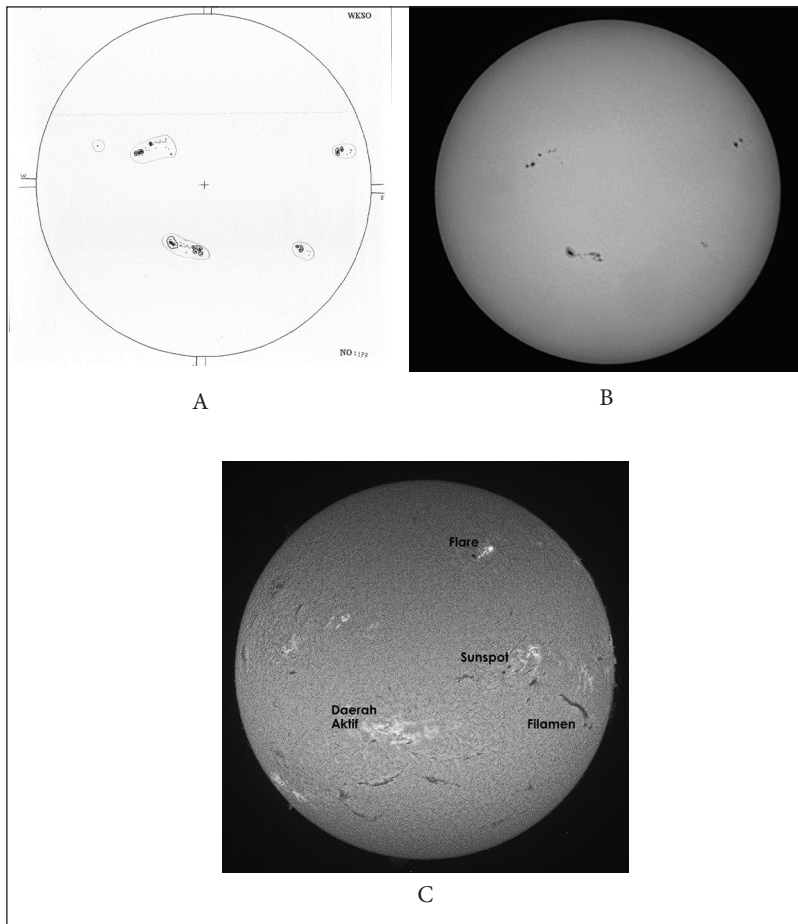


Foto: Dok. BRIN Pasuruan (13 Januari 2023)

Gambar 2.13 Teleskop Matahari Digital

Pada kedua teleskop tersebut terpasang kamera CCD di sisi okulernya yang berfungsi untuk merekam data pengamatan secara otomatis. Kedua teleskop dipasang pada mounting permanen yang sama, sehingga hasil pengamatan keduanya konsisten. Kedua teleskop secara otomatis mengikuti pergerakan Matahari. Citra Matahari direkam dengan interval 1 menit selama 8 jam setiap harinya. Seluruh proses pengamatan hingga perekaman data berjalan secara otomatis tanpa membutuhkan operator. Citra Matahari yang dihasilkan kemudian dianalisis oleh pengamat yang bertugas. Gambar 2.14 merupakan salah satu contoh hasil pengamatan digital.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Keterangan: A. Hasil pengamatan manual. B. Hasil pengamatan digital dengan filter *white-light*. C. Hasil pengamatan digital dengan filter H-Alpha

Sumber: Dok. Arsip BRIN Pasuruan

Gambar 2.14 Contoh Hasil Pengamatan Sunspot di BRIN Pasuruan

G. Penutup

Pengamatan aktivitas Matahari diperlukan untuk meminimalkan dampak negatif Matahari ke Bumi seperti badai geomagnet dan gangguan ionosfer. Aktivitas Matahari yang paling mudah diamati adalah bintik matahari (*sunspot*). Pengamatan *sunspot* telah dilakukan sejak abad ke-17 hingga saat ini. Keberlangsungan data tersebut sangat penting untuk melakukan prediksi siklus Matahari yang berkaitan dengan gangguan Matahari di Bumi. Pengamatan *sunspot* dilakukan di seluruh dunia dan diorganisir oleh WDC-SILSO yang berpusat di Belgia. Data pengamatan *sunspot* di seluruh dunia dikumpulkan untuk dihitung nilai Wolf (R) dan masing-masing stasiun pengamatan memiliki indeks- k yang berubah setiap bulan berdasarkan lokasi dan kualitas pengamatan. Setiap stasiun memiliki waktu, kondisi cuaca, dan kualitas pengamatan yang berbeda sedangkan *sunspot* bergerak seiring waktu. Oleh karena itu, indeks- k ini penting untuk setiap stasiun sebagai nilai penyesuaian data setiap stasiun.

Pengamatan *sunspot* dapat dilakukan secara manual maupun digital. Pengamatan manual dilakukan menggunakan teleskop proyeksi dan hasilnya dicatat dengan metode sketsa. Sementara pengamatan digital dilakukan menggunakan dengan bantuan alat perekam digital yang dipasang pada teleskop ataupun dibawa oleh satelit. Pengamatan manual memiliki keunggulan dalam konsistensi data dan metode pengamatan dalam jangka panjang, sedangkan pengamatan digital unggul dalam resolusi spasial maupun temporal. Data hasil pengamatan manual cocok digunakan dalam pemanfaatan data dengan rentang waktu yang sangat panjang sementara data hasil pengamatan digital lebih cocok digunakan untuk pemanfaatan data dalam rentang waktu yang pendek tetapi membutuhkan resolusi data yang mendetail. Di Indonesia pernah dilakukan pengamatan *sunspot* sejak tahun 1984 hingga 2023 oleh BRIN Pasuruan dan BRIN Sumedang. Pengamatan dilakukan menggunakan metode sketsa maupun metode digital.

Daftar Pustaka

- Arlt, R., & Vaquero, J. M. (2020). Historical *sunspot* records. *Living Reviews in Solar Physics*, 17, 1–60.
- Berghmans, D., Van der Linden, R. A. M., Vanlommel, P., Clette, F., & Robbrecht, E. (2006). History of the Sunspot Index: 25 years SIDC. *Beitrage zur Geschichte der Geophysik und Kosmischen Physik*, 7(1), 288.
- Boteler, D. H. (2019). A 21st Century View of the March 1989 Magnetic Storm. *Space Weather*, 17(10), 1427–1441.
- Carrasco, V. M. S., Lefèvre, L., Vaquero, J. M., & Gallego, M. C. (2015). Equivalence Relations Between the Cortie and Zürich Sunspot Group Morphological Classifications. *Solar Physics*, 290(5), 1445–1455.
- Casanovas, J. (1997). Early observations of *sunspots*: Scheiner and Galileo. In *1st Advances in Solar Physics Euroconference. Advances in Physics of Sunspots* (Vol. 118, p. 3).
- Clette, F. (2018). The *sunspot* number: historical base, current recalibration and scientific impact. In *Proc. Fifth Symp. "Historical Astronomical Records and Modern Science"*, National Astronomical Observatory, Tokyo (Vol. 62).
- Clette, F., Berghmans, D., Vanlommel, P., Van der Linden, R. A., Koeckelenbergh, A., & Wauters, L. (2007). From the Wolf number to the International Sunspot Index: 25 years of SIDC. *Advances in Space Research*, 40(7), 919–928.
- Clette, F., Cliver, E. W., Lefèvre, L., Svalgaard, L., Vaquero, J. M., & Leibacher, J. W. (2016). Preface to topical issue: recalibration of the *sunspot* number. *Solar Physics*, 291, 2479–2486.
- Clette, F., Svalgaard, L., Vaquero, J. M., & Cliver, E. W. (2014). Revisiting the Sunspot Number. A 400-Year Perspective on the Solar Cycle. *Space Science Reviews*, 186, 35–103.
- Cortie, A. L. (1901). On the Types of Sun-Spot Disturbances. *Astrophysical Journal*, 13.
- Djafer, D., Irbah, A., & Meftah, M. (2012). Identification of Sunspots on Full-Disk Solar Images Using Wavelet Analysis. *Solar Physics*, 281(2), 863–875.
- Eddy, J. A., Stephenson, F. R., & Yau, K. K. (1989). On pre-telescopic *sunspot* records. *Royal Astronomical Society, Quarterly Journal (ISSN 0035-8738)*, vol. 30, March 1989, p. 65-73.

- Hathaway, D. H. (2015). The solar cycle. *Living reviews in solar physics*, 12(1), 4.
- Hossfield, C. H. (2002). A history of the Zurich and American relative *sunspot* number indices. *Journal of the American Association of Variable Star Observers*, Vol. 31, No. 1, p. 48–53.
- Hoyt, D. V., & Schatten, K. H. (1998). Group *sunspot* numbers: A new solar activity reconstruction. *Solar physics*, 179, 189–219.
- Vaquero, J. M. (2007). Historical *sunspot* observations: A review. *Advances in Space Research*, 40(7), 929–941.
- Krivsky, L. (1972) dalam McIntosh, P. S. (1990). The Classification of Sunspot Groups. *Solar Physics*, 125(2), 251–267.
- McIntosh, P. S. (1981). The birth and evolution of *sunspots*-Observations. In *The physics of sunspots* (pp. 7–54).
- McIntosh, P. S. (1990). The Classification of Sunspot Groups. *Solar Physics*, 125(2), 251–267.
- Mossman, J. E. (1989). A comprehensive search for *sunspots* without the aid of a telescope, 1981-1982. *Royal Astronomical Society, Quarterly Journal (ISSN 0035-8738)*, vol. 30, March 1989, p. 59–64.
- NOAA (2024). Retrieved Mei 14, 2024. <https://www.ngdc.noaa.gov:https://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/ssndata.html>
- Schaefer, B. E. (1997). Automatic Inflation in the AAVSO Sunspot Number. *The Journal of the American Association of Variable Star Observers*, vol. 26, no. 1, p. 40–46.
- Shapley, A. H. (1949). Reduction of *sunspot*-number observations. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 61(358), 13–21.
- SILSO (2024a). Retrieved Mei 2, 2024, from www.sidc.be: <https://www.sidc.be/SILSO/yearlyssnplot>
- SILSO (2024b). Retrieved Mei 17, 2024, from www.sidc.be: https://sidc.be/SILSO/DATA/GroupNumber/GNobservers_JV_V1-12.txt
- SILSO (2024c). Retrieved Mei 2, 2024, from www.sidc.be: https://www.sidc.be/WOLF/products/K_index_V2.php
- Solanki, S. K. (2003). THE ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS Sunspots: An overview. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 1769, 153–286.
- Svalgaard, L., & Schatten, K. H. (2016). Reconstruction of the *sunspot* group number: the backbone method. *Solar Physics*, 291, 2653–2684.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Bab III

Teleskop Radio dan Rencana Pengembangannya di Indonesia

Farahhati Mumtahana, Ibnu Nurul Huda, Sahlan Ramadhan, Retno Dyah Hapsari, Mario Batubara, Timbul Manik, Musthofa Lathif, Peberlin Parulian Sitompul, Rasdewita Kesumaningrum, dan Taufiq Hidayat.

A. Konsep Dasar Teleskop Radio

Di kalangan masyarakat umum, pengamatan benda langit lebih dikenal dengan menggunakan teleskop pada panjang gelombang optik atau visual seperti pada penglihatan manusia. Padahal, pengamatan pada panjang gelombang lain bisa memberikan informasi yang lebih beragam dari objek langit, salah satunya pengamatan pada panjang gelombang radio. Hampir semua objek langit memancarkan gelombang radio pada tingkat tertentu melalui berbagai proses mekanisme emisi yang ada (Cordon & Ransom, 2016). Astronomi radio yang lahir pada awal abad ke-20 merupakan cabang ilmu yang relatif muda, tetapi sebagian besar penemuan penting tentang alam semesta terkini dihasilkan dari pengamatan dengan teleskop radio.

F. Mumtahana*, I. N. Huda, S. Ramadhan, R. D. Hapsari, M. Batubara, T. Manik, M. Lathif, P. P. Sitompul, R. Kesumaningrum & T. Hidayat.

*Badan Riset dan Inovasi Nasional, e-mail: fara006@brin.go.id

© 2025 Editor & Penulis

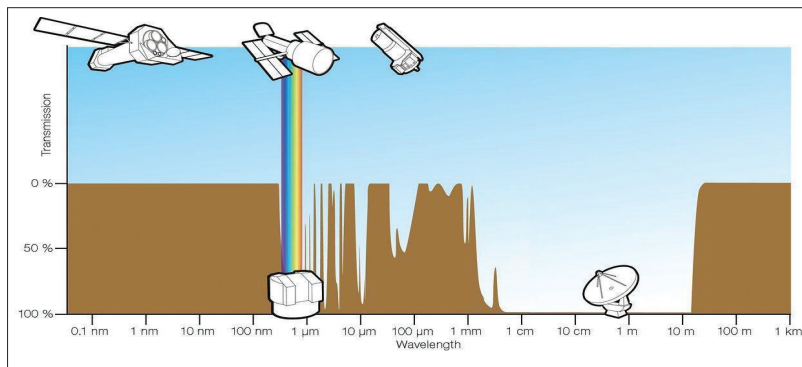
Mumtahana, F., Huda, I. N., Ramadhan, S., Hapsari, R. D., Batubara, M., Manik, T., Lathif, M., Sitompul, P. P., Kesumaningrum R., & Hidayat, T. Teleskop Radio dan Rencana Pengembangannya di Indonesia. Dalam T. Djamaluddin & F. Nuraeni (Ed.), *Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi* (59–104). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1425.c1486 E-ISBN: 978-602-6303-86-8

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Astronomi radio ditemukan secara tidak sengaja oleh Karl Jansky, seorang insinyur radio di Laboratorium telepon Bell pada tahun 1928 (Wilson, 1997). Jansky ditugaskan untuk mempelajari interferensi frekuensi radio dari badai petir untuk membantu Bell merancang antena yang akan meminimalisasi derau statis. Dengan instrumen buatannya, ditemukan suatu sumber radiasi yang pada mulanya diperkirakan dari Matahari. Namun, karena sumber radiasi memuncak sekitar 4 menit lebih awal setiap harinya, Jansky menyimpulkan dengan tepat bahwa sumber radiasi ini harus lebih jauh dari Matahari atau berada di luar tata surya. Jansky melanjutkan pengamatannya dan mengidentifikasi sumbernya berasal dari rasi Sagitarius di Bimasakti. Penemuan ini menghasilkan salah satu makalah di abad ke-20 “Gelombang Radio dari Luar Tata Surya” yang diterbitkan pada tahun 1933. Meskipun penemuannya saat itu belum mendapat banyak perhatian, hal ini menjadi dasar dan awal perjalanan ilmu astronomi radio.

Grote Reber kemudian meneruskan pengamatan pada panjang gelombang yang lebih pendek. Reber membangun teleskop di halaman belakang rumahnya di Wheaton pada tahun 1937. Teleskop ini merupakan teleskop radio pertama dengan resolusi sudut yang baik yang beroperasi pada beberapa pita frekuensi. Pengamatan pertama dilakukan pada frekuensi 3300 MHz, sedangkan pengamatan kedua dilakukan pada pita frekuensi 900 MHz. Karena belum berhasil, Reber melanjutkan pengamatannya di tahun 1938 pada frekuensi 160 MHz dan berhasil mendeteksi sinyal dari langit. Sinyal tersebut merupakan emisi kuat di sepanjang bidang Galaksi Bimasakti. Akhirnya pada tahun 1949, Reber mempublikasikan pemetaan terhadap gelombang radio dari galaksi yang telah dilakukannya. Dua pionir dalam sejarah penemuan radio astronomi tersebut telah memberikan kontribusi penting bagi perkembangan sains astrofisika.

Keterangan: Pengamatan astronomi landas bumi (*ground-based*) transparan pada jendela atmosfer cahaya tampak yang sempit dibandingkan dengan jendela radio yang sangat lebar.



Sumber: Granato (2010)

Gambar 3.1 Jendela pengamatan astronomi landas bumi.

Jendela pengamatan radio untuk pengamatan landas Bumi memiliki rentang paling lebar di antara cakupan frekuensi gelombang elektromagnetik lain. Jendela tersebut merentang dari panjang gelombang 1 cm hingga 15 m. Tampak pada Gambar 3.1, pengamatan di rentang tersebut sangat transparan, tidak banyak terhalangi oleh atmosfer Bumi, kecuali di rentang milimeter dan submilimeter. Sementara itu, pada beberapa panjang gelombang lain, seperti ultraviolet dan sinar-X, pengamatan sangat terhalang atmosfer Bumi sehingga untuk mengamatinya perlu peluncuran wahana pengamatan ke ruang angkasa (*space-based*). Dengan rentang frekuensi yang lebar dan bisa diamati dari Bumi (*ground-based*), astronomi radio sangat memungkinkan untuk menjangkau objek langit yang dulunya belum dapat diamati. Contohnya adalah sumber yang berada di belakang atau tertutupi oleh materi antarbintang.

Selain itu, pengamatan radio juga dapat menjangkau gas dingin dan energi tinggi dengan *collecting area* sinyal yang besar. Banyak juga objek yang membutuhkan pengamatan *counterpart* dari radio sebagai konfirmasi dari pengamatan optik dan panjang gelombang lain dalam mengungkap misteri alam semesta lebih dalam. Jika dibandingkan dengan teleskop optik, teleskop radio dapat digunakan siang-malam 24 jam nonstop sedangkan teleskop optik biasanya hanya dioperasikan

malam hari, kecuali untuk objek yang terlihat siang seperti Matahari. Teleskop radio juga tetap dapat mengamati objek langit di saat langit mendung dan berawan, karena gelombang radio tidak terhalangi penjalarannya oleh awan.

Biaya yang dibutuhkan untuk pembangunan teleskop radio biasanya juga relatif lebih rendah dibanding sistem teleskop optik dengan ukuran serupa. Namun, karena memiliki panjang gelombang yang lebih panjang, sesuai dengan persamaan limit difraksi (1),

$$\theta = \lambda/D \dots\dots\dots (1)$$

dengan θ adalah nilai resolusi sudut, λ adalah panjang gelombang, dan D adalah diameter piringan, dibutuhkan diameter teleskop radio yang lebih besar untuk mencapai resolusi setara teleskop optik. Oleh karena itu, pada teleskop radio sering kali digunakan teknik interferometri untuk mencapai resolusi lebih tinggi yang dibahas lebih lanjut pada bagian B.

B. Bentuk Umum Teleskop Radio

Terdapat beberapa bentuk umum teleskop radio, di antaranya teleskop dengan antena tunggal atau *single-dish*, interferometer, dan *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI).

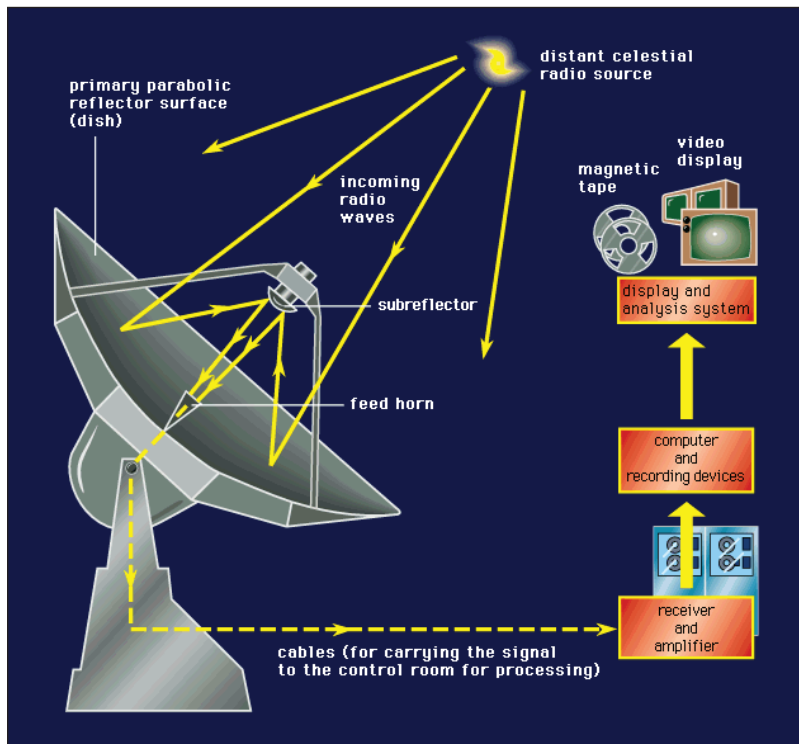
1. Antena Tunggal (*single-dish*)

Bentuk paling umum teleskop radio adalah berupa *single-dish* atau antena tunggal. Teleskop ini berbentuk antena parabola seperti yang sering kita lihat di rumah-rumah atau antena pemancar pada perusahaan telekomunikasi. Perbedaan mendasarnya, secara umum teleskop radio bersifat pasif, tidak memancarkan tapi menerima sinyal dari objek langit.

Konsep dasar teleskop radio *single-dish* secara umum diperlihatkan pada Gambar 3.2. Sinyal yang dipancarkan dari objek langit diterima oleh piringan parabola (*dish*) yang kemudian dipantulkan oleh *subreflector* dan difokuskan pada *feed horn*. Penguatan sinyal

Buku ini tidak diperjualbelikan.

dilakukan *preamplifier* karena objek langit memiliki amplitudo yang sangat kecil jika dibandingkan sinyal-sinyal radio di permukaan Bumi. Sinyal radio dari objek langit yang sampai ke Bumi telah terpapar berbagai gangguan, mulai dari lengkungan yang diakibatkan oleh efek gravitasi Matahari hingga perturbasi dari atmosfer. Seluruh efek tersebut harus dikoreksi terlebih dahulu sebelum sinyal tersebut diolah lebih lanjut. Selanjutnya sinyal analog akan diubah menjadi sinyal digital dengan komponen *Heterodyne Receiver*. Data kemudian diterima dan disimpan pada perangkat komputer pada proses akuisisi data dan analisis.



Keterangan: Skema observasi objek langit menggunakan teleskop radio antenna tunggal.

Sumber: Rempel, B (2023)

Gambar 3.2 Skema teleskop radio

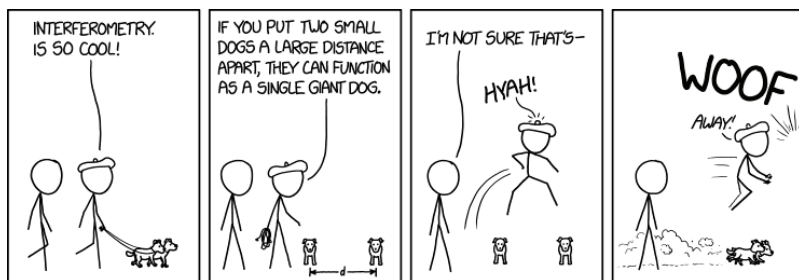
Kualitas pengamatan teleskop radio ditentukan oleh berbagai faktor, antara lain: kualitas bentuk permukaan *dish*, stabilitas pencatat waktu yang digunakan, deformasi termal pada teleskop, dan deformasi posisi teleskop yang disebabkan oleh variasi gaya pasang surut Bumi. Selain itu, besar piringan sangat memengaruhi resolusi angular atau resolusi sudut teleskop tersebut. Resolusi sudut atau daya pisah merupakan kemampuan teleskop untuk melihat detail kecil sehingga dapat memisahkan dua titik yang separasi sudutnya kurang dari ukuran sudut terkecil yang mampu dipisahkan oleh mata. Semakin kecil nilainya, semakin tinggi resolusi sudutnya. Resolusi sudut ini bergantung pada besar panjang gelombang yang diamati dibagi dengan diameter teleskop. Semakin besar diameter teleskop maka resolusi sudut akan semakin kecil. Seperti yang telah sedikit disinggung pada bagian A, gelombang radio lebih panjang dibandingkan visual. Jika kita menginginkan resolusi sudut yang setara dengan teleskop optik tertentu, diameter *dish* pada teleskop radio harus lebih besar dari diameter lensa teleskop optik tersebut.

Meskipun demikian, teleskop radio berdiameter besar secara teknis sangat sulit dan memiliki biaya operasional yang mahal. Gerak teleskop ini pun akan jauh lebih lambat karena beban yang ia miliki menjadi lebih besar. Hal tersebut kemudian menjadikan teleskop radio dengan diameter yang sangat besar sulit untuk direalisasikan. Konsep interferometri digunakan untuk menyiasati hal ini.

2. Interferometer Radio

Pada teknik interferometri, teleskop-teleskop radio dihubungkan menjadi satu kesatuan sehingga seakan-akan kita mengobservasi hanya dengan satu teleskop berdiameter sangat besar. Perumpamaan interferometri dapat dianalogikan seperti Gambar 3.3. Jika terdapat dua anjing kecil dengan jarak pisah d , seolah-olah seperti ada anjing besar dengan diameter d tersebut.

Dengan menggabungkan dua atau lebih teleskop radio, yang biasa dikenal dengan “*array*”, yaitu dengan menggabungkan sinyal



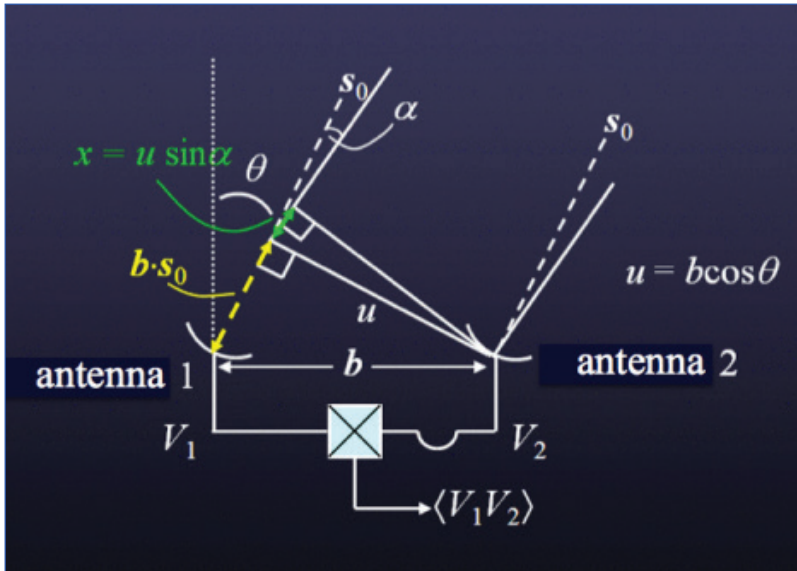
Keterangan: Analogi cara kerja teleskop radio interferometri yang digambarkan dengan anjing sebagai satu antena teleskop radio, sehingga akan lebih *powerful* ketika jumlahnya lebih dari 1.

Sumber: Creative Commons Attribution-NonCommercial 2.5 License. (t.t.).

Gambar 3.3 Analogi cara kerja teleskop radio interferometri.

yang diterima secara bersamaan, memungkinkan untuk memperoleh resolusi yang lebih tinggi. Hal ini karena lebarnya diameter piringan akan digantikan dengan lebar jarak antena (*baseline*) terpanjang. Teknik penggabungan ini biasa dikenal dengan interferometri radio (*aperture synthesis*).

Secara sederhana, cara kerja dari teleskop radio interferometer dapat dilihat pada Gambar 3.4. Sinyal radio yang datang dari suatu objek langit, seperti kuasar, sampai ke Bumi dalam bentuk *plane wave*. Waktu yang diterima untuk sinyal tersebut sampai ke antena-2 berbeda dengan antena-1. Hal ini kemudian menghasilkan keterlambatan sinyal di salah satu antena. Setelah sinyal dari kedua teleskop tersebut digabungkan pada sebuah *correlator*, maka kita akan mendapatkan sinyal yang telah dikoreksi terhadap beda waktu tersebut. Hasil dari *correlator* tersebut dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut. Konsep interferometri ini akan lebih bagus lagi jika digunakan pada lebih dari dua teleskop membentuk *array interferometer*.



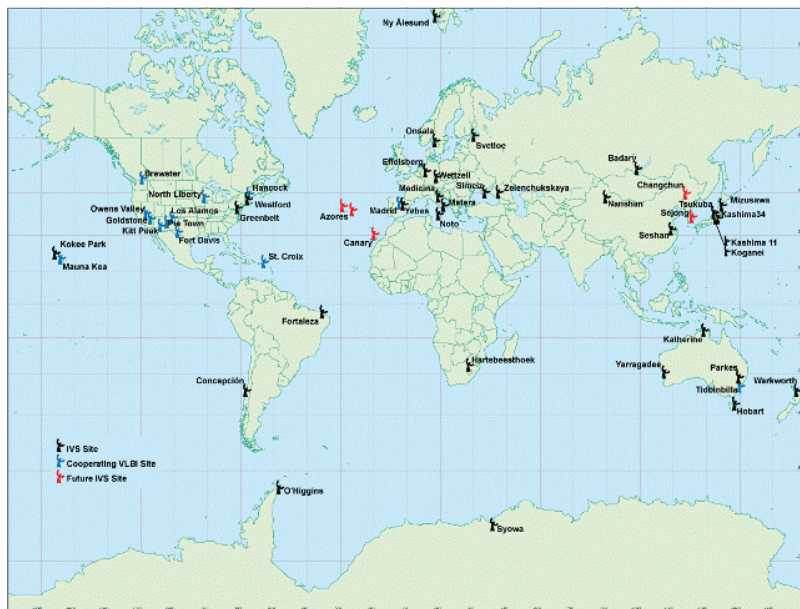
Keterangan: Konfigurasi interferometer dua elemen antena 1-D dengan jarak pisah b .

Sumber: Cortes, P.C., et al (2024)

Gambar 3.4 Interferometer dua elemen antena.

3. VLBI

Very Long Baseline Interferometry (VLBI) merupakan suatu contoh interferometri teleskop radio dengan skala jarak yang lebih jauh hingga lintas negara, bahkan benua. VLBI dibuat pada sekitar tahun 1967 dengan menggabungkan teleskop radio di berbagai belahan Bumi untuk menghasilkan teleskop radio interferometri seukuran Bumi itu sendiri. Gambar 3.5 menunjukkan salah satu contoh sebaran teleskop-teleskop radio yang tergabung dalam sistem VLBI. Tampak sebaran tersebut masih terkonsentrasi pada bagian utara Bumi, sedikit sekali teleskop yang terletak di bagian selatan atau pun dekat ekuator. Hal ini menjadikan peran Indonesia menjadi sangat krusial dalam peningkatan kualitas hasil observasi VLBI itu sendiri.



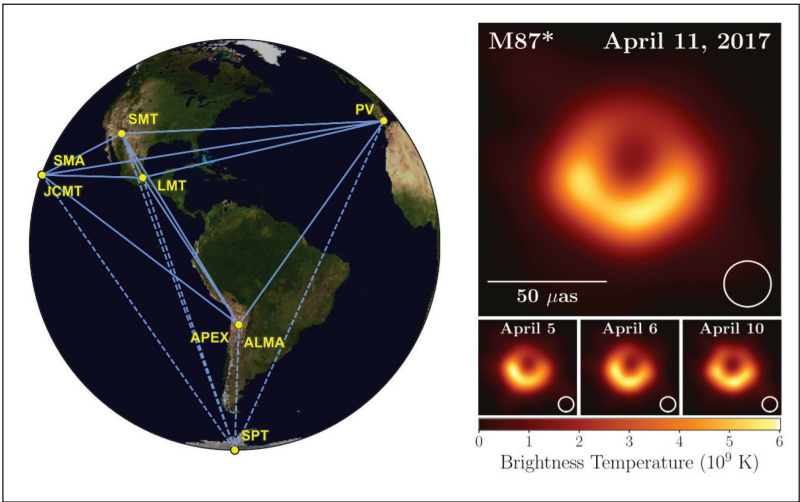
Keterangan: Sebaran teleskop radio yang tergabung dalam geodetik VLBI di dunia.

Sumber: International VLBI Service for Geodesy & Astrometry (2024)

Gambar 3.5 Sebaran teleskop radio VLBI.

Salah satu contoh pemanfaatan VLBI dalam bidang astrofisika adalah observasi citra lubang hitam. Pada awalnya, sinyal radio yang dihasilkan oleh plasma panas di sekitar lubang hitam diobservasi oleh setiap radio teleskop secara individu. Setelah itu, dilakukan korelasi silang untuk setiap sinyal yang diperoleh dari setiap teleskop. Dengan berdasarkan sinyal yang telah dikorelasi pada setiap *baseline* (garis imajiner yang menghubungkan dua teleskop interferometri), citra lubang hitam dapat dikonstruksi dengan lebih akurat dan komprehensif. Pada tahun 2019, teleskop-teleskop VLBI yang tergabung dalam *Event Horizon Telescope* (EHT) berhasil mendapatkan citra lubang hitam *supermassive* pada pusat galaksi M87 (Akiyama et al., 2019). Selain lubang hitam, VLBI dapat dimanfaatkan untuk observasi fenomena-fenomena benda langit lainnya seperti *jet* yang dipancarkan oleh *Active Galactic Nuclei* (Boccardi, 2017) dan *cosmic*

maser (Colomer & van Langevelde, 2017). Selain itu, VLBI juga dapat digunakan untuk memonitor korona dan angin Matahari. Berdasarkan Soja et al. (2014), Data observasi VLBI dapat digunakan untuk memproduksi *coronal electron density model*.



Keterangan: Delapan stasiun EHT 2017 pada 6 lokasi geografis (kiri) serta citra M87 terhadap temperatur kecerlangan dari pengamatan pada 11 April 2017 (kanan).

Sumber: Akiyama et al (2019)

Gambar 3.6 Stasiun EHT 2017 dan citra bayangan lubang hitam M87.

C. Perkembangan Astronomi Radio Secara Global

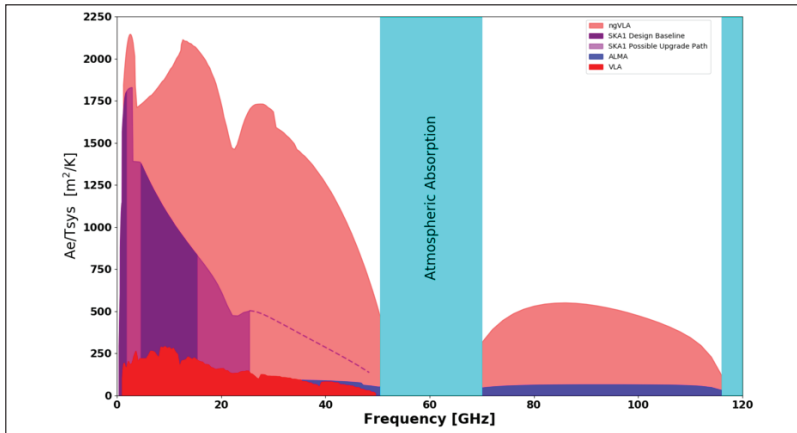
Astronomi adalah bidang yang sangat mendukung kolaborasi internasional, karena astronomi membutuhkan teleskop di berbagai daerah di seantero dunia untuk mengamati keseluruhan langit. Kolaborasi internasional dalam astronomi bahkan sudah dimulai sejak 1887 ketika para astronom dari seluruh dunia mengumpulkan citra dari teleskop mereka dan menyusun peta keseluruhan langit untuk pertama kalinya dan pada 1920 ketika *International Astronomical Union* (IAU) didirikan sebagai perhimpunan ilmiah internasional pertama. Selain adanya kebutuhan untuk mengamati langit dari berbagai titik

di muka Bumi, membangun observatorium astronomi di permukaan Bumi atau di angkasa sangat mahal. Oleh karena itu, sebagian besar observatorium yang telah berdiri maupun yang sedang direncanakan dimiliki bersama oleh beberapa negara. Sejauh ini, seluruh kolaborasi yang ada telah berjalan dengan damai dan sukses.

Tren astronomi radio terkini mengarah pada sensitivitas yang lebih tinggi di semua frekuensi. Karena *receiver* saat ini mendekati limit kuantum pada banyak frekuensi, timbul keinginan untuk menuju cakupan pengamatan (*collecting surface*) yang lebih besar dan penggunaan *bandwidth* yang lebih luas. Teleskop yang ada ditingkatkan untuk mengakomodasi penerima *broadband* (dari 1 hingga 8 GHz tergantung pada frekuensinya) untuk pengamatan garis kontinum dan spektrum. Beberapa kolaborasi internasional sedang dilakukan untuk membangun teleskop radio generasi baru dengan cakupan pengamatan yang jauh lebih besar yang beberapa di antaranya yaitu sebagai berikut.

1. *Very Large Array* (VLA), merupakan kumpulan teleskop radio yang membentuk *array*. Sistem tersebut dikembangkan sebagai Jansky VLA (JVLA) dan yang terkini merencanakan Next Generation VLA (ngVLA).
2. *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array* (ALMA), suatu fasilitas instrumen *array* radio yang mencapai rentang submilimeter antara Eropa, Amerika Utara, dan Asia Timur bekerja sama dengan Republik Chili, adalah proyek astronomi terbesar yang pernah ada.
3. *Square Kilometer Array* (SKA), suatu proyek ambisius kolaborasi berbagai negara, untuk membangun berbagai kumpulan teleskop radio pada frekuensi rendah dan menengah, dan sedang dibangun di Afrika dan Australia.

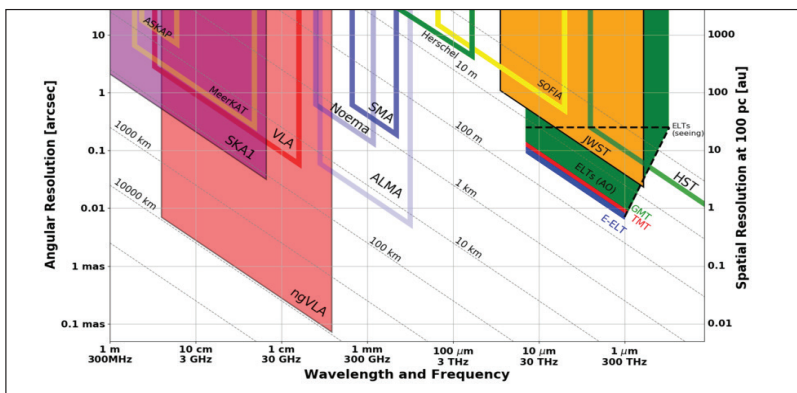
Gambar 3.7 dan 3.8 mendeskripsikan kemajuan beberapa instrumen radio yang paling *powerful* saat ini. Sumbu x merupakan ranah frekuensi dari masing-masing instrumen, sedangkan sumbu y menjelaskan parameter yang berbeda.



Keterangan: Grafik menunjukkan perbandingan sensitivitas (A_e/T_{sys}) dan resolusi sudut dari berbagai teleskop radio, mm, dan sub-mm yang diproyeksikan akan aktif di tahun 2030-an. ngVLA akan mengisi celah antara ALMA dan SKA1, menawarkan sensitivitas tinggi dan resolusi hingga sub-miliar detik busur (mas), membuka peluang baru untuk pengamatan ultra-detail di langit.

Sumber: Reid, et al. (2018)

Gambar 3.7 Sensitivitas beberapa teleskop radio terancang di dunia.



Keterangan: Perbandingan resolusi sudut dari berbagai teleskop yang ada dan yang direncanakan, mulai dari radio hingga optik, yang akan beroperasi di dekade 2030-an. Grafik ini menunjukkan seberapa tajam masing-masing fasilitas dapat "melihat" alam semesta.

Sumber: Reid, et al (2018)

Gambar 3.8 Resolusi sudut yang dapat dicapai oleh beberapa teleskop besar generasi saat ini, baik optik maupun radio

Gambar 3.7 menggambarkan capaian sensitivitas yang dapat diperoleh dari SKA fase 1, JVL A, ngVLA, dan ALMA. Sementara itu, Gambar 3.8 menampilkan pemetaan resolusi sudut yang dapat dicapai baik dari teleskop landas Bumi (kiri) maupun landas layang (kanan). Tampak garis mendatar merah yang berarti bahwa dengan resolusi yang semakin kecil hingga mencapai mili detik busur, dapat digunakan untuk penelitian pembentukan planet terestrial.

D. Aktivitas dan Eksistensi Teleskop Radio di Indonesia

Sebagai pelaksanaan komitmen Indonesia untuk berkontribusi dalam keantariksaan dalam konteks internasional, Indonesia membangun Observatorium Bosscha ITB yang telah dilengkapi dengan Teleskop Radio Bosscha 2,3 m (TRB) dan Teleskop Radio Hidrogen (TRH). Selain itu, Indonesia juga memiliki Spektrograf Radio Matahari bernama SN 4000 di Sumedang yang dibangun LAPAN (sekarang BRIN).

1. Teleskop Radio di ITB-Observatorium Bosscha

Astronomi Radio mulai ditekuni di Observatorium Bosscha ITB saat mulai merambah ke program pengamatan multi-panjang gelombang. Beberapa fasilitas teleskop radio sebagai pendamping instrumen optik di Bosscha kemudian mulai dibangun pada tahun 2008. Beberapa teleskop radio di Observatorium Bosscha diperlihatkan pada Gambar 3.9 antara lain Teleskop Radio Bosscha 2,3 m (TRB) dan Teleskop Radio Hidrogen (TRH) yang ditujukan untuk pengamatan panjang gelombang 21 cm (1420 MHz), teleskop radio JOVE 20,1 MHz, serta Callisto untuk pengamatan semburan Matahari. Teleskop-teleskop tersebut sudah menghasilkan beberapa data yang cukup baik tetapi belum beroperasi secara rutin karena masih dalam tahap perbaikan dan pengembangan (Hidayat et al., 2010).



Keterangan: Teleskop Radio Bosscha 2,3 m (TRB), Teleskop Radio Hidrogen (TRH), dan JOVE di Observatorium Bosscha (kiri ke kanan)

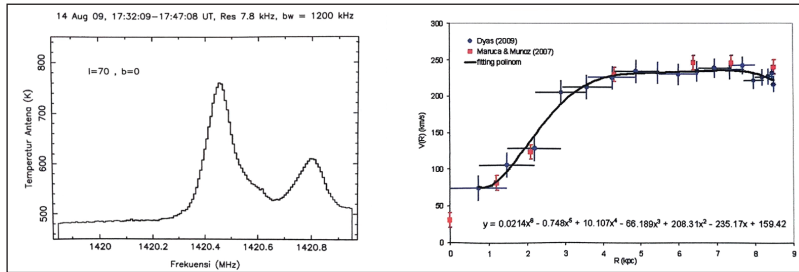
Foto: Ibnu Nurul Huda (2023)

Gambar 3.9 Beberapa teleskop radio di Observatorium Bosscha

1. Teleskop Radio Bosscha 2,3 m (TRB)

Teleskop Radio Bosscha 2,3 m (TRB) diproduksi oleh Haystack Observatory, Massachusetts Institute of Technology (MIT). Secara internasional, TRB dikenal dengan nama *Small Radio Telescope* (SRT). TRB merupakan instrumen yang lengkap, terdiri dari reflektor parabola berdiameter 2,286 m, *feedhorn*, *mounting* alt-azimut yang dilengkapi motor penggerak dan dikontrol oleh operator melalui *ground controller*, serta sistem penerima yang terdiri dari *Low Noise Amplifier* (LNA) dan *receiver*, sedangkan pengoperasian TRB dilakukan menggunakan komputer melalui *software* yang berbasis *Java* (Utomo, 2009). Pengamatan yang cocok dilakukan menggunakan TRB adalah pengamatan spektrum hidrogen netral (HI) karena teleskop radio ini bekerja pada frekuensi 1400-1440 MHz. TRB diletakkan di menara dengan tinggi 5 meter di atas ruang kontrol radio. Hal ini dilakukan supaya medan pandang teleskop tidak terhalang sampai dekat horizon.

Penelitian yang pernah dilakukan menggunakan TRB ini adalah pengamatan Hidrogen Netral (HI) oleh Utomo (2009), Utomo & Hidayat (2010), dan Damanik et al. (2010). Tujuan melakukan pengamatan HI ini antara lain adalah untuk membuat kurva rotasi galaksi pada bidang galaksi (Gambar 3.10).



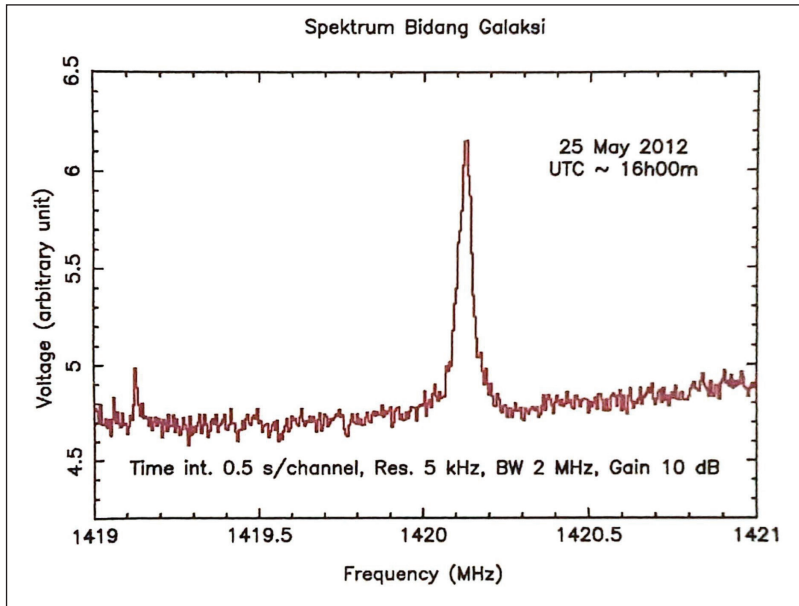
Keterangan: Profil spektrum HI dan kurva rotasi galaksi yang diperoleh dari pengamatan HI dengan menggunakan TRB (titik biru)

Sumber: Utomo (2009)

Gambar 3.10 Pengamatan HI dengan menggunakan TRB.

a) Teleskop Radio Hidrogen 6 m (TRH)

Teleskop Radio Hidrogen (TRH) di Observatorium Bosscha adalah teleskop dengan antenna parabola berdiameter 6 meter. Teleskop ini dapat digunakan untuk mengamati beberapa objek radio seperti pulsar, Matahari, bidang galaksi, dan lain-lain yang tentunya disesuaikan dengan *receiver* yang digunakan. Komponen instrumen yang ada pada TRH sebagian besar dibangun mandiri oleh SDM lokal, terutama pada komponen utama, yaitu bagian antenna, *mounting*, dan motor penggerak. *Receiver* yang digunakan adalah *receiver* SpectraCyber dari *Radio Astronomy Supplies* (RAS) (Mumtahana, 2012). Khusus untuk sistem penggerak dan sistem kontrol gerak TRH, pembuatannya melalui kerja sama antara Observatorium Bosscha dan Laboratorium Otomasi-Teknik Mesin ITB (Nasution, 2012; Kristanto, 2014). Pengembangan instrumentasi untuk teleskop ini juga dilakukan bekerja sama dengan Laboratorium Telekomunikasi Gelombang Mikro - STEI, ITB (Supriyatno et al., 2016). Komponen instrumen pada TRH hampir sama dengan TRB, perbedaan paling terlihat ada pada ukuran diameter antenna parabola.



Keterangan: Spektrum hidrogen pengamatan bidang galaksi yang terdeteksi oleh Teleskop Radio Hidrogen di Observatorium Bosscha.

Sumber: Mumtahana (2012)

Gambar 3.11 Spektrum hidrogen dari Teleskop Radio Hidrogen

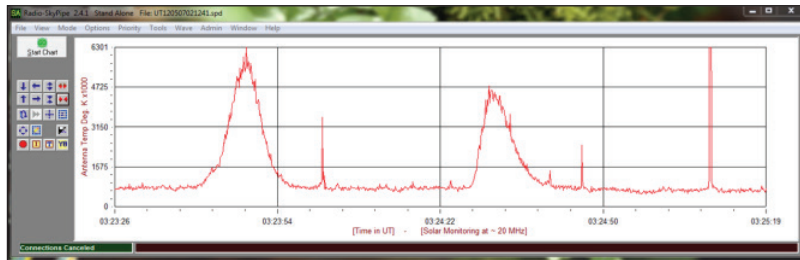
TRH pernah digunakan untuk melakukan uji pengamatan spektral dan kontinum terhadap beberapa objek yang sedang transit di meridian Observatorium Bosscha, seperti pulsar dan bidang galaksi (Mumtahana et al., 2012; Mumtahana, 2012). Dengan menggunakan *receiver* Hidrogen (1420 MHz), spektrum Hidrogen pada bidang galaksi dapat terdeteksi (lihat contoh Gambar 3.11).

b) Teleskop Radio JOVE 20,1 MHz

Teleskop radio JOVE merupakan salah satu proyek NASA yang dimulai sejak tahun 1998. Tujuannya adalah untuk memperkenalkan astronomi radio kepada siswa sekolah menengah dan mahasiswa. Teleskop ini dirancang dalam konsep sederhana dan mudah dijangkau, baik dari segi teknis maupun biaya agar masyarakat bisa membuatnya

sendiri. NASA menyediakan sumber informasi dalam situs webnya, termasuk petunjuk pengamatan dan informasi sains. Teleskop radio JOVE bekerja pada frekuensi rendah, yaitu 20,1 MHz, dapat digunakan untuk mengamati Matahari dan Planet Jupiter. Teleskop ini terdiri dari antena, *receiver*, dan *software*. Antena teleskop radio JOVE merupakan dua antena dipol yang dipasang secara sejajar membentuk *array* dengan panjang masing-masing antena adalah tujuh meter dan keduanya berjarak tujuh meter (Nasrulloh, 2011).

Penelitian yang pernah dilakukan menggunakan teleskop radio JOVE adalah pengamatan Matahari (Gambar 3.12). Teleskop ini menerima sinyal dari semburan Matahari. Semburan Matahari ini kemudian diolah untuk mengetahui nilai total *power* yang dipancarkan Matahari melalui semburan tersebut (Hapsari, 2012; Hapsari, et al., 2012). Nilai tersebut kemudian digunakan untuk pengembangan teleskop radio JOVE selanjutnya (Hidayat et al., 2013a).



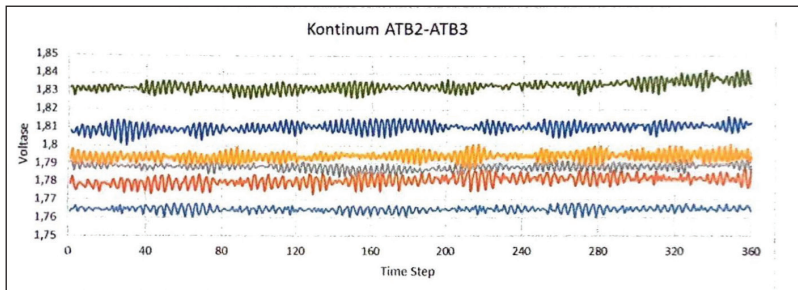
Keterangan: Semburan radio Matahari yang terdeteksi oleh teleskop radio JOVE.

Sumber: Hapsari (2012)

Gambar 3.12 Semburan Matahari dari teleskop radio JOVE.

d) Interferometer Teleskop Radio

Observatorium Bosscha berencana menggunakan lima buah antena untuk interferometer radio. Dua teleskop radio yang akan dijadikan interferometer sudah pernah diuji cobakan, yaitu dua teleskop dengan antena parabola berdiameter tiga meter dan berjarak sekitar 30 meter satu sama lain (Perdana, 2015). Kedua teleskop ini dipilih dalam proyek interferometer karena memiliki spesifikasi yang sama dan komponen keduanya sama dengan Teleskop Radio Hidrogen.



Keterangan: Pola *fringe* hasil pengamatan interferometer lengan galaksi.

Sumber: Perdana (2015)

Gambar 3.13 Pola *fringe* lengan galaksi

Pengamatan dilakukan pada frekuensi 1420 MHz (panjang gelombang 21 cm). Hasil akhir dari uji coba pengamatan ini adalah didapatkan pola interferensi (*fringe*) yang berarti interferensi berhasil dideteksi pada interferometer kedua teleskop ini (lihat contoh Gambar 3.13).

e) Teleskop Radio CALLISTO

CALLISTO adalah *Compound Astronomical Low cost Low frequency Instrument for Spectroscopy and Transportable Observatory*, dikembangkan oleh Christian Monstein, seorang ahli instrumentasi radio dari ETH, Zurich, Swiss (Benz et al., 2009). Teleskop radio Callisto ini memiliki rentang frekuensi yang lebar, yaitu antara 45-870 MHz sehingga dapat mendeteksi beberapa tipe semburan radio Matahari secara sekaligus apabila Matahari sedang aktif dan kita dapat memantau cuaca antariksa menggunakan teleskop ini. Namun, kelemahan teleskop ini adalah teleskop akan menerima gangguan sinyal artifisial (*man-made radio signal*) atau RFI (*Radio Frequency Interference*) karena rentang frekuensi yang sangat lebar (Setiawan et al., 2014; Hidayat et al., 2013b).

Teleskop radio Callisto terdiri dari antenna, LNA (penguat sinyal), spektrometer Callisto, dan *software*. Spektrometer Callisto merupakan komponen terpenting dalam sistem teleskop radio ini. Spektrometer

ini bertugas untuk mengamati kemungkinan adanya berbagai tipe semburan radio Matahari ketika Matahari sedang aktif (Zahirah, 2019).

Teleskop radio Callisto diinstal di Observatorium Bosscha pada pertengahan tahun 2013 (Setiawan et al., 2014; Hidayat et al., 2014). Kemudian perangkat teleskop ini dipindahkan ke Program Studi Astronomi di Gedung CAS lantai 6, Kampus ITB Ganesha, untuk kepentingan pengembangan selanjutnya (Zahirah, 2019; Haryawan, 2021). Adapun e-CALLISTO (<https://e-callisto.org>) merupakan suatu jejaring pengamatan cuaca antariksa menggunakan sebuah spektrometer CALLISTO yang tersebar di seluruh dunia.

2. Teleskop Radio eks LAPAN

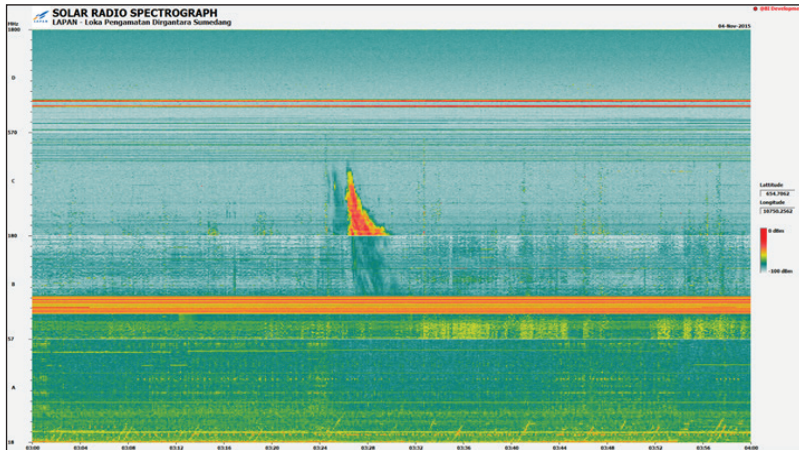
Di LAPAN, instrumentasi radio tertua dibangun di Sumedang, yaitu Spektrograf Radio Matahari bernama SN 4000. Spektrograf untuk mengamati semburan radio Matahari tersebut bekerja pada 4 ban pengamatan dan cukup berkontribusi menghasilkan beberapa tipe *burst* yang cukup penting sebagai *early warning* cuaca antariksa. Adapun untuk spektrograf radio matahari terdiri dari tiga antenna, yaitu Antena *Band A* (18 MHz–57 MHz), *Band B* (57 MHz–180 MHz), serta *Band C-D* (180 MHz–570 MHz dan 570 MHz–1.800 MHz).



Keterangan: Beberapa teleskop radio di BPAA Sumedang LAPAN yaitu Spektrograf Radio Matahari *Band A*, *Band B*, *Band C-D*, dan antenna Callisto (kiri-kanan)

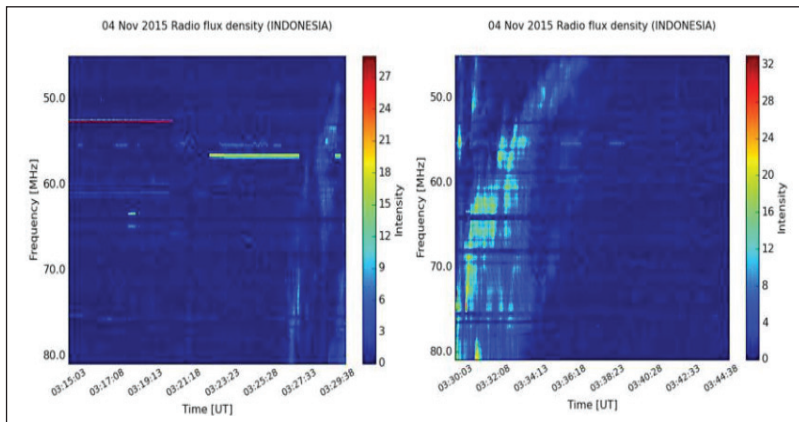
Foto: Karina Dwi Wardhani (2014)

Gambar 3.14 Beberapa teleskop radio di BPAA Sumedang LAPAN



Keterangan: Semburan radio Matahari yang terdeteksi oleh teleskop radio JOVE.
Sumber: Mumtahana et al. (2017)

Gambar 3.15 Semburan radio tipe II pada SN-4000



Keterangan: Data pengamatan CALLISTO Sumedang pada 4 November 2015 yang menunjukkan semburan radio tipe II.

Sumber: Mumtahana et al., 2017

Gambar 3.16 Data pengamatan CALLISTO Sumedang

Salah satu contoh hasil data pengamatan semburan radio dengan instrumen ini di berikan pada Gambar 3.15, yang menunjukkan deteksi semburan tipe II pada 4 November 2015 (Mumtahana et al., 2017). Hasil tersebut dikonfirmasi oleh pengamatan Callisto Sumedang pada Gambar 3.16, yang sama-sama memperlihatkan fitur *fundamental* dan *second harmonic* khas tipe II. Berdasarkan data ini, dapat dilakukan analisis kecepatan dan keterkaitan dengan peristiwa lain seperti CME.

E. Peran Teleskop Radio sebagai Sarana Multidisiplin

Perlu diperhatikan bahwa pengembangan astronomi radio tidak hanya bermanfaat bagi para astronom, tetapi terdapat aspek-aspek multidisiplin yang sangat kuat dalam pembangunan teleskop radio, yaitu sebagai berikut.

1. *Capacity Building*, yang melibatkan kerja sama antarkepakaran yang meliputi peningkatan penguasaan sains, peningkatan kemampuan menangani peralatan tingkat lanjut, penguasaan teknologi terkait, membangun pengalaman dalam memelihara dan mengembangkan fasilitas riset, dan sebagainya yang dapat dijabarkan sebagai berikut.
 - a) Sains: astronomi/astrofisika, geodesi, geodinamika, sains atmosfer, sains komputasi, dan sebagainya.
 - b) *Skill*: konstruksi dan memelihara serta mengembangkan teleskop radio, desain *receiver* dan LNA, perangkat lunak pengolahan data, pendeteksian dan mitigasi RFI, dan sebagainya.
 - c) *Experiences*: Membangun kolaborasi riset dan instrumentasi dengan fasilitas skala global, dan sebagainya.
 - d) Teknologi: Mempelajari dan mengembangkan teknik kriptogenik, mendesain tanda waktu dan frekuensi yang sangat stabil, proses-proses digital, dan sebagainya.

2. *Global cooperation*: Program VLBI baik dengan Asia, Eropa, Australia, Amerika, maupun Afrika jelas merupakan program kolaborasi dalam skala global. Dalam waktu dekat, program VLBI di skala ASEAN juga telah mulai dirintis (Sugiyama et al., 2024a).
3. Pengamatan saintifik yang unik dengan kesempatan luas juga sangat terbuka bagi pengembangan pada bidang pendidikan dan pengajaran, serta pemberdayaan wilayah Indonesia Timur.

1. Pengembangan Kapasitas

Astronomi radio, yang dikenal dalam astronomi telah merevolusi pemahaman kita terhadap alam semesta pada kurun 1960-an. Berawal dari penemuan galaksi radio, kuasar, pulsar, fenomena jet dan kaitannya dengan sumber-sumber astrofisika energi tinggi, sampai dengan distribusi materi antarbintang di Bimasakti, termasuk dalam penyelidikan benda-benda tata surya. Tentu astronomi radio masih memiliki masa depan yang panjang untuk membuka berbagai pemahaman baru tentang jagat raya ini. Menilik hal ini, astronomi radio menjadi opsi yang sangat penting untuk dikembangkan di Indonesia. Selain peningkatan kemampuan teleskop optik, pengembangan menuju pada keberadaan suatu observatorium nasional di Indonesia secara jangka panjang dapat didampingi dengan pengembangan astronomi radio oleh beberapa alasan berikut.

- a) Biaya relatif rendah.
- b) Teknologi yang relatif terjangkau.
- c) Tidak terlalu bergantung pada kondisi cuaca.
- d) Indonesia memiliki wilayah yang sangat luas dan berpotensi untuk memiliki situs pengamatan astronomi yang menjanjikan.
- e) Melibatkan kepakaran multidisiplin untuk menggali sinergisme kemampuan pakar-pakar Indonesia.
- f) Peluang kerja sama internasional sangat terbuka.

Hal ini mendorong untuk dilakukannya perencanaan yang lebih menyeluruh dalam pengembangan astronomi radio di Indonesia,

bersinergi dengan kepakaran multidisiplin yang telah disinggung sebelumnya.

2. Pengembangan Aplikasi VLBI dalam Geodesi dan Astrometri

Pada awalnya, teknik VLBI digunakan oleh para astronom untuk mengamati objek-objek di langit. Namun, sejak tahun 1969, teknik ini juga digunakan untuk keperluan geodesi dan astrometri (Sovers et al., 1998). Berbeda dengan astrofisika yang lebih berfokus pada citra yang dihasilkan VLBI, geodesi dan astrometri lebih memfokuskan pada *time delay* yang dihasilkan oleh teleskop-teleskop VLBI tersebut. Sebagai contoh, VLBI merupakan satu-satunya teknik yang dapat mengukur Parameter Orientasi Bumi (Earth Orientation Parameters; EOP) secara lengkap (Schuh & Behrend, 2012; Karbon et al., 2017). EOP terdiri dari lima bagian yaitu: polar motion (x_{pol} , y_{pol}), nutasi (x_{nut} , y_{nut}), dan UT1-UTC ($d\text{UT1}$). Kelima parameter ini dapat diukur oleh VLBI dengan ketelitian yang sangat tinggi hingga mencapai keakuratan *microsecond* busur untuk *polar motion* dan nutasi, dan keakuratan *microsecond* untuk UT1. Beberapa penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa VLBI dapat digunakan untuk melakukan *tracking* terhadap satelit (Hellerschmied, 2018).

VLBI berkontribusi sangat besar untuk menetapkan kerangka referensi geodetik, misalnya *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF; Altamimi et al., 2016) dan satu-satunya teknik yang dapat digunakan untuk merealisasikan *International Celestial Reference Frame* (ICRF; Charlot et al., 2020). ITRF dan ICRF memiliki peran yang sangat krusial dalam menentukan posisi di Bumi dan di langit dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi. Kuasar adalah objek yang diobservasi dalam teknik VLBI geodesi. Perbedaan waktu penerimaan sinyal radio kuasar pada masing-masing stasiun VLBI digunakan untuk memberikan estimasi berbagai parameter geodesi dan astrometri. Peningkatan akurasi dari setiap teknik geodesi spasial menjadi salah satu target yang disepakati di sidang umum PBB pada tahun 2015. Hal ini karena teknik geodesi spasial, termasuk VLBI,

sangat berperan penting dalam menunjang berbagai aktivitas yang membutuhkan keakuratan tinggi, seperti navigasi spasial dan pengukuran ketinggian air laut (UN, 2015).

3. Fasilitas Pendidikan dan Publik

Pada prinsipnya observatorium astronomi merupakan sebuah sarana penelitian tingkat lanjut yang secara bertahap akan terus berkembang sesuai dengan perkembangan sumber daya manusia dan keahliannya. Pembangunan observatorium astronomi juga disesuaikan dengan kebutuhan pengembangan penelitian yang dilakukan dengan mempertimbangkan perkembangan yang ada di dunia astronomi internasional.

Observatorium ini juga dapat memberikan layanan untuk pendidikan, misalnya memberikan sarana tempat melakukan penelitian setingkat disertasi doktor, tesis magister, maupun magang penelitian bagi mahasiswa tingkat sarjana. Adanya sarana penelitian yang memadai ini tentu akan menciptakan produktivitas yang tinggi bagi penelitian di tingkat doktoral, sehingga publikasi ilmiah di jurnal internasional juga akan meningkat. Untuk layanan publik, observatorium bertanggungjawab memberikan layanan-layanan efemeris, pengamatan *monitoring*, informasi astronomi populer, dan sebagainya. Sama seperti pada program-program pengembangan observatorium di tempat lain, sangat disadari bahwa persiapan ke arah sana biasanya memerlukan waktu yang cukup panjang (program *multi-years*).

F. Rencana Pengembangan Teleskop Radio di Indonesia

Indonesia terus mendorong pengembangan dan aplikasi teleskop radio untuk memperkuat peran Indonesia dalam keantariksaan internasional. Beberapa langkah mulai dilakukan sebagai program dan strategi pengembangan dan pemanfaatan teleskop radio, di antaranya melakukan kajian pembangunan di Observatorium Nasional, mengembangkan antena *decommissioned dish* di Stasiun Bumi Indosat Jatiluhur, dan perencanaan instalasi teleskop radio VGOS di Observatorium Bosscha.

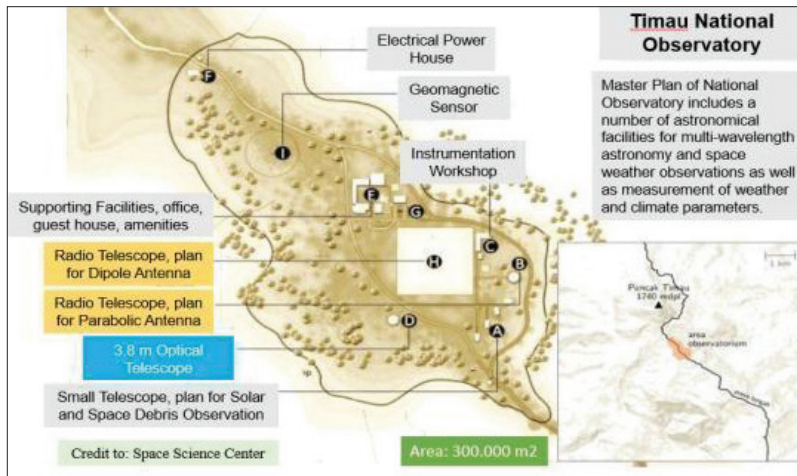
1. Kajian Pembangunan di Observatorium Nasional

Pembangunan observatorium nasional merupakan perwujudan pembangunan fasilitas observasi ruang bumi sebagai sarana untuk mendukung penelitian di bidang astrofisika dan juga menjadi bagian dari penelitian cuaca antariksa dan lingkungan antariksa. Ide ini tertuang dalam Rencana Induk Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN), yang saat ini berintegrasi dengan beberapa lembaga penelitian lain menjadi Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) dengan nama Organisasi Riset Penerbangan dan Antariksa (ORPA). Harapan ke depan adalah ORPA bisa menjadi pusat unggulan kegiatan keantariksaan di Indonesia, memberikan informasi keantariksaan bagi kebutuhan pengguna, serta untuk pemerataan pembangunan antarwilayah, terutama di Kawasan Timur Indonesia.

Harus diakui sarana penelitian keantariksaan di Indonesia, khususnya bidang astronomi dan astrofisika, serta hubungannya dengan lingkungan bumi, sampai sejauh ini masih tergolong belum memadai. Dengan demikian, diperlukan pembangunan observatorium nasional yang bersifat multi panjang gelombang, termasuk pengamatan radio.

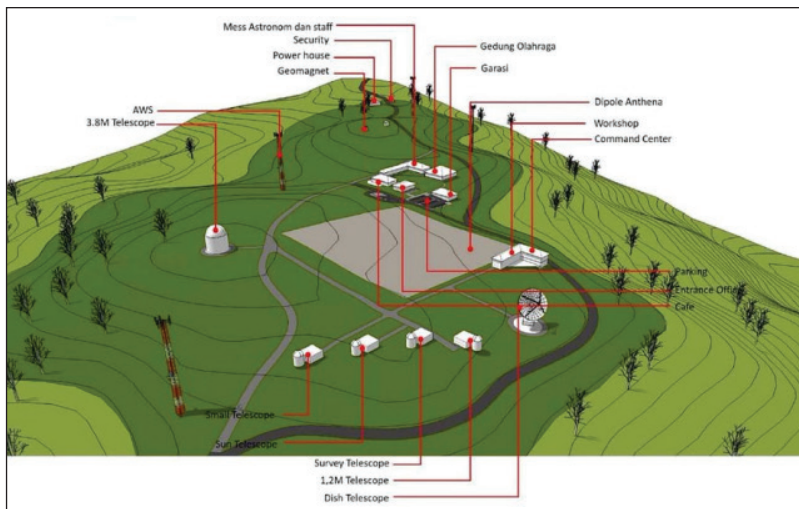
Perencanaan pembangunan observatorium nasional telah diawali dengan beberapa kajian dan survei (Hidayat et al., 2012). Saat ini tengah diselesaikan pembangunan teleskop optik 3,8 m yang akan menjadi salah satu fasilitas utama di Observatorium Nasional Timau (Mumpuni et al., 2017). Pengamatan pada gelombang radio dengan memanfaatkan teleskop radio diperlukan untuk mendukung penelitian-penelitian cuaca antariksa, astronomi, dan penelitian-penelitian bidang lainnya. Rencana pembangunan teleskop radio ini sesuai dengan *master plan* pembangunan Observatorium Nasional Timau.

Gambar 3.17 merupakan peta *master plan* posisi beberapa instrumen di Observatorium Nasional Timau. Seperti terlihat pada gambar tersebut, lokasi teleskop radio direncanakan mencakup dua rentang frekuensi, yaitu terletak pada poin B untuk antena *single-dish* dan poin H untuk antena *array* frekuensi rendah.



Keterangan: *Master Plan* pembangunan Observatorium Nasional Timau dan lokasi teleskop optik dan teleskop radio. Pada titik B dan titik H terlihat lokasi yang direncanakan untuk penempatan teleskop radio et al Sumber: Mumpuni et al. (2017).

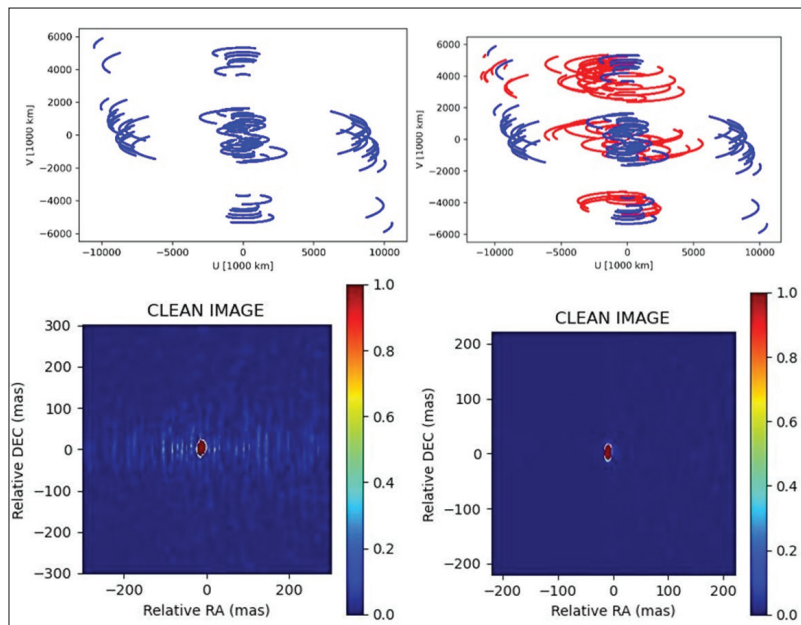
Gambar 3.17 *Master Plan* pembangunan Observatorium Nasional Timau.



Keterangan: *Master Plan* 3D pembangunan Observatorium Nasional Timau dan lokasi teleskop optik dan teleskop radio dish dan *dipol array* et al Sumber: Mumpuni et al. (2017).

Gambar 3.18 *Master Plan* lokasi teleskop Observatorium Nasional Timau.

Gambar 3.18 merupakan citra tiga dimensi *master plan* pembangunan Observatorium Nasional Timau yang memperlihatkan kontur perbukitan serta memberikan gambaran lebih jelas penempatan antenna, baik *dish* maupun *dipol array*. Adapun studi desain antenna teleskop radio *single-dish* dijelaskan pada Sitompul et al. (2024). Diameter antenna yang direncanakan adalah 20 meter dengan frekuensi kerja 1-50 GHz. Sementara itu, potensi riset yang dapat dilakukan dengan adanya pembangunan teleskop radio secara garis besar dijelaskan pada Mumtahana et al. (2023) baik sebagai teleskop *single dish* maupun jejaring VLBI. Kontribusi teleskop di Indonesia dapat mengisi *UV coverage* dengan lebih lengkap dan memberikan perolehan citra lebih baik seperti pada Gambar 3.19.



Keterangan: Panel atas: Hasil simulasi cakupan UV menggunakan East Asia VLBI Network (EAVN) dengan garis biru (kiri) dan antenna EAVN + Indonesia dengan garis merah (kanan).

Panel bawah: Hasil pada simulasi objek dari setiap konfigurasi di panel atas.

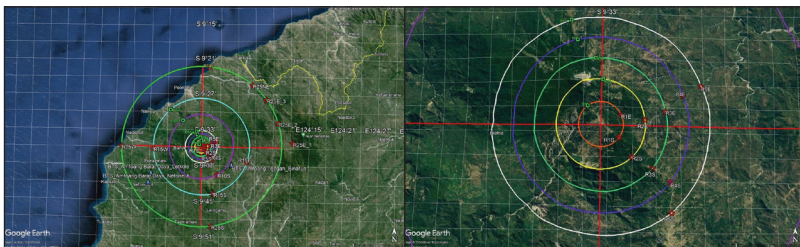
Sumber: Mumtahana et al. (2023)

Gambar 3.19 Hasil simulasi cakupan UV dan objek

Seperti halnya pada tahapan pembangunan teleskop optik, sebelum pembangunan teleskop radio terlaksana, dilakukan beberapa kajian ilmiah terhadap lingkungan khususnya terkait gelombang-gelombang radio yang sekiranya dapat memengaruhi hasil pengamatannya. Hal ini mencakup kelayakannya serta efek interferensi radio terhadap frekuensi kerja teleskop radio yang akan dipakai.

Kegiatan kajian kelayakan gelombang radio di lokasi Observatorium Nasional Timau dan sekitarnya sudah dilakukan dalam beberapa periode kontinyu sebelumnya oleh Hidayat et al. (2014) dan Sitompul et al. (2021). Kegiatan kajian lanjutan ditujukan untuk melihat distribusi spektrum gelombang radio yang dominan aktif di lokasi observatorium. Peta distribusi spektrum gelombang radio yang teramati kemudian dijadikan dasar untuk menentukan frekuensi kerja teleskop radio yang akan dibangun ke depannya. Untuk mendapatkan hasil peta distribusi gelombang radio, dilakukan kegiatan pengamatan gelombang radio yang aktif di kawasan observatorium nasional dan sekitarnya secara berkala. Pengamatan dibuat sedemikian rupa sehingga mendapatkan informasi spektrum gelombang radio secara spasial dan temporal. Lokasi pengamatan gelombang radio yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3.20.

Gambar 3.20 memperlihatkan peta lokasi pengamatan gelombang radio di kawasan Observatorium Nasional dan sekitarnya. Pengamatan



Keterangan: Peta lokasi pengamatan gelombang radio di kawasan observatorium nasional dan sekitarnya. Ruang radius area pengamatan mencakup 25 km (kiri) dan 5 km (kanan).
Sumber: Batubara et al. (2023)

Gambar 3.20 Peta pengamatan radio di kawasan observatorium nasional dan sekitarnya.

dilakukan berdasarkan jarak radius dari pusat lokasi Observatorium Nasional Timau. Jarak radius pengamatan dikelompokkan menjadi jarak setiap 1 km hingga jarak radius 5 km (Gambar 3.20 kanan) dan setiap 5 km mulai dari 10 km hingga 25 km. Sementara itu, titik lokasi pengamatan yang dilakukan ditandai dengan simbol bintang merah. Pada setiap titik lokasi tersebut, pengukuran diatur menjadi empat arah mata angin yang dibagi menjadi beberapa kelompok rentang frekuensi radio (Tabel 3.1).

Tabel 3.1 Kode pengamatan gelombang radio berdasarkan rentang frekuensi.

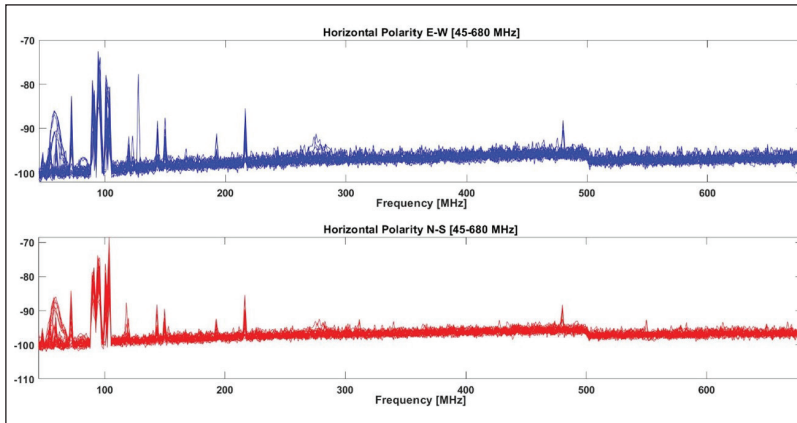
No.	Kode Pengamatan	Rentang Frekuensi	No.	Kode Pengamatan	Rentang Frekuensi
1.	F1	0.068 - 0.120 GHz	6.	F6	0.960 - 1.300 GHz
2.	F2	0.120 - 0.200 GHz	7.	F7	1.300 - 3.000 GHz
3.	F3	0.200 - 0.350 GHz	8.	F8	3.000 - 8.000 GHz
4.	F4	0.350 - 0.680 GHz	9.	F9	8.000 - 13.000 GHz
5.	F5	0.680 - 0.960 GHz	10.	F10	13.000 - 18.000 GHz

Sumber: Batubara et al. (2023)

Sepuluh kelompok rentang frekuensi pada Tabel 3.1 dibuat sebagai pengaturan pengukuran gelombang radio interferensi dengan menggunakan N9927A *Fieldfox Handheld Microwave Vector Network Analyzer* 18 GHz dan *Broadband Horn Antenna* OBH-10180 untuk pengukuran rentang frekuensi dengan kode pengamatan F5–F10 serta *wired antenna* untuk pengukuran rentang frekuensi dengan kode pengamatan F1–F4. Contoh hasil pengamatan gelombang interferensi radio dengan rentang frekuensi 0.068 - 0.680 GHz ditampilkan pada Gambar 3.21.

Profil spektrum pengukuran pada rentang frekuensi 0.068–0.680 GHz pada Gambar 3.21 menunjukkan spektrum yang sangat aktif pada rentang frekuensi sekitar 45–120 MHz. Sebaliknya, hasil pengukuran di rentang frekuensi tinggi (panel bawah Gambar 3.21), khususnya di frekuensi 350–680 MHz, terlihat sedikit spektrum gelombang radio yang aktif di wilayah Observatorium Nasional Timau. Pengukuran RFI berdasarkan kelompok kode pengamatan F5–F10 dalam domain

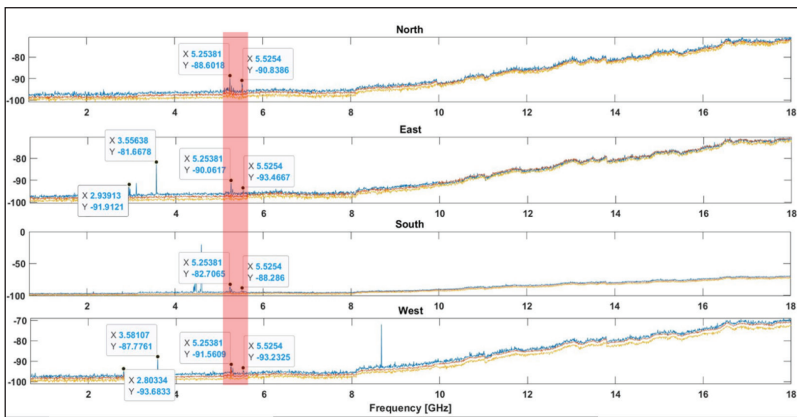
Buku ini tidak diperjualbelikan.



Keterangan: Hasil pengukuran RFI dalam domain rentang frekuensi penuh 68–680 MHz.

Sumber: Batubara et al. (2023)

Gambar 3.21 Hasil pengukuran RFI pada 68-680 MHz.



Keterangan: Hasil pengukuran gelombang interferensi radio berdasarkan kelompok kode pengukuran F5-F10. Bersamaan dengan profil tersebut disertakan grafik dari tiga nilai persentil atas 90% (hijau), tengah 50% (merah), dan bawah 10% (oranye).

Sumber: Batubara et al. (2023)

Gambar 3.22 Hasil pengukuran RFI berdasarkan pengukuran F5–F10.

rentang frekuensi penuh ditampilkan pada Gambar 3.22 pada empat arah mata angin. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa terdapat dua spektrum frekuensi gelombang radio yang aktif, yaitu $\sim 5,2$ GHz dan $\sim 5,5$ GHz (Batubara et al., 2023).

2. Teleskop Radio Konversi Jatiluhur

ITB juga bekerja sama dengan Indosat untuk mengembangkan antenna *decommissioned dish* berdiameter 32 meter yang berada di Stasiun Bumi Indosat Jatiluhur, Purwakarta, Jawa Barat, untuk nantinya di-konversi menjadi teleskop radio (Gambar 3.23). Selanjutnya, antenna dengan penamaan JAH-2A ini direncanakan untuk pengamatan VLBI (Hidayat, 2019; Hidayat et al., 2022a). Selama beberapa hari di antara tahun 2019 s.d. 2021 pengukuran RFI dan kondisi cuaca dilakukan di lokasi tersebut (Ramadhan, 2021; Ramadhan et al., 2022)

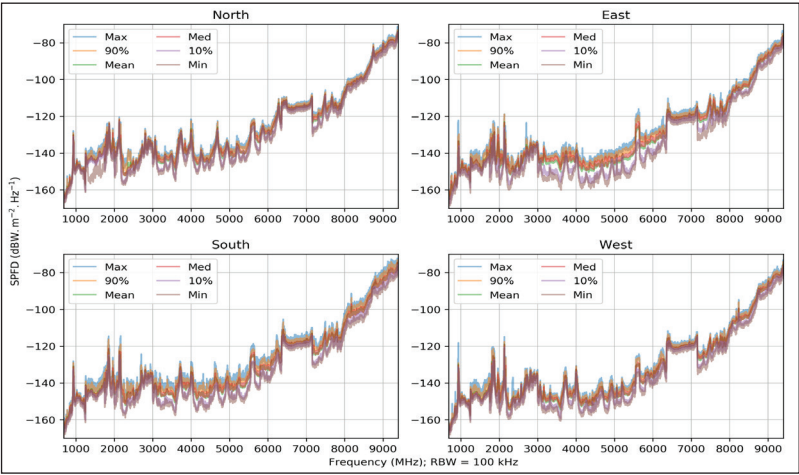


Keterangan: Antena *decommissioned dish* 32-m di Stasiun Bumi Indosat Jatiluhur

Sumber: Ramadhan (2021)

Gambar 3.23 Antena 32-m di Jatiluhur

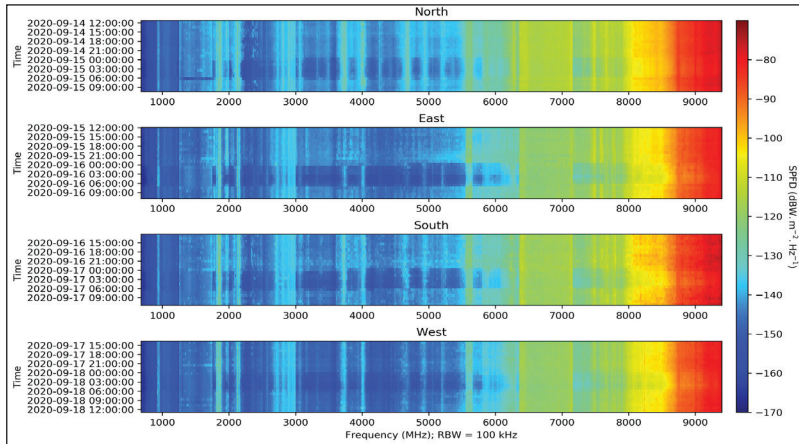
Sebagaimana yang telah dilakukan di lokasi Observatorium Nasional Timau, pengukuran RFI di Stasiun Bumi Indosat Jatiluhur juga dilakukan untuk mengetahui kondisi lingkungan radio di sekitar antenna JAH-2A. Gambar 3.24 dan 3.25 menunjukkan spektrum RFI pada seluruh rentang frekuensi kerja alat, yaitu 680–9.400 MHz, dengan kecenderungan terus meningkat terutama dari frekuensi 6.000 MHz. Namun, jika kita berfokus pada frekuensi antenna JAH-2A yang bekerja pada C-band, khususnya pada frekuensi methanol (6.600–6.700 MHz), terlihat relatif bersih dari RFI untuk semua arah dan polarisasi (Gambar 26). Hal ini merupakan kabar yang baik bagi antenna JAH-2A yang nantinya memang diproyeksikan untuk pengamatan maser methanol pada frekuensi tersebut (Ramadhan, 2021).



Keterangan: Spektrum RFI pada seluruh rentang frekuensi untuk empat arah mata angin dalam polarisasi horizontal.

Sumber: Ramadhan (2021)

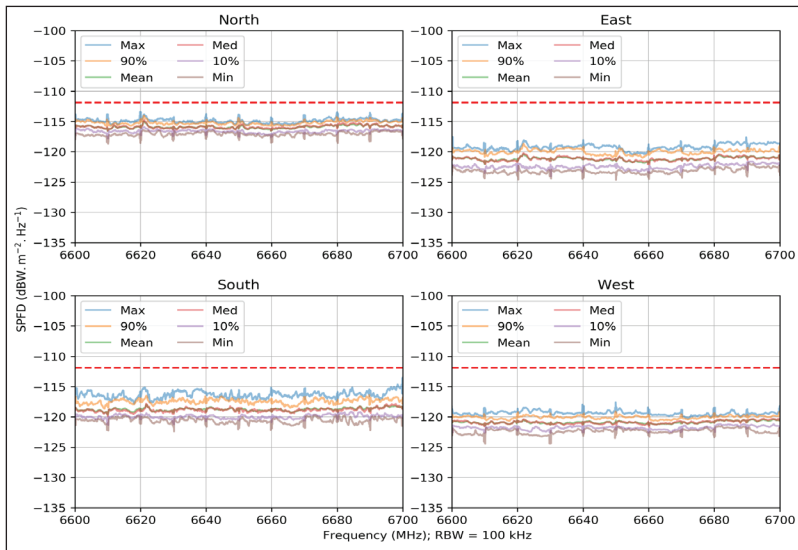
Gambar 3.24 Spektrum RFI seluruh frekuensi dalam polarisasi horizontal



Keterangan: Waterfall diagram RFI pada seluruh rentang frekuensi untuk empat arah mata angin dalam polarisasi horizontal.

Sumber: Ramadhan (2021)

Gambar 3.25 Waterfall diagram RFI di Jatiluhur

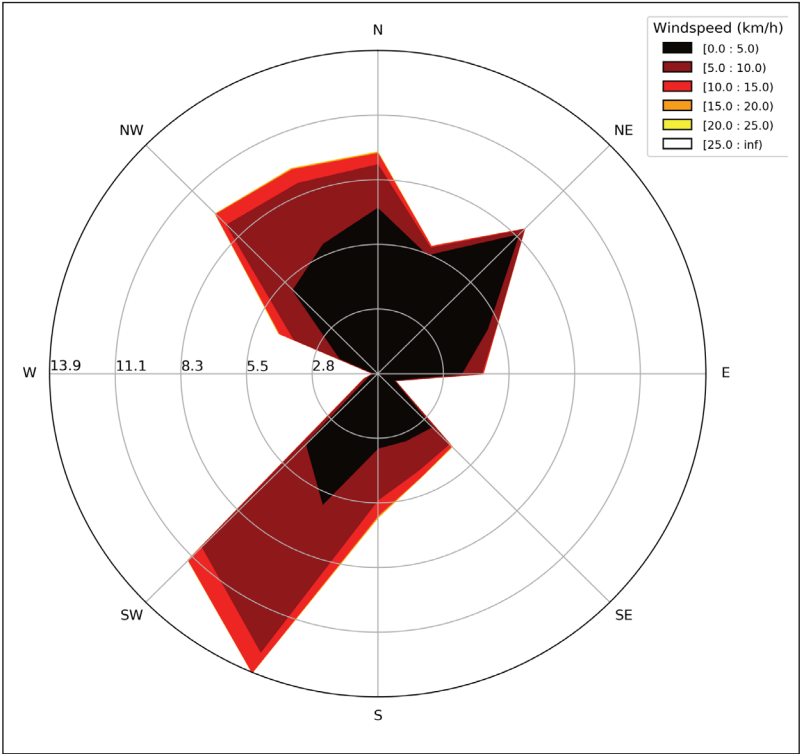


Keterangan: Spektrum RFI pada pita CH_3OH (metanol) di Jatiluhur. Garis merah putus-putus adalah *threshold* yang menandakan nilai 6 dB atas median.

Sumber: Ramadhan (2021)

Gambar 3.26 Spektrum RFI pada pita CH_3OH di Jatiluhur

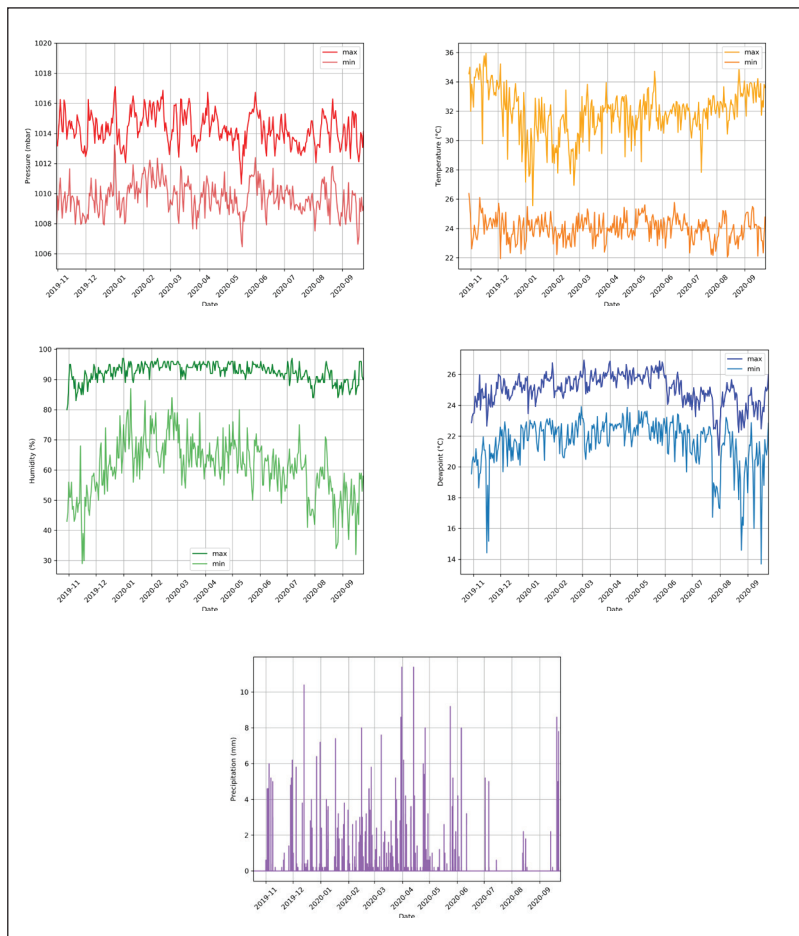
Selain pengukuran RFI, pengukuran cuaca juga dilakukan dengan menggunakan stasiun cuaca otomatis (AWS: *Automated Weather Station*). Terdapat beberapa parameter dasar kondisi cuaca seperti temperatur, tekanan udara, kelembapan, kecepatan angin, dan sebagainya (Gambar 3.27 dan 3.28). Karena daerah Jatiluhur memiliki medan yang berbukit, keberadaan angin menjadi hal yang penting untuk diperhatikan karena antenna tersebut memiliki struktur yang cukup besar dan berat.



Keterangan: Diagram *wind-rose* yang menggambarkan profil kecepatan angin rata-rata pada arah tertentu. Perbedaan warna menandakan perbedaan kecepatan, sedangkan nilai yang tertulis pada sumbu radial menyatakan persentase banyaknya angin.

Sumber: Ramadhan et al. (2022)

Gambar 3.27 Diagram *wind-rose* profil kecepatan angin rata-rata pada arah tertentu.



Keterangan: Variasi tekanan udara harian (kiri atas), temperatur (kanan atas), kelembapan (kiri tengah), titik embun (kanan tengah), dan presipitasi (bawah) di Jatiluhur.

Sumber: Ramadhan et al. (2022)

Gambar 3.28 Plot parameter cuaca di Jatiluhur

3. Rencana Instalasi VLBI Global Observing System (VGOS)

Untuk teknik VLBI, salah satu hal yang menghambat keakuratan dari teknik ini adalah ketidakmerataan distribusi antena VLBI. Posisi antena VLBI masih didominasi di daerah belahan utara Bumi. Masih sangat sedikit antena VLBI yang terletak di daerah ekuatorial dan selatan. Oleh karena itu, Indonesia yang terletak di daerah ekuatorial memiliki peran yang sangat strategis. Keberadaan antena VLBI di Indonesia dapat menjadikan Indonesia turut berkontribusi penting dalam berbagai program VLBI internasional (Nurul Huda et al., 2021). Antena-antena pada sistem VLBI geodesi konvensional (system S/X) rata-rata dibuat sekitar tahun 1960-an dan 1970-an. Terdapat berbagai masalah pada antena VLBI konvensional, misalnya gangguan RFI yang terus meningkat di daerah tersebut, sistem elektronik yang telah obsolet, dan biaya operasional yang sangat tinggi. Hal ini kemudian sangat berpengaruh pada kualitas pengamatan yang dihasilkan oleh teknik VLBI tersebut. Oleh karena itu, organisasi International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS) mengadakan proyek pembuatan VGOS sebagai teleskop radio baru yang merupakan kelanjutan dari jejaring VLBI konvensional. Rencana proyek VGOS sebenarnya dimulai pada tahun 2005 saat IVS Working Group on VLBI2010 (WG3). *Working group* ini kemudian mengeluarkan laporan berjudul *VLBI2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems* yang menjelaskan detail dari proyek tersebut. Proyek ini kemudian dikenal sebagai proyek VLBI2010, yang kemudian berganti nama menjadi VGOS. Jejaring teleskop VGOS nantinya diharapkan akan menggantikan jejaring teleskop VLBI konvensional.

Gambar 3.30 menunjukkan contoh antena VGOS yang terdapat di Sheshan, Shanghai, China. Sistem VGOS melakukan observasi berbagai objek kuasar dengan menggunakan empat atau lebih pita frekuensi pada rentang 2.5 GHz hingga 14 GHz. Observasi akan dilakukan dengan antena kelas 13-m. Salah satu hal yang sangat membedakan antara sistem VGOS dan sistem VLBI konvensional adalah kecepatan pengiriman data. Diperlukan minimal 8 Gbps

sebagai syarat transfer data VGOS. Hal ini kemudian menjadikan data VGOS dapat dikirimkan ke kolerator secara *real time*. Kelebihan antenna VGOS dibandingkan dengan antenna konvensional dapat dilihat pada Tabel 3.2. Berbagai kelebihan tersebut kemudian membuat VGOS dapat memiliki akurasi yang jauh lebih besar dibandingkan dengan VLBI konvensional (ekspektasi hingga 1 milimeter).

Tabel 3.2 Komparasi antenna VLBI konvensional dan VGOS

	Antena VLBI Konvensional	Antena VGOS	Keuntungan VGOS
Ukuran antenna	Berdiameter 5–100 meter	Berdiameter 12–13 meter	Lebih murah
Slew speed	20–200 deg/min	≥ 360 deg/min	Jumlah objek yang diamati lebih banyak
Sensitivitas	200–15.000 SEFD	≤ 2.500 SEFD	Sensitivitas lebih homogen
Rentang frekuensi	Pita S/X (dua pita)	~ 2–14 GHz (empat pita)	Lebih sensitif dan presisi
Recording Rate	128, 256, 512 Mbps	8, 16, 32 Gps	Observasi secara real time; lebih sensitif
Signal processing	Analog/Digital	Digital	Lebih stabil

Sumber: Diolah dari NASA (t.t.)



Keterangan: Contoh antenna VGOS di Sheshan, China.

Sumber: dokumentasi pribadi.

Gambar 3.29 Antena VGOS di China

Salah satu hal penting yang diperlukan untuk menyukseskan proyek VGOS adalah distribusi lokasi yang baik dari teleskop-teleskop radio VGOS tersebut. Kualitas observasi akan semakin baik jika distribusi teleskop VGOS seragam di seluruh belahan Bumi. Namun hingga saat ini lokasi teleskop VGOS masih banyak berada di belahan utara Bumi. Gambar 3.30 menunjukkan distribusi lokasi teleskop VGOS tersebut. Indonesia secara geografis sangat dibutuhkan bergabung dengan proyek VGOS ini. Jika antena VGOS diletakkan di Indonesia, antena tersebut dapat menambah jumlah antena yang dapat mengobservasi objek astronomi radio yang berada di langit bagian selatan. Sementara itu, posisi Indonesia juga berperan penting dalam meningkatkan densitas pengamatan yang dilakukan teleskop-teleskop VGOS (dan juga teleskop VLBI konvensional) di Asia Timur dan Australia. Indonesia dapat bergabung dalam Asia Oceania VLBI Group (AOV) yang hampir setiap bulan melakukan observasi VLBI geodesi menggunakan teleskop-teleskop radio yang berada di Asia dan Oceania. Simulasi pengamatan VLBI menunjukkan bahwa keikutsertaan teleskop radio VGOS di Indonesia dalam jejaring VLBI global dapat meningkatkan kualitas pengamatan secara signifikan, salah satunya ditunjukkan oleh distribusi cakupan langit yang semakin merata. Selain itu, keikutsertaan stasiun VLBI di Indonesia dapat meningkatkan cakupan *UV-coverage* dari pengamatan VLBI tersebut (Nurul Huda et al., 2021).

Untuk mengatasi kekosongan ruang yang terdapat di peta tersebut, saat ini Indonesia (Institut Teknologi Bandung) berencana untuk memasang teleskop radio VGOS di Observatorium Bosscha. Sejumlah persiapan telah dilakukan, salah satunya pengukuran RFI di lokasi tersebut pada rentang frekuensi 2–18 GHz (Hidayat et al., 2022b; Ramadhan et al., 2024) serta program sains terkait (Nurul Huda et al., 2021, 2024). Proyek ini merupakan hasil kerja sama antara Institut Teknologi Bandung dengan Shanghai Astronomical Observatory (SHAO), Chinese Academy of Sciences (CAS). Proyek ini sebenarnya merupakan bagian dari proyek strategis Belt and Road Initiative



Keterangan: Distribusi antenna VGOS diseluruh dunia

Foto: Ibnu Nurul Huda, 2023

Gambar 3.30 Antena VGOS di China

China. Tidak hanya di Indonesia, SHAO juga berencana meletakkan teleskop radio VGOS di Malaysia dan sebuah teleskop di Thailand telah diselesaikan. Berdasarkan hal ini, terdapat beberapa teleskop radio VGOS di Asia Tenggara ke depannya dan akan menjadikan Asia Tenggara memiliki peran signifikan pada jejaring teleskop radio VLBI internasional (Sugiyama et al., 2024a, 2024b).

Kehadiran teleskop radio sekelas VGOS merupakan peluang besar untuk meningkatkan riset multidisiplin di Indonesia. Sebagai contoh, teknik rekonstruksi citra VLBI sedang dikembangkan bekerja sama dengan STEI ITB (Atmaja et al., 2021, 2022, 2023). Teleskop ini akan menjadi salah satu stasiun paling dekat dengan ekuator yang sejauh ini belum ada, sehingga dapat sangat berperan pada jejaring VGOS internasional. Selain itu, teleskop VGOS juga akan menjadi penanda masuknya Indonesia dalam kancah riset radio astronomi internasional. Teleskop ini juga diharapkan dapat menjadi awal hadirnya berbagai teleskop kelas dunia di Indonesia, seperti teleskop yang akan dibuat di Observatorium Nasional Timau ataupun di Jatiluhur.

Teleskop radio VGOS di Indonesia akan berkontribusi pada perkembangan ilmu astronomi di dunia. Berbagai penelitian dapat dilakukan dengan teleskop ini. Sebagai contoh, teleskop ini dapat berkontribusi dalam perealisasi ICRF, dan berperan penting untuk meningkatkan sensitivitas pengamatan di langit selatan. Hasil pengamatan yang belum optimal di langit selatan masih menjadi problem ICRF hingga saat ini. Selain itu, teleskop radio VGOS dapat juga berperan untuk melakukan pengamatan astrometri lainnya. Misalnya saja, pengamatan kuasar atau AGN lain. Teleskop radio VGOS di Indonesia dapat juga digunakan secara *single-dish*. Salah satu objek yang dapat menjadi target adalah sumber-sumber maser dan Indonesia dapat berperan pada jejaring pengamatan maser internasional.

Selain aspek astronomi, teleskop radio VGOS di Indonesia juga akan digunakan untuk keperluan bidang lain. Sebagai contoh, akurasi yang tinggi dari teleskop radio dalam menentukan posisi antena menjadikan teleskop radio VGOS dapat berperan untuk memonitor lempeng tektonik. Selain itu, teleskop radio VGOS akan digunakan juga untuk penelitian *fundamental physics*, seperti pengukuran konstanta relativitas umum. Teleskop radio ini juga dapat berperan dalam studi atmosfer.

G. Penutup

Pengamatan pada panjang gelombang radio penting dilakukan karena dapat mengungkap lebih banyak informasi alam semesta, berdampingan dengan panjang gelombang lain. Riset dengan teleskop radio yang telah dirangkum dalam tulisan ini memberikan gambaran besar topik penelitian dengan berbagai instrumen teleskop radio yang digunakan dari dahulu hingga kini, serta rencana ke depannya.

Meskipun saat ini teleskop radio sudah banyak tersebar di berbagai belahan dunia, daerah ekuator, khususnya di Asia Tenggara, masih tergolong sepi. Keberadaan teleskop radio di Indonesia yang berada di sekitar garis khatulistiwa ini akan menjadi potensi penting untuk penelitian serta membuka peluang besar kolaborasi internasional. Pembangunan teleskop radio yang lebih *powerfull* seperti yang di-

rencanakan di Bosscha (antena VGOS) dan Timau (diameter 20 m) tentu saja akan berdampak positif ke depannya. Kajian pengukuran interferensi sudah banyak dilakukan dan masih perlu dimatangkan demi mempersiapkan instrumen radio yang dapat mengamati dengan baik dan minim gangguan.

Daftar Pustaka

- Akiyama, K., Alberdi, A., Alef, W., Asada, et al. (Event Horizon Telescope Collaboration). (2019). First M87 event horizon telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole. *ApJ*, 875, L1.
- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., & Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the international terrestrial reference frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(8), 6109–6131.
- Atmaja, R.D., Suksmono, A.B., Danudirdjo, D., Hidayat, T. (2021). The Effect of Filtering on Sparse Representation-Based Image Reconstruction. *The 8th International Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering*, ICITACEE 2021, 53–56.
- Atmaja, R.D., Suksmono, A.B., Danudirdjo, D., Hidayat, T. (2022). Total Variation and Random Raw Patches for Reconstructing Image from Incomplete Frequency. *ICIC Express*, 16(10), pp. 1037–1045.
- Atmaja, R.D., Suksmono, A.B., Danudirdjo, D., Hidayat, T. (2023). Reconstruction of simulated VLBI data using the SARA method and random raw patches. *ICCoSITE 2023 - International Conference on Computer Science, Information Technology and Engineering: Digital Transformation Strategy in Facing the VUCA and TUNA Era*, 2023, pp. 152–155.
- Batubara, M., Manik, T., Sitompul P.S.; Lathif, M., Mumtahana, F., Observation of radio spectral at a future radio astronomy observatory site in Indonesia. *AIP Conf. Proc.* 2941, 040017 (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0181380>
- Benz, A O, Monstein, C, Meyer H, Manoharan P.K., Ramesh R., Altynsev A., Lara, A., Paez, J., Cho, K. S. (2009). A World-Wide Net of Solar Radio Spectrometers: e-CALLISTO, *Earth, Moon, and Planets*, 104, 277–285.
- Boccardi, B., et al. (2017) Radio observations of active galactic nuclei with mm-VLBI. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 25(1), 4.

- Charlot, P., Jacobs, C., Gordon, D., Lambert, S., de Witt, A., Bohm, J., Fey, A., Heinkelmann, R., Skurikhina, E., Titov, O., et al. (2020). The third realization of the international celestial reference frame by very long baseline interferometry. *Astron. Astrophys.*, 644, A159.
- Colomer, F., & van Langevelde, H. J. (2017). *Masers! What can VLBI do for you?* In A. Tarchi, M. J. Reid, & P. Castangia (Eds.), *Astrophysical Masers: Unlocking the Mysteries of the Universe* (IAU Symposium 336). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/S1743921317009881>
- Cordon, J. J & Ransom S, M. (2016). *Essential Radio Astronomy. Princeton Series in Modern Observational Astronomy.*
- Cortes, P. C., Vlahakis, C., Hales, A., Carpenter, J., Dent, W., Kamen, S., Loomis, R., Vila-Vilaro, B., Immer, K., Vlahakis, C., Law, J., Stoehr, F., Saini, K. (2024), ALMA Technical Handbook, ALMA Doc. 11.3, ver. 1.4
- Creative Commons Attribution-NonCommercial 2.5 License. (t.t.). Interferometry. <https://xkcd.com/1922/>
- Damanik, S. R., Utomo, D., Hidayat, T. (2010). *Proceedings of the Conference of the Indonesia Astronomy and Astrophysics*, Indonesian Astronomical Society. Pp. 129–134.
- Granato, F. (2010). Transparency of the atmosphere. https://www.eso.org/public/images/atm_opacity/
- Hapsari, R. D. (2012). *Pengembangan Teleskop Radio Jove di Observatorium Bosscha Tahap II* [skripsi tidak diterbitkan]. ITB: Bandung.
- Hapsari, R. D., Hidayat, T. Mumtahana, F. (2012). “Recent Developpment of radio JOVE Telescope at the Bosscha Observatory”. Makalah dipresentasikan pada *International Conference of Mathematics and Natural Sciences*, Bandung, Indonesia, 8–9 November 2012.
- Haryawan, R. K. (2021). *Pengembangan Teleskop radio Frekuensi Rendah dengan Antena LWA*. [skripsi tidak diterbitkan]. ITB: Bandung
- Hellerschmied, A. (2018). *Satellite observations with VLBI (Vol. 102)*. Department für Geodäsie und Geoinformation, Technische Universität Wien. <https://doi.org/10.34726/hss.2018.28517>
- Hidayat, T., Irfan, M., Dermawan, B., Suksmono, A., B., Mahasena, P., Herdiwijaya, D. (2010). Development of Radio Astronomy at the Bosscha Observatory. *Proceedings of the Conference of the Indonesia Astronomy and Astrophysics*, Indonesian Astronomical Society. Pp. 143–146.

- Hidayat, T.; Mahasena, P.; Dermawan, B.; Hadi, T.; Premadi, P.; Herdiwijaya, D. (2012). Clear sky fraction above Indonesia: An analysis for astronomical site selection. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 427, 1903–1917.
- Hidayat, T., Leon-Tanne, S., Suksmono, A. B., Mahasena, P., Irfan, M., and Indrawanto (2013a). Recent Development of Radio Astronomy at the Bosscha Observatory. *Proceedings of the 11th APRIM*, Chiang Mai.
- Hidayat, T., Leon-Tanne, S., Suksmono, A. B. (2013b). Developing radio astronomy at Bosscha Observatory. Paper presented in *3rd International Conference on Instrumentation, Communication, Information Technology and Biomedical Engineering (ICICI-BME) 2013*. DOI: 10.1109/ICICI-BME.2013.6698456.
- Hidayat, T.; Munir, A.; Dermawan, B.; Jaelani, A.T.; Léon, S.; Nugroho, D.H.; Suksmono, A.B.; Mahasena, P.; Premadi, P.W.; Herdiwijaya, D., et al., (2014). Radio frequency interference measurements in Indonesia. *Exp. Astron.*, 37, 85–108.
- Hidayat, T.; B. Dermawan; P. Mahasena; A. Munir; M. Z. Nurzaman; A. T. Jaelani (2015). Radio frequency interference measurement in site testing programs for the future multi-wavelength observatory in Indonesia. *AIP Conf. Proc.* 1677, 050002.
- Hidayat, T., (2019). Proposal Teleskop Radio Sebagai Stasiun VLBI Pertama di Indonesia. [Proposal tidak diterbitkan]. ITB - Indosat Ooredoo: Bandung.
- Hidayat, T., Nurul Huda, I., Ramadhan, S., Premadi, P. W., Dermawan, B., Puspitarini, L., Jaelani, A. T., Vierdayanti, K., Irfan, M., Yusuf, M., Hafieduddin, M., Wulandari, H. R. T., dan Kunjaya, C. (2022a). Program Konversi Antena Telekomunikasi Indosat Menjadi Teleskop Radio VLBI. Dalam Jaelani, Dermawan, & Nurul Huda (Ed.), *Prosiding Seminar Panorama Antariksa 2021: 70 Tahun Pendidikan Tinggi Astronomi* (84-87). ITB Press.
- Hidayat, T., Wulandari, H., Nurul Huda, I., Martokusumo, W., Ramadhan, S., Suryana, J., Suksmono, A.B., Puspitarini, L., Hafieduddin, M. (2022b) Proposal Pengembangan Teleskop Radio VGOS di Institut Teknologi Bandung. [Proposal tidak diterbitkan]. ITB: Bandung.
- International VLBI Service for Geodesy & Astrometry. (2024). Network Stations: Map of Stations. <https://ivscc.gsfc.nasa.gov/>
- International VLBI Service for Geodesy & Astrometry (2019). https://vlbi.org/wp-content/uploads/2019/11/DR_vgos_sites.png

- Karbon, M, et al. (2017). Earth orientation parameters from VLBI determined with a Kalman filter. *Geodesy and Geodynamics* 8.6, 396–407.
- Kristanto, G. I. (2014). *Rancang bangun sistem kontrol posisi pada teleskop radio hidrogen di Observatorium Bosscha* [Tesis magister tidak diterbitkan]. FTMD ITB.
- Nasrulloh, A. (2011). *Pengembangan teleskop radio dan interferometer Jove dua elemen di Observatorium Bosscha* [Skripsi tidak diterbitkan]. ITB: Bandung.
- Nasution, I. (2012). *Teleskop radio hidrogen 6 m: sistem dan software kontrol gerak* [Skripsi tidak diterbitkan]. ITB: Bandung.
- Mumpuni, E.S.; Admiranto, A.G.; Priyatikanto, R.; Puspitarini, L.; Nurzaman, M.Z.; Mumtahana, F.; Yatini, C.Y.; Tanesib, J.L. (2017). *Selayang Pandang Observatorium Nasional Timau*; LAPAN, Pusat Sains Antariksa: Jakarta, Indonesia.
- Mumtahana, F.; Huda, I.N.; Husna, M.; Manik, T.; Sitompul, P.; Batubara, M.; Lathief, M.; Hidayat, T. (2023). The Potential Use of the 20-Meter Radio Telescope Planned at The Timau National Observatory. *Rom. Astron. J.*, 33, 3–14.
- Mumtahana, F. (2012). *Realisasi dan Karakterisasi Teleskop Radio Hidrogen 6 m di Observatorium Bosscha* [Skripsi tidak diterbitkan]. ITB: Bandung.
- Mumtahana, F., Nurzaman, M.Z., Batubara, M. (2017). Struktur Fundamental dan Second Harmonic dalam Semburan Radio Tipe II yang terdeteksi oleh Callisto BPAA Sumedang pada 4 November 2015. *Prosiding Seminar Nasional Sains Antariksa* (31–36). Pusat Sains Antariksa LAPAN.
- Mumtahana, F., Hidayat, T., Hapsari, R. D., (2012). “Characterization of 6-m Radio Telescope at the Bosscha Observatory”. Makalah dipresentasikan pada *International Conference of Mathematics and Natural Sciences*, Bandung, Indonesia, 8–9 November, 2012.
- NASA. (t.t.). VLBI global observing system (VGOS). Diakses pada 21 Oktober 2025 dari <https://earth.gsfc.nasa.gov/geo/instruments/vlbi-global-observing-system-vgos>
- National Radio Astronomy Observatory. (2021). *Tentang ngVLA*. Diakses dari <https://ngvla.nrao.edu/page/about>
- Nurul Huda, I., Hidayat, T., Dermawan, B., Lambert, S., Liu, N., Leon, S., Fujisawa, K., Yonekura, Y., Sugiyama, K., Hirota, T. and Premadi, P.W., (2021). Measuring the impact of Indonesian antennas on global geodetic VLBI network. *Experimental Astron.*, 52(1), pp.141–155.

- Nurul Huda, I., Putri, N. S. E., Hidayat, T., Shu, F., and Li, J. (2024). Study of Asia-Pacific Plate Tectonic Motion by Using VLBI Observation. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2773 012016.
- Perdana, T. (2015). *Pengembangan interferometer radio di Observatorium Bosscha* [Skripsi tidak diterbitkan]. ITB: Bandung.
- Ramadhan, S. (2021). Pengukuran *Radio Frequency Interference* (RFI) pada situs-situs observatorium astronomi radio indonesia di masa depan [Tesis tidak diterbitkan]. ITB: Bandung.
- Ramadhan, S., T. Hidayat, I. Nurul Huda, P. W. Premadi, B. Dermawan, L. Puspitarini, A. T. Jaelani, K. Vierdayanti, M. Irfan, M. Yusuf, M. Hafieduddin, H. R. T. Wulandari, Z. L. Dupe, dan C. Kunjaya. (2022). Profil Cuaca Situs Stasiun Bumi Jatiluhur untuk Persiapan Teleskop Radio VLBI Indonesia. *Prosiding Seminar Panorama Antariksa 2021*, (96–99).
- Ramadhan, S., Hidayat, T., Suryana, J., Romadhoni, A., Kurniasari, M. (2024). RFI measurements at Bosscha observatory to prepare a new VGOS station, *J. Phys.: Conf. Ser.* 2773 012015.
- Reid, M., Loinard, L., Maccarone, T. (2018). 3. Astrometry and Long Baseline Science. *Science with a Next-Generation Very Large Array ASP Conference Series, Monograph 7 Eric J. Murphy, ed.* Astronomical Society of the Pacific. (523–531)
- Rempel, B. (2023). User Manual and Guide Collection: Radio Telescope Circuit Diagram. <https://www.electricalibrary.com/en/2017/10/31/how-radiotelescopes-work/>
- Schuh, H., dan Behrend, D. (2012). VLBI: A fascinating technique for geodesy and astrometry. *J. of Geod.*, 61, 68–80.
- Setiawan, A., Hidayat, T., Suherman, M., Setyanto, H., Herdiwijaya, D. (2014). Pengembangan Teleskop Radio CALISTO di Observatorium Bosscha. Makalah dipresentasikan pada pertemuan Himpunan Astronomi Indoneisa 2013. ITB Bandung.
- Sitompul, P.P.; Razi, P.; Manik, T.; Batubara, M.; Lathif, M.; Mumtahana, F.; Suryana, R.; Huda, I.N.; Hidayat, T.; Taryana, Y.; et al. (2024) A Study for a Radio Telescope in Indonesia: Parabolic Design, Simulation of a Horn Antenna, and Radio Frequency Survey in Frequency of 0.045–18 GHz. *Aerospace* 2024, 11, 52.
- Sitompul, P.P.; Manik, T.; Batubara, M.; Suhandi, B. Radio Frequency Interference Measurements for a Radio Astronomy Observatory Site in Indonesia. (2021). *Aerospace*, 8, 51.

- Soja, B., R. Heinkelmann, and H. Schuh. (2014). Probing the solar corona with very long baseline interferometry. *Nature Communications* 5.1, 1–9.
- Sovers, Ojars J., John L. Fanselow, dan S. Jacobs, C. (1998). Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results. *Rev. of Mod. Phys.*, 70.4. 1393.
- Sugiyama, K.; Jaroenjittichai, P.; Leckngam, A.; Kramer, B. H.; Rujopakarn, W.; Soonthornthum, B.; Sakai, N.; Punyawarin, S.; Duangrit, N.; Asanok, K.; Hidayat, T.; Abidin, Z. Z.; Algaba, J. C.; Diep, P. N.; Poshyachinda, S. (2024a). The 40-m Thai National Radio Telescope with its key sciences and a future South-East Asian VLBI Network. *Proceedings of the International Astronomical Union*, Vol. 380, 461–469.
- Sugiyama, K., Jaroenjittichai, P., Leckngam, A., Kramer, B. H., Rujopakarn, W., Soonthornthum, B., Sakai, N., Hidayat, T., Abidin, Z.Z., Algaba, J. C., Diep, P. N., Poshyachinda, S. (2024b). Thai National Radio Astronomy Observatory Project and a future South-East Asian VLBI Network. *Journal of Physics: Conference Series* 2773 (2024) 012021.
- Supriyatno, B.I., Hidayat, T., Susksmono, A.B., Munir, A., (2016). Development of radio telescope receiver based on GNU radio and USRP. *Proceeding of 2015 1st International Conference on Wireless and Telematics*, ICWT 2015 7449244.
- UN (2015). Global geodetic reference frame for sustainable development (GGRF). Resolution of the United Nations, Ref. No. A/69/L.53, diadopsi dari United Nations General Assembly pada 26 Feb. 2015, New York.
- Utomo, D. (2009). *Karakteristik Teleskop Radio Bosscha 2,3 m: Penentuan Kurva Rotasi Galaksi dari Pengamatan HI 21 cm*. [skripsi tidak diterbitkan]. ITB: Bandung
- Utomo, D. & Hidayat, T. (2010). Retrieval of Galactic Rotation Curve from HII Observations at the Bosscha Observatory. *Proceedings of the Conference of the Indonesia Astronomy and Astrophysics*, Indonesian Astronomical Society. Pp. 123–127.
- Wilson, T. L. (1997). *Tools of radio astronomy*. In *Choice Reviews Online* (Vol. 35, Issue 04).
- Zahirah, S. (2019). *Pengembangan Teleskop Radio Callisto di Observatorium Bosscha dan ITB untuk Pemantauan Cuaca antariksa*. [skripsi tidak diterbitkan]. ITB: Bandung.

Bab IV

Sampah Antariksa dan Peran Indonesia dalam Mitigasinya

Abdul Rachman, Judhistira Aria Utama, dan
Aditya Abdilah Yusuf

A. Implikasi Negatif Teknologi Keantariksaan

Satelit-satelit buatan yang mengitari Bumi sejak lebih dari setengah abad yang lalu telah memberikan banyak dan beragam manfaat bagi manusia. Negara-negara di dunia telah memanfaatkannya untuk telekomunikasi, navigasi, militer, penelitian ilmiah, mitigasi bencana, pendidikan, kesehatan, dan lain-lain. Indonesia sejak lama telah memanfaatkan teknologi satelit, bahkan Indonesia adalah negara berkembang pertama yang memanfaatkannya. Namun, ada sisi lain yang perlu diwaspadai karena hadirnya teknologi ini ternyata telah menyebabkan sampah, tidak hanya terbatas di permukaan bumi saja tetapi juga sampai ke antariksa. Persoalan sampah antariksa ini bisa menimbulkan bencana antariksa yang mungkin menyebabkan musnahnya satelit itu sendiri.

A. Rachman, J. A. Utama & A. A. Yusuf.

*Badan Riset dan Inovasi Nasional, e-mail: abd001@brin.go.id

© 2025 Editor & Penulis

Rachman, A., Utama, J. A. & Yusuf, A. A. Sampah Antariksa dan Peran Indonesia dalam Mitigasinya. Dalam T. Djameluddin & F. Nuraeni (Ed.), *Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi* (105–145). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1425.c1487
E-ISBN: 978-602-6303-86-8

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Puluhan ribu sampah sekarang bertebaran di luar angkasa, bahkan jika kita memperhitungkan sampah-sampah berupa serpihan-serpihan kecil berukuran kurang dari 1 cm maka jumlahnya sudah mencapai jutaan. Sampah-sampah yang berukuran besar bisa berupa satelit-satelit buatan yang tidak beroperasi lagi karena sudah habis masa kerjanya dan roket-roket yang sudah menjalankan tugasnya mengorbitkan satelit-satelit buatan tadi. Sementara itu, sampah yang kecil kebanyakan adalah serpihan-serpihan yang berasal dari satelit dan roket yang pecah.

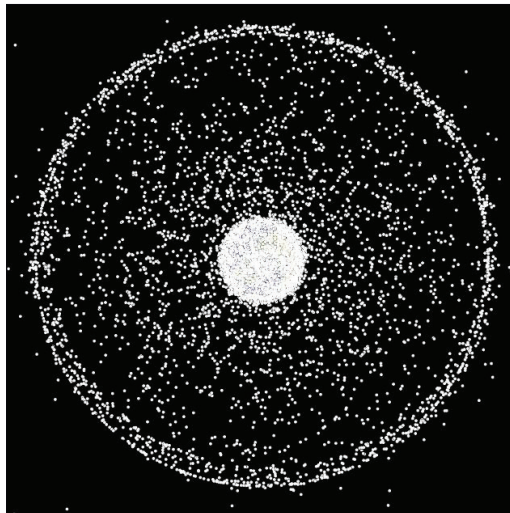
Sampah di antariksa juga bisa berupa benda apa saja yang terlepas di antariksa, baik yang tidak disengaja maupun disengaja. Sampah yang tidak disengaja terlepas (disebut *anomalous debris*) misalnya sarung tangan astronot, serpihan cat (*paint flakes*), dan pelindung permukaan (*surface coating*), dan lain-lain. Sementara itu, yang disengaja adalah sampah yang sengaja dilepaskan saat satelit dibawa oleh roket ke orbit atau sewaktu-waktu dalam masa beroperasinya satelit (disebut *mission-related debris*) seperti tutup lensa atau teleskop, baut, tanki bahan bakar yang sudah kosong, dan lain-lain. Selain benda-benda buatan yang masih mengorbit di antariksa, sampah tersebut juga mencakup benda-benda buatan yang sedang jatuh ke Bumi, dengan kata lain mengalami *reentry* di atmosfer.

Semua sampah di antariksa seperti dinyatakan di atas dinamakan sampah antariksa¹ yang definisinya adalah semua benda buatan yang mengorbit Bumi maupun yang sedang dalam proses jatuh ke Bumi namun tidak memiliki fungsi (UNOOSA, 2010). Jika kita asumsikan bahwa jumlah satelit yang saat ini beroperasi adalah 8000 buah (proyeksi berdasarkan data yang diperoleh dari www.ucsusa.org yang memakai data per Mei 2023 sebanyak 7560 buah), dengan menggunakan data katalog benda-benda antariksa buatan yang tersedia di Space-Track² bisa kita peroleh bahwa jumlah sampah berukuran di atas 10 cm adalah sekitar 20300 buah. Ini mencapai 70,4% dari seluruh benda antariksa buatan yang mengitari Bumi sekarang.

¹ Disebut dengan *space debris* atau *orbital debris* atau *space junk* dalam bahasa Inggris.

² Layanan ini beralamat di www.space-track.org yang dikelola oleh Departemen Pertahanan Amerika Serikat.

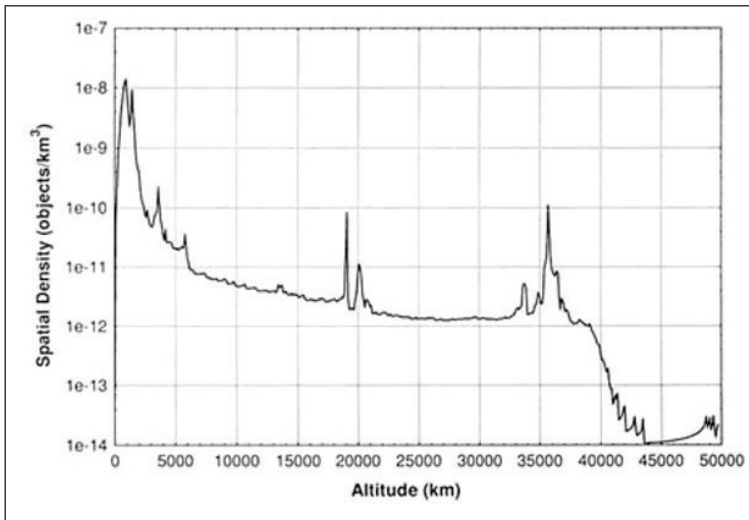
Sampah antariksa dapat dikelompokkan berdasarkan tiga parameter yakni ukuran, kecepatan, dan daerah orbitnya. Dari segi ukuran, sampah antariksa mulai dari beberapa meter (contohnya satelit yang sudah habis masa usianya dan roket tingkat atas yang sudah menyelesaikan misinya) hingga beberapa milimeter yang berasal dari pecahan satelit dan roket. Bahkan bisa lebih kecil lagi jika berupa serpihan cat dan bahan pelindung permukaan (*surface coating*) atau berupa *slag* atau debu yang berasal dari hasil pembakaran motor roket. Semakin kecil ukurannya, semakin banyak jumlah sampah tersebut. Dari sisi kecepatan, objek sampah antariksa dapat bergerak sekitar 7,6 km/detik (sekitar 27.000 km/jam) pada orbit rendah di bawah 500 km, dan menurun hingga sekitar 3,0 km/detik (sekitar 10.000 km/jam) pada orbit geostasioner di ketinggian sekitar 36.000 km dari permukaan Bumi. Jika dibandingkan dengan laju peluru yakni sekitar 0,8 km/dtk, laju sampah antariksa minimal 3,75 kali lebih cepat.



Sumber: NASA (t.t.)

Gambar 4.1 Pemandangan benda-benda buatan yang dilihat dari atas kutub utara bumi menggunakan data dari US Space Command Satellite Catalog pada tanggal 1 Januari 2019. Ini adalah seluruh benda antariksa buatan (termasuk sampah) berukuran di atas 10 cm yang terdapat dalam katalog tersebut.

Adapun dari segi daerah orbit, sampah antariksa bisa berada di orbit rendah (di bawah 2000 km), di orbit menengah (dengan puncaknya di sekitar 20.000 km), dan di sekitar orbit geostasioner (di ketinggian sekitar 36.000 km). Kebanyakan sampah antariksa berada di orbit rendah yang disebut juga orbit LEO (*Low Earth Orbit*) dan di orbit geostasioner (disingkat orbit GEO) seperti terlihat pada Gambar 4.1. Pada gambar tersebut, daerah orbit LEO tampak sebagai daerah yang menutupi permukaan bumi (yang berada di tengah gambar) sedangkan daerah orbit GEO tampak seperti cincin dengan Bumi di pusatnya. Namun banyak juga sampah yang berada di orbit menengah yang disebut juga orbit MEO (*Medium Earth Orbit*) yang pada gambar terlihat di antara LEO dan GEO. Satelit-satelit aktif di MEO terkonsentrasi pada ketinggian sekitar 20200 km yang dinamakan orbit semi-sinkronos. Jadi, sampah antariksa biasanya ditemukan di tiga daerah itu seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2

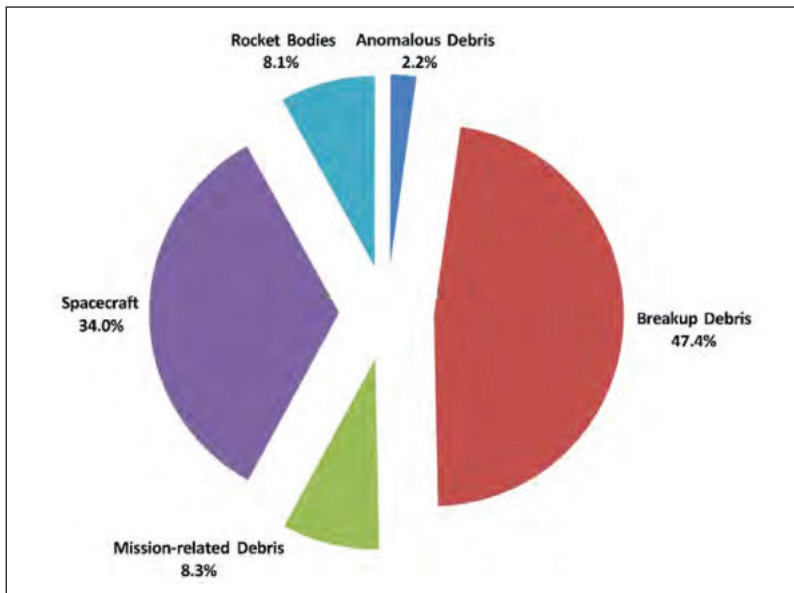


Sumber: National Research Council (1995)

Gambar 4.2 Kerapatan spasial benda-benda buatan berdasarkan US Space Command Satellite Catalog tahun 1994. Ini adalah seluruh benda antariksa buatan (termasuk sampah) berukuran di atas 10 cm yang terdapat dalam katalog tersebut.

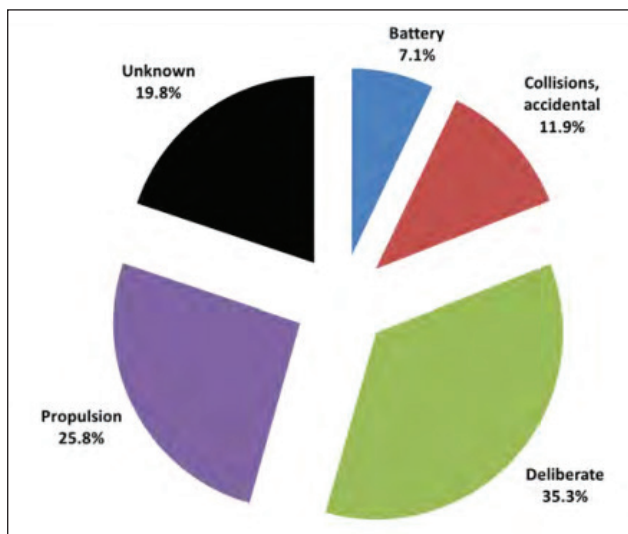
yang memperlihatkan tingginya kerapatan spasial benda-benda langit di ketiga ketinggian tersebut.

Hampir separuh dari populasi benda buatan di orbit adalah benda-benda kecil yang berasal dari satelit atau roket yang pecah (mengalami fragmentasi atau *breakup*). Penyebabnya bisa karena terjadi ledakan (*explosion*) pada benda bersangkutan atau karena tabrakan dengan benda antariksa lain (*collision*). Benda-benda kecil yang dihasilkan tersebut dinamakan *breakup debris* (atau *fragmentation debris*) seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3. Selanjutnya, satelit aktif dan satelit bekas (keduanya disebut sebagai *spacecraft* pada Gambar 4.3) menempati peringkat kedua dalam populasi diikuti oleh *mission-related debris* di peringkat ketiga. Roket bekas (*rocket bodies*) menempati peringkat keempat, sedang *anomalous debris* menempati posisi terakhir dalam hal persentase populasi benda buatan yang berada di orbit.



Sumber: NASA ODPO (2022)

Gambar 4.3 Komposisi dalam populasi benda buatan terkatalog yang berada di orbit. Ini adalah seluruh benda antariksa buatan (termasuk sampah) berukuran di atas 10 cm yang terdapat dalam katalog tersebut.



Sumber: NASA ODPO (2022)

Gambar 4.4 Proporsi sampah antariksa yang berupa serpihan (*breakup debris*) ter katalog yang berada di orbit. Ini adalah seluruh sampah berukuran di atas 10 cm yang terdapat dalam katalog tersebut.

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa tabrakan yang disengaja (*deliberate collision*) dan ledakan yang terkait dengan bahan bakar (*propulsion-related events*) adalah penyebab utama terbentuknya sampah antariksa yang berupa serpihan (*breakup debris*). Ledakan yang terkait bahan bakar terjadi pada satelit bekas atau roket bekas yang masih menyisakan bahan bakar di tangki atau saluran bahan bakarnya. Ini terjadi jika ada kebocoran atau pencampuran komponen-komponen bahan bakar akibat pengaruh lingkungan antariksa terhadap satelit atau roket bersangkutan yang selanjutnya memicu *self-ignition*. Adapun tabrakan selain disengaja (*deliberate*) bisa juga terjadi tanpa sengaja (*accidental collision*). Tabrakan yang disengaja biasanya dilakukan dalam rangka pengujian senjata antariksa (disebut juga *anti-satellite test*), sedangkan tabrakan yang tidak disengaja terjadi jika benda bersangkutan ditabrak oleh benda

antariksa lainnya secara alami. Gambar 4.4 juga menunjukkan bahwa fragmentasi bisa terjadi karena baterai (*battery*) yang meledak dan bahwa cukup banyak (hampir 20% dari populasi) serpihan yang belum diketahui (*unknown*) dengan pasti apa penyebabnya.

Apa kontributor terbesar dalam populasi serpihan antariksa? Sebelum tahun 2007, kontributor terbesar sampah antariksa adalah serpihan karena ledakan. Akan tetapi semenjak itu serpihan akibat tabrakan antara dua benda antariksa mengambil alih status tersebut. Ini terjadi ketika China menembak satelit bekas mereka bernama FENGYUN-1C yang mengorbit di ketinggian sekitar 850 km untuk menguji sistem anti satelit mereka pada 11 Januari 2007 (NASA ODPO, 2007). Satelit berbobot 960 kg ini pecah berantakan menghasilkan lebih dari 3000 sampah baru yang tersebar di ketinggian 200 hingga di atas 4000 km. Karena ketinggiannya, hingga kini masih banyak sampah tersebut yang berada di orbit (belum jatuh ke Bumi dan habis terbakar). Adapun ledakan terbesar yang tercatat adalah yang dialami oleh roket bekas bernama STEP-2 pada tahun 1996 (NASA ODPO, 1996a). Roket tersebut meledak di ketinggian 625 km menghasilkan 754 serpihan yang tercatat dalam katalog.

Jika membandingkannya dengan sampah yang ada di bumi (sampah terestrial) maka sampah antariksa dan sampah terestrial bisa saja serupa dari segi material. Akan tetapi, bedanya adalah sampah antariksa selalu bergerak sangat cepat dan lokasinya sulit dicapai. Dari segi manajemen pun, pengelolaan sampah antariksa selalu melibatkan negara lain karena sifat ruang antariksa yang digunakan bersama-sama oleh seluruh dunia. Di samping itu, sampah antariksa bisa berusia sangat lama karena berada dalam ruang antariksa yang hampir vakum. Ini berimplikasi pada dampak dan upaya pembersihan sampah antariksa tersebut.

B. Dampak Sampah Antariksa

Keberadaan sampah antariksa ini menimbulkan berbagai dampak. Berikut ini akan dijelaskan dampak utama dan dampak lain dari keberadaan sampah antariksa tersebut.

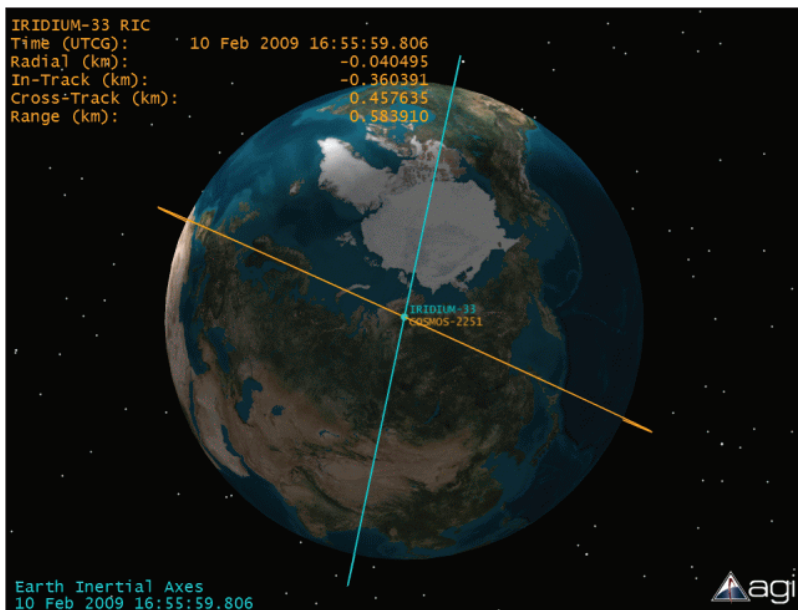
1. Dampak Utama

Pada dasarnya semua sampah antariksa berasal dari satelit atau roket yang beroperasi di orbit, maka, sebagai akibatnya, mereka berbagi daerah yang sama dengan satelit dan roket yang masih beroperasi mulai dari ketinggian 300 km hingga 40.000 km dari permukaan Bumi. Ini berarti sampah-sampah tersebut selain mengotori antariksa juga bisa mengganggu operasional satelit atau roket yang masih aktif. Dengan kelajuannya yang luar biasa, sampah yang berukuran sangat kecil pun memiliki energi yang cukup besar untuk menimbulkan kerusakan. Sebagai contoh, sampah dengan berat 5 kg di orbit LEO memiliki energi yang sebanding dengan sebuah mobil yang bergerak dengan kecepatan 100 km/jam. Dalam sebuah tabrakan antara dua benda antariksa buatan, rata-rata laju relatif antara kedua benda adalah sekitar 11 km/dtk (mendekati 40.000 km/jam). Oleh karena itu, tabrakan dengan sampah yang berukuran cukup besar mampu menghancurkan sebuah satelit dan menghasilkan ribuan sampah baru berupa serpihan. Kerusakan yang ditimbulkan oleh sampah yang menabrak sebuah satelit selain ditentukan oleh besar energi yang dilepaskan saat terjadi tabrakan juga bergantung pada desain benda antariksa tersebut, komponen yang ditabrak, dan geometri tabrakan.

Tabrakan antara dua benda antariksa buatan tanpa ada unsur kesengajaan (dengan kata lain secara insidental) yang pertama kali diketahui terjadi pada 24 Juli 1996. Pada hari itu, satelit CERISE milik Perancis ditabrak oleh sebuah serpihan antariksa di ketinggian sekitar 670 km. Serpihan ini sendiri berasal dari roket bekas milik *European Space Agency* (ESA) yang meledak pada Nov 1986. Serpihan tersebut menabrak *gravity-gradient boom* sehingga patah dan menghasilkan sebuah sampah baru (NASA ODPO, 1996b). Namun, hasil analisis data historis pada 2005 menunjukkan bahwa ada kasus tabrakan yang terjadi sebelumnya yakni pada Desember 1991 antara satelit bekas bernama COSMOS 1934 milik Rusia bertabrakan dengan sebuah serpihan dari satelit milik Rusia lainnya yang bernama COSMOS 926. Kejadian ini menghasilkan dua sampah baru. Tabrakan tanpa sengaja berikutnya adalah yang diyakini terjadi pada 10 Februari 2009 saat

satelit bekas milik Rusia bernama COSMOS 2251 menabrak satelit IRIDIUM 33 milik Amerika Serikat yang masih beroperasi menghasilkan lebih dari 2200 sampah baru. Ini adalah pertama kali dua benda antariksa yang masih utuh bertabrakan (Gambar 4.5). Selain tiga kasus tadi, ada dua kasus lagi yang teridentifikasi hingga Maret 2021. Ini semua membuktikan bahwa tabrakan antar benda buatan adalah hal yang nyata terjadi. Jika itu melibatkan satelit yang masih aktif, banyak kerugian yang dapat ditimbulkan. Ini dikarenakan beroperasinya sebuah satelit memerlukan biaya yang sangat mahal dan umumnya memiliki fungsi yang penting bahkan vital bagi sebuah negara. Lebih dari itu, sebuah satelit bisa bernilai vital secara internasional jika ia digunakan untuk kepentingan global.

Tabrakan dengan sampah yang berukuran kecil pun perlu diwaspadai. Kerusakan bisa terjadi dalam berbagai bentuk yang mampu

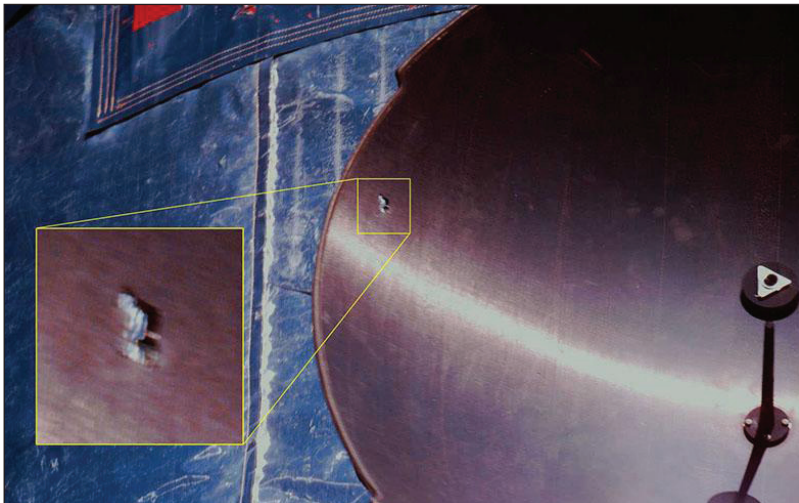


Sumber: Kelso (2024)

Gambar 4.5 Ilustrasi tabrakan antara IRIDIUM 33 dan COSMOS 2251 di atas Rusia bagian utara pada 10 Feb 2009

menurunkan kinerja atau kegagalan fungsi tertentu pada satelit yang tertabrak tersebut. Di LEO, bahkan sampah yang berukuran 1 mm tetap berpotensi merusak jika menabrak komponen satelit yang sensitif seperti lensa atau panel surya. Sebagai contoh adalah kerusakan pada piringan antena teleskop ruang angkasa Hubble yang ditunjukkan pada Gambar 4.6. Sampah berukuran kurang dari 1 mm bisa secara perlahan merusak *thermal surfaces* dan lensa. Oleh karena itu, satelit yang didesain dengan mempertimbangkan lingkungan sampah antariksa akan mampu bertahan lebih baik dibandingkan dengan satelit yang tidak didesain demikian. Namun, tidak semua komponen sensitif pada satelit mampu diproteksi dengan mudah seperti *photovoltaic arrays*, antena, dan sensor (National Research Council, 1995).

Probabilitas sampah antariksa menabrak sebuah satelit bergantung pada ukuran satelit dan fluks (jumlah per satuan luas per satuan waktu) sampah antariksa di daerah orbit satelit. Nilai probabilitas tersebut sebanding dengan luas penampang lintang satelit relatif terhadap



Sumber: NASA (2012)

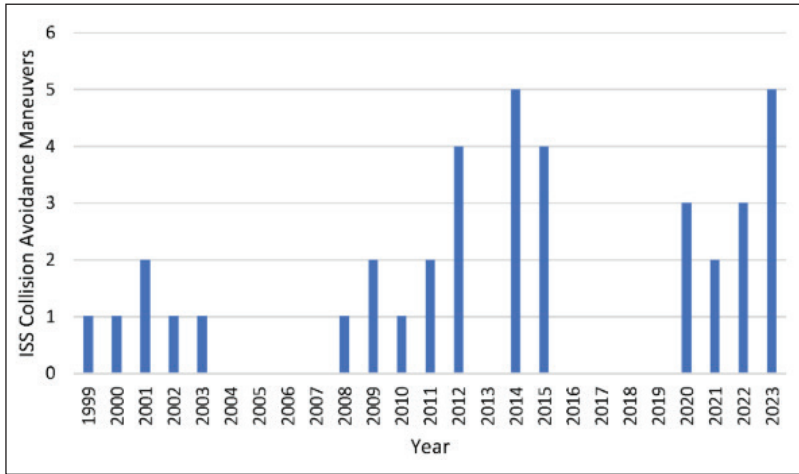
Gambar 4.6 Piringan antena Hubble Space Telescope yang ditembusi sampah antariksa berukuran kecil.

fluks sampah antariksa dan durasi satelit terpapar dalam lingkungan orbitnya. Nilai fluks itu sendiri sangat dipengaruhi oleh ketinggiannya dari permukaan bumi dan juga oleh aktivitas matahari. Studi yang menghitung fluks sampah antariksa pada tiga satelit Indonesia yang berada di LEO selama siklus matahari ke-25, yang saat ini berlangsung, telah dilakukan. Hasilnya menunjukkan bahwa ekspektasi rata-rata jumlah tabrakan yang dialami oleh LAPAN-TUBSAT, LAPAN-A2, dan LAPAN-A3 adalah berturut-turut 1 tiap 5 th, 1 tiap 6,8 th, dan 1 tiap 8,6 th (Rachman, 2021).

Selain bisa berdampak pada satelit dan roket, sampah antariksa tentu saja bisa berdampak pada astronot. Astronot yang sedang menjalani misi di luar wahana (*extravehicular activities*, EVA³) sangat rentan terhadap tumbukan sampah berukuran kecil. Jika dirata-ratakan, sampah berukuran 1 mm mampu melubangi baju ruang angkasa yang dipakai oleh astronot Amerika Serikat (National Research Council, 1995). Bagi astronot yang berada di dalam wahana, lubang yang terjadi akibat tabrakan dengan sampah antariksa bisa mengakibatkan berkurangnya tekanan dalam kabin di samping efek negatif lainnya yang membahayakan jiwa. Untuk menghindari terjadinya musibah, *International Space Station* (ISS) melakukan manuver untuk menghindari yang disebut dengan *Predetermined Debris Avoidance Maneuver* (PDAM) setiap kali ada sampah yang diduga akan berada cukup dekat dengan stasiun tersebut. Manuver ini telah dilakukan sebanyak 38 kali hingga akhir 2023 (Gambar 4.7). Jika PDAM tidak sempat dilakukan, para astronot akan terpaksa berlindung di dalam wahana yang siap membawa mereka menjauh dari ISS. EVA akan ditunda jika diduga akan ada risiko dari sampah antariksa.

Terkait dengan upaya mitigasinya, sampah berukuran 1 mm hingga 10 cm adalah yang paling sulit diantisipasi. Di satu sisi, sampah pada rentang ukuran ini dapat menghancurkan komponen satelit (yang diproteksi dengan baik sekalipun), tetapi di sisi lain keterbatasan teknologi saat ini tidak memungkinkan untuk membuat katalog sampah seukuran ini. Hal itu berbeda dengan

³ Dikenal juga dengan istilah *spacewalks*.



Sumber: NASA ODPO (2024)

Gambar 4.7 Histori manuver yang dilakukan ISS agar terhindar dari tabrakan dengan sampah antariksa hingga Nov 2013

sampah berukuran di atas 10 cm yang telah dapat dibuat katalognya sehingga posisinya dapat diprediksi. Keberadaan katalog itu memungkinkan satelit melakukan manuver untuk menghindari tabrakan. Ini dengan catatan bahwa satelit tersebut dilengkapi dengan motor (*thruster*) untuk bisa melakukan manuver.

2. Dampak Lain

Risiko lain dari sampah antariksa timbul jika ia jatuh ke Bumi. Hal ini hanya berlaku untuk sampah yang berada di orbit LEO yang selalu mengalami perlambatan gerak akibat gesekannya dengan atmosfer (efek pengereman). Sampah yang berada di atas ketinggian 700 km bisa membutuhkan waktu hingga 100 tahun baru jatuh ke Bumi jika kerapatan massanya tinggi. Jika ketinggiannya 500 km, sampah itu bisa bertahan beberapa tahun di orbit sebelum jatuh. Namun, jika ketinggiannya di bawah 300 km, hanya butuh beberapa bulan agar sampah itu jatuh ke Bumi (Space Mission Analysis and Design [SMAD], 2005). Karena per definisi tiap sampah antariksa tidak

bisa dikendalikan, maka sampah tersebut bisa jatuh di mana saja di permukaan bumi.

Sampah yang jatuh akan terbakar akibat gesekan dan tekanan yang kuat di atmosfer. Saat tekanan sudah demikian tinggi, maka benda akan pecah dan selanjutnya masing-masing pecahan akan terus menurun ketinggiannya dan mengalami *aeroheating* hingga pecahan itu habis terbakar atau menyisakan komponen yang sampai ke permukaan bumi. Komponen yang terbuat dari bahan yang memiliki titik leleh (*heat of ablation*) tinggi seperti titanium atau stainless steel akan memiliki peluang yang lebih besar untuk sampai ke permukaan bumi dibandingkan komponen yang berbahan aluminium. Namun, meskipun ada komponen yang selamat sampai ke permukaan bumi, dengan luasnya lautan dan daerah yang umumnya tidak berpenghuni (seperti hutan dan gurun), maka risiko komponen itu menimpa manusia adalah sangat rendah. Meski demikian, sampah antariksa berukuran besar terlebih jika mengandung zat berbahaya seperti bahan radioaktif atau bahan beracun lainnya harus selalu diwaspadai. Satelit bernama COSMOS 954 milik Uni Soviet (sekarang Rusia) yang mengandung nuklir pernah jatuh di perairan utara Kanada pada tahun 1978 sehingga menimbulkan banyak pencemaran yang menghabiskan biaya besar untuk pembersihannya (Cohen, 1984).

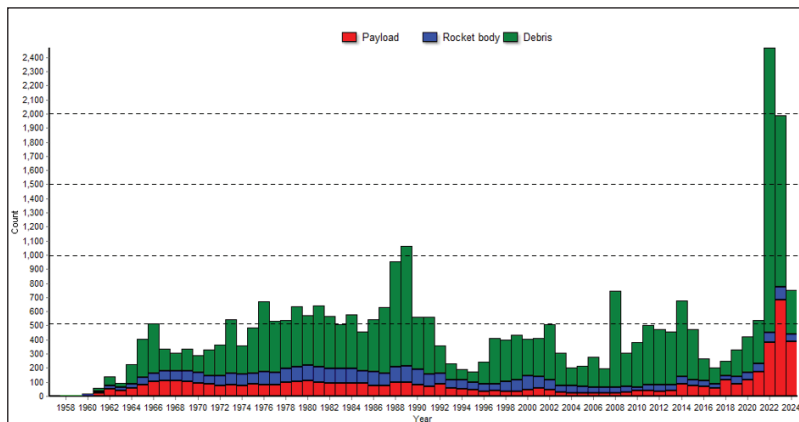
Hingga kini lebih dari 30 ribu sampah antariksa telah jatuh ke Bumi. Lebih dari 9000 di antaranya adalah satelit dan roket bekas yang berarti ukurannya cukup besar dan memiliki kemungkinan ada bagian yang sampai ke permukaan bumi. Sebagai akibat melonjaknya jumlah benda baru⁴ di orbit rendah dalam 5 tahun terakhir, terlihat jelas pula lonjakan drastis pada jumlah satelit bekas dan serpihan yang jatuh dalam periode itu seperti ditunjukkan pada Gambar 4.8 (Huwaidda dan Rachman, 2023). Tujuh buah sampah yang berukuran cukup besar telah ditemukan jatuh di wilayah Indonesia terakhir kali pada tahun 2022. Untuk meminimalkan potensi kerusakan yang ditimbulkan oleh benda-benda berbobot sangat besar, tentu saja

⁴ Lonjakan ini terjadi karena adanya proyek mega-konstelasi satelit internet di orbit LEO yang dimulai dengan peluncuran konstelasi satelit Starlink pada tahun 2019 dan fragmentasi pada satelit COSMOS 1408 bulan November 2021.

opsi yang terbaik adalah jika proses *reentry*-nya bisa dikendalikan sehingga jatuh di tempat yang aman yakni di tengah samudera yang luas. Sebagai contoh adalah stasiun ruang angkasa MIR milik Rusia yang berbobot 120 ton yang dijatuhkan ke Samudera Pasifik pada 23 Maret 2001.

Risiko jatuhnya benda antariksa pada pesawat terbang pun perlu diwaspadai. Alasannya bukan hanya karena meningkatnya jumlah benda jatuh antariksa akan tetapi juga karena meningkatnya jumlah penerbangan pesawat (*air traffic*). Berdasarkan informasi yang dikeluarkan oleh *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, pada 25 Desember 1996 sebuah benda sebesar kelereng yang diduga merupakan pecahan dari sampah antariksa yang mengalami *reentry* menabrak kaca depan (*whindshield*) sebuah pesawat Boeing 757 yang sedang berada di ketinggian 30 ribu kaki. Insiden ini menyebabkan retaknya kaca bagian luar dan akhirnya dilakukan pendaratan darurat. Kekhawatiran atas dampak jatuhnya benda antariksa yang sering kali tidak dikendalikan terhadap keselamatan penerbangan mendorong dikeluarkannya *Montreal Recommendations on Aviation Safety and Uncontrolled Space Object Reentries* pada bulan Maret 2023.

Masih terkait dengan dampak jatuhnya benda antariksa adalah pengaruhnya pada atmosfer Bumi. Hal ini mulai menarik perhatian dunia semenjak terjadinya lonjakan jumlah benda jatuh dalam 5 tahun terakhir (lihat kembali Gambar 4.8). Para peneliti mengkhawatirkan efek buruk pada stratosfer setelah adanya penemuan bahwa 10% dari partikel aerosol yang ada di lapisan tersebut mengandung aluminium dan logam lain yang berasal dari *reentry* benda-benda antariksa buatan (Murphy et al, 2023). Menanggapi fenomena ini, ESA mengadakan workshop berjudul *Understanding the Atmospheric Effects of Spacecraft Re-entry* pada Januari 2024 dengan tujuan untuk menemukan kekosongan pengetahuan dalam *reentry modeling* dan untuk menjawab tantangan-tantangan berat yang muncul pada *reentry* benda-benda antariksa di atmosfer.



Sumber: Huwaidaa dan Rachman (2023)

Gambar 4.8 Jumlah benda jatuh antariksa sejak awal peluncuran satelit hingga tahun 2024. Payload menandakan satelit bekas, rocket body menandakan roket bekas, dan debris menandakan serpihan. Data diperoleh dari Space Track.

Dampak lain yang sudah terasa sejak lebih dari 30 tahun yang lalu adalah gangguan sampah antariksa pada pengamatan astronomi (Shara dan Johnston, 1986). Sampah antariksa dan satelit yang masih beroperasi bisa lewat di depan medan pandang kamera dan, jika kondisinya tepat, bisa memantulkan sinar matahari sehingga tampak bercahaya oleh pengamat di Bumi. Dalam citra yang direkam oleh kamera, cahaya tersebut akan tampak berupa jejak (*streak*) yang berupa garis lurus yang bisa mengurangi kualitas citra. Jejak-jejak sampah antariksa di citra-citra astronomi semakin banyak bermunculan apalagi setelah dimulainya proyek mega-konstelasi satelit⁵ pada tahun 2019 yang menargetkan puluhan ribu satelit di orbit rendah untuk layanan internet. Gambar 4.9 memperlihatkan salah satu citra astronomi yang dipenuhi oleh jejak satelit dan sampah antariksa. Selain itu, seperti sudah dibahas sebelumnya, sampah antariksa bisa bertabrakan dengan teleskop ruang angkasa yang jika itu terjadi, dampaknya bisa fatal. Di samping pengamatan optik, pengamatan radio astronomi pun bisa terganggu lewat derau elektromagnetik

⁵ Beberapa di antaranya adalah Starlink, OneWeb, Kuiper, SatNet.



Sumber: Möller (2020)

Gambar 4.9 Foto Angkasa yang Dipenuhi Konstelasi Satelit Starlink

yang mungkin muncul tanpa disengaja dari mega-konstelasi satelit sehingga menjadi sumber interferensi radio yang baru (Vruno et al, 2023).

Dampak lain pada pengamatan astronomi yang baru dibahas dalam beberapa tahun terakhir ini adalah meningkatnya kecerlangan langit akibat peningkatan drastis jumlah benda-benda antariksa buatan (satelit dan sampah antariksa). Penyebabnya adalah cahaya matahari yang dipantulkan dan dihamburkan oleh kumpulan besar benda-benda antariksa buatan menimbulkan efek *skyglow*⁶ baru. Bahkan sebelum dimulainya era mega-konstelasi satelit, Kocifaj et al (2021) menemukan bahwa dampak baru ini bisa mengakibatkan adanya peningkatan sekitar 10% pada kecerlangan langit yang hanya dipengaruhi oleh sumber-sumber cahaya alami. Nilai 10% tersebut adalah batas kritis tingkat polusi cahaya yang masih bisa diterima di sebuah observatorium astronomi menurut *International Astronomical*

⁶ *Skyglow* adalah cahaya di langit malam yang terlihat menyebar ke segala arah dan biasanya menjadi tanda tingginya tingkat polusi cahaya di suatu tempat.

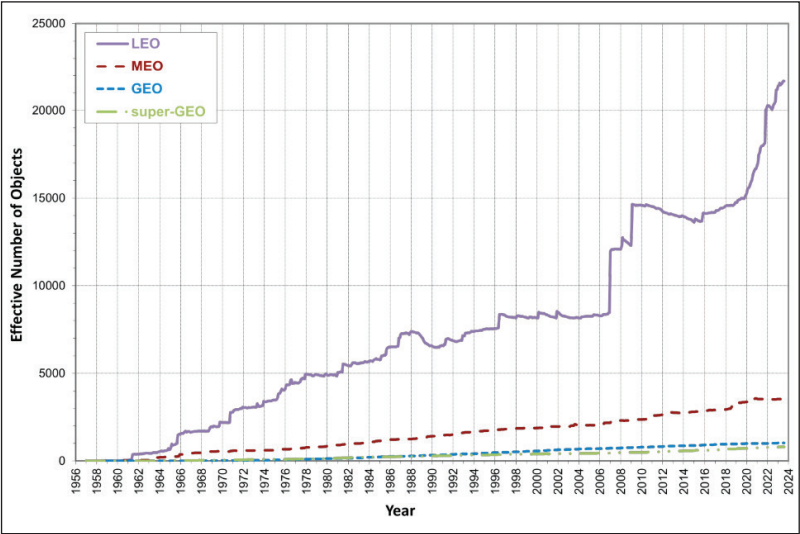
Union (IAU). Setelah dimulainya era mega-konstelasi satelit, investigasi yang dilakukan oleh Barentine et al (2023) menunjukkan bahwa peningkatan jumlah satelit dan sampah antariksa di berbagai ukuran akan mengakibatkan hilangnya data astronomi dan mengurangi peluang ditemukannya penemuan-penemuan baru dari pengamatan landas bumi akibat hilangnya sinyal-sinyal astrofisika di tengah derau pengamatan. Fenomena ini patut diwaspadai termasuk oleh bangsa Indonesia yang sedang membangun sebuah observatorium nasional di kaki Gunung Timau di Kab. Kupang, Nusa Tenggara Timur (Mumpuni et al, 2017). Fasilitas bernama Observatorium Nasional Timau yang ditargetkan mulai beroperasi pada tahun 2025 ini akan dilengkapi dengan sebuah teleskop dengan cermin berukuran 3,8 meter sebagai instrumen utamanya. Ketika selesai dibangun, teleskop tersebut akan menjadi teleskop terbesar di Asia Tenggara.

C. Perkembangan Populasi Sampah Antariksa

Sebelum membahas tentang bagaimana perkembangan populasi sampah antariksa dari waktu ke waktu, mari kita lihat bagaimana para peneliti bisa mengetahui kondisi populasi tersebut pada suatu saat. Populasi dan karakteristik sampah antariksa diperoleh dari beragam teknik pengamatan dan pengukuran (dikarenakan lebarnya rentang ukuran dan ketinggian sampah antariksa) dan pemodelan. Secara umum, pengamatan dengan radar digunakan untuk benda-benda di ketinggian rendah (orbit LEO), sedangkan pengamatan dengan teleskop optik digunakan untuk benda-benda di orbit tinggi (MEO dan GEO). Adapun untuk benda-benda yang sangat kecil, pengukuran dilakukan secara *in situ* dengan mengirim alat pengukur ke antariksa lalu alat tersebut dipulangkan ke Bumi untuk dianalisis. Sebagai contoh, Departemen Pertahanan Amerika Serikat memakai radar dan teleskop optik dalam *U.S. Space Surveillance Network* (SSN) untuk membuat katalog benda-benda antariksa buatan berukuran minimal 5 hingga 10 cm di LEO dan 1 m di GEO sedangkan Badan Antariksa Amerika Serikat (NASA) mengirim satelit khusus ke luar angkasa untuk mengukur dimensi dan distribusi orbit benda-benda yang lebih kecil (NASA, 2008).

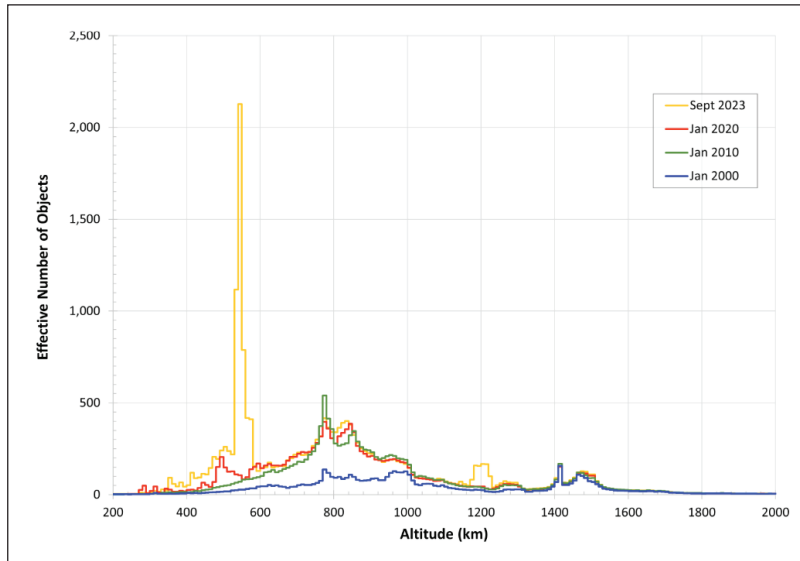
Dibandingkan dengan daerah orbit lain, LEO adalah daerah yang paling padat dan paling dinamis seperti terlihat pada Gambar 4.10. Pada gambar tersebut, LEO mencakup benda-benda dengan ketinggian lebih rendah atau melewati 2000 km; MEO mencakup benda-benda dengan ketinggian di antara atau melewati dari 2000 km hingga 35586 km; GEO mencakup benda-benda dengan ketinggian di antara atau melewati dari 35586 km hingga 35986 km; super-GEO mencakup benda-benda dengan ketinggian di antara atau melewati 35986 km hingga 600 ribu km. Jumlah efektif yang digunakan pada gambar berarti bahwa nilainya juga memperhitungkan berapa nilai fraksi orbit suatu benda di dalam rentang daerah orbit yang disebutkan sebelumnya. Dua lonjakan besar setelah tahun 2006 menandakan kasus fragmentasi yang disengaja pada Januari 2007 dan kasus insidental pada Februari 2009. Efek proyek mega-konstelasi satelit di orbit LEO yang dimulai tahun 2019 jelas terlihat pada gambar tersebut.

Gambar 4.11 menunjukkan secara lebih detail bagaimana dinamisnya daerah orbit LEO itu sejak tahun 2000. Peningkatan



Sumber: NASA ODPO (2023)

Gambar 4.10 Jumlah efektif benda antariksa buatan di orbit bumi dalam katalog SSN. LEO menandakan orbit rendah, MEO orbit menengah, GEO orbit geosinkron.



Sumber: NASA ODPO (2023)

Gambar 4.11 Jumlah efektif benda antariksa buatan yang per ketinggian 10 km antara 200 hingga 2000 km pada empat waktu yang berbeda yang ada dalam katalog SSN.

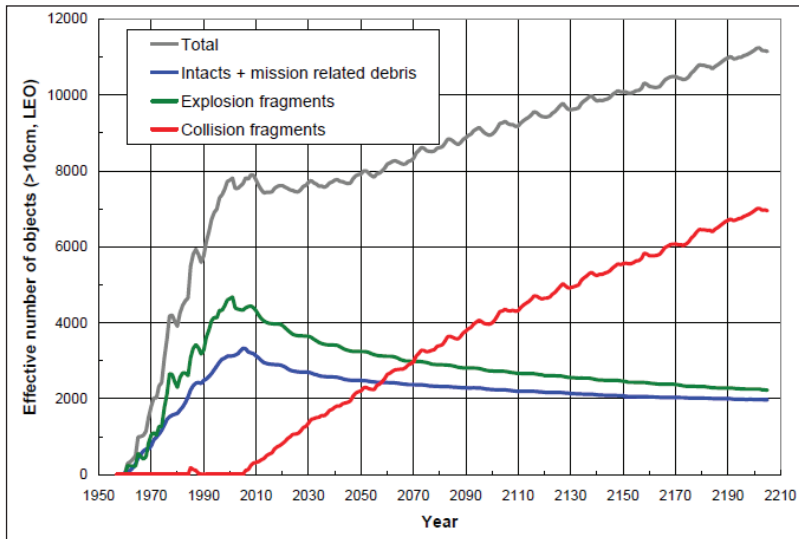
sejak 2000 ke 2010 didominasi oleh serpihan yang berasal dari kasus FENGYUN-1C pada Januari 2007 dan kasus COSMOS 2251 vs IRIDIUM 33 pada Februari 2009. Peningkatan sejak 2010 ke 2020 dikarenakan mulainya proyek konstelasi satelit Starlink dan proliferasi satelit CubeSat⁷ di bawah ketinggian sekitar 650 km. Peningkatan sejak 2020 hingga 2023 disebabkan oleh hal yang sama yaitu konstelasi satelit Starlink dan proliferasi satelit CubeSat di bawah ketinggian 650 km ditambah dengan peningkatan baru di sekitar 1200 km akibat konstelasi OneWeb.

Katalog SSN hanya berisi benda-benda berukuran di atas 10 cm dan itu pun tidak lengkap karena banyak benda yang tidak bisa dimasukkan ke dalam katalog karena keterbatasan akurasi orbit yang bisa didapat dari pengamatan. Untuk data yang lebih lengkap

⁷ CubeSat adalah suatu klas satelit kecil dengan *form factor* berupa kubus dengan panjang sisi 10 cm. Satelit-satelit ini memiliki bobot kurang dari 2 kg per unit.

dan untuk populasi sampah berukuran di bawah 10 cm kita bisa memakai data yang disediakan oleh ESA di situs web-nya (www.esa.int). Berdasarkan situs itu, hingga Desember 2023, jumlah benda yang ukurannya di atas 10 cm diperkirakan sebanyak 36500; antara 1 hingga 10 cm diperkirakan sebanyak 1 juta; antara 1 mm hingga 1 cm diperkirakan sebanyak 130 juta. Jumlah benda-benda kecil ini diketahui dari pengukuran dan pemodelan.

Adanya lonjakan jumlah benda buatan di orbit rendah dalam 5 tahun terakhir semakin menambah kekhawatiran akan dampak sampah antariksa. Apalagi mengingat riset yang dilakukan oleh Liou dan Johnson (2010) menunjukkan bahwa jumlah benda antariksa di LEO akan terus bertambah sekalipun tidak ada peluncuran baru sejak 2008 (Gambar 4.12). Meningkatnya kepadatan benda di LEO secara terus menerus ini akhirnya akan memicu terjadinya tubrukan berantai antar benda-benda antariksa buatan (*cascading effect of collision*) yang dinamakan *Kessler Syndrome* (Kessler dan Cour-Palais, 1978).



Sumber: NASA (2008)

Gambar 4.12 Jumlah efektif benda antariksa buatan di orbit LEO berukuran di atas 10 cm yang diperoleh dari simulasi komputer berdasarkan asumsi tidak ada peluncuran baru

D. Upaya Internasional untuk Memitigasi Dampak Sampah Antariksa

Dunia telah melakukan berbagai upaya untuk meminimalkan dampak negatif berupa kerugian dan kerusakan yang dimungkinkan oleh sampah antariksa dan untuk menjamin bahwa misi keantariksaan akan terus bisa berlangsung di masa depan. Upaya-upaya tersebut dapat dikelompokkan ke dalam tiga kategori yakni melakukan mitigasi (pencegahan), remediasi (pengobatan), dan pemantauan (*monitoring*) pada populasi sampah antariksa. Sejak tahun 1994 sampah antariksa telah menjadi agenda khusus di *Scientific and Technical Subcommittee* (STSC) PBB yang bersidang sekali setiap tahun. Sidang terakhir STSC adalah sidang ke-61 yang berlangsung pada 29 Januari hingga 9 Februari 2024.

1. Pedoman-Pedoman Mitigasi (*Mitigation Guidelines*)

Mitigation guidelines berisi seperangkat pedoman mitigasi yang pembahasannya sudah dimulai sejak tahun 1980an. Sejauh ini beberapa negara dan organisasi telah menempuh cara ini di antaranya Amerika Serikat, Rusia, Jepang, dan European Space Agency (ESA). PBB pun membuat pedoman sendiri yang diterima secara resmi pada tahun 2007 untuk secara sukarela diimplementasikan oleh negara-negara anggotanya. Pedoman ini berdasarkan pedoman-pedoman yang sudah dikembangkan oleh berbagai negara dan organisasi dengan memperhitungkan perjanjian-perjanjian dan prinsip-prinsip PBB di bidang antariksa.

Pedoman yang dibuat oleh PBB terdiri dari tujuh poin (UNOOSA, 2010) sebagai berikut.

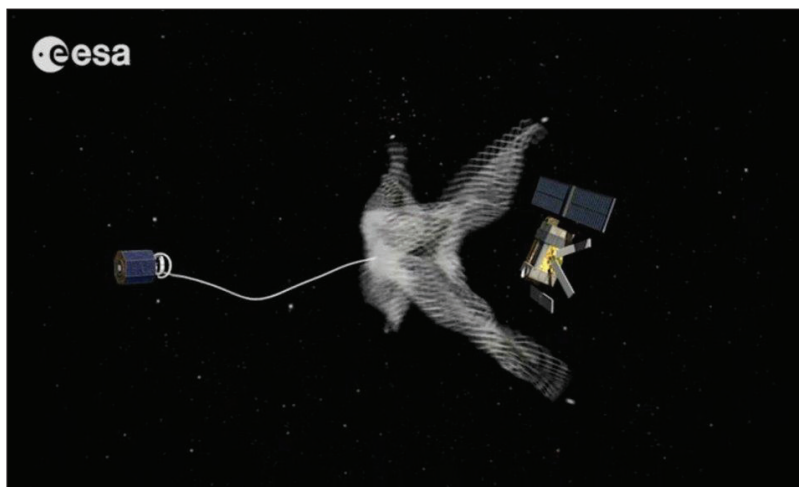
- 1) membatasi sampah yang dihasilkan dari operasi normal (*mission-related debris*);
- 2) meminimalkan potensi terjadinya ledakan (*break-ups*) selama benda beroperasi;
- 3) membatasi peluang terjadinya tabrakan yang tidak disengaja di orbit;

- 4) menghindari penghancuran benda antariksa dan aktivitas lain yang membahayakan di orbit;
- 5) meminimalkan potensi terjadinya ledakan (*break-ups*) setelah benda beroperasi;
- 6) membatasi jangka waktu satelit dan roket bekas berada di orbit rendah (LEO) setelah benda-benda tersebut selesai beroperasi; dan
- 7) membatasi jangka waktu satelit dan roket bekas berada di orbit geosinkron (GEO) setelah benda-benda tersebut selesai beroperasi.

Hingga kini, mitigasi sampah antariksa sudah memberikan banyak hasil. Ini tampak dari jumlah *mission-related debris* yang cenderung tetap sejak tahun 1986 kendati jumlah satelit terus bertambah.

2. Remediasi (*Remediation*)

Namun, studi teoritis yang dilakukan sejak tahun 2005 menunjukkan bahwa mitigasi saja tidak akan cukup untuk menstabilkan pertumbuhan jumlah sampah antariksa karena jumlahnya akan terus meningkat bahkan sekalipun tidak ada peluncuran satelit baru lagi. Oleh karena itu, tindakan lain perlu dilakukan yakni melalui remediasi (pengobatan) pada populasi sampah antariksa. Hal itu dilakukan dengan cara mengambil sampah (khususnya di orbit rendah) yang menjadi target untuk dijatuhkan ke Bumi. Tindakan tersebut penting untuk dilakukan karena bersifat lebih nyata dan tegas sehingga dinamakan juga *active debris removal* (ADR). Hingga saat ini sudah banyak konsep yang diusulkan untuk misi ADR, misalnya dengan menggunakan satelit khusus yang memiliki lengan robotik untuk menangkap sampah yang ditarget lalu menariknya ke atmosfer. Metode lain adalah menggunakan jaring yang dilemparkan ke target untuk membungkusnya kemudian satelit yang terhubung dengan tali (*tether*) menariknya ke atmosfer (Gambar 4.13). Akan tetapi, berbeda dengan mitigasi sampah antariksa yang sudah berjalan selama puluhan tahun



Sumber: European Space Agency (2013)

Gambar 4.13 Ilustrasi remediasi dengan menggunakan jaring dan tali untuk menjatuhkan sampah antariksa.

dan sudah memberikan hasil yang signifikan, remediasi masih dalam tahap percobaan hingga saat ini.

Sebagaimana umumnya penyakit, remediasi sampah antariksa lebih sulit dilakukan daripada mitigasi. Setiap konsep yang ditawarkan untuk ADR bukan hanya harus layak secara teknis tapi juga terjangkau secara ekonomi dan bisa diterima secara politis oleh masyarakat internasional. Aspek politis ini penting diperhitungkan karena kemampuan mengambil sampah bisa saja disalahgunakan misalnya dengan diam-diam mengambil satelit pihak lain atau mengacaukan misinya.

3. Pemantauan Sampah Antariksa (*Monitoring*)

Mitigasi dan remediasi hanya bisa dilakukan secara efektif jika populasi dan karakteristik sampah antariksa kita ketahui dengan baik. Untuk itu, kemampuan untuk melakukan pengamatan dan pemantauan perlu selalu diperkuat. Saat ini semakin banyak institusi yang mampu melakukan pengamatan sendiri satelit dan sampah antariksa di berbagai negara, termasuk Indonesia (diterangkan di

Buku ini tidak diperjualbelikan.

bagian akhir bab ini). Dengan demikian maka jaringan pengamatan sampah antariksa internasional pada dasarnya bisa diwujudkan. Hal ini akan sangat mendukung kelengkapan dan akurasi data orbit dan sikap benda-benda antariksa buatan yang diperlukan dalam rangka *space situational awareness*⁸.

E. Sampah Antariksa yang Jatuh di Indonesia

Setiap benda antariksa yang mengitari Bumi selalu melewati ekuator dalam satu kali revolusinya. Dengan demikian maka otomatis Indonesia yang memiliki wilayah terpanjang di ekuator (lebih dari 5000 km) menjadi negara yang secara umum berpeluang besar untuk kejatuhan benda antariksa yang mengalami *reentry*. Hingga saat ini ada tujuh buah sampah antariksa yang ditemukan jatuh di wilayah Indonesia (Djamaluddin, 2021). Dua di antaranya ditunjukkan pada Gambar 4.14.



Sumber: Sumber: Djamaluddin (2021)

Gambar 4.14 Sampah antariksa bekas tabung bahan bakar roket Uni Sovyet/Rusia yang jatuh di Gorontalo 1981 (kiri) dan di Lampung 1988 (kanan).

⁸ *Space situational awareness* (SSA) adalah pengetahuan, karakterisasi, dan praktik penjejakan benda-benda antariksa dan lingkungan tempatnya beroperasi.

Berikut daftar sampah antariksa yang ditemukan di Indonesia dan telah diidentifikasi.

1. Sampah antariksa yang jatuh di Gorontalo tahun 1981
Tabung bahan bakar roket jatuh di Gorontalo pada 16 Maret 1981. Dari analisis orbit disimpulkan bahwa objek tersebut adalah bagian roket SL-8 milik Uni Sovyet/Rusia dengan nomor katalog 11610. Roket ini digunakan untuk meluncurkan satelit INTERCOSMOS 20 pada 1 November 1979.
2. Sampah antariksa yang jatuh di Lampung tahun 1988
Tabung bahan bakar bekas roket jatuh di Lampung pada 16 April 1988. Dari analisis orbit disimpulkan bahwa benda jatuh tersebut adalah bagian roket SL-4 milik Uni Sovyet/Rusia dengan nomor katalog 19042. Roket ini digunakan untuk meluncurkan satelit COSMOS 1938 pada 11 April 1988.
3. Sampah antariksa yang jatuh di Bengkulu tahun 2003
Pada 13 Oktober 2003 ada laporan benda jatuh di Bengkulu. Dari analisis orbit disimpulkan bahwa benda jatuh tersebut adalah pecahan roket CZ-3 milik RRT dengan nomor katalog 23416. Roket ini digunakan untuk meluncurkan satelit DFH-3 1 pada 29 November 1994.
4. Sampah antariksa yang jatuh di Madura tahun 2016
Beberapa objek antariksa jatuh di perairan Madura pada 26 September 2016. Dari analisis orbit disimpulkan bahwa benda jatuh tersebut adalah bagian roket Falcon 9 dengan nomor katalog 41730 milik Space X Amerika Serikat. Roket itu digunakan untuk meluncurkan satelit JCSAT 16 pada 14 Agustus 2016.
5. Sampah antariksa yang jatuh di Sumatera Barat tahun 2017
Pada 18 Juli 2017 ada dua objek antariksa jatuh di dua lokasi berbeda di Sumatera Barat. Dari analisis orbit disimpulkan bahwa kedua objek tersebut berasal dari pecahan roket CZ-3A dengan nomor katalog 31116 milik RRT. Roket digunakan untuk meluncurkan satelit Beidou M1 pada 13 April 2017.

6. Sampah antariksa yang jatuh di Kalimantan Tengah tahun 2021
Sebuah objek berlogo CNSA (*Chinese National Space Administration*) ditemukan warga pada 4 Januari 2021. Semula objek tersebut diduga bagian roket RRT yang melintas wilayah tersebut saat jatuh awal Januari. Namun, setelah gambar lengkap diperoleh dan didukung konfirmasi dari CNSA, disimpulkan bahwa objek tersebut adalah *payload fairing* (pelindung muatan satelit) roket Long March/CZ-8 milik RRT. Roket LM/CZ-8 diluncurkan pada 22 Desember 2020 dan bagian *fairing* dilepaskan sebelum roket mencapai orbit dan jatuh di perairan dekat Selat Karimata. Arus laut membawa objek yang relatif ringan tersebut ke Selat Karimata lalu Laut Jawa dan terdampar di pantai Kalimantan Tengah.
7. Sampah antariksa yang jatuh di Sanggau, Kalimantan Barat tahun 2022

Pada 30 Juli 2022 dikabarkan sampah antariksa berkode CZ-5B milik RRT akan segera jatuh. CZ-5B adalah bekas roket peluncur modul stasiun antariksa RRT yang diluncurkan pada 24 Juli 2022. Malam itu Tim Pusat Riset Antariksa BRIN terus memantau lintasan akhir orbit CZ-5B yang melalui Indonesia. Akhirnya diperoleh konfirmasi dari USSPACECOM di Space-Track bahwa objek telah jatuh di samudera Hindia pada pukul 23.45 WIB.

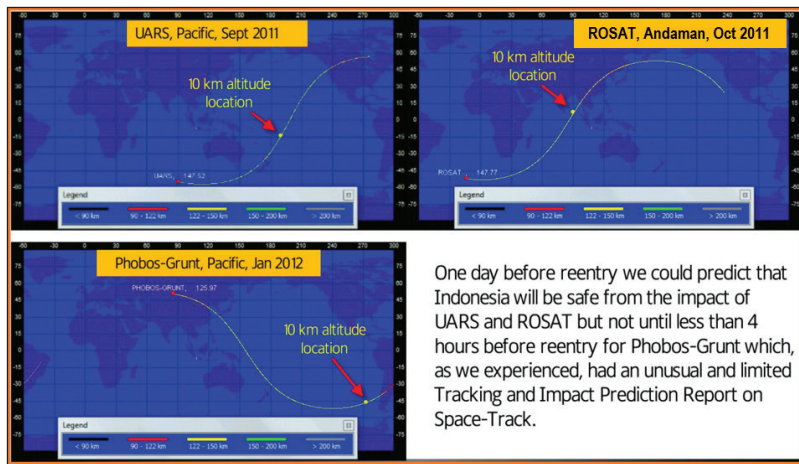
F. Peran Indonesia

1. Peran Pemerintah dan Swasta

Pemerintah melalui Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)⁹ telah melakukan pemantauan dan identifikasi benda jatuh antariksa yang berpotensi jatuh di Indonesia sejak awal milenium ini (Djamaluddin, 2004). Hal itu dilakukan dengan mengidentifikasi benda-benda yang ditemukan di beberapa lokasi di Indonesia dan memantau jatuhnya beberapa sampah antariksa. Pada awal tahun 2000-an hingga 2008 pemantauan dilakukan menggunakan data dan program komputer yang tersedia di internet. Pada tahun 2009 LAPAN

⁹ Sejak 2021 LAPAN bersama beberapa badan dan lembaga negara yang lain berintegrasi ke Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).

mulai mengembangkan program komputer sendiri yang dinamakan Track-it memakai data orbit dari Space-Track dan SGP4 Pascal Library dari Celestrak¹⁰ yang berisi kode program untuk mengolah data orbit yang telah diperoleh (Rachman, 2010). Track-it digunakan sejak 2010 untuk melakukan pemantauan virtual secara otomatis terhadap benda-benda antariksa buatan yang diperkirakan berpotensi jatuh di wilayah Indonesia. Meskipun demikian, Track-it sebenarnya mampu memantau potensi jatuh benda di seluruh dunia. Track-it juga mendukung pengoperasian secara manual seperti umumnya program-program penjejak satelit yang tersedia di internet. Situs web pun dikembangkan sebagai media diseminasi hasil pemantauan dan informasi-informasi mendasar tentang benda jatuh antariksa dan bagaimana peran pemerintah dalam menanggapi isu itu (Neflia et al, 2010). Gambar 4.15 menunjukkan beberapa kasus pemantauan yang menggunakan Track-it.



Sumber: Rachman (2014)

Gambar 4.15 Pemantauan benda jatuh antariksa yang dilakukan pemerintah Indonesia setelah tahun 2010. Ketiga benda antariksa yang dipantau ini berbobot beberapa ton ketika *reentry*.

¹⁰ Celestrak adalah situs web yang menyediakan data dan sumber daya lainnya secara gratis dan beralamat di www.celestrak.org.

Riset untuk pengamatan satelit pertama kali dilakukan pada tahun 2014 dengan tujuan untuk mengurangi ketergantungan data orbit dari pihak luar dan meningkatkan akurasi hasil analisis orbit yang dilakukan oleh pemerintah terkait dengan isu benda jatuh antariksa. Pada riset yang diarahkan pada aspek astrometri dan fotometri ini, pengamatan medan lebar dilakukan dengan binokuler dan kamera digital, sedangkan pengamatan medan sempit dilakukan memakai teleskop dengan kedudukan ekuatorial. Dari penelitian tersebut, diperoleh hasil yang cukup memuaskan pada sistem dengan kamera digital, berbeda halnya dengan sistem dengan binokuler dan teleskop (Dani et al, 2015).

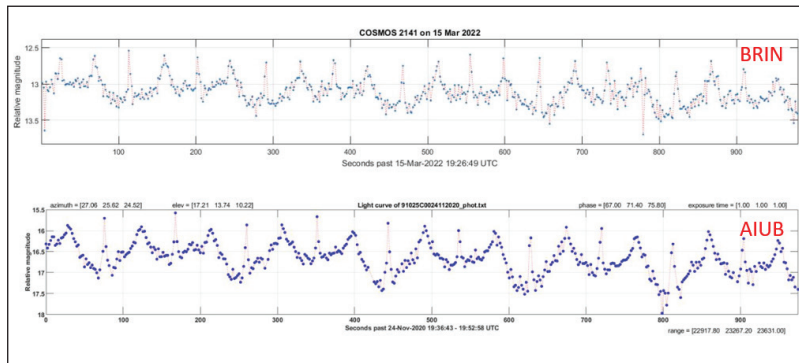
Riset yang memakai teleskop untuk mengamati satelit dan sampah antariksa kembali dilakukan setelah tahun 2020 menggunakan teleskop-teleskop yang dipasang di Kab. Kupang, NTT. Teleskop-teleskop ini adalah bagian dari Observatorium Nasional Timau. Diperoleh hasil yang cukup memuaskan baik dari aspek astrometri (Dio et al, 2022) maupun fotometri (Rachman et al, 2023). Teleskop-teleskop yang dipakai berukuran 10 hingga 50 cm dan diletakkan di dalam sebuah kubah dengan model *clamshell* (Gambar 4.16). Dari astrometri diperoleh prototipe untuk *pipeline* yang bisa dipakai untuk



Foto: Koleksi BRIN Kupang

Gambar 4.16 Sebagian dari instrumen yang digunakan untuk pengamatan satelit dan sampah antariksa oleh pemerintah Indonesia sejak tahun 2020.

mendeteksi secara otomatis jejak satelit yang terdapat di citra lalu mengidentifikasi objeknya dan selanjutnya menentukan bagaimana orbit awalnya. Adapun dari fotometri, telah berhasil diperoleh kurva cahaya¹¹ yang cukup representatif sebab profilnya bersesuaian dengan kurva cahaya yang diperoleh dari sistem yang sudah mapan dengan ukuran teleskop yang jauh lebih besar seperti terlihat pada Gambar 4.17. Kurva cahaya selanjutnya dianalisis untuk mengetahui sikap (*attitude*) benda yang diamati yang informasinya penting dalam upaya mitigasi maupun *on-orbit servicing*. Rencananya, teleskop 3.8 meter di Observatorium Nasional Timau juga akan digunakan untuk pengamatan khusus satelit dan sampah antariksa. Pengamatan rutin akan dilakukan memakai teleskop-teleskop yang lebih kecil. Dengan keunikan lokasi dan langitnya yang tergolong sangat cerah, Observatorium Nasional Timau diharapkan akan melengkapi observatorium-observatorium astronomi lainnya di permukaan bumi (Priyatikanto et al, 2023).



Keterangan: Menggunakan teleskop berukuran 20 cm milik BRIN di Kupang (atas); teleskop berukuran 1 meter milik Astronomical Institute of University of Bern (AIUB) di Swiss (bawah).

Sumber: Rachman et al. (2023)

Gambar 4.17 Perbandingan kurva cahaya satelit COSMOS 2141

¹¹ Kurva cahaya adalah grafik perubahan kecerlangan suatu benda terhadap waktu.

Selain melalui pemantauan dan pengamatan sampah antariksa, para operator satelit geostasioner di Indonesia yang sebagian adalah perusahaan swasta juga turut berperan dalam mitigasi melalui disposal satelit-satelit mereka yang sudah habis masa kerjanya. Secara keseluruhan, meskipun ada beberapa kasus kegagalan, operator satelit di Indonesia umumnya berupaya untuk mematuhi pedoman internasional dan meningkatkan praktik manajemen satelit mereka.

2. Potensi Perguruan Tinggi

Dengan dimungkinkannya penggunaan teleskop kecil untuk pengamatan satelit dan sampah antariksa, maka diharapkan akan banyak perguruan tinggi-perguruan tinggi di Indonesia yang bisa turut berkontribusi. Selain itu, teleskop kecil lebih fleksibel dalam pengoperasian dan pemeliharaannya yang membuatnya ideal untuk institusi pendidikan yang memiliki sumber daya terbatas. Dewasa ini telah cukup banyak perguruan tinggi di Indonesia yang memiliki teleskop dengan dukungan yang mampu menjejak bintang dengan baik dan dilengkapi dengan kamera astronomi bersensor CCD atau CMOS.

Di masa depan bisa dibangun sebuah jaringan pengamatan yang terdiri dari stasiun-stasiun pengamatan antariksa milik pemerintah (dalam hal ini BRIN) yang didukung oleh teleskop-teleskop kecil milik perguruan tinggi. Dengan lokasi perguruan tinggi yang tersebar di berbagai daerah di Indonesia, maka teleskop-teleskop ini pun bisa berada di tiga zona waktu yang berbeda (WIB-WITA-WIT) seperti halnya stasiun-stasiun milik pemerintah sehingga bisa saling menguatkan. Penempatan teleskop-teleskop di ketiga zona waktu di Indonesia akan memperbesar peluang keberhasilan pengamatan terhadap target tertentu yang bergerak cepat di orbit rendah (Gambar 4.18). Selain itu hal tersebut akan memungkinkan untuk melakukan pengamatan secara simultan atas suatu target dari lokasi yang berbeda hingga ribuan kilometer.

Penggunaan jejaring teleskop ini juga memungkinkan perguruan tinggi untuk berpartisipasi dalam proyek penelitian global dan kolaboratif. Mahasiswa dan peneliti dapat terlibat langsung dalam proses



Sumber: Rachman (2023)

Gambar 4.18 Wilayah geografis Indonesia yang lebar di sepanjang ekuator memungkinkan dilakukannya pengamatan dalam tiga periode orbit secara berturut-turut atas suatu benda di orbit rendah yang melintasi Indonesia.

pengumpulan dan analisis data, memberikan mereka pengalaman praktis yang berharga dalam bidang astronomi dan sains antariksa. Hal ini juga membuka peluang untuk penelitian antardisiplin, menggabungkan keahlian dari berbagai bidang studi untuk memahami lebih baik tentang sampah antariksa dan dampaknya. Dengan meningkatnya jumlah sampah antariksa, penting untuk mengembangkan metode yang efektif untuk memantau dan melacak objek-objek ini. Jejaring teleskop kecil dapat memberikan data penting yang diperlukan untuk mendukung upaya mitigasi risiko tumbukan antara sampah antariksa dengan satelit aktif di orbit Bumi. Data ini tidak hanya berguna untuk kepentingan ilmiah tetapi juga untuk keamanan satelit komersial dan misi antariksa berawak seperti sudah dibahas sebelumnya.

Pendidikan dan kesadaran tentang sampah antariksa juga dapat ditingkatkan melalui penggunaan jejaring teleskop ini. Perguruan tinggi dapat mengintegrasikan pengamatan sampah antariksa ke dalam kurikulum mereka dengan memberikan mahasiswa pemahaman yang lebih mendalam tentang isu-isu lingkungan antariksa dan tanggung jawab kita dalam menjaga keberlanjutan ruang angkasa. Perguruan tinggi di Indonesia yang mencetak calon guru, atau yang dikenal sebagai Lembaga Pendidikan Tenaga Kependidikan (LPTK) seperti halnya Universitas Pendidikan Indonesia di Bandung Jawa Barat, memiliki peran penting dalam mendidik generasi mendatang tentang pentingnya pengamatan sampah antariksa. Melalui kurikulum yang dirancang dengan baik, calon guru dapat dibekali dengan pengetahuan dan keterampilan untuk mengajarkan topik ini kepada para siswa kelak. Ini akan menciptakan kesadaran sejak dini tentang dampak sampah antariksa dan pentingnya upaya global dalam mengatasi masalah ini, yang pada gilirannya akan membentuk sikap bertanggung jawab terhadap lingkungan antariksa bagi generasi mendatang.

Terbukanya peluang untuk melakukan pengamatan dengan teleskop kecil juga bisa menginspirasi perguruan tinggi-perguruan tinggi untuk merancang dan membangun sistem pengamatan sendiri. Salah satu perguruan tinggi yang telah memperoleh hasil awal adalah Institut Teknologi Sumatera (ITERA). Observatorium Astronomi ITERA Lampung (OAIL) berkomitmen untuk memajukan penelitian astronomi di Indonesia melalui pengembangan instrumen pemantau langit yang mumpuni. Berikut adalah beberapa instrumen yang telah dan sedang dikembangkan di OAIL.

1. Allsky Camera (Gambar 4.19)

- OAIL memiliki dua *allsky camera*; satu terletak di OZT-ALTS dan satu lagi di ITERA Robotic Telescope (IRT).
- Kamera di OZT-ALTS dilengkapi dengan lensa *fisheye* 180 derajat dan kamera DSLR, yang dipantau menggunakan komputer berbasis Windows.

- Kamera di IRT memiliki lensa *fisheye* 170 derajat dan kamera CMOS, yang dipantau menggunakan komputer berbasis Raspberry Pi. Instrumen ini juga dilengkapi dengan peralatan tambahan untuk mengukur kondisi atmosfer, termasuk kecerlangan langit, kelembapan, suhu udara dan langit, arah dan kecepatan angin, serta sensor hujan.
- Kedua kamera ini merupakan bagian dari jaringan allskycam.or.id yang memungkinkan pertukaran data pemantauan langit antar anggota.

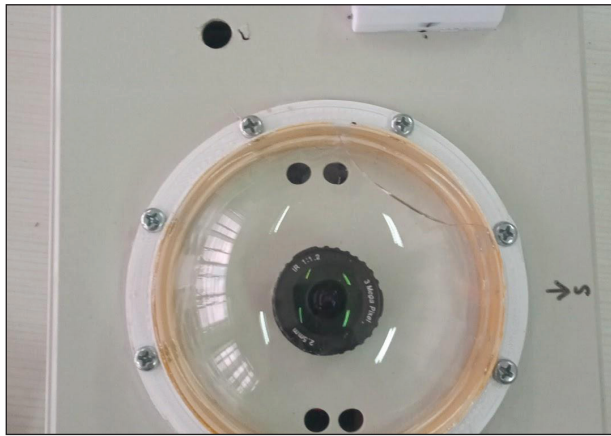


Foto: Dok. OAIL (2024)

Gambar 4.19 Allsky camera yang dikembangkan di ITERA.

2. ITERA Robotic Telescope (IRT) (Gambar 4.20)

- IRT adalah teleskop yang dikembangkan sistem otomasinya untuk mengamati objek langit dengan kemampuan penjejakan (*tracking*) satelit atau sampah antariksa.
- IRT menggunakan teleskop jenis Ritchey-Chretien yang memiliki cermin utama diameter 25 cm dengan panjang fokus 2000mm. IRT menggunakan kamera CMOS yang memiliki resolusi tinggi dan rentang dinamis yang lebar sehingga mampu melakukan pengamatan fotometri dan astrometri yang akurat.

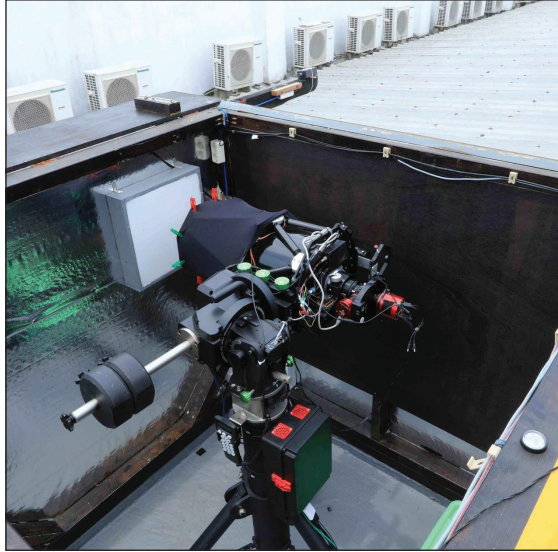


Foto: Dok. OAIL (2023)

Gambar 4.20 ITERA Robotic Telescope (IRT).

3. Ultra Compact ITERA Robotic Telescope III (Utopia III) (Gambar 4.21)
 - Utopia III adalah generasi ketiga dari seri Utopia yang dirancang sebagai *portable mount* sehingga mudah dibawa dan digunakan.
 - Dengan dudukan teleskop yang dapat bergerak cepat (12° per detik), sensor CMOS sensitif, dan teleskop kecil dan ringan (refraktor berdiameter 80 mm, panjang fokus 300mm), Utopia III efektif untuk penjejakan satelit yang cukup terang.
 - Utopia III juga telah berhasil melakukan pengamatan fotometri dengan hasil yang memuaskan.
4. Asteroid Sky Survey ITERA (ASTI)
 - ASTI adalah instrumen yang masih dalam tahap pengembangan dengan tujuan melakukan survei langit secara luas.

- Dengan teleskop 8 inci dan kamera CMOS sensitif, serta program *pipeline* pengamatan terintegrasi, ASTI diharapkan dapat menyediakan data fotometri dan astrometri asteroid yang akurat.
- Pengembangan *pipeline* dan database pengamatan menjadi fokus utama untuk mendukung misi ini.

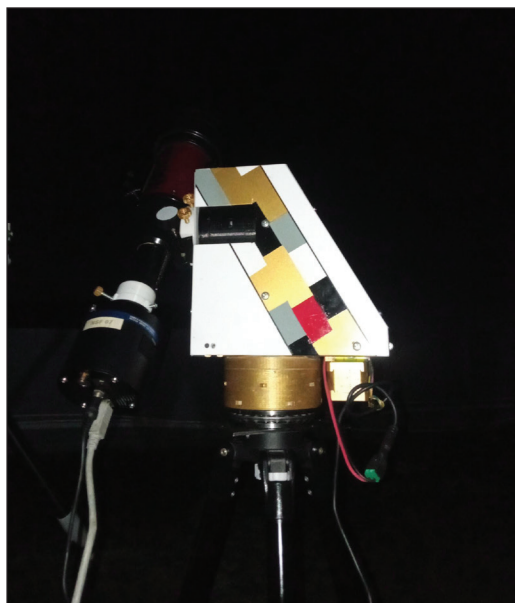


Foto: Dok. OAIL (2024)

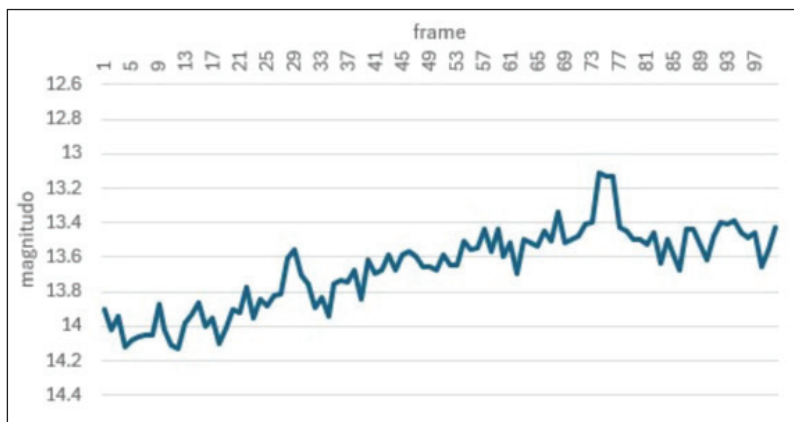
Gambar 4.21 Utopia III untuk pengamatan satelit.

Pada 9 Mei 2024 Utopia III berhasil dipakai untuk mengamati 2nd *stage booster* dari salah satu roket FALCON 9. Salah satu citra yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 4.22. Gambar 4.23 menunjukkan kurva cahaya yang dihasilkan. Hasil ini adalah hasil awal sehingga belum bisa dipandang sebagai representasi kondisi benda yang diamati.



Foto: Dok. OAIL (2024)

Gambar 4.22 Contoh citra hasil pengamatan sampah antariksa dengan Utopia III yang diamati pada 9 Mei 2024. Terlihat benda yang diamati dan diikuti gerakannya yakni 2nd stage booster dari salah satu roket FALCON 9 berbentuk titik sedangkan bintang-bintang berbentuk garis. Waktu paparan yang digunakan adalah 1 detik.



Sumber: Dok. OAIL (2024)

Gambar 4.23 Kurva cahaya 2nd stage booster dari FALCON 9 yang diamati pada 9 Mei 2024 dengan Utopia III. Durasi pengamatan adalah 100 detik.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

OAIL berharap agar instrumen-instrumen di atas tidak hanya akan meningkatkan kapasitas penelitian astronomi di ITERA tetapi juga dapat menjadi model bagi institusi lain untuk bergabung dalam usaha pemantauan langit bersama. Keberhasilan ini akan membuka jalan bagi kolaborasi ilmiah yang lebih luas dan kontribusi signifikan pada komunitas astronomi global.

G. Penutup

Sampah antariksa menjadi isu internasional akibat dampaknya pada misi luar angkasa, keselamatan penerbangan, keselamatan manusia dan properti di permukaan bumi, serta pengamatan astronomi. Dampak utamanya adalah risiko yang ditimbulkan jika bertabrakan dengan satelit-satelit yang masih beroperasi dan risiko pada keselamatan astronot terutama yang sedang melakukan misi di luar wahana. Dampak lainnya adalah risiko yang ditimbulkan jika jatuh ke Bumi yang bisa menimbulkan kerusakan pada pesawat terbang, properti, dan ancaman pada jiwa selain potensi kerusakan pada atmosfer. Dampak lainnya lagi adalah gangguan sampah antariksa (dan satelit) pada pengamatan astronomi baik yang dilakukan di antariksa (melalui potensi tabrakan) maupun yang dilakukan di permukaan bumi (melalui jejak yang ditimbulkannya pada citra hasil pengamatan maupun melalui efeknya pada kejernihan langit serta derau elektromagnetik yang mungkin muncul).

Pengetahuan kita tentang populasi dan karakteristik sampah antariksa diperoleh melalui pengamatan menggunakan radar dan teleskop optik serta alat pengukur yang diluncurkan ke luar angkasa. Dari pemantauan yang dilakukan selama ini diketahui adanya kecenderungan bahwa jumlah sampah antariksa dan satelit aktif yang mengorbit Bumi selalu meningkat. Orbit rendah (ketinggian di bawah 2000 km) adalah daerah orbit yang paling padat dan paling dinamis dibanding daerah orbit lainnya yang lebih tinggi. Belakangan ini, maraknya peluncuran satelit-satelit CubeSat dan proyek megakonstelasi satelit LEO yang dimulai sejak 2019 sangat berpengaruh pada dinamika tersebut. Diperkirakan bahwa berbagai dampak akibat

sampah antariksa akan terus meningkat seiring dengan semakin bertambahnya jumlah satelit dan akibat sampah antariksa itu sendiri. Hingga Desember 2023, jumlah benda antariksa berukuran di atas 10 cm diperkirakan telah mencapai 36500; antara 1 hingga 10 cm mencapai 1 juta; dan antara 1 mm hingga 1 cm mencapai 130 juta.

Dunia tentu saja tidak tinggal diam dalam menghadapi isu sampah antariksa. Oleh karena itu, berbagai upaya, baik dengan membuat pedoman-pedoman mitigasi maupun merencanakan remediasi melalui *active debris removal* serta pemantauan populasi sampah antariksa serta studi karakterisasinya, telah banyak dilakukan. Langkah mitigasi telah memberikan hasil yang signifikan dalam mengurangi laju penambahan jumlah sampah antariksa. Namun, langkah remediasi masih dalam tahap studi dan percobaan. Di bidang pemantauan, telah semakin banyak institusi di berbagai negara yang mampu melakukan pengamatan sendiri satelit dan sampah antariksa. Indonesia telah beberapa kali terdampak oleh sampah antariksa yang jatuh ke permukaan bumi dan sudah turut berperan aktif melakukan pengamatan sampah antariksa melalui pemerintah dan swasta. Diharapkan kelak peran ini dilakukan juga oleh perguruan tinggi yang tersebar di seluruh Indonesia yang saat ini telah mulai memperlihatkan hasil.

Berdasarkan pemaparan yang sudah diberikan dalam tulisan ini, penulis memberikan beberapa rekomendasi.

1. Semua negara yang melakukan aktivitas keantariksaan, terutama yang terdaftar sebagai anggota PBB, sedapat mungkin mematuhi pedoman-pedoman mitigasi yang sudah dibuat oleh lembaga tersebut.
2. Sebagai negara yang makin banyak terlibat dengan aktivitas keantariksaan, Indonesia perlu mempelajari dan aktif berperan dalam pemantauan populasi sampah antariksa dan karakterisasinya. Agar lebih efektif, kegiatan ini sebaiknya dilakukan melalui kerja sama dengan negara-negara lain terutama yang sudah lebih maju dalam bidang ini. Berbagai alat pengamatan di Observatorium Nasional Timau termasuk instrumen utamanya (berupa teleskop dengan cermin berdiameter 3.8 m) dapat digunakan dalam kerja sama tersebut.

3. Pemerintah Indonesia perlu lebih aktif mendorong pihak swasta dan perguruan tinggi di Indonesia untuk terus berperan dan meningkatkan kompetensinya dalam rangka memitigasi dampak sampah antariksa. Isu kurangnya periset terampil yang sering kali dihadapi dalam riset keantariksaan di dalam negeri diharapkan bisa teratasi melalui kerja sama yang erat antara pemerintah, swasta, dan perguruan tinggi.

Daftar Pustaka

- Barentine, J. C., Venkatesan, A., Heim, J., Lowenthal, J., Kocifaj, M., & Bará, S. (2023). Aggregate effects of proliferating low-Earth-orbit objects and implications for astronomical data lost in the noise. *Nature Astronomy*, 7(3), 252-258.
- Cohen, A. F. (1984). Cosmos 954 and the international law of satellite accidents. *Yale Journal of International Law*, 10(1), 78.
- Danarianto M. D., Maharani A. M., Falah B. M. and Rohmah F. (2022). Proc. The Int. Symp. on Space Science (Indonesia) (IOP Publishing).
- Dani, T., Rachman, A., Priyatikanto, R., & Religia, B. (2015). Instrumentation development for space debris optical observation system in Indonesia: Preliminary results. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1677, No. 1). AIP Publishing.
- Djamaluddin, T. (2004). Analisis Orbit dan Identifikasi Benda Jatuh Antariksa di Indonesia, Prosiding Seminar Nasional Sains Antariksa II, hlm. 297-301, 2004.
- Djamaluddin, T. (2021). Dokumentasi Benda Jatuh Antariksa di Indonesia, <https://tdjamaluddin.com/2021/01/10/dokumentasi-benda-jatuh-antariksa-di-indonesia/> , diakses pada Juni 2024.
- European Space Agency. (2013, 25 April). Global experts agree action needed on space debris. https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/Global_experts_agree_action_needed_on_space_debris
- Huwaidaa F. A & A. Rachman (2023). *Understanding the pattern of space objects number of reentries since the beginning of the space age*, Prosiding ICMNS 2023.
- Kelso, T.S. (2024). Celestrak. <http://celestrak.org/>
- Kessler, D. J., dan B. G. Cour-Palais (1978). Collision frequency of artificial satellites: The creation of a debris belt, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 83 (A6), 2637–2646.

- Kocifaj, M., Kundracik, F., Barentine, J. C., & Bará, S. (2021). The proliferation of space objects is a rapidly increasing source of artificial night sky brightness. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 504(1), L40–L44.
- Liou, J.-C., dan N. L. Johnson (2008), Instability of the present LEO satellite populations, *Advances in Space Research*, 41 (7), 1046–1053.
- Möller, A. (2020, 210 April). Überflug der Starlink 5 Satelliten am 20.04.2020 aufgenommen aus Berlin. Wikimedia Commons. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Starlink-5.jpg>
- Mumpuni, E. S., Admiranto, A. G., Priyatikanto, R., Puspitarini, L., Nurzaman, M. Z., Mumtahana, F., ... & Tanesib, J. L. (2017). Selayang Pandang Observatorium Nasional Timau.
- Murphy, D. M., et al. (2023). Metals from spacecraft reentry in stratospheric aerosol particles, *PNAS* Vol. 120, No. 43.
- NASA. (t.t.). Photo gallery. Orbital Debris Program Office. Diakses pada 21 Oktober 2025 dari <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/photo-gallery/>
- NASA ODPO (1996a). Major satellite breakup in June, *Orbital Debris Quarterly News*, Volume 1, Issue 2.
- NASA ODPO (1996b). First natural collision of cataloged earth satellites, *Orbital Debris Quarterly News*, Volume 1, Issue 2.
- NASA ODPO (2007). Chinese anti-satellite test creates most severe orbital debris cloud in history, *Orbital Debris Quarterly News*, Volume 11, Issue 2.
- NASA (2008). Handbook for Limiting Orbital Debris, NASA, Washington, DC 20546, NASA-Handbook 8719.14.
- NASA. (2012). Hubble space debris damage. USGS. <https://www.usgs.gov/media/images/hubble-space-debris-damage>
- NASA ODPO (2022). History of on-orbit satellite fragmentations - 16th edition, tech. report.
- NASA ODPO (2023). Monthly effective number of objects in earth orbit, *Orbital Debris Quarterly News*, Volume 27, Issue 4.
- NASA ODPO (2023). Effective number of catalog objects per 10-km altitude bin, *Orbital Debris Quarterly News*, Volume 27, Issue 4.
- National Research Council (1995). *Orbital Debris: A Technical Assessment*, The National Academies Press, Washington, DC.

- Neflia, A. R., Rachman, A., Dani, T., & Djamaluddin, T. (2010). Upgrading on Dissemination System for Spacecraft Reentry. In Proceeding of International Workshop on Space Weather in Indonesia (IWSWI).
- Priyatikanto, R., Mumpuni, E. S., Hidayat, T., Saputra, M. B., Murti, M. D., Rachman, A., & Yatini, C. Y. (2023). Characterization of Timau National Observatory using limited in situ measurements. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 518(3), 4073–4083.
- Rachman, A. (2021). Space debris flux on LAPAN satellites during Solar Cycle 25, *J. Phys.: Conf. Ser.* 2214 012020.
- Rachman, A. dan T. Dani (2010). Pengembangan perangkat lunak pemantau otomatis benda jatuh antariksa, *Prosiding Seminar Nasional Sains Antariksa V*.
- Rachman, A. (2014). Space debris mitigation activities in Indonesia, presentasi pada sidang ke-51 Subkomite Ilmiah dan Teknis UNCOPUOS, Wina, 2014.
- Rachman, A. (2023). Monitoring Space Debris from Indonesia, presentasi pada APRSAF-29, Jakarta, September 2023.
- Rachman, A., T. Djamaluddin, dan A. Vananti (2023). Photometric Observation of Defunct Satellites Using Small Telescopes: Preliminary Results, *Prosiding ICMNS 2023*.
- Shara, M. M., & Johnston, M. D. (1986). Artificial Earth satellites crossing the fields of view of, and colliding with, orbiting space telescopes. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 98(606), 814.
- Space Mission Analysis and Design (2005). Microcosm Press & Kluwer Academic Publishers.
- UNOOSA (2010). Space Debris Mitigation Guidelines of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space.
- Vruno, F.D. et al. (2023). Unintended electromagnetic radiation from Starlink satellites detected with LOFAR between 110 and 188 MHz, *A&A* 676, A75. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346374>

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Bab V

Asteroid 99942 Apophis Berpotensi Menabrak Bumi?

Thasman Aditya Singh, Praza Gumilang Kembaren,
David Maulana Raihan, dan Christian Vieri

A. Asteroid Dekat Bumi

Objek-objek di tata surya kita selain planet terdapat juga asteroid dalam berbagai bentuk dan ukuran. Asteroid merupakan objek berbatu yang mengorbit matahari, lebih kecil dari planet terkecil, tetapi lebih besar dari meteoroid (bakal meteor). Asteroid pada umumnya memiliki bentuk yang tidak beraturan karena tidak memiliki gravitasi yang cukup untuk membentuknya menjadi bola. Selain itu, pada dasarnya asteroid memiliki orbit yang cenderung tetap, seperti halnya planet.

Asteroid dapat dianggap sebagai blok penyusun planet (kadang-kadang disebut planetoid atau planet minor). Masih belum jelas mengapa objek-objek di sabuk asteroid (atau sabuk Kuiper) tidak terbentuk menjadi planet, meskipun gravitasi Jupiter diperkirakan memainkan peran penting dalam mengubah orbitnya. Terlepas dari

T. A. Singh, P. G. Kembaren, D. M. Raihan & C. Vieri.

*Institut Teknologi Sumatera (ITERA), e-mail: singhthasman@gmail.com

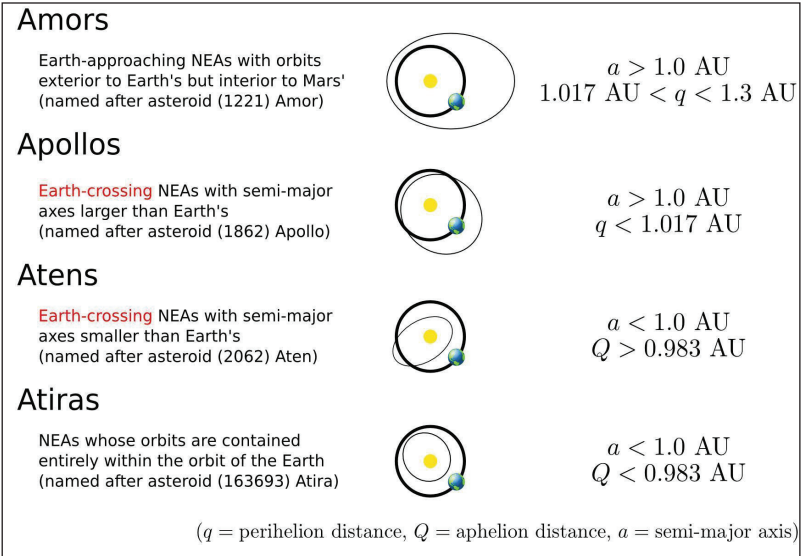
© 2025 Editor & Penulis

Singh, T. A., Kembaren, P. G., Raihan, D. M. & Vieri, C. Asteroid 99942 Apophis Berpotensi Menabrak Bumi?. Dalam T. Djamaluddin & F. Nuraeni (Ed.), *Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi* (147–179). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1425.c1488
E-ISBN: 978-602-6303-86-8

Buku ini tidak diperjualbelikan.

ukurannya, objek-objek ini cenderung tetap berada di orbitnya, jauh dari Bumi. Namun, terkadang, asteroid dan komet didorong oleh gravitasi planet-planet di dekatnya ke orbit yang lebih dekat dengan matahari, sehingga menjadi objek yang mengorbit dekat dengan Bumi. Asteroid yang ‘terdorong’ ini merupakan sebagian kecil dari semua asteroid di tata surya, tetapi jumlahnya cukup banyak. Beberapa asteroid tersebut kemudian dapat menjadi ancaman dan berpotensi menabrak Bumi kita.

Near Earth Asteroid (NEA) atau Asteroid Dekat Bumi merupakan istilah untuk asteroid dengan jarak perihelion $q < 1.3$ Astronomi. Satuan Astronomi adalah satuan jarak di tata surya, yaitu jarak rata-rata bumi-matahari, sekitar 150 juta km. Orbit NEA umumnya tidak stabil dikarenakan sering berpapasan dekat dengan planet di bagian dalam tata surya. Orbitnya tersebar hingga sabuk asteroid utama, di antara planet Mars dan Jupiter. NEA dibagi menjadi beberapa kelompok berdasarkan jarak perihelion (q), jarak aphelion (Q), dan sumbu semimayor (a) seperti terlihat dalam Gambar 5.1.



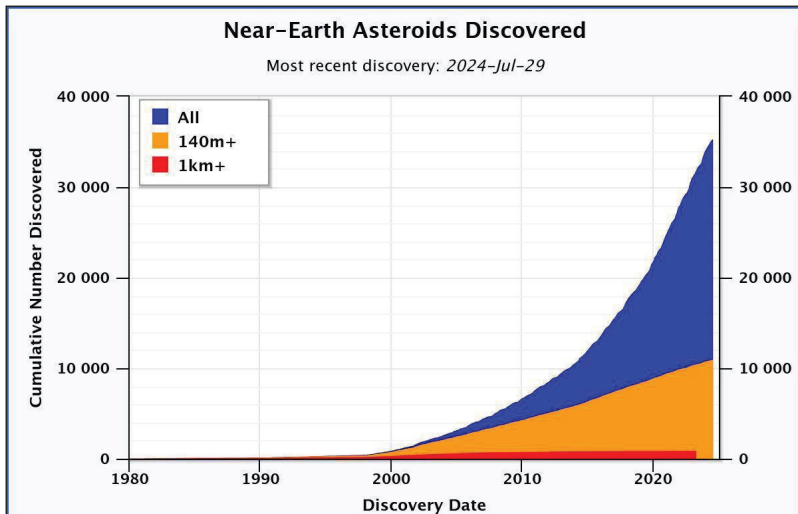
Sumber: NEO Basics (NASA JPL, 2024)

Gambar 5.1 Kelompok Asteroid Dekat Bumi

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Grup Apollo, Asteroid Dekat Bumi dengan sumbu semimayor $a > 1.0$ sa dan jarak perihelion $q < 1.017$ sa. Grup Apollo merupakan asteroid tipe *Earth-crossing* dan dinamakan merujuk asteroid 1862 Apollo (asteroid pertama dengan orbit yang memotong orbit Bumi). Hingga Juli 2024, telah diidentifikasi sebanyak 19.975 asteroid dengan tipe Apollo. Beberapa anggota asteroid dari grup ini adalah: 101955 Bennu, 25143 Itokawa, dan 4179 Toutatis. Grup Amor merupakan Asteroid Dekat Bumi dengan sumbu semimayor $a > 1.0$ sa dan jarak perihelion $1.017 \text{ sa} < q < 1.3$ sa. Grup Amor merupakan asteroid tipe *Earth-approaching* dan dinamakan merujuk asteroid 1221 Amor. Hingga Juli 2024, sebanyak 12461 asteroid tipe Amor telah ditemukan. Beberapa asteroid dari grup ini adalah: 433 Eros, 719 Albert, dan 887 Alinda. Grup Aten adalah asteroid dengan sumbu semimayor $a > 1.0$ SA dan jarak aphelion $Q > 0.983$ sa. Grup Aten bertipe *Earth-crossing*, dinamakan merujuk asteroid 2062 Aten. Sebanyak 2800 asteroid telah diklasifikasikan sebagai grup Aten. Beberapa asteroid dari grup ini adalah: 3753 Cruithne, 524522 Zoosve, dan 99942 Apophis. Grup Atira (dinamakan merujuk asteroid 163693 Atira), asteroid dengan sumbu semimayor $a < 1.0$ sa dan jarak aphelion $Q < 0.983$ sa. Orbit dari grup ini seluruhnya berada di dalam orbit Bumi. Hingga Juli 2024, sebanyak 32 asteroid telah diklasifikasikan sebagai tipe Atira. Beberapa asteroid dari grup ini adalah: 594913 'Aylo'chaxnim, 1998 DK36, dan 2023 WK3. Dalam Gambar 5.2 terlihat adanya peningkatan jumlah kumulatif penemuan Asteroid Dekat Bumi selama 25 tahun terakhir.

Potentially Hazardous Asteroids atau Asteroid Berpotensi Berbahaya (ABB) merupakan asteroid yang berpotensi mengancam Bumi saat berpapasan dekat. ABB didefinisikan sebagai asteroid dengan Jarak Minimum Perpotongan Orbit (MOID) ≤ 0.05 sa ($\leq 7.480.000$ km) dan memiliki magnitudo mutlak (H) ≤ 22 atau asteroid dengan diameter ≥ 140 m (NASA JPL, 2024b). Hingga 14 Juli 2024, sebanyak 35.268 NEA telah ditemukan dengan rincian 12461 tipe Amor, 19975 tipe Apollo, 2800 tipe Aten, dan 32 tipe Atira. Selain itu sebanyak 2422 PHA telah teridentifikasi (NASA JPL, 2024).



Keterangan: Warna merah menunjukkan asteroid berukuran 1 km atau lebih. Warna biru menunjukkan asteroid berukuran 140 meter atau lebih.

Sumber: NASA JPL (2024)

Gambar 5.2 Jumlah kumulatif penemuan Asteroid Dekat Bumi.

NEA penting untuk dipelajari karena sampel NEA memberikan informasi dan petunjuk tentang era pembentukan tata surya. Selain itu, NEA diyakini sebagai bagian dari populasi planetesimal yang masih bertahan sejak tahap awal pembentukan tata surya. Pertama, NEA diyakini sebagai bagian dari populasi planetesimal yang masih bertahan sejak tahap awal pembentukan tata surya. Kedua, NEA penting untuk dipelajari karena berpotensi memberikan dampak signifikan terhadap kehidupan di Bumi, contohnya dalam kasus tabrakan dengan Bumi yang dapat menyebabkan kepunahan besar. Oleh karena itu, informasi tentang NEA ini penting untuk menjadi bahan mitigasi di masa yang akan datang. Ketiga, hasil pembelajaran tentang NEA bisa memberi peluang bagi manusia untuk eksplorasi dan eksploitasi material NEA (*astromining*). Terakhir, NEA penting untuk dipelajari karena merupakan objek yang paling mudah untuk diakses di tata surya (Nolan et al., 2021).

Jatuhnya asteroid ke Bumi dapat menimbulkan kerusakan yang masif berskala global, contohnya peristiwa Chicxulub yang diperkirakan terjadi sekitar 66 juta tahun lalu. Peristiwa tersebut diyakini menjadi penyebab kepunahan dinosaurus dan perubahan iklim global (Rachman, 2015). Di Indonesia sendiri, pada tanggal 8 Oktober 2009, sebuah asteroid kecil yang diperkirakan berdiameter dari 5 hingga 10 meter memasuki lapisan atmosfer bumi dan meledak di atas perairan Teluk Bone, Sulawesi Selatan. Peristiwa ini dikenal sebagai “Ledakan Asteroid Bone” (Rachman, 2010). Peristiwa jatuhnya meteorit terbaru terjadi pada tanggal 28 Januari 2021. Sebuah meteorit jatuh di Punggur, Lampung Tengah. Peristiwa ini menghebohkan warga sekitar karena menimbulkan suara dentuman keras dan kerusakan pada beberapa rumah (Harbowo et al., 2021).

B. Asteroid 99942 Apophis

Asteroid 99942 Apophis merupakan sebuah asteroid pelintas bumi dari kelompok Aten atau Apollo. Asteroid ini telah menarik perhatian astronom dan masyarakat umum sejak penemuannya pada tanggal 19 Juni 2004 oleh para astronom di Kitt Peak National Observatory. Asteroid ini memiliki diameter sekitar 370 meter (Gambar 5.3) dan telah diidentifikasi sebagai salah satu asteroid yang berpotensi untuk menimbulkan ancaman (Valvano et al., 2021) karena berisiko mengalami tabrakan dengan Bumi (Bancelin et al., 2012; Pérez-Hernández & Benet, 2022). Dengan ukurannya yang cukup besar, tabrakan Apophis dengan Bumi memiliki potensi dampak besar dan menjadi ancaman terhadap kehidupan manusia dan ekosistem Bumi. Pada tahun 2004, asteroid ini sempat menimbulkan kekhawatiran besar karena memiliki kemungkinan 2,7% untuk menghantam Bumi pada tahun 2029 (Müller et al., 2014). Meskipun kemungkinan tabrakan pada tahun 2029 telah dieliminasi, asteroid ini masih memiliki kemungkinan tabrakan pada tahun-tahun mendatang, seperti pada tahun 2036 dan 2068 (Pérez-Hernández & Benet, 2022). Untuk prediksi yang lebih akurat, dibutuhkan pemahaman yang lebih baik mengenai perilaku dari orbit pergerakan Apophis untuk dapat mengembangkan strategi mitigasi dan perlindungan terhadap Bumi.



Sumber: ESA (2024)

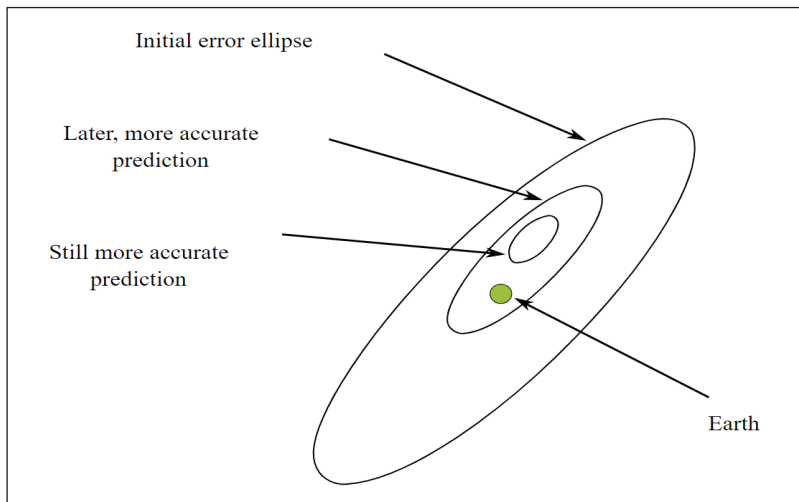
Gambar 5.3 Ilustrasi asteroid 99942 Apophis.

Terdapat berbagai metode yang dapat digunakan astronom untuk memahami dan memprediksi potensi ancaman yang ditimbulkan oleh Apophis, di antaranya simulasi N-Benda. Simulasi tersebut sangat berguna untuk mendapatkan model lintasan dari asteroid di masa depan. Dengan melibatkan faktor seperti gaya gravitasi dan massa, simulasi ini dapat memprediksi kemungkinan tabrakan asteroid dengan Bumi. Informasi tersebut sangat penting untuk mengembangkan strategi mitigasi yang efektif, seperti misi defleksi asteroid atau sistem peringatan dini.

Pada bab ini penulis menjelaskan model simulasi N-benda lintasan asteroid 99942 Apophis selama rentang waktu integrasi, yakni sekitar 100 tahun ke depan, dan memprediksi lintasan orbit yang akan berpapasan dengan Bumi. Simulasi ini dilakukan untuk memahami dinamika orbit asteroid dan memperkirakan jarak papasan dengan Bumi (Dotson et al., 2022). Dalam proses pemodelannya, dilakukan simulasi dengan menghitung elemen-elemen orbit dan jarak terhadap Bumi. Luaran yang dihasilkan berupa visualisasi data elemen orbit,

data papasan dekat, dan plot evolusi orbit. Dengan demikian, hasil dari simulasi ini diharapkan dapat memberikan manfaat terkait pemahaman yang lebih baik tentang ancaman yang mungkin ditimbulkan oleh Apophis dan menyumbangkan wawasan yang berguna bagi upaya mitigasi risiko yang terkait dengan asteroid yang berpotensi berbahaya bagi Bumi.

Simulasi model lintasan asteroid digambarkan sebagai diagram orbit dan elips error yang memberikan gambaran visual tentang lintasan asteroid telah berubah dari waktu ke waktu. Salah satu elips yang digambarkan mewakili lintasan asteroid di masa lalu dan elips lainnya menggambarkan variasi potensial jalur orbit yang diprediksi. Variasi ini diperlukan untuk menggambarkan ruang lingkup kemungkinan asteroid berada pada titik waktu tertentu dengan mempertimbangkan nilai error atau ketidakpastian di dalamnya. Ketidakpastian tersebut muncul karena adanya keterbatasan data pengamatan. Gambar 5.4 menunjukkan bentuk lintasan orbit asteroid 99942 Apophis beserta tiga elips error yang menggambarkan prediksi orbitnya di masa lalu.



Sumber: Academic Dictionaries and Encyclopedias (2024)

Gambar 5.4 Koreksi error bentuk orbit

Seiring dengan bertambahnya jumlah pengamatan dan peningkatan teknologi, ketidakpastian dalam prediksi lintasan Apophis telah berkurang secara signifikan. Saat ini, lintasan Apophis diperkirakan akan sangat berdekatan dengan Bumi pada tanggal 13 April 2029, tetapi tidak ada risiko tabrakan pada tanggal tersebut. Namun, papasan dekat ini tetap menjadi subjek studi intensif karena gaya gravitasi Bumi dapat mengubah orbit Apophis di masa depan, sehingga dilakukan pengamatan secara kontinu untuk dapat meningkatkan akurasi prediksi astronomi.

Ketika Apophis pertama kali diamati, elips erornya sangat besar, menunjukkan ketidakpastian yang tinggi. Dalam prediksi orbit awalnya diperkirakan memiliki peluang besar untuk berdampak pada Bumi pada tahun 2029, dengan probabilitas sekitar 2,7%. Prediksi ini menempatkan Apophis pada level 4 pada Skala Bahaya Dampak Torino, peringkat tertinggi yang pernah diberikan pada saat itu (NASA, 2024).

Prediksi selanjutnya yang dilakukan tahun 2005–2006 dengan pengamatan tambahan, para ilmuwan mampu menyempurnakan orbit Apophis. Pada prediksi tersebut, kemungkinan dampak pada tahun 2029 telah dikesampingkan. Namun, masih ada kekhawatiran mengenai kemungkinan dampak pada tahun 2036 jika Apophis melewati “lintasan orbit bergravitasi” tertentu selama pendekatan jarak dekat pada tahun 2029 (ESA, 2021). Pada tahun 2006 para astronom berpendapat ada kemungkinan melewati orbit papasan dengan Bumi pada tahun 2029 dengan erornya berkurang menjadi angka yang sangat kecil dan peringkat Skala Torino Apophis diturunkan menjadi nol. Pada tahun 2008, studi terperinci telah mempersempit lintasan orbit menjadi kurang dari 1 km lebarnya. Tahun 2013–2015 dilakukan pengamatan lanjutan selama beberapa tahun berikutnya dan menghasilkan data yang lebih akurat, sehingga elips eror menjadi lebih kecil. Prediksi kemungkinan tabrakan pada saat tahun 2029 diturunkan menjadi 1 dalam 250.000. Dengan bantuan pengamatan radar, terjadi penyempurnaan lintasan Apophis, sehingga secara efektif mengesampingkan segala kemungkinan dampak pada Bumi pada tahun 2036 (Morelli et al., 2024).

Pengamatan kembali dilakukan pada tahun 2020 dengan menggunakan Teleskop Subaru dan mampu mengkonfirmasi efek Yarkovsky pada Apophis, yang sedikit mengubah orbitnya karena gaya termal. Kemudian pada bulan Maret 2021, pengamatan radar maupun optik menggunakan antena Goldstone Deep Space Communications Complex dan Teleskop Subaru di Hawaii memberikan data yang sangat akurat mengenai jarak dan orbit Apophis, sehingga para astronom berpendapat tidak ada risiko tabrakan setidaknya selama 100 tahun ke depan terhadap Bumi karena semakin mempersempit elips error dan meningkatkan presisi prediksi orbit Apophis (NASA, 2021).

Prediksi terbaru, yang didasarkan pada data pengamatan hingga tahun 2023, menunjukkan kemungkinan tabrakan yang sangat kecil pada tahun 2068, yaitu 1 dalam 100.000. Elips error pada prediksi ini pun jauh lebih kecil dibandingkan dengan prediksi awal tahun 2004. Pada 13 April 2029, Apophis akan melintas sangat berdekatan dengan Bumi, pada jarak yang diperkirakan sekitar 31.000 km. Pengamatan dari jarak dekat ini akan memberikan data tambahan yang sangat berguna untuk lebih menyempurnakan pemahaman kita tentang orbit Apophis. Hal ini menghasilkan kesimpulan bahwa tidak ada risiko dampak pada tahun 2029, 2036, atau 2068 (NASA, 2021).

C. Analisis Perubahan Orbit Apophis

Prediksi lintasan Apophis masih terus dilakukan para astronom mengingat adanya beberapa faktor yang dapat mengubah lintasan asteroid di tata surya. Untuk pemuktahiran prediksi lintasan Apophis, penulis pun melakukan perhitungan tersendiri berdasarkan data *Jet Propulsion Laboratory Small Bodies Database Lookup* (JPL-SBDL) dan *NASA Horizons System* untuk memprediksi kemungkinan papasan asteroid Apophis dengan Bumi di masa depan dengan menggunakan simulasi N-Benda. Dalam proses simulasi, gaya-gaya non-gravitasional seperti efek Yarkovsky dan gaya tekanan radiasi tidak turut diperhitungkan, sehingga hasil yang didapatkan merupakan dinamika elemen orbit tanpa efek tersebut.

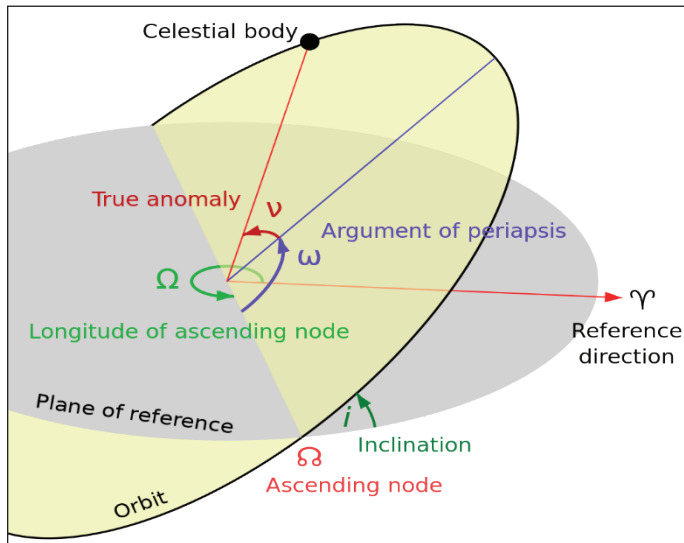
Dalam penggunaan data dari JPL-SBDL, elemen orbit seperti eksentrisitas, sumbu semi mayor, inklinasi, sudut nodal naik, argumen periapsis, dan anomali rata-rata digunakan untuk menggambarkan orbit objek tersebut. Sementara itu, data tambahan dari *NASA Horizons System* memperluas *dataset* dengan menambahkan objek-objek baru yang dapat dijadikan objek simulasi dalam riset. Proses pengumpulan data ini menjadi langkah awal yang penting dalam mengembangkan model simulasi dan menghasilkan model yang akurat untuk memprediksi kemungkinan papasan asteroid di masa depan. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang potensi ancaman asteroid terhadap Bumi, upaya mitigasi dapat diambil untuk mengurangi risiko dampaknya.

Perhitungan orbit dilakukan dengan menggunakan persamaan dasar sebagai berikut.

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} = - \sum_{i,j=l;j \neq i}^n \frac{Gm_j(x_i - x_j)}{|x_i - x_j|^3}$$

Perhitungan pada dinamika orbit mengambil bentuk masalah dari N-benda ($i, j = 1, \dots, N$) yang masing-masingnya mempunyai $d^2 x_i / dt^2$: Ini adalah akselerasi benda ke- i . Akselerasi adalah laju waktu perubahan kecepatan. G merupakan konstanta gravitasi universal, yang nilainya sekitar $6.67430 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$; m_j adalah massa sistem ke- j ; serta x_i dan x_j adalah vektor posisi ke i dan j . Vektor ini memiliki tiga komponen, yaitu x_p , y_p , dan z_i (Dermawan et al., 2010).

Untuk dapat menjalankan persamaan tersebut, diperhitungkan elemen orbital seperti anomali sejati, argumen perihelion, bujur node, inklinasi, eksentrisitas, dan beberapa elemen lainnya. Gambar 5.5 menggambarkan diagram orbit suatu benda langit, dalam hal ini planet atau asteroid yang mengorbit matahari. Orbitnya diwakili oleh elips, dengan matahari terletak di salah satu fokus elips. Diagram ini juga mencakup berbagai elemen orbital yang menentukan bentuk dan orientasi orbit (Dermawan et al., 2010). Anomali Sejati (θ) merupakan sudut antara perihelion (titik terdekat dengan matahari) dan posisi



Sumber: University of Pisa (2022)

Gambar 5.5 Elemen orbit

benda langit saat ini. Hal tersebut mewakili pergerakan benda langit sepanjang orbitnya. Argumen Perihelion (ω) adalah sudut antara titik menaik (titik perpotongan benda langit dengan bidang referensi yang bergerak ke utara) dan perihelion. Hal ini menunjukkan orientasi sumbu utama elips relatif terhadap bidang referensi. Bujur Node Menaik (Ω) adalah sudut antara meridian referensi (titik referensi tetap dalam ruang) dan node menaik. Ini menentukan posisi titik menaik di bola langit. Inklinasi (i) adalah sudut antara bidang orbit dan bidang ekuatorial (bidang orbit bumi sebagai acuan). Ini mewakili kemiringan orbit relatif terhadap bidang ekuatorial. Eksentrisitas (e) adalah ukuran bentuk suatu elips, menunjukkan seberapa jauh elips tersebut dari bentuk lingkaran sempurna. Sumbu Semimayor (a) adalah jarak terpanjang dari pusat elips ke titik terluar pada elips tersebut. Sudut nodal naik yaitu titik saat benda langit melintasi bidang ekuatorial bergerak ke arah utara. Ini menandai transisi dari gerakan dari selatan ke utara. Orbit itu sendiri merupakan jalur yang diikuti benda langit saat berputar mengelilingi matahari, bentuknya

elips, dengan matahari di salah satu fokusnya. Bidang referensi, dalam hal ini digunakan bidang ekliptika, adalah bidang tetap yang digunakan untuk menggambarkan orientasi orbit. Biasanya bidang ekuator bintang atau bidang sistem benda langit (Andersson, 2018).

Elemen orbital memberikan informasi penting tentang pergerakan benda langit di sekitar benda utamanya. Mereka digunakan untuk menghitung posisi dan kecepatan benda langit pada waktu tertentu, memprediksi pergerakan masa depan, dan memahami dinamika orbitnya. Anomali sebenarnya dan argumen perihelion sangat penting untuk menentukan posisi benda langit sepanjang orbitnya dan orientasinya relatif terhadap bidang referensi. Bujur titik menaik dan kemiringannya penting untuk memahami orientasi orbit di ruang angkasa dan hubungannya dengan bidang referensi (Sánchez-Lozano & Fernández-Martínez, 2016).

Bentuk orbit elips merupakan konsekuensi interaksi gravitasi antara benda langit dan bintang. Tarikan gravitasi bintang bervariasi menurut jarak, menyebabkan benda langit bergerak lebih cepat saat mendekati bintang dan lebih lambat saat menjauh. Eksentrisitas elips, ukuran perpanjangannya, menunjukkan seberapa besar penyimpangan orbitnya dari lingkaran sempurna. Orbit yang sangat eksentrik memiliki perbedaan yang signifikan antara periapsis dan apoapsis, sedangkan orbit dekat lingkaran memiliki perbedaan yang minimal (Valvano et al., 2021). Tabel 5.1 menunjukkan nilai-nilai elemen orbit dan ketidakpastiannya untuk sebuah objek tertentu. Elemen orbit adalah parameter yang digunakan untuk menggambarkan bentuk, orientasi, dan posisi orbit suatu objek di ruang angkasa. Informasi dalam Tabel 5.1 dapat digunakan untuk mempelajari gerakan objek dan untuk memprediksi posisinya elemen orbit pada saat masa depan.

Tabel 5.1 Elemen Orbit

Elemen Orbit	Nilai Optimal	Ketidakpastian
e	0.1912907261004625	2.0934 x 10-9
a (sa)	0.922552140675628	2.7703 x 10-9
i (°)	3.339736.385186.360	1.1053 x 10-9
Ω (°)	2.039153721810.900	3.7774 x 10-6
ω (°)	1.266832.317899.630	4.101 x 10-6
M (°)	5.223188.448841.550	6.8308 x 10-7

Sumber: NASA (2024)

Dalam simulasi N-benda, penulis memakai komputer atau laptop yang memiliki spesifikasi menengah dengan minimal RAM 8 gigabita dan minimal prosesor yang diproduksi tahun 2021 serta dengan waktu simulasi yang dilakukan kurun waktu 10 menit. Simulasi ini efektif untuk memprediksi kemungkinan papasan 99942 Apophis dengan Bumi di masa mendatang. Langkah awal adalah memakai bahasa program python dengan website pendukung seperti *google collab* lalu memakai *library* REBOUND untuk mensimulasikan orbit asteroid tersebut dan mengumpulkan data orbital Apophis dari (JPL NASA SBDL) *Jet Propulsion Laboratory NASA Small Bodies Database Lookup* (Valvano et al., 2024). Selanjutnya, merancang model simulasi dengan memperhitungkan gaya gravitasi dan parameter yang terlibat simulasi. Beberapa parameter yang digunakan dalam simulasi ini antara lain waktu awal integrasi, integrator, *bodies*, dan interval waktu. Waktu awal integrasi (*ti*) adalah *epoch* dari elemen orbit yang tertera pada laman web JPL NASA SBDL. Integrator yang digunakan adalah IAS15. Integrator ini dipilih dikarenakan IAS15 merupakan integrator yang adaptif, artinya tidak ada langkah waktu (*time step*) yang konstan dan mampu menyesuaikan dengan peristiwa papasan dekat. *Bodies* (benda) yang dilibatkan adalah Matahari sebagai pusat sistem, delapan planet, Bulan, dan Apophis. Interval waktu integrasi adalah +100 tahun sejak waktu awal integrasi (Valvano et al., 2024). Langkah

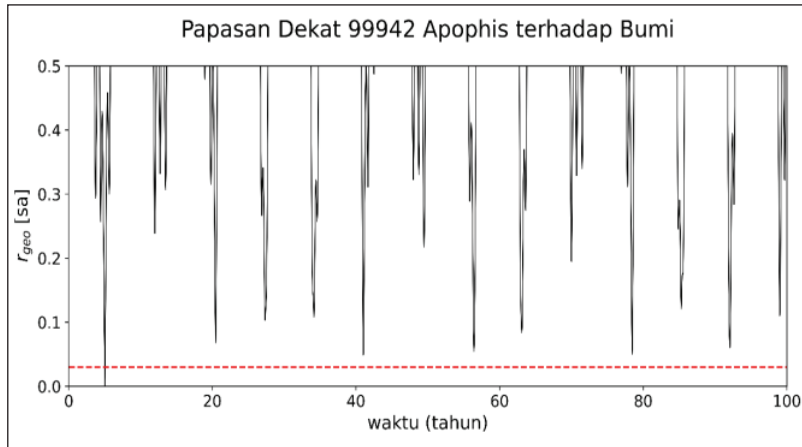
Buku ini tidak diperjualbelikan.

dalam melakukan simulasi ini bertujuan untuk memprediksi lintasan asteroid di masa depan dan berpotensi risiko tabrakan dengan Bumi.

Beberapa langkah penting dalam menjalankan simulasi adalah sebagai berikut.

1. Kompilasi data elemen-elemen orbit yang meliputi Semimajor axis (a): Jarak rata-rata asteroid dari Matahari. Data tersebut diperoleh dari sumber basis data astronomi di situs website NASA.
2. Optimalisasi nilai elemen orbit asteroid. Hal ini dilakukan dengan menggunakan algoritma tertentu untuk meminimalkan perbedaan antara data observasi dan hasil simulasi. Optimasi elemen orbit ini diperlukan untuk meningkatkan akurasi simulasi.
3. Menjalankan Simulasi N-benda. Simulasi ini memperhitungkan pengaruh gravitasi dari benda-benda lain di tata surya, seperti Matahari, planet, dan asteroid lainnya. Hal ini penting untuk mendapatkan hasil simulasi yang realistis, karena orbit asteroid 99942 Apophis dapat dipengaruhi oleh gaya gravitasi dari benda-benda lain.
4. Visualisasi hasil simulasi. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan grafik atau animasi untuk menunjukkan lintasan asteroid 99942 Apophis di masa depan. Visualisasi hasil simulasi ini dapat membantu para ahli untuk memahami potensi risiko tabrakan dengan Bumi.
5. Analisis.. Hal ini dilakukan untuk mengevaluasi potensi risiko tabrakan dengan Bumi. Analisis ini dapat mempertimbangkan berbagai faktor, seperti jarak minimum antara asteroid dan Bumi, kecepatan relatif, dan kemungkinan tabrakan.

Gambar 5.6 menunjukkan plot papasan dekat asteroid 99942 Apophis terhadap Bumi dalam kurun waktu 31 Maret 2024 hingga 31 Maret 2124. Plot tersebut merupakan jarak geosentrik Apophis terhadap waktu dalam tahun integrasi yang dibatasi pada jarak < 0.03 satuan astronomi (sa). Selama rentang waktu integrasi, ditemukan bahwa terdapat sebelas kali peristiwa papasan dekat Apophis dengan



Gambar 5.6 Plot jarak geosentrik 99942 Apophis terhadap Bumi

Bumi. Peristiwa papasan dekat yang akan terjadi selanjutnya adalah pada tanggal 13 April 2029, pada peristiwa papasan dekat ini, jarak geosentrik Apophis hanya berkisar 0.00025 sa (< 0.01 lunar distance atau sekitar 31,388 km dari permukaan Bumi) dan 30 Maret 2036, dengan jarak geosentrik Apophis hanya berkisar 0.2386353 sa dari permukaan Bumi. Kedua peristiwa tersebut berpontesi berpapasan dengan Bumi yang diprediksi akan terjadi.

Tabel 5.2 Data waktu dan jarak geosentrik saat peristiwa asteroid 99942 Apophis papasan dekat Bumi 100 tahun ke depan.

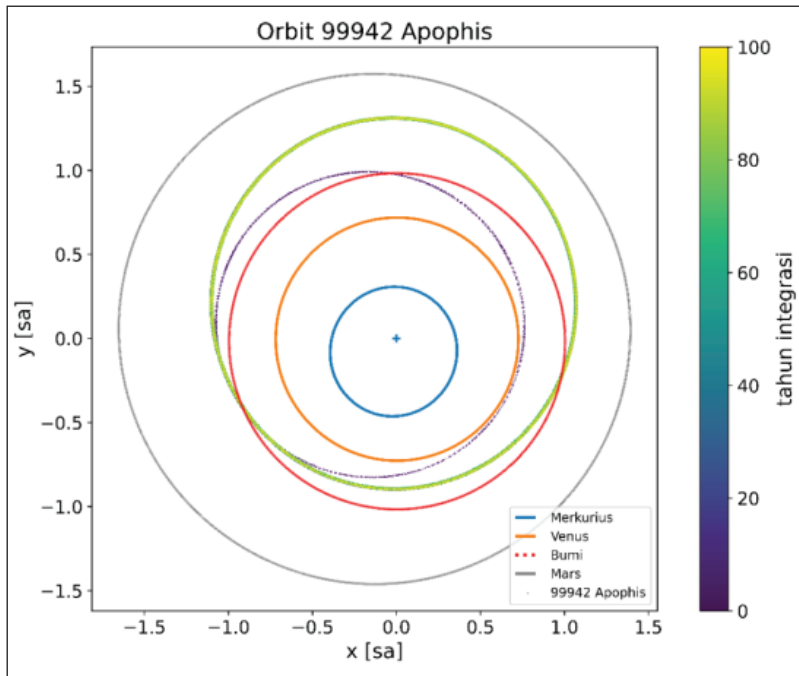
Tanggal	Jam (UTC)	Jarak (SA)
29 Desember 2027	01:29	0.2936311
12 September 2028	11:15	0.2565818
13 April 2029	20:52	0.000254
25 November 2029	11:18	0.3003569
30 Maret 2036	00:00	0.2386353
23 Desember 2036	12:26	0.3317136
26 September 2037	23:47	0.3068927
19 Maret 2043	23:23	0.4792903
20 Januari 2044	00:38	0.3152374

Tanggal	Jam (UTC)	Jarak (SA)
15 September 2044	14:21	0.0678787
13 Februari 2051	00:14	0.266497
5 Agustus 2051	19:38	0.103201
26 Mei 2058	15:04	0.10773
7 November 2058	03:25	0.257269
10 April 2065	06:49	0.04886516
2 Desember 2065	19:22	0.3108171
6 Oktober 2066	15:32	0.487051
27 Maret 2072	02:16	0.3224165
2 Januari 2073	03:53	0.3306448
23 September 2073	15:42	0.2173882
2 Februari 2080	19:17	0.2889097
4 September 2080	11:27	0.05480528
6 Mei 2087	23:28	0.08236081
14 November 2087	04:07	0.27423
1 April 2094	21:12	0.1945168
19 Desember 2094	00:53	0.3286354
29 September 2095	15:15	0.3398957
20 Maret 2101	09:04	0.4883296
21 Januari 2102	12:59	0.3111664
15 September 2102	20:37	0.04952086
21 Februari 2109	02:52	0.2457812
17 Juli 2109	13:05	0.128016
26 April 2116	01:09	0.05996463
16 November 2116	16:00	0.2836401
7 April 2123	09:39	0.110746
10 Desember 2123	03:07	0.3215404

Tabel 5.2 merupakan tabel waktu dan jarak geosentrik saat peristiwa papasan dekat Apophis selama rentang waktu integrasi selama 100 tahun ke depan. Tabel data waktu dan jarak geosentrik saat peristiwa asteroid 99942 Apophis papasan dekat dengan Bumi memberikan

informasi penting tentang orbit asteroid dan potensi bahaya yang ditimbulkannya bagi Bumi. Perlu dicatat bahwa meskipun jarak ini tergolong dekat, asteroid 99942 Apophis tidak diperkirakan akan menabrak Bumi pada tabel peristiwa-peristiwa papasan dekat di atas (khususnya pada peristiwa papasan dekat 13 April 2029 dan 30 Maret 2036). Data tersebut membantu para astronom untuk memahami dan memprediksi pergerakan asteroid Apophis di masa depan, sehingga dapat dilakukan tindakan pencegahan jika diperlukan.

Gambar 5.6 menunjukkan grafik perkiraan jarak papasan dekat asteroid 99942 Apophis terhadap Bumi dalam rentang waktu hingga 100 tahun ke depan. Grafik ini dibuat berdasarkan data pengamatan dan simulasi orbit asteroid yang dilakukan oleh para astronom. Sumbu horizontal (x) menunjukkan waktu dalam satuan tahun, sedangkan sumbu vertikal (y) menunjukkan jarak papasan dekat asteroid Apophis terhadap Bumi dalam satuan astronomi. Jarak papasan dekat didefinisikan sebagai jarak terdekat antara asteroid dan Bumi pada saat mereka berdua berada di titik terdekat dalam orbitnya masing-masing. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa asteroid Apophis akan mengalami beberapa papasan dekat dengan Bumi dalam rentang waktu jarak sekitar 36.700 kilometer. Jarak papasan dekat ini terbilang cukup dekat dalam rentang waktu 100 tahun ke depan. Papasan terdekat pertama akan terjadi pada tahun 2029, dengan jarak sekitar 31.860 kilometer. Papasan terdekat kedua akan terjadi pada tahun 2036, dengan pola orbit Apollo, para astronom meyakini bahwa kemungkinan asteroid Apophis menabrak Bumi pada saat-saat tersebut sangatlah kecil. Hal ini dikarenakan adanya efek gravitasi yang akan sedikit mengubah lintasan asteroid saat ia berada dekat dengan Bumi. Namun, para astronom tetap memantau asteroid Apophis dengan cermat untuk mengantisipasi kemungkinan terjadinya tabrakan di masa depan. Hal ini dilakukan dengan melakukan pengamatan terus menerus terhadap asteroid Apophis dan dengan meningkatkan akurasi model-model simulasi orbitnya.

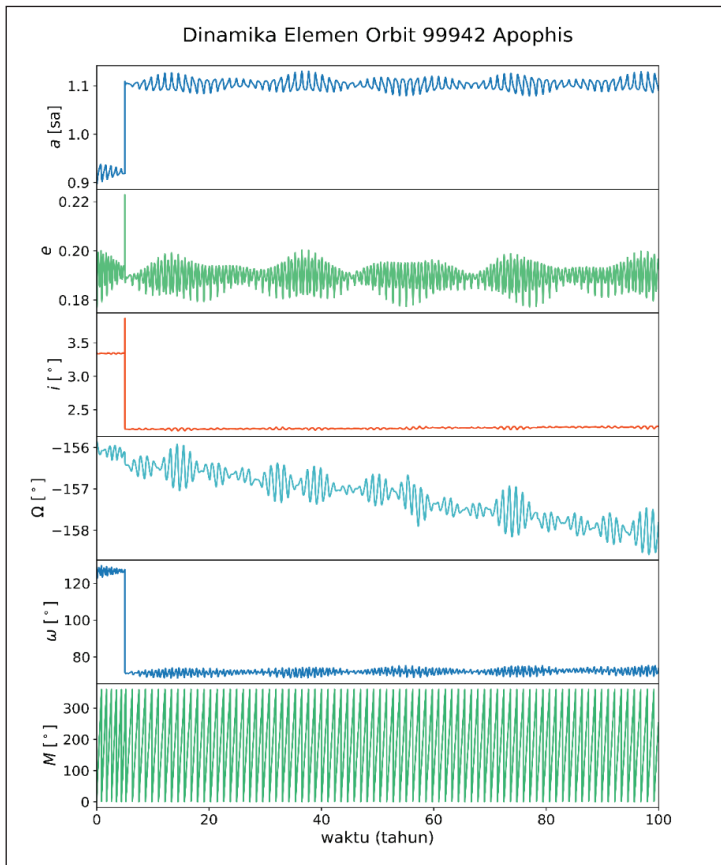


Gambar 5.7 Plot Lintasan Orbit 99942 Apophis Selama 100 Tahun.

Gambar 5.7 merupakan plot lintasan orbit Apophis (dengan gradasi warna biru hingga kuning), disertakan juga Matahari (ber-tanda “+”), plot orbit planet Merkurius (biru), Venus (oranye), Bumi (Merah), dan Mars (abu-abu). Plot lintasan orbit asteroid 99942 Apophis ini dibuat untuk rentang waktu selama 100 tahun. Orbit asteroid ini digambarkan dalam sistem koordinat heliocentric, dengan sumbu x dan y mewakili jarak asteroid dari Matahari dalam satuan satuan astronomi (SA). Sumbu z mewakili waktu dalam satuan tahun. Pada sekitar awal waktu integrasi (sebelum peristiwa papasan dekat pada 13 April 2029), orbit Apophis *crossing* dengan planet Venus dengan tipe Aten. Setelah peristiwa papasan dekat pada 13 April 2029 dan 30 Maret 2036, orbit Apophis mengalami perubahan menjadi tipe Apollo. Gradasi warna menunjukkan waktu integrasi, serta juga menunjukkan bahwa orbit 99942 Apophis miring terhadap bidang

ekliptika sebesar 3.3 derajat. Bidang ekliptika adalah bidang yang dibentuk oleh orbit Bumi mengelilingi Matahari. Kemiringan orbit ini menunjukkan bahwa 99942 Apophis tidak bergerak di bidang yang sama dengan Bumi.

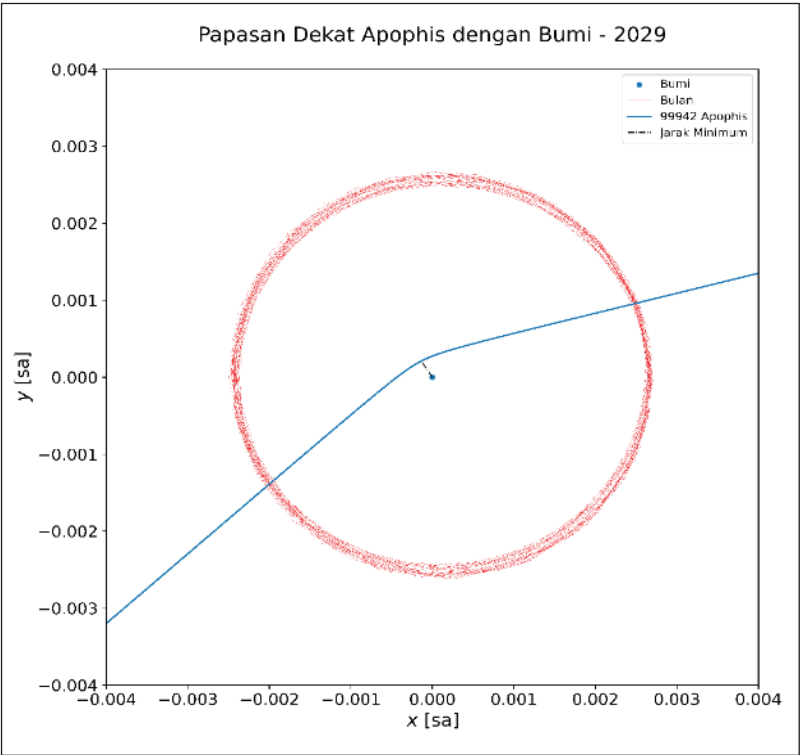
Gambar 5.8 menunjukkan eksentrisitas orbit 99942 Apophis berkisar antara 0.18 dan 0.22, yang menunjukkan bahwa orbitnya tidak terlalu eksentrik. Sumbu semimayor orbit berkisar antara 1.05



Gambar 5.8 Dinamika Elemen Orbit Asteroid 99942 Apophis Selama 100 Tahun ke Depan.

dan 1.10 sa (sebelum peristiwa papasan dekat tahun 2029 berkisar 0.92 sa), yang menunjukkan bahwa orbitnya masih berada di sekitar Bumi. Sebelum peristiwa papasan dekat 2029, inklinasi orbit 99942 Apophis berkisar antara 3.0 dan 3.5 derajat, sedangkan setelah peristiwa papasan dekat, inklinasi berada pada nilai < 2.5 derajat yang menunjukkan bahwa orbitnya tidak terlalu miring terhadap bidang ekliptika. Bujur node naik Ω berkisar antara -167.5 hingga -157.5 derajat dan juga pada argumen perihelion ω berkisar antara 120 dan 300 derajat.

Gambar 5.9 menunjukkan area yang diperbesar pada orbit Apophis dan Bumi di sekitar titik terdekat mereka pada tahun 2029.



Gambar 5.9 Papasan Dekat Apophis dengan Bumi Tahun 2029.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



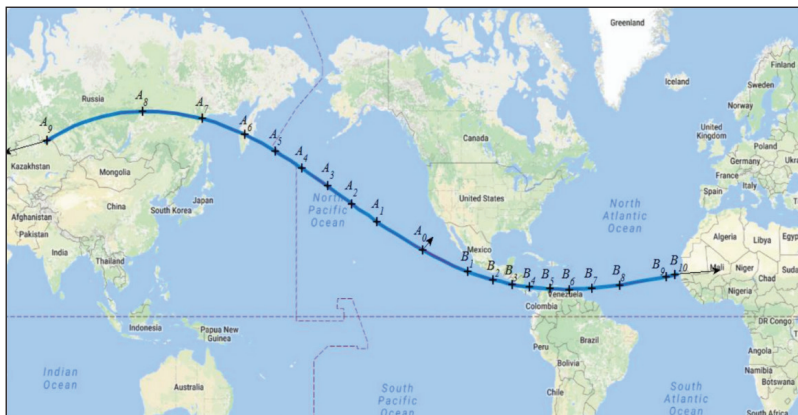
Sumber: Ershkov & Russian (2021)

Gambar 5.10 Hasil Prediksi Proyeksi pada Permukaan Bumi Lintasan Orbit Asteroid 99942 Apophis pada Tanggal 13 April 2029.

Jarak minimum antara Apophis dan Bumi pada tahun 2029 adalah 31,000 kilometer. Gambar tersebut juga menunjukkan bahwa Apophis akan melewati Bumi pada 13 April 2029. Gambar 5.10 menunjukkan proyeksi lintasan asteroid Apophis berupa titik-titik merah pada saat asteroid melintas dekat bumi pada 13 April 2029.

Dalam skenario yang paling optimis (tidak terdapat dampak langsung Apophis ke permukaan Bumi), Apophis akan melewati permukaan Bumi dengan jarak relatif dekat, sekitar 500 kilometeran. Jika kita juga memperhitungkan lintasan awal, Apophis akan melintasi Ural Selatan yang terletak di wilayah Federasi Rusia (Gambar 5.11). Hal ini berarti kemungkinan interaksi Apophis dengan atmosfer bagian atas dengan kepadatan yang cukup akan menyebabkan ledakan seperti peristiwa Tunguska pada tahun 1908. Skenario terakhir harus dievaluasi sebagai bencana bagi wilayah Ural dan Kazakstan, meskipun kita tidak dapat mengesampingkan skenario sederhana untuk menghasilkan gelombang kejut oleh ledakan (tanpa dampak panas ekstra ke wilayah lokal di dalamnya wilayah yang disebutkan pada Gambar 5.11 sebagai akibat dari ledakan asteroid) (Ershkov & Russian, 2021).

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Guo et al. (2018)

Gambar 5.11 Lintasan orbit asteroid 99942 apophis 13 Maret 2036.

Dapat di lihat pada Gambar 5.11, adanya jalur yang berisiko akibat dampak yang ditimbulkan oleh Apophis di Belahan Bumi Utara. Titik awal di bagian barat (area A_1) terletak di dekat Omsk, Tomsk, dan Novosibirsk. Kemudian secara berurutan melewati wilayah Krasnoyarsk, Yakutia, Timur Jauh, dan Kamchatka di Rusia, dekat Kepulauan Aleutia, melintasi Pasifik Utara, Amerika Tengah (Nikaragua, Kosta Rika), Amerika Selatan (Kolombia, Venezuela), dan berakhir di Atlantik, sebelum mencapai pantai barat Afrika (dekat Dakar, area B_{10}) (Guo et al., 2018).

Analisis numerik mengindikasikan bahwa jalur yang berisiko akibat dari Apophis berada di atas sebuah bidang, dan hampir sejajar dengan bidang ekliptika pada saat tabrakan. Kami memperkirakan panjang dan lebar PoR di permukaan Bumi. Dalam hal ini, kami mengasumsikan bahwa perpotongan antara bidang PoR dan Bumi berbentuk lingkaran dengan jari-jari $RP \approx 5370$ km. Sudut pusat PoR mengelilingi Bumi $\phi \approx 4.534$ rad = 259.8 derajat, maka panjangnya $LP \approx \phi RP = 24.347$ km. Lebar PoR dihitung secara numerik sesuai dengan koordinat titik tumbukan pada arah normal ke sumbu longitudinal PoR. Lebar area A_0 diperkirakan sekitar 27 km. Untuk A_i dan B_i

($i \geq 1$), lebarnya sekitar 10–22 km. Secara rata-rata, lebar PoR adalah sekitar 20 km. Perhatikan bahwa dalam, diperkirakan sebesar 30–50 km (Guo et al., 2018).

D. Penilaian Risiko Tabrakan

Selama bertahun-tahun, beberapa model risiko dan probabilitas dampak bahaya telah dikembangkan untuk mengukur kemungkinan, tingkat keparahan, dan dampak. Hal itu didasarkan pada berbagai variabel seperti kecepatan, massa, medan magnet, dan lain-lain. Sebagai alternatif, skala penilaian risiko dan dampak bahaya digunakan untuk menilai tingkat keparahan tumbukan berdasarkan parameter probabilistik dan kinetika yang dihitung, menggabungkan potensi kerusakan menjadi satu nilai pada skala integer. Skala penilaian risiko yang sering digunakan di antaranya Skala Torino dan Skala Teknis Palermo (*Palermo Technical Impact Hazard Scale*).

Skala Torino memberikan klasifikasi risiko dampak yang terkait dengan objek luar angkasa NEO (Near Earth Objects), termasuk asteroid dan komet. Tujuannya adalah untuk menunjukkan kepada publik keseriusan dalam memprediksi tabrakan benda-benda kecil di tata surya. Skala ini menggabungkan faktor probabilitas dan potensi kerusakan dari sebuah tabrakan, yang diekspresikan dalam bentuk nilai numerik.

Tabel 5.3 Skala Torino

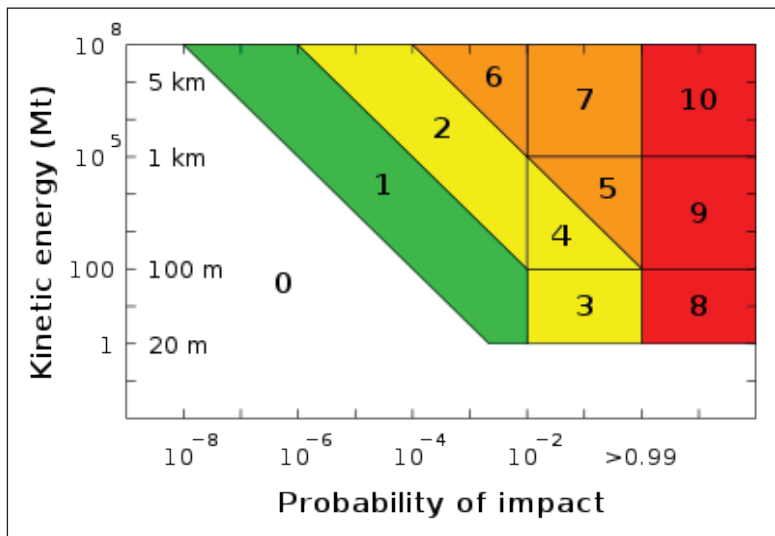
Kategori	Skala	Deskripsi
Tidak Berbahaya (Zona Putih)	0	Peluang tabrakan yang mendekati nol. Benda-benda kecil seperti meteor akan terbakar saat memasuki atmosfer Bumi. Kejadian hujan meteor yang tidak menimbulkan bencana termasuk dalam kategori ini.
Normal (Zona Hijau)	1	Peristiwa rutin saat objek melintasi orbit bumi dan diperkirakan tidak menimbulkan bahaya termasuk dalam kategori ini. Berdasarkan perhitungan sementara, probabilitas tumbukan sangat kecil sehingga tidak perlu dipublikasikan. Kategori ini bisa diturunkan ke level nol jika ada observasi terbaru yang mengonfirmasi.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Kategori	Skala	Deskripsi
Perlu perhatian astronom (Zona Kuning)	2	Penemuan objek yang berpotensi menjadi rutin dengan memperluas pencarian. Meskipun begitu, kemungkinan tabrakan tetap sangat kecil. Observasi terbaru mungkin dapat menurunkan tingkat bahaya ke level nol.
	3	Perhitungan sementara menunjukkan bahwa kemungkinan tabrakan adalah 1% atau lebih, yang dapat menyebabkan kerusakan di wilayah tertentu di Bumi. Observasi terbaru mungkin dapat menurunkan tingkat bahaya ke level nol. Publik perlu diberitahu jika tabrakan diperkirakan akan terjadi dalam waktu kurang dari satu dekade.
	4	Perhitungan sementara menunjukkan bahwa kemungkinan tabrakan adalah 1% atau lebih, yang dapat menyebabkan kerusakan di beberapa wilayah di Bumi. Observasi terbaru mungkin dapat menurunkan tingkat bahaya ke level nol. Publik perlu diberitahu jika tabrakan diperkirakan akan terjadi dalam waktu kurang dari satu dekade.
Membahayakan (Zona Oranye)	5	Meskipun menimbulkan ancaman serius, belum pasti akan menyebabkan kerusakan di bagian bumi tertentu. Perhatian astronom diperlukan untuk menentukan apakah akan terjadi tabrakan atau tidak. Jika tabrakan diperkirakan terjadi dalam waktu kurang dari satu dekade, rencana darurat harus segera disiapkan.
	6	Penemuan objek besar yang menimbulkan ancaman serius, meskipun belum tentu menyebabkan kehancuran global. Rencana darurat perlu disiapkan jika tabrakan diperkirakan akan terjadi dalam waktu kurang dari tiga decade.
	7	Objek besar akan mendekati orbit bumi dengan jarak yang sangat dekat. Rencana darurat internasional harus disiapkan untuk ancaman dalam 100 tahun mendatang.

Kategori	Skala	Deskripsi
Tabrakan (Zona Merah)	8	Tabrakan dipastikan akan terjadi, yang dapat menyebabkan kehancuran di beberapa kawasan. Peristiwa ini diperkirakan terjadi rata-rata sekali dalam 50 tahun atau sekali dalam 1000 tahun.
	9	Tabrakan dipastikan akan terjadi, yang akan mengakibatkan kehancuran regional dan tsunami besar. Peristiwa ini diperkirakan terjadi rata-rata sekali setiap 10.000 tahun atau sekali setiap 100.000 tahun
	10	Tabrakan dipastikan akan terjadi, yang akan menyebabkan kehancuran global. Peristiwa ini diperkirakan terjadi rata-rata sekali setiap 100.000 tahun.

Sumber: Siregar (2017)



Sumber: Johnson et al. (2023)

Gambar 5.12 Skala Torino

Skala Torino saat ini diakui sebagai standar emas dalam penilaian risiko bahaya karena kesederhanaan dan aksesibilitasnya bagi anggota masyarakat umum. Dengan sistem kode warna yang mudah diguna-

Buku ini tidak diperjualbelikan.

kan, tingkat kerusakan dan seriusnya dampak dapat dengan jelas dikomunikasikan untuk membantu dalam respons ilmiah, evakuasi, dan tanggapan masyarakat yang lebih luas. Probabilitas tumbukan dan perkiraan energi kinetik keduanya merupakan variabel penting dalam Skala Torino, sehingga parameter lain tidak diterapkan. Ini berarti prediksi dampak bersifat satu dimensi dan tidak mempertimbangkan faktor-faktor lain seperti parameter orbital dan properti lain dari objek dekat Bumi (NEO) (Satpathy et al., 2022).

Skala Teknis Palermo (*Palermo Technical Impact Hazard Scale*) serupa dengan skala Torino, tetapi melibatkan perhitungan yang lebih rumit. Skala Palermo adalah sebuah skala logaritmik yang digunakan untuk menilai tingkat risiko dari kemungkinan dampak asteroid atau komet yang dapat bertabrakan dengan Bumi. Skala ini mempertimbangkan baik probabilitas dari tabrakan maupun energi kinetik yang akan dilepaskan jika tabrakan terjadi (Siregar, 2017). Skala Palermo dinyatakan dalam angka yang bisa positif maupun negatif. Nilai negatif merupakan indikasi bahwa risiko tabrakan sangat kecil dibandingkan dengan ancaman alami dari benda-benda langit lainnya yang setara dalam jangka waktu tertentu. Nilai nol merupakan indikasi bahwa risiko tabrakan sebanding dengan tingkat ancaman dasar dari objek-objek serupa yang ada di alam. Sementara itu, nilai positif merupakan indikasi bahwa risiko tabrakan lebih besar daripada ancaman dasar alami dan membutuhkan perhatian lebih lanjut.

Secara matematis, Skala Palermo dihitung menggunakan rumus yang melibatkan probabilitas tabrakan dan energi kinetik objek (Johnson et al., 2023).

$$P = \log\left(\frac{P_i E^{0.8}}{0.03T}\right)$$

P = skala Palermo;

Pi = probabilitas tumbukan;

E = energi tumbukan (dalam megaton TNT); dan

T = waktu sampai tumbukan terjadi (dalam tahun).

E. Strategi Mitigasi Bencana Asteroid

Dampak dan mitigasi bencana asteroid sangat penting dalam astronomi dan ilmu kebumihian, mengingat potensi bencana global yang bisa disebabkan oleh tumbukan asteroid. Dampak fisik bencana asteroid menyebabkan ledakan besar, menciptakan kawah besar, melepaskan energi yang setara dengan banyak bom nuklir, dan gelombang kejut ataupun tsunami. Sementara itu, dampak ekologis bisa menyebabkan gangguan pada ekosistem habitat. Oleh sebab itu, dibutuhkan upaya mitigasi. Salah satu upaya mitigasi adalah program survei NEA yang merupakan program atau upaya yang dilakukan untuk mendeteksi, melacak, dan melakukan karakterisasi objek-objek dekat Bumi, termasuk asteroid dan komet yang memiliki orbit yang dapat mendekati atau melintasi orbit Bumi (Grav et al., 2023). Meski Apophis diperkirakan tidak akan menabrak Bumi dalam 100 tahun ke depan, alternatif mitigasi tetap diperlukan mengingat adanya faktor yang mungkin memberikan pengaruh pada lintasannya dan Apophis mengalami perubahan orbit.

Pada umumnya, survei NEA dilakukan untuk:

- 1) Mendeteksi secara dini potensi bahaya.
- 2) Mengumpulkan data mengenai ukuran, komposisi, bentuk, dan sifat fisik lainnya dari NEO untuk memahami potensi dampak dan menentukan metode mitigasi yang paling efektif.
- 3) Memantau dan menghitung orbit NEA dengan presisi tinggi untuk memprediksi lintasan mereka di masa depan dan menilai risiko tabrakan dengan Bumi (Grav et al., 2023).

Ada pun beberapa teknologi dan metode yang digunakan untuk survei NEA antara lain sebagai berikut.

1. Teleskop optik digunakan untuk survei luas langit, mendeteksi pergerakan NEA terhadap latar belakang bintang tetap.
2. Teleskop inframerah digunakan untuk mendeteksi NEA yang mungkin tidak terlihat dalam panjang gelombang optik, terutama yang berukuran kecil atau memiliki albedo rendah.

3. Radar Planetary memungkinkan pengukuran jarak yang sangat akurat serta pencitraan detail dari NEA, membantu dalam karakterisasi bentuk dan rotasi.
4. Simulasi komputer digunakan untuk memodelkan orbit dan interaksi gravitasi untuk memprediksi lintasan masa depan NEA (Grav et al., 2023).

Mitigasi NEA melibatkan beberapa langkah strategis untuk mengurangi risiko yang ditimbulkan oleh asteroid yang berpotensi mendekati atau menabrak Bumi. Langkah-langkah tersebut antara lain:

1. Deteksi dan pelacakan dengan menggunakan teleskop darat dan luar angkasa untuk mendeteksi dan melacak asteroid yang mendekati Bumi atau dengan menyusun katalog asteroid untuk memantau dan memprediksi orbit mereka.
2. Melakukan penilaian risiko dengan cara menganalisis data untuk menilai kemungkinan dan dampak potensial dari tabrakan dan menggunakan model komputer untuk menyimulasikan berbagai skenario dan menentukan tingkat ancaman.
3. Menggunakan teknologi secara langsung untuk menghindari tabrakan asteroid, salah satunya dengan menabrak asteroid dengan pesawat ruang angkasa untuk mengubah lintasannya, menggunakan gravitasi pesawat ruang angkasa untuk menarik asteroid ke jalur yang berbeda untuk menghindari tabrakan atau biasa disebut dengan defleksi. Selain itu, ada juga dengan cara fragmentasi yaitu menghancurkan asteroid menjadi potongan-potongan kecil, meskipun ini lebih berisiko karena pecahannya bisa tetap menimbulkan ancaman (NASA JPL, 2024).

Upaya mitigasi ini bertujuan untuk meminimalkan risiko dan dampak dari potensi tabrakan NEA dengan Bumi. Hal tersebut membutuhkan kolaborasi internasional badan antariksa dan ilmuwan di seluruh dunia untuk berbagi data dan sumber daya. Beberapa misi internasional telah diluncurkan untuk mempelajari dan mengurangi

risiko yang ditimbulkan oleh Near-Earth Asteroids (NEA). NASA's Near-Earth Object (NEO) Program didirikan untuk mendeteksi, melacak, dan mempelajari objek dekat Bumi (NEOs), termasuk asteroid dan komet. OSIRIS-REx adalah misi NASA yang diluncurkan pada tahun 2016 untuk mengunjungi asteroid Bennu, mengumpulkan sampel, dan membawanya kembali ke Bumi untuk dipelajari. Misi ini bertujuan untuk lebih memahami komposisi dan sejarah asteroid, serta untuk meningkatkan kemampuan kita dalam menanggapi potensi ancaman dari NEA (NASA, 2024). Hayabusa2 diluncurkan oleh badan antariksa Jepang (JAXA) pada tahun 2014 untuk mempelajari asteroid Ryugu dan mengembalikan sampel ke Bumi. Hayabusa2 berhasil membawa sampel pada tahun 2020, memberikan wawasan berharga tentang komposisi dan karakteristik asteroid (JAXA, 2013). Double Asteroid Redirection Test (DART) merupakan misi NASA yang diluncurkan pada tahun 2021 dengan tujuan untuk menguji kemampuan mengubah jalur asteroid. DART menabrakkan pesawat ruang angkasa ke satelit asteroid Didymos untuk melihat dapat tabrakan tersebut dalam mengubah orbit Didymos tersebut. Ini adalah demonstrasi penting dari teknologi defleksi asteroid (NASA, 2024c). HERA adalah misi yang direncanakan oleh European Space Agency (ESA) untuk mengikuti misi DART. HERA akan mengunjungi sistem asteroid Didymos untuk melakukan observasi pasca-tabrakan, membantu mengukur efektivitas strategi defleksi (ESA, 2024). NEOWISE adalah misi yang diadaptasi dari Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) NASA untuk mendeteksi dan mengkarakterisasi NEOs menggunakan teleskop inframerah (IPAC, 2013).

F. Rekomendasi Kajian Lanjutan

Berdasarkan hasil simulasi dengan waktu integrasi 100 tahun ke depan ditemukan bahwa terdapat puluhan kali peristiwa papasan dekat Apophis dengan Bumi. Peristiwa papasan dekat yang akan terjadi selanjutnya dalam waktu dekat pada tanggal 13 April 2029. Pada peristiwa papasan dekat ini, jarak geosentrik Apophis hanya berkisar 0.00025 SA (< 0.01 kali jarak bumi-bulan atau sekitar 31.388

km dari permukaan Bumi) dan 30 Maret 2036, dengan jarak geosentrik Apophis hanya berkisar 0.2386353 SA dari permukaan Bumi. Perubahan orbit Apophis terlihat dari perubahan orbit Apophis dari tipe Aten sebelumnya menjadi tipe Apollo setelah peristiwa papasan dekat pada 13 April 2029. Hal ini menunjukkan bahwa peristiwa papasan dekat dapat memengaruhi orbit asteroid secara signifikan. Kemudian terlihat bahwa orbit Apophis tidak terlalu eksentrik, masih berada dalam sekitar Bumi, dan tidak terlalu miring terhadap bidang ekliptika. Meskipun pendekatan ini tergolong sangat dekat dalam standar astronomi, tidak ada indikasi bahwa Apophis akan menabrak Bumi pada peristiwa-peristiwa tersebut. Namun demikian, data ini penting untuk memahami dan memprediksi pergerakan asteroid di masa depan, serta untuk merencanakan tindakan pencegahan jika diperlukan.

Ada beberapa rekomendasi untuk kajian selanjutnya. Pertama, memperdalam pemahaman tentang dinamika orbit benda kecil tata surya, terutama asteroid. Kedua, dalam simulasi perlu melibatkan efek perturbasi dari objek lain di tata surya, seperti asteroid-asteroid besar (Ceres dan Pallas). Ketiga, perlu melibatkan efek gaya non-gravitasional, seperti tekanan radiasi matahari dan efek Yarkovsky, sehingga hasil simulasi akan memberikan gambaran yang lebih akurat tentang jalur orbit Apophis. Keempat, studi tentang kemungkinan dampak tabrakan dengan Bumi menggunakan skala Torino dan Palermo, termasuk skenario mitigasi dan langkah yang harus di ambil jika benda tersebut berpotensi menabrak Bumi. Terakhir, kolaborasi internasional dengan observatorium dan badan antariksa lain akan sangat membantu dalam berbagi data sehingga galat pada orbit lintasan asteroid akan terus berkurang.

Daftar Pustaka

- Academic Dictionaries and Encyclopedias. (2024, Mei 13). 99942 Apophis. <https://en-academic.com/dic.nsf/enwiki/656695#>
- Andersson, J. (2018). Determination of the Orbit and Dynamic Origin of Meteoroids. Dalam J. Andersson (Ed.), *Determination of the Orbit and Dynamic Origin of Meteoroids* (1 ed., Vol. 1, hlm. 6–7). Uppsala Universitet.

- Bancelin, D., Colas, F., Thuillot, W., Hestroffer, D., & Assafin, M. (2012). Asteroid (99942) Apophis: New predictions of Earth encounters for this potentially hazardous asteroid. *Astronomy and Astrophysics*, 544(52), 1–4. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117981>
- Dermawan, B., Hidayat, T., Putra, M., Fermita, A., Wahyuningtyas, D. T., Mandey, D., Hudaya, Z., Utomo, dan D., Keilmuan Astronomi, K., & -Institut Teknologi Bandung, F. (2010). Dinamika Orbit Asteroid Yang Analog Dengan Orbit Bumi. *Jurnal Sains Dirgantara*, 7(2), 164–177. http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi
- Dotson, J. L., Brozovic, M., Chesley, S., Jarmak, S., Moskovitz, N., Rivkin, A., Sánchez, P., Souami, D., & Titus, T. (2022). Apophis Specific Action Team Report. Dalam *The Lunar and Planetary Institute's (LPI's) (Vol. 1, Nomor 2)*.
- Ershkov, S., & Russian, P. (2021). Revisiting Apophis 2029 approach to Earth (staying on shoulders of NASA's experts) or Can we be sure in almost ricocheting fly-by of Apophis on 13 of April 2029 near the Earth? *Astronomical*, 1(1), 2–3.
- ESA. (2021, Maret 26). Apophis impact ruled out for the first time. https://www.esa.int/Space_Safety/Planetary_Defence/Apophis_impact_ruled_out_for_the_first_time
- ESA. (2024, Juli 26). Apophis. ESA. https://www.esa.int/Space_Safety/Planetary_Defence/Apophis
- ESA. (2024b, Agustus 4). hera. ESA. https://www.esa.int/Space_Safety/Hera
- Grav, T., Mainzer, A. K., Masiero, J. R., Dahlen, D. W., Spahr, T., Bottke, W. F., & Masci, F. J. (2023). The NEO Surveyor Near-Earth Asteroid Known Object Model. *Planetary Science Journal*, 4(12), 1–4. <https://doi.org/10.3847/PSJ/ad072e>
- Guo, P., Ivashkin, V. V., Stikhno, C. A., & Shkapov, P. M. (2018). Determination and investigation of asteroid Apophis' trajectories set potentially colliding with the Earth in 2036. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 468(1), 5–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/468/1/012023>
- Harbowo, D. G., Muztaba, R., Malasan, H. L., Sumardi, S., Agustina, L. K., Julian, T., Sitorus, J. H., Denhi, A. D. A., Sihombing, D. J. P., Mahayu, M. P., & Setyawan, D. (2021). Meteorite from Astomulyo Village, Central Lampung, Indonesia: Investigation of its chemical properties. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 882(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/882/1/012011>

- IPAC. (2013, Desember 11). THE NEOWISE PROJECT. IPAC. <https://neowise.ipac.caltech.edu/>
- JAXA. (2013, April 6). Hayabusa2. JAXA. <https://www.hayabusa2.jaxa.jp/en/>
- Johnson, P. A., Johnson, J. C., Omran, N. Al, & Mardon, A. A. (2023). Near-Earth Objects Impact Hazard Assessment Scales.
- Morelli, A. C., Mannocchi, A., Giordano, C., Ferrari, F., & Topputo, F. (2024). Initial Trajectory Assessment of a low-thrust option for the RAMSES Mission to (99942) Apophis. *Advances in Space Research*, 73(8), 2. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.02.005>
- Müller, T. G., Kiss, C., Scheirich, P., Pravec, P., O'Rourke, L., Vilenius, E., & Altieri, B. (2014). Thermal infrared observations of asteroid (99942) Apophis with Herschel. *Astronomy and Astrophysics*, 566(22), 1. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201423841>
- NASA. (2021, Maret 24). NASA Analysis: Earth Is Safe From Asteroid Apophis for 100-Plus Years. <https://www.nasa.gov/solar-system/nasa-analysis-earth-is-safe-from-asteroid-apophis-for-100-plus-years/>
- NASA. (2024). Small-Body Database Lookup. https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=99942%20apophis&view=OPC
- NASA. (2024, Mei 13). Asteroid 99942. <https://science.nasa.gov/solar-system/asteroids/apophis/>
- NASA. (2024, Juli 31). NASA's Double Asteroid Redirection Test (DART). NASA. <https://science.nasa.gov/planetary-defense-dart/>
- NASA. (2024, Juli 31). OSIRIS-REx. NASA. <https://science.nasa.gov/mission/osiris-rex>
- NASA JPL. (2024a, Agustus 2). Discovery Statistics NEA. NASA JPL. <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html>
- NASA JPL. (2024, Agustus 2). NEO Basics. NASA JPL. https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html
- NASA JPL. (2024, Agustus 4). CNEOS is NASA's center for computing asteroid and comet orbits and their odds of Earth impact. NASA JPL. <https://cneos.jpl.nasa.gov/>
- Nolan, M., Abell, P., Asphaug, E., Drouet D'aubigny, C., Becker, T., Brozovic, M., Busch, M., Binzel, R., Chesley, S., & Daly, R. T. (2021). Near-Earth Objects. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 2021(4), 1–9. <https://doi.org/10.3847/25c2cfef.babe6f0dî>

- Pérez-Hernández, J. A., & Benet, L. (2022). Non-zero Yarkovsky acceleration for near-Earth asteroid (99942) Apophis. *Communications Earth and Environment*, 3(1), 1–4. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00337-x>
- Rachman, A. (2010). Identifikasi Benda Jatuh Antariksa di Teluk Bone. Dalam A. Rachman (Ed.), *Pusat Pemanfaatan Sains Antariksa LAPAN (Lingkungan Antariksa, Vol. 1, hlm. 1–5)*. LAPAN.
- Rachman, A. (2015). Metode Sederhana Untuk Memperoleh Karakteristik Asteroid Kecil Yang Jatuh di Chelyabinsk Rusia Pada 15 Februari 2013. *Pusat Sains Antariksa LAPAN*, 10(1), 1–2. www.perthnow.com.au
- Sánchez-Lozano, J. M., & Fernández-Martínez, M. (2016). Near-Earth object hazardous impact: A Multi-Criteria Decision Making approach. *Scientific Reports*, 6(2), 1–7. <https://doi.org/10.1038/srep37055>
- Satpathy, A., Mainzer, A., Masiero, J. R., Linder, T., Cutri, R. M., Wright, E. L., Pittichova, J., Grav, T., & Kramer, E. (2022). NEOWISE Observations Of The Potentially Hazardous Asteroid (99942) Apophis. *AAS*, 1(1), 13–16. <http://arxiv.org/abs/2204.05412>
- Siregar, S. (2017). *Fisika Tata Surya* (S. Siregar, Ed.; *Fisika Tata Surya*, Vol. 1). Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam ITB. <http://personal.fimipa.itb.ac.id/suryadi>.
- University of Pisa. (2022). *Orbital Elements*.
- Valvano, G., Sfair, R., Winter, O. C., Machado-Oliveira, R., & Borderes-Motta, G. (2024). Apophis: May a meteor activity happen on Earth after the 2029 closest approach? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 531(1), 1. <https://doi.org/10.1093/mnras/stae1181>
- Valvano, G., Winter, O. C., Sfair, R., 2, G. B.-M., Machado, R., & Moura, T. (2021). APOPHIS Effects of the 2029 Earth's Encounter on the Surface and Nearby Dynamics. *MINRAS*, 1(1), 2–11. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab3299>

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Bab VI

Medan Magnet Bumi dan Peranannya Melindungi Bumi

Siska Filawati, Mira Juangsih, Visca Wellyanita,
Setyanto Cahyo Pranoto, Anwar Santoso, Elvina Ayu
Ratnasari, Rizal Suryana, dan La Ode Muhammad Musafar

A. Medan Magnet Bumi dan Strukturnya Sebagai Akibat Distorsi Matahari

Bumi telah berusia 4,5 miliar tahun. Sebuah angka fantastis dibanding usia kehidupan awal manusia yang dimulai 150.000 tahun yang lalu apalagi usia rata-rata manusia yang berkisar 72 tahun. Lantas sebelum manusia bagaimanakah Bumi? Apakah Bumi telah seperti ini sejak tercipta?

Bumi merupakan salah satu planet dalam tata surya dengan pusat yang kita sebut dengan 'Matahari'. Pada usia 0, Bumi terus berkemelum pada kondisi panas-mendingin, tabrakan, guncangan, tempat yang tak semestinya dihuni. Proses-proses pembentukan ini menjadikan Bumi seperti sekarang, layak dihuni oleh ribuan spesies termasuk kita, manusia.

S. Filawati*, M. Juangsih, V. Wellyanita, S. C. Pranoto, A. Santoso, E. A. Ratnasari, R. Suryana & L. O. M. Musafar

*Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail*: sisk005@brin.go.id

© 2025 Editor & Penulis

Filawati, S., Juangsih, M., Wellyanita, V., Pranoto, S. C., Santoso, A., Ratnasari, E. A., Suryana, R., & Musafar, L. O. M. Medan Magnet Bumi dan Peranannya Melindungi Bumi. Dalam T. Djamaluddin & F. Nuraeni (Ed.), *Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi* (181–221). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1425.c1489 E-ISBN: 978-602-6303-86-8

Buku ini tidak diperjualbelikan.

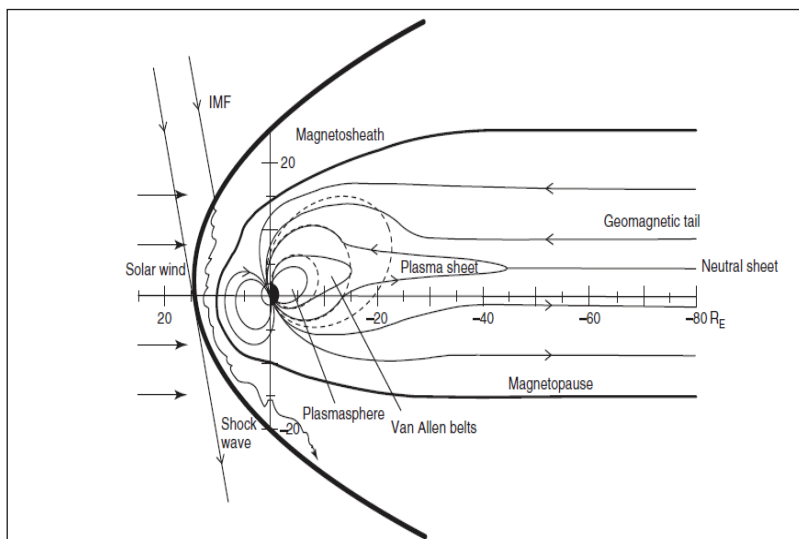
Sekitar 1 miliar tahun yang lalu, inti Bumi terbentuk (CWRU, 2024). Banyak teori menyebut bahwa asal mula inti Bumi berasal dari pendinginan partikel yang mencair oleh akumulasi panas dari elemen radioaktif, tetapi setelah proses tersebut jumlah material radioaktif menurun yang mengakibatkan partikel memadat (Urry, 1949; Jacobs, 1953). Material dengan densitas rendah terpisahkan ketika pemadatan berlangsung lambat, hal ini mengakibatkan inti Bumi terbagi menjadi dua lapisan, yaitu inti Bumi dalam yang padat dan inti Bumi luar yang cair. Saat inti dalam mengkristal dan inti luar mendingin, material yang terlarut dan tersuspensi akan mengendap (Anderson, 2002). Teori dan eksperimen tentang proses pembentukan inti Bumi masih dibahas secara mendalam hingga kini. Berdasarkan survei seismik, diketahui bahwa atom penyusun inti Bumi adalah besi dan nikel (Anderson, 2002; Jacobs, 1953). Besi dan nikel merupakan bahan feromagnetik yang memiliki sifat kemagnetan kuat, baik sifat untuk menyimpan maupun berinteraksi untuk memproduksi kemagnetan. Interaksi besi dan nikel dengan elektron dan ion atom lain di inti Bumi menjadi sumber medan magnet Bumi. Sementara itu, magnet memiliki arah dan polaritas, serta besar dan intensitas, dalam istilah lain, medan magnet adalah vektor.

Medan magnet Bumi berbentuk polar memiliki polaritas positif (Utara) dan negatif (Selatan) bergerak dari positif ke negatif. Kutub utara magnet Bumi terletak $11,5^\circ$ dari kutub utara geografis Bumi. Selaras dengan kutub Selatan, magnet Bumi di belahan selatan geografis Bumi. Medan magnet Bumi memiliki besar yang berbeda bergantung pada jarak terhadap pusat Bumi dan sudut lintang. Oleh karena itu, besar medan magnet berbeda bergantung lokasi. Untuk menentukan besar medan magnet dilakukan pengukuran pada tiap wilayah, sedangkan pemodelan medan magnet menggunakan perhitungan *spherical harmonics* yang diturunkan dari persamaan Maxwell. Perhitungan tersebut dilakukan secara berkala setiap 5 tahun dengan menggunakan data satelit, stasiun landas Bumi, dan survei geomagnet yang dilakukan di seluruh dunia. Oleh karena itu,

dengan pengamatan medan magnet Bumi yang tersebar di seluruh dunia, nilai pengamatan di lokasi berbeda menjadi titik acuan terhadap perubahan medan magnet Bumi dan bagaimana memprediksinya untuk periode tertentu di masa depan. Perubahan medan magnet Bumi seperti melemahnya medan magnet Bumi dapat merubah seluruh proses fisis kemagnetan yang berkaitan dengan arah dan navigasi modern, sistem kelistrikan, sistem satelit, keselamatan astronot, dan interaksi Matahari-Bumi yang merupakan indikasi cuaca antariksa (Risk Frontiers, 2024). Apakah suatu saat medan magnet Bumi akan berbalik arah? Jawaban dan penjelasan ini akan dijabarkan secara rinci pada subbab lain dalam buku ini.

Bumi bukan pemeran tunggal dalam pembentukan medan magnet. Ada Matahari, sebagai pusat tata surya dan sebagai bintang penjaga planet tetap pada posisinya. Matahari merupakan plasma yang melepaskan energi elektromagnetik sepanjang waktu, disebut juga sebagai angin matahari (*solar wind*). Akibat interaksi dengan angin matahari, magnetosfer bumi menjadi terdistorsi, bagian magnetosfer yang menghadap Matahari terkompresi mampat menuju Bumi dan berbentuk ekor di bagian malam dengan panjang mencapai ratusan R_E (R_E adalah jari-jari Bumi sebesar 6387 km), serta berakibat pula pada pembentukan struktur medan magnet Bumi yang memiliki fungsi tertentu (Wanget al et al., 2023). Interaksi angin matahari dan medan magnet Bumi membentuk magnetosfer bumi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.1.

Angin matahari merupakan plasma yang didominasi oleh ion H^+ dan He^{++} dan dapat diukur dengan empat variabel utama yaitu densitas, kecepatan, temperatur, dan medan magnet. Dalam kondisi Matahari tenang, angin matahari memiliki densitas $\sim 5/cm^3$, kecepatan 400 km/detik, temperatur 10^5 K dan medan magnet ± 5 nT (Kallenrode, 2004). Namun, saat kondisi Matahari meningkat, nilai-nilai tersebut dapat meningkat dan dapat menimbulkan gangguan badai geomagnet.



Keterangan: Sumbu x dan y direpresentasikan dengan jari-jari Bumi dalam R_E
 Sumber: Parks (2003)

Gambar 6.1 Sketsa Magnetosfer pada sisi siang (kiri) dan malam (kanan)

Gambar 6.1 menunjukkan bahwa bagian siang berjarak hingga $15 R_E$ sedangkan bagian malam hingga ratusan R_E , disebut juga dengan magnetotail. Awalnya, interaksi angin matahari dan magnetosfer membentuk susunan magnetosfer luar, yaitu *bow shock* dan *magnetopause*. Aktivitas dari fenomena yang terjadi di Matahari akan mengakibatkan terjadinya transmisi energi menuju magnetosfer Bumi yang sebanding dengan kecepatan angin matahari dan juga dipengaruhi oleh orientasi dari medan magnet antar-planet (*Interplanetary Magnetic Field/IMF*) (Dungey, 1961). Aliran angin matahari bergerak dari permukaan Matahari dengan kecepatan supersonik dan berinteraksi dengan medan magnet Bumi mengakibatkan terjadinya gelombang kejut (*shock wave*) dan dikenal sebagai *bow shock* (Borovsky & Vladiva, 2018). Proses yang terjadi di *bow shock* dapat menentukan proses selanjutnya angin matahari dapat menembus atau dibelokkan oleh lapisan magnetosfer (Eastwood, et al., 2017;

Mejnertsen, et al., 2018). Analisis terhadap *bow shock* cukup penting untuk mengetahui dinamika magnetosfer. Lapisan berikutnya adalah *magnetopause* yang memiliki jarak sekitar $11 R_E$ (Farfield, 1971). *Magnetopause* merupakan tempat yang memiliki keseimbangan tekanan antara angin matahari dan medan magnet Bumi. Oleh karena itu, pada lapisan ini, sebagian angin matahari dapat dibelokkan dan berpenetrasi ke lapisan yang lebih dalam. Penetrasi angin matahari bergantung pada kondisi arah IMF. Jika IMF bernilai positif atau sama dengan arah medan magnet Bumi yang bergerak dari kutub magnet selatan ke kutub magnet utara, angin Matahari akan diarahkan ke kutub magnet utara. Sementara itu, jika IMF bernilai negatif yaitu memiliki arah berlawanan dengan medan magnet Bumi, akan terjadi rekoneksi. Rekoneksi adalah proses energi magnet diubah menjadi energi plasma (Lopez, 1990). Proses keseimbangan di *magnetopause* membuat *magnetopause* dapat mampat dan mengembang, sehingga lapisan yang lebih dalam juga mengalami hal yang sama (Kallenrode, 2004; Borovsky & Vladiva, 2018).

Magnetosfer dalam terdiri dari tiga populasi partikel bermuatan dan terperangkap dalam medan magnet Bumi. Partikel-partikel ini bergerak dalam gerakan melingkar atau berputar di sekitar garis medan. *Magnetosfer* bagian dalam terdiri dari:

- 1) *Plasmasphere*; memiliki garis-garis medan magnet tertutup yang terdiri dari partikel berenergi rendah yang bergerak dari ionosfer. Lapisan ini dipengaruhi oleh waktu terbit-tenggelam Matahari karena berotasi bersama dengan Bumi ke arah timur. Rotasi medan magnet Bumi ke arah timur bersama dengan pengisian ion dan elektron di sisi siang *plasmasphere* yang berasal dari ionosfer sehingga menghasilkan torus plasma dingin (Singh et al., 2011). Plasma terdiri dari ion H^+ , He^+ , O^+ , O^{++} , D^{++} , N^+ , N^{++} , dan ion lain dengan persentase lebih rendah. Ion dalam *plasmasphere* berubah formasi saat terjadi badai geomagnet, rasio O^+/H^+ naik menjadi 100%, sedangkan diketahui bahwa O^+ dapat berinteraksi dengan lapisan atmosfer sehingga memunculkan aurora. *Plasmasphere* dapat digunakan untuk mempelajari medan listrik magnetosfer

karena konveksi medan listrik dengan skala besar berada di *plasma*pause (Ebihara & Miyoshi, 2009).

- 2) *Plasmasheet*; memiliki plasma dengan densitas rendah, terdiri dari ion dan elektron yang berasal dari angin matahari, dan bergerak ke barat dan timur. Proses fisis *plasmasheet* ion dan elektron berbeda, ion dalam *plasmasheet* bergerak dari *magnetotail* di sisi malam ke kutub magnet dengan aliran yang menyimpang dari pola konveksi medan magnet dan akan terjebak di kutub magnet sehingga aliran ion tersebut mengalami kenaikan densitas dan temperatur yang dapat mengakibatkan *Kelvin-Helmholtz Instability*. Sementara itu, elektron dalam *plasmasheet* bergerak mengikuti medan magnet di kutub magnet dan menuju *magnetopause* sisi siang yang mengakibatkan *pitch angle* menurun sehingga terjadi presipitasi elektron ke atmosfer. Peningkatan energi *drift ion* dan elektron yang bergerak ke barat dan timur membentuk arus cincin di bidang ekuatorial Bumi (Borovsky & Vladiv, 2018). Dengan meningkatnya arus cincin, medan magnet menjadi Bumi menurun, yang merupakan indikasi adanya badai geomagnet yang akan dijelaskan pada subbab berikutnya (Lakhina et al., 2006);
- 3) Sabuk Radiasi Van Allen; terdiri dari partikel berenergi tinggi yang terperangkap di dua wilayah, yaitu sabuk radiasi bagian luar yang didominasi oleh elektron sehingga wilayah ini disebut sebagai sabuk radiasi elektron dan sabuk radiasi dalam yang didominasi oleh proton dan neutron (Li & Temerin, 2001). Sabuk radiasi elektron terbentuk sebagai akibat interaksi dengan angin matahari sehingga pengamatan sabuk radiasi elektron sangat diperlukan dalam prediksi cuaca antariksa. Sabuk radiasi elektron merupakan salah satu parameter untuk mengetahui kondisi cuaca antariksa. Sabuk radiasi elektron akan mengalami penurunan fluks saat terjadi badai geomagnet. Hal ini dikarenakan lapisan sabuk radiasi elektron bergerak mendekati Bumi sehingga seolah-olah fluks turun. Namun, sekitar 2 hingga 3 hari setelah badai geomagnet, fluks elektron energi tinggi meningkat dan mengakibatkan gang-

guan pada satelit karena elektron berpenetrasi ke komponen satelit dan menghasilkan penumpukan muatan di dalam material satelit (Filawati, 2018). Sabuk radiasi ion didominasi oleh proton dan neutron yang bersumber dari interaksi radiasi kosmik dengan atmosfer Bumi (Parks, 2003; Kallenrode, 2004). Partikel-partikel ini bergerak sepanjang garis medan menuju kutub kemudian dipantulkan kembali ke arah ekuator, sehingga menimbulkan gerakan memantul. Sabuk radiasi elektron dan ion bergerak dengan kecepatan dan medan magnet tertentu mengikuti mengikuti garis medan menuju kutub dan masuk ke atmosfer bagian atas (NASA, 2024a). Sabuk radiasi ion berubah seiring dengan perubahan medan magnet. Saat terjadi badai geomagnet, intensitas proton naik 10 kali lipat sehingga mengakibatkan lapisan sabuk radiasi ion mampat dan berinteraksi dengan lapisan di ketinggian yang lebih rendah sehingga dapat memengaruhi proses fisis lainnya (Ebihara & Miyoshi, 2009). Magnetosfer bagian dalam merupakan poin kunci untuk mempelajari hubungan dan keterkaitan Magnetosfer-Ionosfer.

Pada lintang tinggi, garis medan yang terbuka dan menyapu bagian malam medan magnet disebut *magnetotail*. *Magnetotail* dapat memanjang hingga ratusan R_E . Medan magnet *magnetotail* berasal dari plasma yang terkonveksi dari kutub magnet yang menjalar ke *plasmashet* di bagian malam. *Plasmashet* merupakan tempat terjadinya rekoneksi yang akan mengarahkan energi plasma menuju ke kutub magnet Bumi yang dapat menimbulkan aurora. Rekoneksi tersebut disebut sebagai ‘*substorm*’. *Magnetotail* memiliki dinamika yang berbeda dengan magnetosfer pada sisi siang.

Pengamatan magnetosfer Bumi perlu dilakukan secara kontinu, mengingat dinamika magnetosfer yang bergantung pada lokasi, waktu, serta rotasi dan revolusi Bumi. Pengamatan dapat dilakukan dengan menggunakan instrumen landas Bumi dan landas antariksa yang masing-masing memiliki karakteristik tertentu sehingga pengamatannya dapat saling mendukung serta kolaborasi antar negara sangat diperlukan. Pada subbab berikutnya akan dijelaskan fungsi vital

magnetosfer Bumi dalam mengantisipasi dampak aktivitas Matahari terhadap kelangsungan kehidupan di Bumi dan teknologi antariksa, pengamatan magnetosfer Bumi landas Bumi dan antariksa, serta riset magnetosfer ke depan.

B. Badai Geomagnet

Aktivitas geomagnet terjadi akibat proses fisis di daerah magnetosfer Bumi. Penyebab umum dari munculnya fenomena geomagnet adalah aliran energi dari Matahari ke Bumi melalui angin Matahari. Angin Matahari tersebut berinteraksi dengan magnetosfer dan terkadang menyebabkan gangguan geomagnet, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 6.2. Gangguan geomagnet yang tinggi menyebabkan badai geomagnet.

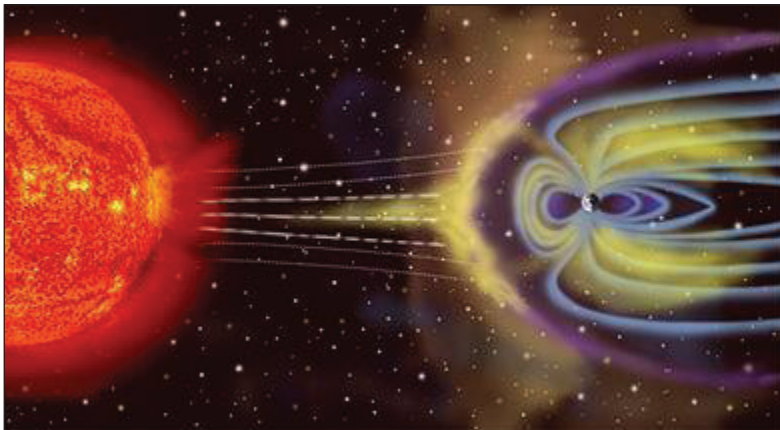
Badai geomagnet merupakan gangguan pada medan magnet Bumi yang timbul akibat adanya gangguan pada IMF dan angin matahari. Badai geomagnet secara umum terjadi karena adanya kondisi tidak normal di medium antarplanet yang dikenali dari perubahan pada IMF dan emisi angin matahari yang disebabkan oleh berbagai macam aktivitas Matahari. Aktivitas yang menyebabkan badai geomagnet di antaranya yaitu aliran angin matahari berkecepatan tinggi (*High Speed Stream/HSS*), *Co-rotating Interaction Region* (CIR), dan lontaran massa korona (*Coronal Mass Ejection/CME*) (Gonzales, 1994).

Sebenarnya ada tiga peristiwa badai matahari yang berpengaruh terhadap medan magnet atau lingkungan antariksa Bumi yaitu flare, CME, dan lubang korona. Peristiwa CME dan flare bisa mempercepat laju partikel walaupun flare itu sendiri tidak secara langsung memengaruhi medan magnet tetapi partikel yang dipercepat dalam mekanisme flare memengaruhi waktu tibanya partikel ke Bumi. Pada umumnya flare mempercepat ion yang biasanya dalam bentuk proton. Besaran energi yang dihasilkannya bisa mencapai ratusan MeV dan peristiwa ini disebut SEP (*Solar Energetic Particle*). Terdapat dua paradigma peristiwa SEP, yaitu gradual SEP yang diakibatkan oleh gelombang kejut akibat CME di ruang antarplanet dan impulsif SEP yang diakibatkan oleh flare matahari tanpa CME (Desai & Giacalone, 2016).

Lontaran massa korona di ruang antarplanet (ICME) membawa partikel yang sangat besar dan menjauhi matahari dengan kecepatan yang dapat mencapai 1.000 km/detik. Jika lontaran massa korona itu berarah ke Bumi, akan terjadi badai geomagnet yang bisa mengakibatkan terganggunya satelit, sinyal GPS, bahkan hingga terganggunya komunikasi radio dan merusak jaringan listrik di permukaan Bumi.

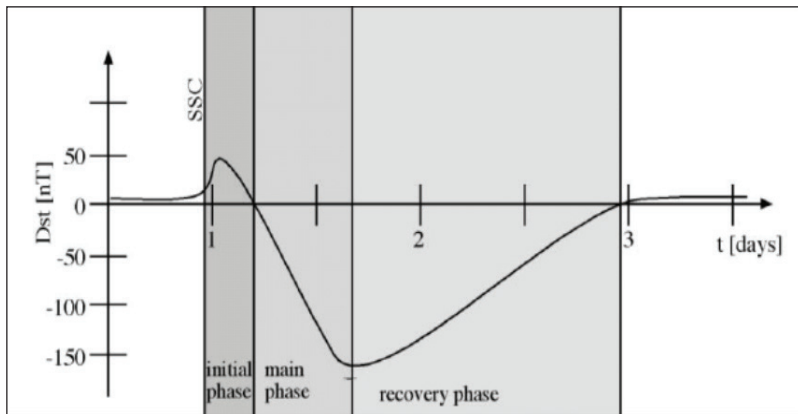
Gangguan geomagnet didorong oleh interaksi angin matahari dengan magnetosfer dan kekuatan interaksi ini tergantung dari parameter angin Matahari. Studi tentang gangguan medan magnet penting dalam memahami dinamika lingkungan Matahari-Bumi. Lebih dari itu, studi ini juga penting karena badai geomagnet dapat menyebabkan gangguan pada jaringan listrik, kerusakan satelit, gangguan komunikasi, dan masalah navigasi (Rathore, 2012). Gonzalez et al. (1994) dan Bakare & Chukwuma (2010) menjelaskan bahwa badai geomagnet memainkan peran penting dalam cuaca antariksa dengan mentransfer energi dari angin Matahari ke magnetosfer yang mengakibatkan peningkatan partikel bermuatan.

Pada kejadian badai geomagnet terdapat 3 fase, yaitu fase awal (*initial phase*), fase utama (*main phase*), dan fase pemulihan (*recovery phase*). Ketika fase awal, terjadi peningkatan Dst antara 20–50 nT,



Sumber: NASA (2024b)

Gambar 6.2 Ilustrasi Angin Matahari sampai ke Medan Magnet Bumi



Sumber: Kasran et al. (2018)

Gambar 6.3 Fase Badai Geomagnet

kemudian masuk fase utama ditandai dengan menurunnya indeks Dst. Fase pemulihan dimulai ketika indeks Dst mulai naik sampai ke kondisi normal (Kasran et al., 2018). Pada kejadian badai geomagnet terdapat 3 fase, yaitu fase awal (*initial phase*), fase utama (*main phase*), dan fase pemulihan (*recovery phase*), seperti yang dtunjukkan oleh Gambar 6.3.

Parameter untuk memonitor tingkat badai geomagnet di antaranya yaitu:

1. Indeks Dst

Indeks Dst merupakan rata-rata komponen horizontal medan magnet dari 4 stasiun pengamatan di daerah lintang rendah, yaitu Hermanus (HER), Honolulu (HON), Kakioka (KAK), dan San Juan (SJG). Semakin negatif, maka kondisi geomagnet semakin terganggu.

2. Indeks AE

Indeks AE pertama kali diperkenalkan oleh Davis dan Sugiura pada tahun 1966 sebagai ukuran aktivitas elektrojet global di zona aurora yang dihasilkan oleh peningkatan arus ionosfer yang mengalir di bawah dan di dalam daerah aurora. Indeks AE adalah rentang total deviasi dari nilai hari tenang medan magnet hori-

zontal (H) yang berasal dari 12 stasiun. AE sangat berguna dalam studi morfologi *substorm*, satelit komunikasi, propagasi radio, sintilasi radio, dan hubungan antara medan magnet antarplanet dan magnetosfer Bumi.

3. Indeks K

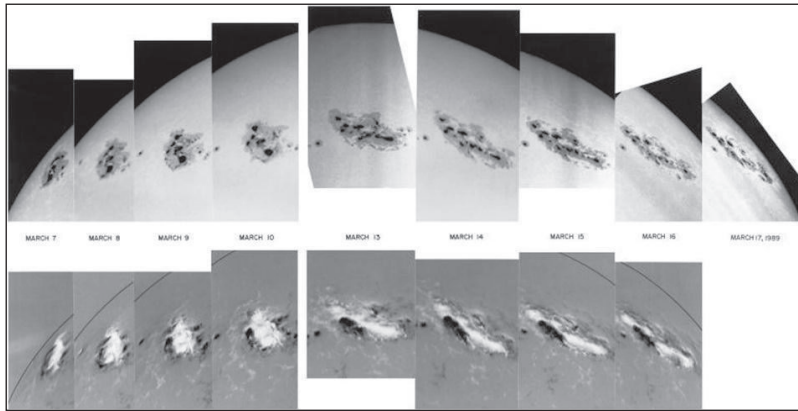
Indeks K adalah pengukuran aktivitas geomagnet dengan periode 3 jam-an dari data komponen H yang diperkenalkan oleh J.Bartels pada tahun 1939. Indeks K dilambangkan dengan bilangan bulat dari 0-9. Indeks K 0 - 4 menunjukkan kondisi geomagnet tenang dan lebih dari 5 menunjukkan aktivitas geomagnet pada tingkat badai geomagnet.

4. Indeks Kp

Indeks Kp adalah rata-rata tingkat gangguan geomagnet dalam interval 3 jam-an yang diperoleh dari 13 stasiun pengamatan di lintang menengah.

Beberapa contoh badai geomagnet besar yang pernah terjadi, adalah sebagai berikut.

1. Badai geomagnet yang terjadi pada tanggal 13 Maret 1989, berdampak pada terjadinya pemadaman saluran listrik di Kanada bagian Timur (Kappenman & Albertson, 1990), terganggunya sistem satelit, dan juga berkontribusi terhadap karat dan korosi pada pipa minyak dan gas. Dua CME dengan kecepatan yang sangat tinggi menabrak Bumi, mengakibatkan terjadinya *Storm Sudden Commencement* (SSC) (Allen, et al., 1989; Fujii, et al., 1992) dan menghasilkan aurora yang sangat indah, langit tampak sangat bercahaya di belahan Bumi bagian utara. Badai ini berasal dari daerah aktif NOAA5395 yang berada pada daerah piringan matahari tampak pada Gambar 6.3. Selama itu dia menghasilkan 11 *flare* kelas X dengan *flare* terbesar X15 pada tanggal 6 Maret dan *flare* X6.5 pada tanggal 17 Maret. Walaupun *flare* terbesarnya adalah kelas X15, akan tetapi yang berdampak adalah *flare* X4.5 pada tanggal 10 Maret dan *flare* X7.3 pada tanggal 12 Maret yang berasosiasi dengan adanya CME (Boteler, 2019). SSC akibat



Sumber: Boteler (2019)

Gambar 6.4 Perjalanan *Sunspot* 5395 Melintasi Permukaan Matahari antara Tanggal 7 dan 17 Maret 1989

gelombang kejut dari CME antar planet tersebut terjadi pada jam 01.27 UT dan yang kedua terjadi pada 07.43 UT tanggal 13 Maret. Kecepatan angin Matahari pada saat itu 980 km/detik dan medan magnet antarplanet arah Utara-Selatan (B_z) bernilai -50 nT, akibatnya nilai Dst mencapai nilai -589nT dan indeks Kp mencapai 9+.

2. Badai geomagnet 30 Oktober 2003, mengakibatkan terjadinya gangguan aliran listrik di Swedia bagian selatan. Badai geomagnet ini dikenal sebagai Halloween Storm, pada saat itu indeks Dst turun berkisar -180 nT pada peristiwa SSC pertama. Sesaat setelah IMF B_z kembali ke arah utara atau badai telah berada pada fase pemulihan, terjadi lagi gelombang kejut yang kedua dan membuat Dst kembali turun berkisar sampai dengan -360 nT dan diikuti dengan penurunan Dst sampai dengan kisaran -400nT (Pulkkinen, et al., 2005)

3. Badai Geomagnet Saint Patricks terjadi pada 17–18 Maret 2015 ketika siklus matahari ke- 24. Badai geomagnet ini berlangsung selama kurang lebih 18 jam dan mencapai level G4 ($Dst = -223$ nT) dengan fase utama badai dimulai pukul 07.30 UT pada tanggal 17 Maret 2015. Pada saat itu medan magnet antarplanet (Bz) mengarah ke selatan sampai dengan -30 nT. Badai ini diakibatkan oleh perubahan medan magnet antarplanet (IMF) berarah selatan pada saat penurunan indeks Dst yang pertama dan *magnetic cloud* (MC) *storm*. Awan magnetik (MC) merupakan lontaran plasma matahari yang memiliki medan magnet sangat kuat, rotasi sudut besar, dan temperatur proton rendah. Badai geomagnet st. Patricks ini mengakibatkan terputusnya aliran listrik di beberapa negara (Astafyeva, et al., 2015).
4. Badai geomagnet terbesar terjadi baru-baru ini, yaitu pada tanggal 11–12 Mei 2024, mengakibatkan nilai indeks Dst turun sampai dengan -412 nT, dengan Kp mencapai 9+. Badai geomagnet ini merupakan badai terbesar yang terjadi selama 20 tahun terakhir, diakibatkan CME pada tanggal 10 Mei 2024. Kecepatan angin matahari sampai dengan 900 km/detik, dan medan magnet antarplanet berarah selatan berkisar -50 nT . Badai geomagnet ini diakibatkan oleh daerah aktif 3664 memasuki daerah piringan matahari yang tampak pada tanggal 7 Mei 2024 dan berkembang pesat ukuran dan kompleksitasnya. Pada tanggal 8 Mei 2024 terjadi 7 *flare* kelas X dan beberapa *flare* kelas M yang mengarah ke Bumi. Peristiwa pertama *flare* kelas X1.0 yang berdurasi panjang terjadi pada jam 05:09 UT, tanggal 8 Mei 2024 yang berasosiasi dengan Halo CME yang mengarah ke Bumi. Kemudian diikuti dengan *flare* kelas M8.6 pada jam 12:04 UT yang bergerak dengan kecepatan tinggi menuju Bumi. Kedua CME itu bergerak menuju Bumi diikuti dengan *flare* yang besar yaitu X1.0 dan M9.8 sekitar jam 21:40. Dampak dari badai magnetik ini adalah terganggunya sistem satelit Starlink yang merupakan cabang dari SpaceX pada tanggal 11 Maret 2024. Selain itu dampak positif dari badai ini

adalah di sebagian wilayah lintang tinggi dapat melihat keindahan dari pancaran cahaya di langit utara atau yang biasa disebut aurora borealis yang berwarna merah muda, hijau dan ungu.

Menurut penelitian, sumber utama badai geomagnet ekstrem memiliki karakterisasi indeks Dst < -100 nT (nano-Tesla) adalah CME yang merupakan pelepasan plasma dan medan magnet dalam jumlah besar secara tiba-tiba dari Matahari. Selain itu, fenomena lubang korona yang terjadi di Matahari, menghasilkan aliran HSS yang keluar dari lubang korona dapat menyebabkan badai geomagnet sedang (Tsurutani, et al., 1997).

Angin matahari dapat digambarkan sebagai aliran partikel bermuatan yang berasal dari bagian atas atmosfer matahari. Angin matahari menyebabkan perubahan kecepatan, kepadatan, dan suhu seiring waktu dan garis bujur. Karena pemanasan koronal, partikel angin matahari mencapai kecepatan lepas dan mengembang menjauhi Matahari dan ketika angin matahari dengan kecepatan tinggi memasuki medium antarplanet, partikel tersebut juga dapat mengganggu medan magnet Bumi (Cane & Richardson, 1995; Loewe & Prolss, 1997). Kane (2005) dan Sabbah (2001) menemukan bahwa badai geomagnet terutama terjadi ketika interaksi IMF dengan Bumi mempunyai komponen Bz yang kuat ke arah selatan.

Arus cincin tumbuh di magnetosfer bagian dalam selama badai magnet dan memberikan kontribusi signifikan terhadap karakteristik gangguan medan magnet Bumi yang diamati di garis lintang rendah. Arus cincin bumi bertanggung jawab untuk melindungi garis lintang bawah bumi dari medan listrik magnetosfer (Daglis, et al., 1999). Oleh karena itu, hal ini berdampak besar pada elektrodinamika badai geomagnet. Sistem arus cincin terdiri dari sebuah pita, pada jarak 3 hingga $8 R_E$, yang terletak pada bidang ekuator dan beredar searah jarum jam mengelilingi Bumi (bila dilihat dari utara). Partikel-partikel di wilayah ini menghasilkan medan magnet yang berlawanan dengan medan magnet bumi sehingga pengamat Bumi akan mengamati penurunan medan magnet di wilayah tersebut. Pembelokan negatif medan magnet bumi akibat arus cincin diukur dengan indeks Dst.

Energi arus cincin terutama dibawa oleh ion-ion, yang sebagian besar adalah proton. Namun, kita juga melihat partikel alfa dalam arus cincin, sejenis ion yang banyak terdapat dalam angin matahari. Selain itu, persentase tertentu merupakan ion oksigen O^+ , mirip dengan ionosfer bumi, meskipun jauh lebih energik. Campuran ion ini menunjukkan bahwa partikel arus cincin mungkin berasal dari lebih dari satu sumber.

C. Pengamatan Medan Magnet Bumi

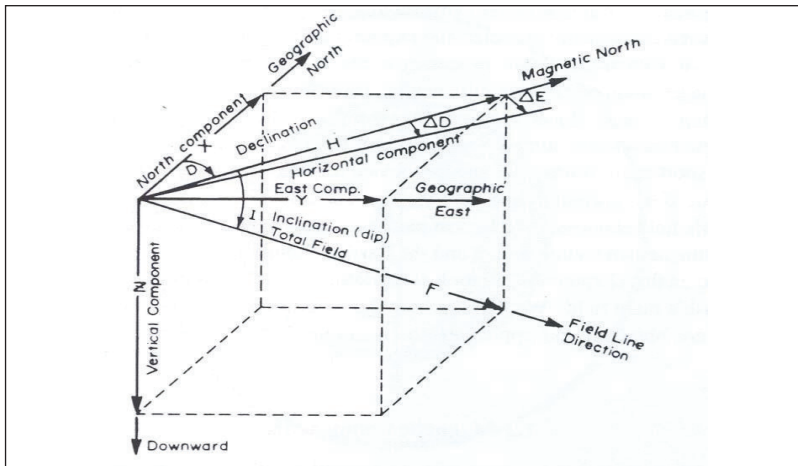
Pengamatan medan magnet bumi dilakukan untuk dapat memahami fenomena-fenomena fisis yang terjadi serta dampaknya bagi kehidupan. Aktivitas geomagnet dapat berdampak pada sistem teknologi di Bumi, terutama yang berkaitan dengan teknologi informasi, telekomunikasi, dan navigasi yang berbasis antariksa/satelit, serta para operator survei geofisika. Magnetosfer merupakan lapisan di lingkungan Bumi yang mengandung medan magnet yang berasal dari superposisi dari beberapa sumber. Sumber utama medan magnet bumi berasal dari: (1) medan utama (*main field*) yang bersumber dari inti bumi, (2) aliran plasma inti bumi yang terkait dengan variasi sekular medan magnet, (3) medan litosfer yang diakibatkan oleh kerak batuan termagnetisasi, (4) induksi akibat gerak samudra, (5) medan magnet ionosferik, dan (6) medan magnetosferik.

Berdasarkan sistem koordinatnya, vektor medan magnet bumi umumnya digambarkan dengan dua cara seperti ditunjukkan pada Gambar 6.4. Pertama, vektor direpresentasikan sebagai komponen X, Y, Z dengan X merepresentasikan arah geografis utara-selatan, Y arah timur-barat, dan Z arah vertikal bumi. Kedua, vektor direpresentasikan sebagai komponen H, D, Z, dengan H merepresentasikan arah magnet utara-selatan, D arah sudut deklinasi, dan Z arah vertikal, sedangkan inklinasi (I) yaitu sudut antara medan magnet total (F) dengan bidang horizontal yang dihitung dari bidang horizontal menuju bidang vertikal ke bawah. Berdasarkan sistem koordinatnya, vektor medan magnet Bumi umumnya digambarkan dengan dua cara seperti ditunjukkan pada Gambar 6.5.

$$X = H \cos(D), Y = H \sin(D) \quad Z = B \sin I \quad (C.1)$$

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = \sqrt{H^2 + Z^2} \quad (C.2)$$

$$\frac{Z}{H} = \tan(I) \quad (C.3)$$



Sumber: Campbel (2003)

Gambar 6.5 Proyeksi komponen medan magnet Bumi

1. Instrumentasi Magnetometer

Magnetometer merupakan suatu instrumen yang dapat mengamati perubahan fisis suatu medan magnet secara *real time*. Magnetometer pertama kali diperkenalkan oleh Carl Friedrich Gauss sekitar tahun 1833 dengan membuat suatu perangkat yang dapat mendeteksi dan mengukur nilai dan orientasi medan magnet Bumi. Hasil penemuannya masih digunakan sampai saat ini dan telah menjadi dasar bagi pengembangan teori magnetik modern. Karena penemuan ini juga, nama Gauss digunakan sebagai standar untuk satuan kerapatan fluks magnet.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Terdapat beberapa jenis magnetometer yang saat ini digunakan untuk pengamatan, survei di lapangan maupun untuk keperluan riset dalam skala laboratorium. Pengukuran medan magnet Bumi dapat dilakukan di permukaan Bumi (*ground-based*) maupun di antariksa (*space-based*). Berbagai teknik pengukuran medan magnet telah banyak dikembangkan untuk diterapkan dalam instrumen, sehingga menghasilkan beberapa jenis magnetometer. Secara umum magnetometer terbagi atas dua jenis yaitu magnetometer skalar dan magnetometer vektor.

Magnetometer skalar adalah magnetometer yang hanya mengukur nilai total dari suatu kekuatan medan magnet di sekitarnya. Magnetometer skalar umumnya jenis magnetometer *mobile*, dan sering digunakan untuk survei atau pemetaan. Contoh dari magnetometer skalar antara lain *proton precession magnetometer* (PPM) dan *Overhauser*, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.6. Prinsip kerja dari instrumen *proton precession magnetometer* adalah dengan memanfaatkan gejala resonansi magnetik (*nuclear magnetic resonance-NMR*), adanya perubahan medan magnet akan mempengaruhi orientasi spin proton (*gyromagnetik*). Dengan adanya spin proton ini maka dapat dideteksi frekuensi resonansi atau tegangan yang diinduksi dalam kumparan sehingga dapat ditentukan besarnya nilai medan magnet. Sementara itu, *Overhauser* memiliki kerja mirip dengan proton magnetometer, hanya saja menggunakan sinyal frekuensi radio untuk mempolarisasi putaran elektron.



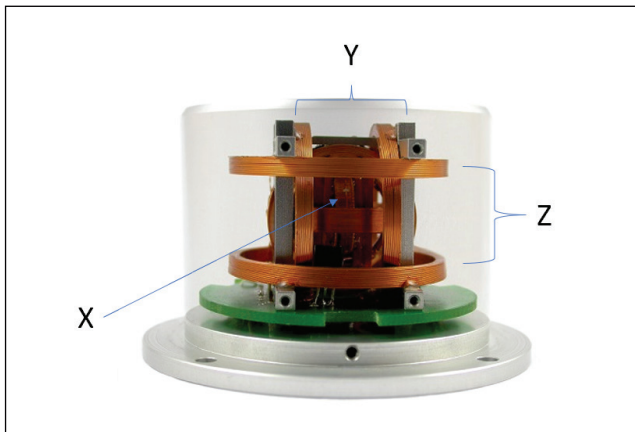
Keterangan: (a) Proton Type: G856, (b) Overhauser GSM-15.

Sumber: Dok. BRIN

Gambar 6.6 Magnetometer Jenis Skalar

Magnetometer vektor adalah magnetometer yang dapat mengukur besar dan arah medan magnet. Secara umum orientasi dari medan magnet direpresentasikan dalam 3 koordinat yaitu komponen X (arah Utara-Selatan), Y (Timur-Barat), dan Z (vertikal). Magnetometer vektor umumnya jenis magnetometer *statis* yang sering digunakan untuk mengukur variasi diurnal (harian). Contoh dari magnetometer vektor antara lain fluxgate dan induktif, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.7. Magnetometer ini pada dasarnya terdiri dari kumparan/lilitan yang materialnya mempunyai permeabilitas tinggi dalam medan magnetik yang rendah sehingga memungkinkan untuk mengukur benda magnetik yang mempunyai *hysteresis loop* sekecil mungkin. Secara umum prinsip kerja dari fluxgate adalah dengan menerapkan hukum Faraday, yaitu jika ada suatu fluks magnet yang melewati suatu koil, fluxgate akan menghasilkan tegangan/arus yang proposional (berbanding lurus) dengan perubahan fluks.

Dalam perkembangannya, instrumen magnetometer sudah mengalami banyak variasi dalam perancangan maupun konfigurasi yang disesuaikan dengan kebutuhan, baik untuk penggunaan secara komersial maupun kegiatan penelitian (Jankowski dan Sucksdorff,



Sumber: Magson (2024)

Gambar 6.7 Magnetometer Vektor Tipe Fluxgate.

Tabel 6.1 Spesifikasi Ideal Fluxgate Magnetometer

Rugged	Mean time before failure 24 months	Passband	DC to 1 Hz DC to 0.1 Hz ^a
Reliable	mean time to repair 1 day	Noise	0.03 nT in passband
Protected against	lightning, humidity, RF interference	Linearity	0.1% at full scale
Power	<100 W, uninterruptible	Timebase	1 s month ⁻¹ 5 s month ^{-1 a}
Resolution	0.1 nT 0.1 nT ^a	Sampling rate	10 Hz
Dynamic range	>±3000 nT (8000 high latitude 6000 elsewhere) ^a	Measurement interval	5 s 1.0 s ^a
Stability	0.25 nT per month 5 nT per year ^a	Temperature coefficient	Sensor <0.1 nT/°C Console <0.1 nT/°C ^a 0.25nT/°C ^a
3 component sensor construction	orthogonal within ±30' Stable to 0.3''/month 0.3''/°C	Tilt sensors	Resolve 1'' (every 10 min) Stability 1''/month

Sumber: Trigg (1988)

1996). Namun, untuk penggunaan observatorium diperlukan instrumen magnetometer yang memiliki suatu standar khusus (Trigg, 1988) seperti terlihat pada Tabel 6.1.

2. Jaringan Obsevatori Geomagnet

Observatori geomagnet merupakan suatu kawasan tempat dilakukannya pengamatan medan magnet bumi. Keberadaan observatori geomagnet ini selain sebagai pusat riset juga berperan sebagai penyedia informasi data pengamatan untuk penelitian ilmiah maupun kebutuhan komersial. Seiring dengan perkembangannya, setiap observatorium geomagnet dituntut untuk dapat menghasilkan data pengamatan yang lebih baik. Kelayakan dari suatu observatorium geomagnet dapat dilihat dari beberapa hal, di antaranya lokasi pengamatan yang tetap, perekaman data jangka panjang, kualitas data yang baik, dan modernisasi dari instrumen pengamatan dengan standarisasi seperti pada Tabel 6.2. Selama beberapa dekade ke belakang, data observatorium geomagnet hanya tersedia dalam bentuk kertas cetak seperti magnetogram. Dengan perkembangan teknologi saat ini, transformasi data observasi telah mengalami peralihan dari data analog ke data digital sehingga penyebarannya menjadi lebih cepat.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Tabel 6.2 Daftar Lokasi Stasiun Pengamatan Magnetometer LAPAN

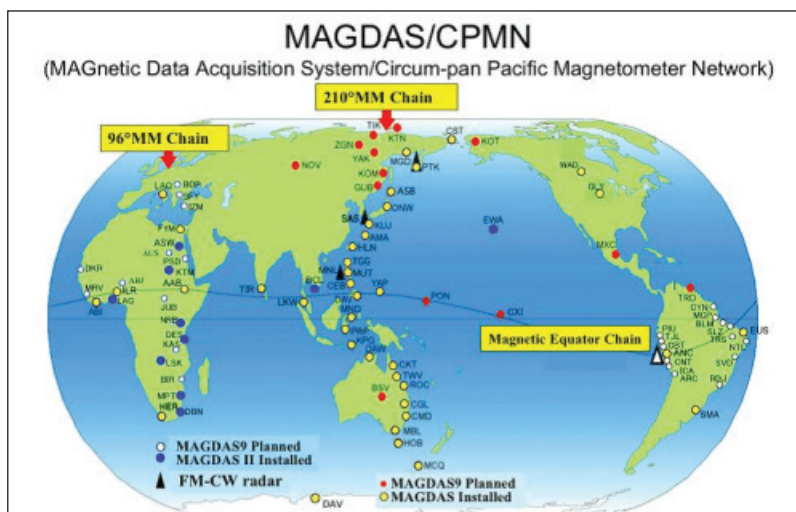
Stasiun Pengamatan	Jenis Magnetometer	Jaringan Pengamatan	Tahun Pemasangan
Biak (BIK)	Fluxgate (YU-8)	LAPAN/BRIN	1992
Tanjungsari (TJS)	Fluxgate (MB162)	LAPAN/BRIN	2004
Kototabang (KTB)	Fluxgate (YU-8)	LAPAN/BRIN	2004
Pare-Pare (PRP)	Fluxgate (Magdas I,II)	MAGDAS/CPMN	2006
Manado (MND)	Fluxgate (Magdas I,II)	MAGDAS/CPMN	2007
Kupang (KPG)	Fluxgate (Magdas I,II)	MAGDAS/CPMN	2007
Watukosek (WTK)	Fluxgate (Magson)	LAPAN/BRIN	2012
Pontianak	Fluxgate (Magdas 9)	MAGDAS/CPMN	2011
Jayapura (JYP)	Fluxgate (Magdas 9)	MAGDAS/CPMN	2011
Pameungpeuk (PMK)	Fluxgate (Magson)	LAPAN/BRIN	2012
Negara (NGR)	Fluxgate (Lemi)	LAPAN/BRIN	2012

BRIN memiliki jaringan magnetometer yang tersebar diseluruh wilayah Indonesia yang bertujuan untuk melakukan studi terkait model medan magnet bumi regional, sistem arus ionosfer, pulsa magnet, serta layanan terkait dengan cuaca antariksa. Kolaborasi dengan observatorium luar negeri juga dilakukan untuk membentuk komunitas geomagnet yang bertujuan mengumpulkan, menyimpan, dan mendistribusikan informasi tentang data pengamatan guna membantu penelitian ilmiah dengan lebih baik. Salah satu upaya tersebut di antaranya melakukan kolaborasi dengan jaringan internasional MAGDAS/CPMN (*Magnetic Data Acquisition System/Circum-pacific Magnetometer Network*). Pemasangan magnetometer pertama kali dilakukan pada tahun 1992 di Stasiun Pengamat Dirgantara (SPD) Biak. SPD Biak merupakan bagian dari stasiun pengamatan LAPAN (Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional) dan sejak tahun 2021 LAPAN bergabung dengan BRIN (Badan Riset dan Inovasi Nasional). Seiring dengan waktu, saat ini BRIN memiliki 11 lokasi pengamatan medan magnet yang tersebar di seluruh Indonesia. Beberapa stasiun tersebut merupakan bagian dari jaringan magnetometer MAGDAS/CPMN, di antaranya stasiun Manado, Pare-Pare, Kupang, Pontianak, dan Jayapura, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.9.



Sumber: Triharjanto (2014)

Gambar 6.8 Peta Jaringan Stasiun Magnetometer LAPAN



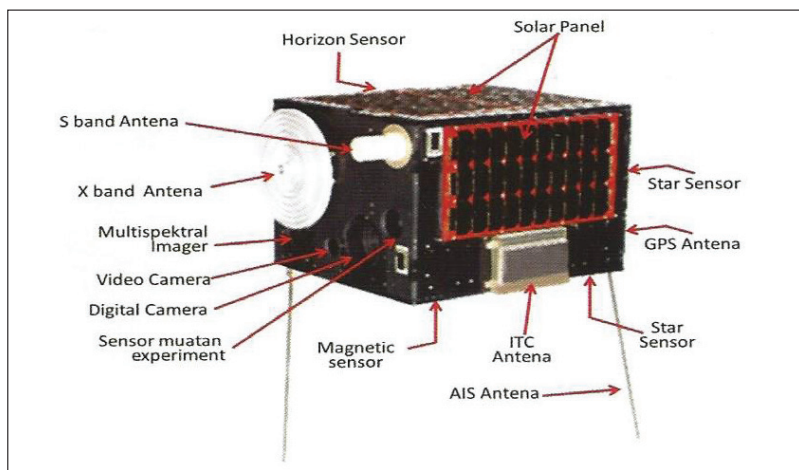
Sumber: i-SPES (2024)

Gambar 6.9 Peta Jaringan Stasiun MAGDAS/CPMN.

Pengamatan *space-based* juga dilakukan oleh BRIN dengan meluncurkan satelit LAPAN-A3. Satelit ini membawa beberapa muatan, termasuk di antaranya magnetometer HFGM (*Hybrid Fluxgate Magnetometer*) untuk melakukan eksperimen pengukuran medan

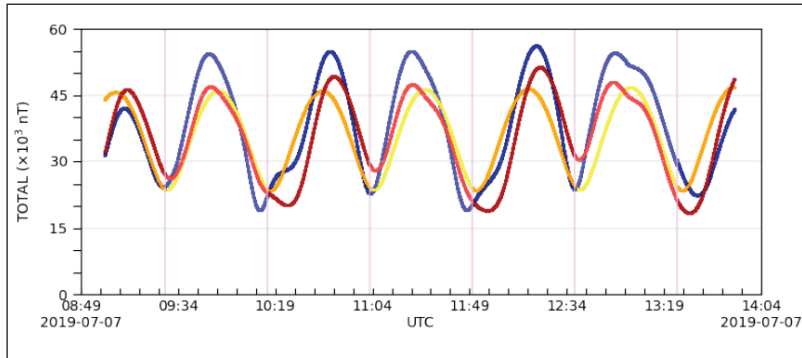
Buku ini tidak diperjualbelikan.

magnet bumi di ketinggian atmosfer-atas/ionosfer (Triharjanto et al., 2014). Satelit LAPAN-A3 merupakan satelit mikro yang memiliki orbit polar pada ketinggian LEO (*Low Earth Orbit*) sekitar 500 km dari permukaan Bumi. Dengan ketinggian dan orbitnya yang polar, satelit ini dapat mengelilingi Bumi sebanyak 14 kali dalam satu hari. Hasil pengukuran HFGM (*Hybrid Fluxgate Magnetometer*) dalam rentang waktu tersebut dapat memberikan gambaran mengenai kondisi medan magnet global karena akan melewati beberapa area penting secara kelistrikan dan kemagnetan berdasarkan klasifikasi lintang (Musafar et al., 2021). Lintang tinggi merupakan area *polar cap* yang memiliki geometri garis medan magnet terbuka dan menghubungkan ruang angkasa dekat Bumi dengan medium antar-planet. Sementara itu, lintang menengah dan rendah merupakan area tempat sistem arus ionosfer berada. Magnetometer satelit LAPAN-A3 melakukan perekaman data medan magnet resolusi waktu yang tinggi, yaitu dengan *sampling rate* 128 per detik. Data dengan resolusi tinggi ini dapat digunakan untuk menganalisis fenomena ionosfer yang bersifat lokal di sepanjang lintasan orbit tersebut. Hasil ekstraksi data satelit LAPAN-A3 terlihat pada Gambar 6.11.



Sumber: Doni K. (2017)

Gambar 6.10 Satelit Mikro LAPAN-A3



Keterangan:

Garis biru: Satelit LAPAN-A3; Garis kuning: Model dipol; Garis merah: IGRF

Sumber: Musafar (2021)

Gambar 6.11 Plot Medan Magnet Rekaman Magnetometer

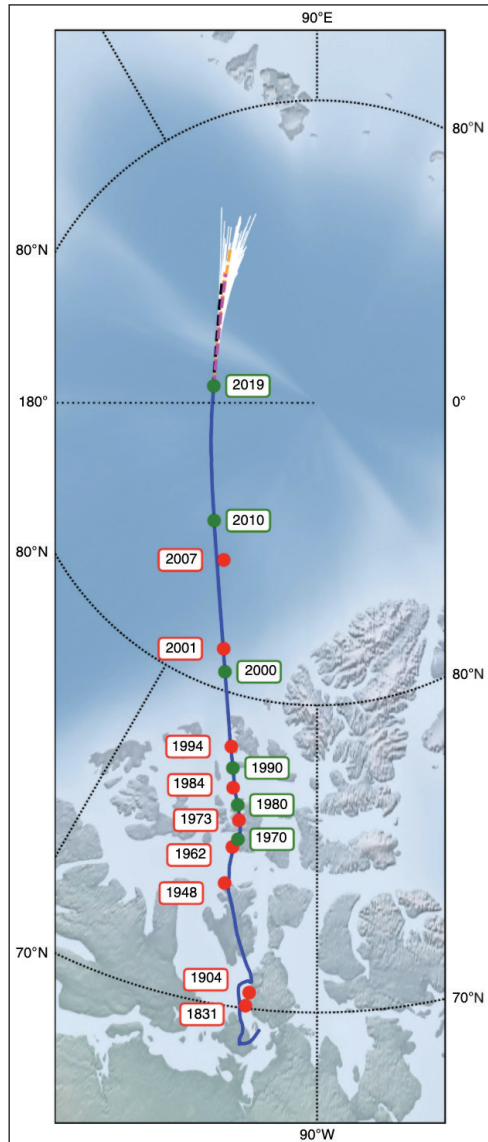
D. Perubahan Medan Magnet Bumi

Akankah medan magnet bumi (magnetosfer) selamanya melindungi Bumi? Pertanyaan ini merupakan pertanyaan terbaik untuk mengonfirmasi pernyataan seperti pada judul. Mengapa menjadi pertanyaan terbaik? Karena magnetosfer merupakan pelindung bagi kehidupan di Bumi dan lingkungannya dari bahaya yang berasal dari antariksa. Permasalahannya, sampai kapan magnetosfer menjadi pelindung Bumi? Akankah magnetosfer hilang dan bagaimana efeknya bagi lingkungan Bumi dan semesta jika magnetosfer hilang?

1. Pemicu Terjadinya Pembalikan Polaritas Kutub Medan Geomagnet

Terdapat dua bukti bahwa polaritas kutub medan geomagnet mengalami pembalikan (*flip*). Pertama, terjadinya pengembaraan/bergeraknya titik kutub utara magnet yang telah dicatat oleh ilmuwan dan pelaut sejak 1831. Perpindahan kutub ini diperkirakan sejauh 31 mil per tahun, seperti dapat dilihat pada Gambar 6.12.

Kedua, ketika lava dari gunung berapi memadat, saat itu mineral feromagnetik seolah-olah sejajar dengan medan geomagnet. Dari



Sumber: Livermore et al. (2020)

Gambar 6.12 Pengembangan/Pergerakan Lokasi Titik Kutub Utara

Buku ini tidak diperjualbelikan.

analisis terhadap batuan, diperoleh hasil bahwa medan magnet saat pemadatan berlawanan dengan medan magnet saat ini; seolah-olah kutub selatan magnet berada pada kutub utara geografis. Para ilmuwan tidak mengetahui secara pasti penyebab pembalikan tersebut, tetapi menurut catatan ilmuwan, pembalikan kutub Bumi terakhir terjadi 780.000 tahun lalu (Shergold, 2023).

Para ilmuwan juga mengetahui hal yang mengkhawatirkan, yakni telah terjadi penurunan kekuatan medan magnet sebesar 30% dalam 3.000 tahun terakhir berdasarkan penelitian batuan dan lava. Dengan semakin baiknya pengetahuan ilmuwan akan medan magnet, diketahui bahwa sekitar 200 tahun lalu medan magnet telah mengalami pelemahan sebesar 9% dari sekarang. Hal ini menunjukkan bahwa titik kutub-kutub bumi pernah mengalami pergerakan dan medan magnet pernah mengalami perubahan (penurunan kekuatan) (Shergold, 2023).

2. Peristiwa Apokaliptik Akibat Pembalikan Polaritas Kutub Medan Geomagnet

Sekitar 420.000 tahun yang lalu, magnetosfer bumi pernah mengalami kondisi apokaliptik (kondisi hancur parah-kiamat), dipicu oleh pembalikan kutub magnet bumi dan perubahan perilaku Matahari (Fogwill et al., 2021). Pembalikan kutub medan geomagnet ini merupakan terkini dan pembalikan ini memicu serangkain peristiwa dramatis yang mempunyai konsekuensi bagi lingkungan Bumi seperti hancurnya lapisan ozon, GIC di seluruh daerah tropis, cahaya aurora spektakuler, musim dingin ekstrem di utara Amerika serta perubahan pola cuaca yang drastis. Selama peristiwa ini, paparan ultraviolet ekstrem menghantam Bumi sehingga menyebabkan kepunahan mega fauna dan flora.

Peristiwa pembalikan kutub 420.000 tahun yang lalu dikenal sebagai “Laschamps Excursion”. Nama tersebut berasal dari nama sebuah desa tempat ditemukannya di Massif Central Prancis. Ekskursi Laschamps terbaru terjadi di Tasmania, Australia. Namun, hingga saat ini, belum jelas apakah perubahan ini berdampak pada iklim dan

kehidupan manusia. Penelitian baru menunjukkan bahwa dampaknya bersifat global dan meluas.

Adanya peristiwa 420.000 tahun lalu ini telah dibuktikan oleh Profesor Alan Cooper dengan menganalisis pohon kauri di New Zealand. Melalui analisis lingkaran pohon kauri dapat ditentukan kemungkinan peristiwa yang terjadi saat itu. Analisis menggunakan sistem komputer canggih menemukan bahwa, pada saat pembalikan kutub, kekuatan medan magnet bumi turun hingga kurang dari 6% dari kekuatan medan geomagnet saat ini, sehingga seolah-olah Bumi tanpa magnetosfer atau pelindung perisai (Fogwill et al., 2021).

Jadi berdasarkan paparan di atas, terbukti bahwa walaupun titik kutub Bumi mengalami pergerakan dan medan geomagnet mengalami perubahan, tetapi medan geomagnet atau magnetosfer tidak akan pernah hilang sama sekali dan akan tetap menjadi perisai bagi kehidupan di Bumi. Medan geomagnet atau magnetosfer hanya akan mengalami perubahan dan pelemahan, serta pembalikan kutub-kutub sebagai dampak interaksi dengan Matahari dan alam semesta.

E. Lingkungan Antariksa dan Pengaruh terhadap Teknologi Antariksa

Lingkungan antariksa didefinisikan sebagai ruang vakum atau medium di luar atmosfer Bumi. Lingkungan antariksa dipengaruhi oleh aktivitas Matahari, diantaranya *flare*, CME, dan lubang korona. *Flare* adalah fenomena ledakan energi di atmosfer matahari hingga mencapai 6×10^{25} joule dengan kelajuan tinggi dan terjadi secara tiba-tiba. CME merupakan ledakan plasma dari permukaan Matahari, lubang korona merupakan wilayah di korona matahari dengan kepadatan rendah dan temperatur rendah. Interaksi dari kondisi aktivitas Matahari dapat berdampak langsung bagi berbagai teknologi di Bumi, seperti sistem komunikasi, sistem navigasi, dan satelit yang mengorbit Bumi. Ada dua masalah utama cuaca antariksa bagi satelit yang mengorbit Bumi, yaitu paparan radiasi dan hambatan satelit di atmosfer (Gubby & Evans, 2002). Matahari secara terus menerus memancarkan energi dalam jumlah yang sangat besar di seluruh spektrum elektromagnetik

yang terdiri dari sinar-X, ultraviolet, cahaya tampak, infra merah, dan gelombang elektromagnetik (Lu et al. et al, 2019). Dampak gangguan pada satelit akan semakin meningkat seiring dengan peningkatan aktivitas matahari yang selalu memancarkan radiasi elektromagnetik dan partikel bermuatan. Tumbukkan partikel menjadi salah satu penyebab anomali satelit yang disebabkan oleh cuaca antariksa. Anomali satelit merupakan suatu kondisi ketika satelit mengalami gangguan yang penyebabnya tidak dapat diperkirakan secara pasti. Berbagai macam anomali satelit yang disebabkan oleh cuaca antariksa seperti pengisian daya (*charging*), hambatan atmosfer (*atmospheric drag*), hilang kendali sikap satelit (*lost the attitude control*), dan lain-lain.

Sampai pada bulan Mei 2024 ada sebanyak 9.900 satelit aktif di orbit dengan 12% mengorbit di Geostationary Earth Orbit (GEO), 3% di Medium Earth Orbit (MEO), dan 85% di Low Earth Orbit (LEO) (Nano Avionics, 2024). Seiring dengan meningkatnya jumlah satelit yang mengorbit, fenomena cuaca antariksa sangat penting untuk menjadi perhatian karena cuaca antariksa memainkan peran utama pada kesehatan, operasional, dan kinerja dari satelit, terutama pada orbit rendah dan tinggi. Pada tahun 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, dan 2011 terdapat kejadian anomali satelit sebanyak 23 kasus, 21 kasus, 28 kasus, 24 kasus, 21 kasus, 14 kasus, dan 3 kasus (Ahmad, 2012).

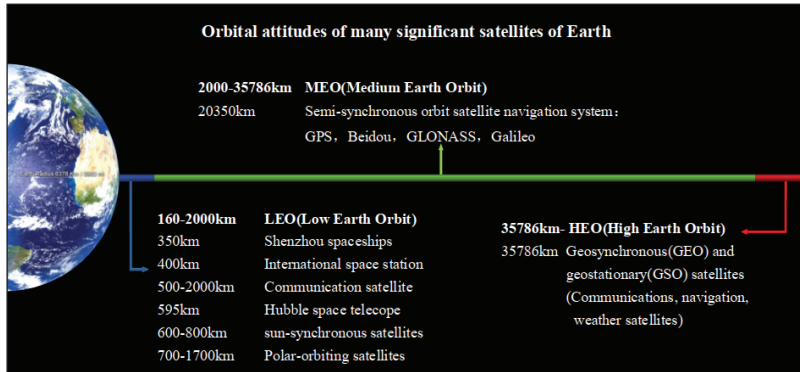
Kejadian anomali satelit yang lebih spesifik terjadi pada tanggal 20 Januari 1994 pada satelit Intelsat K, Anik E1, dan Anik E2 yang mengalami kehilangan kontrol sikap satelit yang disebabkan peningkatan fluks elektron relativistik (>2 MeV) Kejadian tersebut mengakibatkan Electrostatic Discharge (ESD) secara internal oleh elektron sabuk radiasi (Ahmad, 2012). Pada bulan Februari tahun 2022, sekitar 38 satelit starlink hilang kendali. Kejadian tersebut diduga akibat badai geomagnet lingkungan antariksa yang terdiri dari berbagai fenomena kompleks dari Matahari yang dapat memengaruhi ruang antarplanet, magnetosfer, ionosfer, dan termosfer Bumi, Perubahan fenomena tersebut akan membawa dampak negatif terhadap sistem teknologi berbasis ruang angkasa dan landas Bumi (Horneet alet al., 2013).

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Selain itu, pada awal Februari 2022, 38 satelit Starlink mengalami mati secara prematur karena adanya *drag* tidak normal pada atmosfer atas. Penyebab kejadian ini adalah badai geomagnet yang disebabkan adanya angin Matahari dan medan magnet antarplanet (Tsyganenko et al., 2022). Pada tahun 1994, dua satelit komunikasi Kanada, Satelit Anik E1 dan E2, mengalami kerusakan akibat badai geomagnet yang kuat, sehingga Satelit Anik E1 mengalami kegagalan sistem kendali sikap satelit, sedangkan Anik E2 mengalami gangguan daya, menyebabkan hilangnya layanan komunikasi di seluruh Kanada. Pada tahun 1997, Satelit Telstar 401 mengalami kegagalan total yang diduga disebabkan oleh badai matahari yang kuat sehingga menyebabkan gangguan besar pada layanan TV dan data di Amerika Utara.

Selain satelit komunikasi, badai matahari juga menyebabkan kerusakan pada satelit cuaca NOAA-16 yang mengakibatkan kerusakan pada beberapa instrumen penting sehingga mengurangi kemampuan satelit dalam mengumpulkan data cuaca. Serangkaian badai matahari yang terjadi pada akhir Oktober hingga awal November 2003, yang disebut juga sebagai Badai Matahari Halloween, menyebabkan gangguan pada beberapa satelit, termasuk satelit komunikasi dan navigasi. Badai ini juga menyebabkan peningkatan radiasi yang mengharuskan beberapa satelit dioperasikan dalam mode aman (*safe mode*) untuk melindungi komponen elektroniknya (Leach & Alexander, 1996).

Secara umum penempatan satelit pada orbit dibagi ke dalam tiga wilayah, yaitu LEO, MEO, dan GEO (ditunjukkan pada Gambar 6.13). LEO didefinisikan sebagai orbit yang memiliki ketinggian antara 180 km sampai 2.000 km, MEO memiliki ketinggian antara 2.000 km sampai 35.780 km, dan GEO memiliki ketinggian lebih besar dari 35.780 km. Ketinggian orbit LEO merupakan wilayah yang sangat terpengaruh oleh lapisan atmosfer atas (Luet al et al., 2019). Satelit yang ditempatkan pada orbit LEO adalah satelit dengan berbagai macam misi, seperti edukasi, percobaan, pengamatan bumi, sambungan internet, dan Internet of Things (IoT). Sementara itu, pada orbit MEO dan GEO, satelit yang ditempatkan memiliki misi lebih spesifik seperti komunikasi, navigasi, dan pengamatan cuaca. Pada setiap orbit, banyak kejadian anomali yang dihasil dari berbagai kondisi



Sumber: Yifan Luet al et al. (2019)

Gambar 6.13 Distribusi Wahana Antariksa di Orbit Bumi

cuaca antariksa, sehingga pada proses desain dilakukan penekanan khusus untuk menghilangkan dampak utama dari pengaruh cuaca antariksa pada setiap orbit.

Berdasarkan NASA Marshall Space Flight Center, lingkungan antariksa meliputi enam area, yaitu atmosfer netral, plasma, radiasi, meteoroid/debu orbital, lingkungan termal, dan lingkungan matahari (Luet al et al., 2019; Leach & Alexander, 1996). Cuaca antariksa sangat dipengaruhi oleh aktivitas matahari. Selain itu, aktivitas matahari juga dapat memicu aktivitas lain pada lingkungan antariksa seperti atmosfer netral, plasma, radiasi, partikel makroskopis, medan magnet, dan temperatur.

Perubahan kondisi atmosfer bagian atas dapat menyebabkan perubahan kerapatan termosfer yang memengaruhi hambatan satelit pada orbit rendah (LEO, <2.000 km). Dampak utama dari peningkatan kerapatan ini muncul akibat peningkatan suhu yang dihasilkan dari energi yang masuk ke termosfer yang didorong oleh aktivitas matahari atau aktivitas geomagnet (Fang, T.W.et al et al., 2022). Kejadian tersebut menyebabkan perubahan kerapatan atmosfer netral secara langsung dan akan menyebabkan hambatan atmosfer (*atmospheric drag*) pada orbit rendah. Hambatan satelit dapat mengganggu operasional satelit seperti saat mengontrol sikap satelit karena adanya peningkatan gaya

Buku ini tidak diperjualbelikan.

& Peplinski, 1986). Gangguan yang disebabkan oleh atom oksigen akan mengikis material satelit yang berdampak pada material satelit menjadi teroksidasi dan menghasilkan gas volatil (De Groh.et al et al., 2008). Akibatnya instrumen optik akan mengalami pengembunan sehingga citra yang dihasilkan menjadi buram atau kurang baik resolusinya.

Ionosfer adalah bagian atmosfer atas yang terionisasi oleh radiasi Matahari, berada mulai dari 60 km hingga 100 km di atas permukaan laut, dan wilayahnya mencakup termosfer dan sebagian mesosfer dan eksosfer. Lapisan ionosfer mengandung partikel listrik bermuatan yang dapat memantulkan dan menyerap sebagian gelombang radio tertentu. Peran dari ionosfer sangat penting dalam kelistrikan atmosfer dan membentuk batas pada lapisan magnetosfer (Suryana, 2021). Elektron yang terdapat pada lapisan ionosfer dapat memengaruhi pelemahan sinyal yang merambat pada lapisan ionosfer, apalagi ketika aktivitas Matahari mengalami peningkatan yang signifikan menyebabkan amplitudo dan fase dari sinyal radio akan berfluktuasi dengan cepat sehingga memengaruhi propagasi sinyal di semua frekuensi.

Orbit rendah (LEO) terletak di bagian bawah sabuk radiasi bagian dalam, maka dampak lingkungan radiasi di lintang tinggi dan Atlantik Selatan Anomali (South Atlantic Anomaly) tidak akan lebih kuat jika dibandingkan dengan orbit yang lebih tinggi (MEO dan GEO) dari pada orbit LEO. Gangguan medan geomagnet membuat sifat partikel berenergi tinggi mengalami gejolak dengan intensitas yang bervariasi berdasarkan waktu dan lokasi. Di sisi lain, meskipun proton mendominasi partikel berenergi tinggi di orbit LEO, peristiwa proton memiliki pengaruh yang lebih sedikit pada wahana antariksa. Hal ini disebabkan oleh perisai medan geomagnet (Yifan Luet al et al., 2019).

Kerusakan instrumen dan peralatan satelit tidak hanya terjadi pada aktivitas Matahari yang tinggi, tetapi juga dapat terjadi bahkan pada aktivitas Matahari yang tergolong rendah. Contoh kasus ini terjadi pada satelit Galaxy 15. Satelit ini mengalami gangguan komunikasi sehingga tidak dapat merespon terhadap perintah dari

Bumi tetapi tetap dapat mengirimkan sinyal dari transpondernya. Akibatnya, satelit mengalami *drifting* dan berpotensi terjadi tabrakan dengan satelit lain pada orbit *geostationary*. Sementara itu, beberapa ilmuwan berpendapat bahwa hilangnya kemampuan komunikasi satelit dapat disebabkan oleh badai geomagnet dengan intensitas rendah sampai menengah (Allen, 2010).

Pada tahun 2022, Pusat Prediksi Cuaca Luar Angkasa (SWPC) NOAA mengeluarkan peringatan bahwa peristiwa badai geomagnet kecil tetapi berkepanjangan akan terjadi. Beberapa hari kemudian, SpaceX Starlink meluncurkan sejumlah satelit baru ke orbit rendah Bumi. Namun, setelah peluncuran, 38 dari 49 satelit Starlink mengalami kegagalan dan keluar orbit hingga terbakar saat masuk kembali ke atmosfer Bumi. Studi yang dilakukan terhadap kejadian tersebut mengonfirmasi bahwa badai geomagnet pada bulan Februari menciptakan gangguan di lapisan atas atmosfer yang meningkatkan kondisi tarikan satelit dan mengurangi stabilitas satelit (Kataoka, 2022).

Selain badai geomagnet dan badai matahari, keberadaan meteorit dan sampah luar angkasa juga dapat mengancam satelit dan wahana antariksa. Observatorium luar angkasa generasi terbaru milik NASA, James Webb Space Telescope, yang ditempatkan pada titik Lagrange Bumi-Matahari 2 (L2), telah mengalami 20 tumbukan mikro-meteorit yang terdeteksi sejak peluncurannya pada tahun 2021. Tumbukan mikro-meteorit secara perlahan akan menurunkan performa peralatan. Dampak yang paling serius terjadi antara tanggal 23 Mei 2022 dan 25 Mei 2022 dan memengaruhi segmen C3 dari cermin utama heksagonal berlapis emas sebanyak 18 buah dari teleskop tersebut (Bartels, 2024; McElwain, 2023).

F. Perkembangan Riset Geomagnet di Indonesia

Secara historis, riset kemagnetan antariksa atau medan geomagnet di luar Bumi padat, mulai dari permukaan Bumi hingga antariksa, didasari oleh pertanyaan terkait dengan deviasi besar pada hasil medan magnet Bumi, yang dewasa ini dikenal dengan sebutan badai magnet. Pertanyaan ini menimbulkan hasrat para ilmuwan geofisika,

astrofisika, dan bidang terkait lainnya untuk menjelaskan hal tersebut. Selain itu, kemunculan aurora di daerah lintang tinggi telah teramati sejak lama, tetapi tidak diduga bahwa hal tersebut berkaitan dengan kemagnetan di antariksa Bumi. Pada sisi lain, observasi kejadian *flare* di awal abad ke-19 memunculkan spekulasi bahwa deviasi besar medan magnet Bumi terjadi akibat peristiwa *flare* yang melontarkan garis bermuatan listrik yang dapat mencapai orbit Bumi. Pada sisi lain, eksperimen komunikasi jarak jauh menggunakan gelombang radio melahirkan penemuan ionosfer yang merupakan sebuah lapisan konduktif di atas lapisan atmosfer.

Penyelidikan mengenai penyebab terjadinya badai geomagnet di lingkungan Bumi memicu perkembangan teoritis dan observasional. Hasil-hasil awal kajian teoritis di antaranya adalah adanya lapisan batas antara daerah antariksa Bumi dan ruang antarplanet, dugaan kuat bahwa Matahari melontarkan plasma yang disebut angin Matahari secara terus-menerus menuju ruang antar-planet. Gagasan teoritis tersebut selanjutnya dibuktikan melalui hasil observasi. Pada sisi lain, dengan adanya observasi medan magnet yang dilakukan secara kontinu diketahui pula bahwa variasi medan magnet Bumi berperilaku mengikuti lama penyinaran Matahari seperti halnya peningkatan ionisasi di atmosfer bagian atas akibat radiasi Matahari. Hasil observasi dan gagasan ini menimbulkan pemahaman baru bahwa antariksa Bumi memiliki struktur kompleks yang terdiri atas magnetosfer dan ionosfer. Magnetosfer ini termampatkan pada sisi siang dan membentuk geometri mirip dengan sebuah ekor pada sisi malam. Selain itu, aliran plasma angin matahari menimbulkan disturbansi pada sistem magnetosfer-ionosfer Bumi yang disertai oleh transfer momentum dan energi angin matahari ke dalam sistem tersebut. Konsekuensi dari kejadian tersebut adalah terbentuknya berbagai sistem arus skala besar dan peristiwa transpor partikel.

Interaksi Matahari-Bumi selanjutnya menjadi topik riset antariksa hingga dewasa ini. Karena medium di antariksa Bumi, dalam hal ini ionosfer dan magnetosfer, berupa plasma, maka riset kemagnetan antariksa serta observasinya merupakan hal yang esensial dalam

menyelidiki proses-proses dinamis dan mekanisme seperti apa yang berperan dalam berbagai keadaan dan fenomena di dalam sistem antariksa Bumi. Permasalahan-permasalahan yang ada dalam riset tersebut masih mengenai bagaimana mekanisme transfer energi dari angin matahari ke dalam sistem antariksa, kopling dan transfer momentum dan energi antardaerah di antariksa Bumi, percepatan dan energisasi partikel pada suatu daerah tertentu, transpor partikel dari satu daerah menuju daerah lainnya, penjalaran dan pembangkitan gelombang plasma di magnetosfer dan ionosfer, serta keterkaitan antara satu proses dengan proses lainnya.

Indonesia, selain terletak pada lintang ekuatorial sistem koordinat geografis tempat pemanasan matahari paling tinggi selama ekuinoks, pada sisi lain juga terletak pada lintang rendah sistem koordinat geomagnet. Karena letaknya yang demikian, sebuah stasiun pengamat medan magnet pertama di bangun di Batavia sejak sebelum era kemerdekaan. Observasi tersebut dimanfaatkan untuk menyelidiki variasi medan magnet dan hubungannya dengan sistem arus yang mengalir di ionosfer Bumi. Terkait dengan penyelidikan hubungan Matahari-Bumi, yaitu setelah peristiwa gerhana matahari total tahun 1983, dan sejalan dengan riset global penjalaran disturbansi magnetik, maka dibangun sejumlah stasiun pengamat medan magnet di beberapa daerah di Indonesia melalui kolaborasi riset internasional antara BRIN (LAPAN hingga tahun 2020 sebelum bergabung dengan BRIN) dengan universitas dan/atau lembaga riset Jepang. Arah penelitian saat itu adalah untuk menyelidiki mekanisme fisis penjalaran disturbansi magnetik dari lintang tinggi menuju lintang rendah (penjalaran latitudinal) serta penjalaran dalam arah radial menuju permukaan Bumi dan azimutal.

Pada sisi lain observasi di bidang atmosfer-tengah dan atmosfer-atas/ionosfer telah menunjukkan keberadaan gelembung plasma ekuatorial. Transpor vertikal yang diikuti oleh penjalaran sejajar medan-magnet gelembung plasma menuju lintang-tengah tersebut merupakan salah satu permasalahan transpor partikel dari atmosfer menuju ionosfer. Pada sisi lain, telah lama diketahui bahwa terdapat

peristiwa *stratospheric sudden warming* (SSW) di daerah lintang tengah. Hasil-hasil penelitian hingga dewasa ini juga menunjukkan adanya keterkaitan antara SSW dan arus Sq geomagnet. SSW ini juga diduga menjadi pemicu bagi perubahan iklim global.

Variasi tekanan angin matahari mengakibatkan osilasi permukaan *magnetopause* dan mengakibatkan tereksitasinya gelombang ULF di magnetosfer Bumi. Mekanisme pembangkitan dan penyaluran gelombang ini menjadi salah satu fokus dalam riset plasma antariksa. Meskipun demikian, dengan adanya sejumlah jaringan observasi medan magnet global, sejumlah peneliti juga menduga bahwa peristiwa gempa bumi akibat aktivitas tektonik juga mengeksitasi gelombang dalam rentang ULF tersebut.

Di awal tahun 2000-an, program cuaca antariksa muncul karena cuaca antariksa telah memberi dampak dan membahayakan infrastruktur teknologi. Pada awalnya dampak cuaca antariksa diyakini terjadi pada daerah lintang tinggi. Namun, hasil-hasil observasi dan riset menunjukkan bahwa dampak cuaca antariksa juga terjadi pada lintang rendah. Lebih lanjut, bencana antariksa seperti peristiwa anomali satelit dan bahkan jatuhnya sejumlah satelit operasional diyakini merupakan dampak dari dinamika lingkungan antariksa. Sejumlah negara, termasuk Indonesia, mencetuskan program cuaca untuk diagnosis kondisi antariksa Bumi dan juga untuk peramalannya.

Singkatnya, Indonesia terletak pada daerah tempat garis-garis medan magnetnya seluruhnya berada pada lapisan ionosfer. Medan magnet tersebut bervariasi dari waktu ke waktu dan memiliki ketergantungan pada sumber eksternal. Antariksa bumi terdiri atas magnetosfer dan ionosfer. Kopling angin matahari-magnetosfer-ionosfer-atmosfer merupakan isu penting dalam riset kemagnetan antariksa. Keterkaitan antara satu peristiwa dengan peristiwa lainnya dan/atau antara satu daerah dengan daerah lainnya masih memerlukan penyelidikan lebih jauh untuk mengungkap mekanisme pembangkitan, penyaluran, dan dampak yang dapat ditimbulkannya. Beberapa permasalahan utama dalam bidang biomagnet adalah sebagai berikut.

1. Proses dan mekanisme transfer energi maupun perkiraan jumlahnya yang masuk ke dalam sistem antariksa bumi
2. Pembentukan dan mekanisme percepatan partikel energi tinggi
3. Sumber dan berkurangnya partikel
4. Dinamika *magnetotail*
5. Keterkaitan antara fenomena lintang tinggi dan lintang rendah
6. Penjalaran efek badai magnet dan arus ionosfer terhadap perubahan kondisi ionosfer dan proses-proses transpor partikel serta pengaruhnya terhadap penjalaran gelombang radio melewati ionosfer
7. Eksitasi gelombang mikroseismik saat gempa Bumi merupakan permasalahan utama dalam bidang geomagnet

Selain itu, kopling sistem magnetosfer-ionosfer-atmosfer mungkin akan menjadi topik menarik dalam menyelidiki perubahan iklim global. Meskipun demikian, untuk mencapai semua itu diperlukan juga observasi yang meliputi medan magnet, kerapatan, atau spektrum frekuensi/energi plasma antariksa, baik berbasis permukaan bumi atau satelit. Alam selalu menampilkan peristiwa yang patut kita pelajari agar kita selalu berpikir.

Daftar Pustaka

- Allen, J. (2010), The Galaxy 15 Anomaly: Another Satellite in the Wrong Place at a Critical Time, *Space Weather*, 8,S06008, doi:10.1029/2010SW000588
- Allen, J., Sauer, H., Frank, L., & Reiff, P. (1989). Effects of the March 1989 solar activity. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 70, 1486–1488.
- Arnold G S & Peplinski D R . (1986). Reaction of high-velocity atomic oxygen with carbon. *AIAA Journal*, 24(4):673–677.
- Astafyeva, E., Zakharenkova, I., Foerster, M., Doornbos, EN. (2015). *Ionospheric and thermospheric response to the 2015 St. Patrick's day storm*, AGUpubs, Volume 120, Issue 10, October 2015, 9023–9037.

- Bakare, N. O. & Chukwuma, V. U. (2010). Relationship between Dst and solar wind conditions during intense geomagnetic storms. *Indian Journal of Radio & Space Physics*, Vol. 39, 150-155.
- Bartels, Meghan. (2024). The James Webb Space Telescope gets its own micrometeoroid forecast-here's how. Space.com. <https://www.space.com/james-webb-space-telescope>. accessed on 15 June.
- Borovsky, J. E. & Valdivia, J. A. (2018). The Earth's Magnetosphere: A Systems Science Overview and Assessment. *Surveys in Geophysics*, 39:817–859. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9487-x>
- Boteler, D.H., A 21st Century View of the March 1989 Magnetic Storm, *AGUpubs*, Volume17, Issue10, October 2019, 1427–1441.
- Campbell, W. H. (2003). *Introduction to Geomagnetic Fields*. Cambridge University Press.
- Cane, H. V., & Richardson, I. G. (1995). Cosmic ray decreases and solar wind disturbances during late October 1989. *J. Geophys. Res.* 100, 1755.
- CWRU (2024). Retrieved July 21, 2024 from <https://thedaily.case.edu/really-know-earths-inner-core-formed/#:~:text=It%20is%20widely%20accepted%20that,metal%20at%20the%20planet's%20center>
- Daglis, I.A., Thorne, R.M., Baumhjohnann, W., Orsini, S. (1999). The terrestrial ring current: Origin, formation, and decay, Review of Geophysics, Vol.37: 437–438. <https://doi.org/10.1029/1999RG900009>
- De Groh K K, Banks B A, McCarthy C E, et al. (2008). MISSE 2 PEACE polymers atomic oxygen erosion experiment on the international space station. *High Performance Polymers*, 20(4–5): 388–409.
- Desai, M.I., Giacalone, J. (2016), Large gradual solar energetic particle events, *J. Living ev. Sol. Phys.* 13, 3
- Dungey J.W. (1961). Interplanetary Magnetic Field And The Auroral Zones. *Phys. Rev. Lett.*, 6, 47.
- Eastwood, J.P., Nakamura, R., Turc, L., Mejnertsen, L., Hesse, M. (2017). The Scientific Foundations of Forecasting Magnetospheric Space Weather. *Space Sci. Rev.*, 212: 1221–1252. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0399-8>
- Ebihara, Y. & Miyoshi, Y. (2011). Dynamic inner magnetosphere: Tutorial and recent advances, in Dynamic Magnetosphere. *IAGA Special Sopron Book Series*, Vol. 3, 145–187. <https://doi:10.1007/978-94-007-0501-2>

- Fang, T.-W., Kubaryk, A., Goldstein, D., Li, Z., Fuller-Rowell, T., Millward, G., et al. (2022). Space weather environment during the SpaceX Starlink satellite loss in February 2022. *Space Weather*, 20, e2022SW003193. <https://doi.org/10.1029/2022SW003193>
- Filawati, S. (2018). Analysis of Electron Flux Condition in Outer Electron Radiation Belt Based On Interplanetary Magnetic Field (Bz) and Solar Wind Speed. *Jurnal Sains Dirgantara*, Vol. 15.
- Fogwill, C., Hogg, A., Turney, C., & Thomas, Z. (2021). Earth's magnetic field broke down 42,000 years ago and caused massive sudden climate change. *The Conversation*.
- Fujii, R., Fukunishi, H., Kokubun, S., Sugiura, M., Tohyama, F., Hayakawa, H., Tsuruda, K., & Okada, T. (1992). Field-aligned current signatures during the March 13–14, 1989, great magnetic storm. *Journal of Geophysical Research*, 97(A7), 10,703–10,715.
- Gonzalez, W. D., Joselyn, J. A., Kamide, Y., Kroehl, H. W., Rostoker, G., Tsurutani, B. T., & Vasyliunas, V. M. (1994). What is a geomagnetic storm? *Journal of Geophysical Research*, 99 (A4), 5771. <https://doi.org/10.1029/93JA02867>
- Gubby, Robin and Evans, John. 2002. Space Environment Effect and Satellite Design. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 64(16):1723–1733. doi:10.1016/S1364-6826(02)00122-0
- Horne, R. B., S. A. Glauert, N. P. Meredith, D. Boscher, V. Maget, D. Heynderickx, and D. Pitchford (2013), Space weather impacts on satellites and forecasting the Earth's electron radiation belts with SPACECAST, *Space Weather*, 11, 169–186, doi:10.1002/swe.20023.
- i-SPES (2024). Retrieved Juli 1, 2024, from http://magdas2.i-spes.kyushu-u.ac.jp/figures/MAGDAS_map.png
- Jacobs, J. A. (1953). The earth's inner core. *Nature*, 172, 197–298.
- Jankowski J., and C. Sucksdorff. (1996). Guide For Magnetic Measurements And Observatory Practice. *Warsaw*.
- Kataoka, Ryuho, et al 2022. Unexpected space weather causing the reentry of 38 Starlink satellites in February 2022. *J. Space Weather Space Clim.* 2022, 12, 41. <https://doi.org/10.1051/swsc/2022034>
- Kallenrode, M. B. (2004). *Space Physics: An Introduction to Plasmas and Particles in the Heliosphere and Magnetospheres*. 3rd ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Kane, R. (2005). How good is the relationship of solar and interplanetary plasma parameters with geomagnetic storms? *J. Geophys. Res. Atmos.* 110(A2). <https://doi.org/10.1029/2004JA010799>
- Kasran, F. A. M., Jusoh, M. H., Rahim, S. A. E. A., Abdullah, N. (2018). Geomagnetically Induced Currents (GICs) in Equatorial Region. *IEEE 8th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*.
- Lakhina, G. S., Alex, S., Mukherjee, S. & Vichare, G. (2006). On magnetic storms and substorms. *Goa, ILWS WORKSHOP*.
- Leach R D dan Alexander M B. (1996). *Spacecraft System Failures and Anomalies Attributed to the Natural Space Environment*[J], National Aeronautics & Space Administration Nasa Reference..
- Livermore, P. W., Finlay, C. C., & Bayliff, M. (2020). Recent north magnetic pole acceleration towards Siberia caused by flux lobe elongation. *Nature Geoscience*. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0570-9>
- Loewe, C. A., & Prölss, G. W. (1997). Classification and mean behavior of magnetic storms. *J. Geophys. Res. Atmos.* 102(A7):14209–14214. <https://doi.org/10.1029/96JA04020>
- Lopez, R. E. (1990). Magnetospheric Substorms. *John Hopkins APL Technical Digest*, 11, 3–4.
- Lu , Y., Shao, Q., Yue, H. and Yang ,F., (2019). A Review of the Space Environment Effects on Spacecraft in Different Orbits. *IEEE Access*, vol. 7, pp. 93473–93488, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2927811
- Magson. (2024). Retrieved Juni 14, 2024, from https://www.magson.de/images/magson_fluxgate_sensor_transparent.jpg.
- Michael W. McElwain et al 2023. The James Webb Space Telescope Mission: Optical Telescope Element Design, Development, and Performance. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Vol. 135, No.1047.doi 10.1088/1538-3873/acada0
- Musafar L. M, Yatini C. Y , Nuraeni F, Wellyanita V, Winarko A, Juangsih M, Ratnasari E.A, Hasbi W, Utama S. (2021). Pre-Processing Data Magnetometer Satelit Lapan-A3. *Jurnal Sains Dirgantara*, 19(1), 1–12. <https://doi.org/10.30536/j.jsd.2020.v19.a3559>
- Nano Avionics (2024). Retrieved Mei 14, 2024, from <https://nanoavionics.com/blog/how-many-satellites-are-in-space/#:~:text=As%20of%20May%20the%204th,to%20dominate%20low%20Earth%20orbit>
- NASA (2024a). Retrieved Mei 14, 2024, from <https://www.nasa.gov/image-article/earths-magnetosphere-4/>

- NASA (2024b). Retrieved Mei 14, 2024, from <http://sec.gsfc.nasa.gov/popscise.jpg>
- Nizam, A. (2012). Analisis Potensi Anomali Satelit-Satelit Orbit Rendah dalam Siklus Matahari Ke-23, *Jurnal Sains Dirgantara*, 9(2).
- Mejnertsen, L., Eastwood, J. P., Hietala, H., Schwartz, S. J., & Chittenden, J. P. (2018). Global MHD simulations of the Earth's bow shock shape and motion under variable solar wind conditions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123, 259–271. <https://doi.org/10.1002/2017JA024690>.
- Parks, G. K. (2003). *Magnetosphere*. Elsevier.
- Pulkkinen, A., S. Lindahl, A. Viljanen, and R. Pirjola (2005), Geomagnetic storm of 29–31 October 2003: *Geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system*, AGUpubs, Volume 3, Issue 8, August 2005.
- Rathore, B. S., Kaushik, S. C., Bhadoria, R. S., Parashar, K. K., & Gupta, D. C. (2012). Sunspots and geomagnetic storms during solar cycle-23. *Indian Journal of Physics*, 86(7): 263–267. <https://doi.org/10.1007/s12648-012-0106-2>
- Risk Frontiers (2024). Retrieved July 20, 2024. <https://riskfrontiers.com/insights/risks-of-weakening-of-the-earths-magnetic-field/#:~:text=However%2C%20as%20the%20Earth's%20magnetic,every%20living%20thing%20on%20Earth>
- Sabbah, I. (2001). Correction to “The role of interplanetary magnetic field and solar wind in modulating both galactic cosmic rays and geomagnetic activity”. *Geophysical Research Letters*, 28(8), 1669.
- Shergold B. (2023). What causes the magnetic flip or reversal of the Earth's magnetic field? Retrieved Mei 14, 2024 from <https://www.quora.com/What-causes-the-magnetic-flip-or-reversal-of-the-Earths-magnetic-field>
- Singh, A.K., Singh, R.P., & Siingh, D. (2011). State studies of Earth's plasmasphere: A review. *Planetary and Space Science* 59 (2011) 810–834. <https://doi:10.1016/j.pss.2011.03.013>
- Suryana, R. et al (2021) *J. Phys.: Conf. Ser.* 1940 012090
- Trigg D. F. (1988). Specifications Of An Ideal Variometer For Magnetic Observatory Applications In: Coles RL (ed). Proceedings of the international workshop on magnetic observatory instruments. *Geological Survey of Canada Paper*, 88–17.

- Triharjanto R. H, Bangkit H, Saifudin A. (2014). Development of Space-based Magnetic Activities Measurement Mission in LAPAN's Micro-Satellites. *Proceeding of 2nd Asia Future Conference*, Indonesia.
- Tsurutani, B. T., W. D. Gonzalez, Y. Kamide, and J. K. Arballo (Eds.). (1997), Magnetic Storms, Geophys. Monogr. Ser., vol. 98, AGU, Washington, D. C. DOI: 10.1029/GM098p0077
- Tsyganenko, N. A., Andreeva, V. A., Sitnov, M. I., & Stephens, G. K. (2022). Magnetosphere Distortions During the “Satellite Killer” Storm of February 3–4, 2022, as Derived From a Hybrid Empirical Model and Archived Data Mining. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127(12). <https://doi.org/10.1029/2022JA031006>
- Urry, W. D. (1949). Significance of Radioactivity in Geophysics-Thermal History of The Earth. *Trans . Amer. Geophys. Union*, 30, 171–180.
- Wang, X. Y., Zhang Q. H., Wang, C., Zhang, Y. L., Tang, B. B., Xing, Z. Y., Oksavik, K., Lyons, L. R., Lockwood, M., Zong, Q. G., Li, G. J., Liu, J., Ma, Y. Z., & Wang, Y. (2023). Unusual shrinkage and reshaping of Earth's magnetosphere under a strong northward interplanetary magnetic field. *Commun Earth Environ*, 4(31). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00700-0>

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Bab VII

Dinamika Ionosfer Regional Indonesia: Perkembangan Riset dalam Empat Dekade Terakhir

Agri Faturahman, Sefria Anggarani, Annis Siradj Mardiani, Jiyo, dan Rezy Pradipta

A. Pendahuluan

Pada ketinggian 60 km sampai dengan sekitar 1.000 km di atas permukaan Bumi, lapisan atmosfer secara dominan terdiri dari gas terionisasi dan elektron bebas yang disebut sebagai plasma. Plasma ini terbentuk akibat terionisasinya gas netral pada atmosfer oleh absorpsi sinar X dan sinar EUV (*Extreme Ultraviolet*) yang diradiasikan oleh Matahari melalui mekanisme fotoionisasi. Lapisan atmosfer yang didominasi oleh plasma ini dikenal sebagai lapisan ionosfer. Keadaan lapisan ionosfer dapat dikarakterisasi oleh berbagai macam parameter. Namun, salah satu parameter yang paling penting adalah profil kerapatan elektron versus ketinggian. Profil kerapatan elektron inilah yang menjadi salah satu indikator dari kondisi atau keadaan lapisan ionosfer. Keadaan lapisan ionosfer tidaklah statis, ia

A. Faturahman*, S. Anggarani, A. S. Mardiani, Jiyo & R. Pradipta

*Badan Riset dan Inovasi Nasional, e-mail: agri.faturahman@brin.go.id

© 2025 Editor & Penulis

Faturahman, A., Anggarani, S., Mardiani, A. S., Jiyo & Pradipta, R. *Dinamika Ionosfer Regional Indonesia: Perkembangan Riset dalam Empat Dekade Terakhir*. Dalam T. Djameluddin & F. Nuraeni (Ed.), *Keantarikaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi* (223–250). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1425.c1490 E-ISBN: 978-602-6303-86-8

berubah-ubah sepanjang waktu, bahkan keadaan ionosfer juga dapat berbeda dari satu tempat ke tempat lain di Bumi. Hal ini menandakan bahwa keadaan lapisan ionosfer mempunyai variabilitas, baik secara temporal maupun spasial.

Dalam kehidupan modern saat ini, kita tidak bisa lepas dari penggunaan sistem teknologi komunikasi dan navigasi. Pemanfaatan kedua teknologi ini sudah sangat melekat dalam kehidupan kita. Sebagai contoh, *Global Navigation Satellite System* (GNSS) termasuk di dalamnya adalah *Global Positioning System* (GPS); sistem komunikasi/penyiaran dan navigasi berbasis satelit; dan sistem komunikasi/penyiaran berbasis radio HF (*High Frequency*). Semuanya kita gunakan, baik secara praktis untuk kehidupan sehari-hari maupun untuk keperluan khusus dalam bidang penerbangan, kelautan, kebencanaan, bahkan operasi militer. Semua teknologi tersebut memanfaatkan sinyal radio dalam rentang spektrum tertentu yang berperan sebagai pembawa informasi. Kualitas sinyal radio ini dapat dipengaruhi oleh berbagai macam faktor dan salah satu faktornya adalah pembiasan, penyerapan, difraksi, dan hamburan yang disebabkan oleh plasma ionosfer. Seperti yang telah disebutkan, keadaan ionosfer selalu berubah dan sangatlah dinamis. Adakalanya dinamika variasi dan fluktuasi kondisi ionosfer ini dapat mengganggu sistem atau infrastruktur teknologi penting yang memanfaatkan perambatan gelombang radio, seperti sistem komunikasi dan navigasi.

Keadaan atau kondisi lapisan ionosfer dan dinamikanya dipengaruhi oleh berbagai macam faktor. Namun secara umum dinamika lapisan ionosfer dapat dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu interaksi kopling dari atas dan dari bawah lapisan ionosfer. Interaksi kopling dari atas adalah interaksi antara lapisan ionosfer dengan lingkungan di atasnya, dalam hal ini adalah lingkungan antariksa sekitar Bumi. Sementara itu, interaksi kopling dari bawah artinya interaksi antara lapisan ionosfer dengan lapisan atmosfer bawah, yang substansi penyusun utamanya terdiri dari atom dan molekul netral (Materassi et al., 2019).

Pada awalnya, kebutuhan akan pengetahuan terhadap fenomena di ionosfer dilakukan berdasarkan motivasi untuk meningkatkan kualitas dan prediksi keberhasilan komunikasi radio jarak jauh, terutama saat berlangsungnya Perang Dunia II (Rawer, 1975). Pada masa itu, pengamatan dan pengukuran parameter fisis berkaitan dengan fungsi untuk perencanaan frekuensi komunikasi radio. Kemudian, dengan semakin berkembangnya jaringan dan teknologi pengamatan secara global, terutama infrastruktur pengamatan berbasis antariksa (roket dan satelit), tujuan penelitian dan pengamatan juga bertambah. Selain kebutuhan praktis, fokus penelitian dan pengamatan juga ditujukan untuk memahami secara lengkap mekanisme fisis dan dampak dari fenomena yang terjadi di Ionosfer terhadap berbagai bidang.

Dengan semakin kompleksnya infrastruktur teknologi, khususnya yang ditempatkan di lingkungan antariksa seperti satelit, para peneliti semakin menyadari bahwa pemahaman mendalam tentang dinamika dan variabilitas ionosfer menjadi sangat penting. Hal ini karena fenomena di ionosfer bisa sangat memengaruhi infrastruktur teknologi tersebut dan juga koneksinya dengan stasiun di Bumi. Sampai saat ini, morfologi ionosfer Bumi telah dipelajari secara ekstensif dan didefinisikan secara akurat, sehingga model klimatologinya sudah tersedia secara luas. Model klimatologi merupakan model yang mewakili dan menggambarkan perubahan ionosfer yang terjadi secara berulang dan terus-menerus, sehingga dapat berfungsi sebagai referensi kondisi dasar atau kondisi standar dari keadaan ionosfer. Dari model klimatologi ini, secara global, parameter penting terkait variabilitas ionosfer pada ketinggian tertentu, variasi harian, variasi musiman, variasi spasial di lokasi geografis dan geomagnetik yang berbeda, dan variasi respons terhadap aktivitas matahari, dapat diakses dengan mudah (Cander, 2019).

Walaupun model klimatologis sudah tersedia dan dapat digunakan, pengembangan model ionosfer global yang akurat dan berkualitas tinggi masih menjadi tantangan signifikan, baik dari segi ilmiah maupun teknisnya (Zolesi, B., & Cander, L. R., 2014; Kusano, 2023). Hal ini karena untuk membuat model yang akurat, salah satu faktor

utamanya adalah diperlukan pemahaman secara menyeluruh terkait komposisi penyusun lapisan ionosfer, baik partikel yang bersifat netral maupun plasma, yang saling berinteraksi satu sama lain di lapisan ini. Selain itu, proses fisis di ionosfer juga sangat bergantung pada orientasi relatif dari angin netral dan medan magnet Bumi, sehingga sangat spesifik untuk setiap wilayah. Oleh karena itu, variabilitas ionosfer secara lokal dan regional merupakan subjek yang penting untuk dipelajari dan dipahami.

Berdasarkan latar belakang tersebut, pada bab ini akan dibahas mengenai pentingnya pemahaman dinamika dan variabilitas ionosfer serta perkembangan penelitian dalam bidang ini secara singkat, khususnya untuk regional Indonesia dan sekitarnya selama empat dekade terakhir. Pembahasan diawali dengan penjelasan umum dan singkat terkait lapisan ionosfer. Kemudian, dilanjutkan dengan perkembangan penelitian dinamika ionosfer secara umum. Selanjutnya adalah pembahasan mengenai perkembangan penelitian dinamika ionosfer regional Indonesia dari pertama kali dirintis sampai dengan saat ini. Terakhir, akan dibahas potensi yang dapat dimaksimalkan untuk menunjang pengembangan penelitian dinamika ionosfer regional Indonesia, sehingga ke depannya dapat memberikan kontribusi lebih besar lagi bagi komunitas sains global dan komunitas lain yang terkait dengan pemanfaatan dalam bidang ini.

B. Sekilas tentang Lapisan Ionosfer

Pada bagian pendahuluan telah disinggung bahwa lapisan ionosfer didefinisikan sebagai bagian dari lapisan atmosfer yang secara dominan terdiri dari gas terionisasi dan elektron bebas. Keadaan materi yang terdiri dari elektron bebas dan gas terionisasi ini disebut sebagai plasma. Plasma pada lapisan ionosfer yang terbentuk akibat interaksi antara materi di atmosfer dengan radiasi yang dipancarkan oleh Matahari. Lapisan plasma ionosfer ini terbentuk pada ketinggian sekitar 60 km sampai dengan sekitar 1.000 km di atas permukaan Bumi. Mekanisme fisis dan mekanisme kimiawi yang mengatur struktur dan dinamika ionosfer Bumi telah dibahas dalam buku-buku referensi

secara komprehensif (Ratcliffe, 1960; Rishbeth and Garriott, 1969; Banks and Kockarts, 1973; Rees, 1989; Kelley, 2009; Knipp, 2011; Schunk and Nagy, 2009). Oleh karena itu, pada subbab ini tidak akan disajikan pengulangan teori secara rinci. Pembaca yang ingin mengetahui teori ionosfer lebih mendalam, dapat membaca buku-buku referensi tersebut. Tujuan dari subbab ini adalah mereview kembali pengetahuan dasar tentang ionosfer dan pengenalan terminologinya bagi para pembaca.

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, lapisan ionosfer terbentuk akibat interaksi antara materi di atmosfer Bumi dengan pancaran radiasi Matahari. Dalam kerangka ini, lapisan plasma ionosfer terbentuk dari proses ionisasi molekul-molekul netral di atmosfer oleh absorpsi radiasi Matahari dengan berbagai panjang gelombang. Mekanisme ini disebut sebagai fotoionisasi. Matahari memancarkan gelombang elektromagnetik dengan berbagai macam spektrum panjang gelombang, dari mulai sinar X (panjang gelombang kurang dari 10 nm) sampai dengan sinar EUV (panjang gelombang kurang dari 120 nm). Pancaran radiasi tersebut menembus atmosfer Bumi pada ketinggian yang berbeda-beda, bervariasi dari waktu ke waktu (variasi temporal), dan dari satu titik ke titik lain di atmosfer Bumi (variasi spasial). Oleh karena itu, dalam buku referensi, ionosfer seringkali digambarkan sebagai serangkaian lapisan dengan struktur vertikal tertentu dan struktur vertikal ini dihasilkan karena energi penetrasi foton dari Matahari mencapai atmosfer Bumi pada ketinggian yang berbeda.

Ionosfer terbagi menjadi beberapa lapisan yang diberikan nama berdasarkan ketinggian dan komposisinya, yaitu lapisan D, E, dan F diurutkan dari ketinggian terendah sampai dengan tertinggi. Kerapatan elektron (atau kerapatan plasma) paling tinggi berada di lapisan F pada ketinggian sekitar 300–400 km. Selain struktur vertikal yang dikarakterisasi berdasarkan ketinggian, lapisan ionosfer juga mempunyai struktur lain yang dikarakterisasi oleh *solar zenith angle* dan garis medan magnet Bumi di sepanjang arah utara-selatan. Berdasarkan parameter tersebut, ionosfer terbagi menjadi tiga daerah,

yaitu daerah lintang tinggi dengan lintang geomagnetik antara 90° sampai dengan 60° pada setiap sisi ekuator magnetik; kemudian daerah lintang menengah dengan lintang geomagnetik antara 60° sampai dengan 20° pada setiap sisi ekuator magnetik; dan terakhir daerah lintang rendah dengan lintang geomagnetik antara 0° sampai dengan 20° pada setiap sisi ekuator magnetik.

Selanjutnya, jika ditinjau dari sudut pandang temporal, karena sumber energi ionisasi utama di ionosfer adalah gelombang elektromagnetik dari Matahari (sinar X, sinar EUV, dan lain-lain), densitas plasma sangat bergantung pada *solar zenith angle* dari matahari terbit sampai terbenam. Densitas plasma akan meningkat mulai dari Matahari terbit, kemudian akan mencapai maksimum pada siang hari, selanjutnya akan berkurang pada malam hari. Densitas plasma cenderung tinggi di daerah lintang rendah dengan *solar zenith angle* yang kecil. Namun, terdapat fenomena EIA (*Equatorial Ionization Anomaly*) berupa terbentuknya daerah tertentu dengan akumulasi densitas plasma yang tinggi di sekitar 15° – 25° lintang geomagnetik utara dan selatan. Jika ditinjau dari wilayah ionosfernya, Indonesia termasuk daerah lintang rendah dan berada di wilayah sekitar puncak EIA.

Telah disebutkan bahwa faktor utama yang memengaruhi dinamika ionosfer adalah interaksi kopling dari atas dan dari bawah lapisan ionosfer. Terkait interaksi kopling dari atas, telah diketahui secara umum bahwa faktor utama yang membentuk lapisan ionosfer adalah radiasi sinar X dan sinar EUV dari Matahari, artinya dinamika ionosfer juga sangat bergantung dengan dinamika aktivitas Matahari. Sementara itu, berkaitan dengan lingkungan antariksa, Bumi kita ini dikelilingi oleh suatu sistem medan magnet dan sistem arus listrik kompleks yang disebut sebagai magnetosfer. Magnetosfer ini terbentuk akibat adanya interaksi antara angin matahari dengan medan magnet bumi. Magnetosfer memuat plasma angin matahari, medan magnet, dan aliran partikel berenergi tinggi. Aliran partikel inilah yang membawa energi dari angin matahari menuju ionosfer. Hal ini menandakan terdapat interaksi antara magnetosfer dan ionosfer. Oleh

karena itu, selain dipengaruhi aktivitas Matahari, dinamika ionosfer juga dipengaruhi oleh dinamika magnetosfer. Pengaruh dari dinamika aktivitas Matahari dan magnetosfer terhadap lapisan ionosfer dan dampaknya terhadap aktivitas di Bumi membentuk suatu sistem yang didefinisikan sebagai “cuaca antariksa”. Pengantar dari pembahasan terkait cuaca antariksa dan koneksi antara aktivitas Matahari, magnetosfer, dan ionosfer dapat dipelajari lebih lanjut dalam Moldwin (2022).

Selanjutnya untuk interaksi kopling dari bawah, lapisan ionosfer merupakan bagian dari sistem atmosfer bumi secara keseluruhan. Ciri utama lapisan ionosfer yang membedakannya dengan lapisan atmosfer bawah adalah karakterisasi profil kerapatan elektronnya. Karena merupakan bagian dari sistem atmosfer bumi, tentu dinamika-nya pun bergantung pada dinamika lapisan atmosfer di bawahnya karena saling terkait. Sebagai contoh, faktor tunggal terbesar yang berkontribusi terhadap variasi kerapatan elektron ionosfer harian adalah adanya pergerakan ionisasi secara lokal/regional. Pergerakan ionisasi secara lokal/regional ini tidak berkorelasi secara spasial maupun temporal. Sampai saat ini, sumber penyebabnya diduga berasal dari lapisan atmosfer bawah (troposfer atau stratosfer) dan kemungkinan dipicu oleh proses meteorologi seperti gelombang atmosfer yang secara langsung atau tidak langsung memengaruhi lapisan ionosfer.

Dengan semakin berkembangnya teknologi berbasis antariksa, instrumen pengamatan yang dipasang pada satelit, data hasil pengamatan yang sangat besar, dan kemampuan pemodelan komputer yang mutakhir, paradigma terkait lapisan ionosfer mulai bergeser. Gagasan lama tentang lapisan-lapisan yang membentuk ionosfer dan pembagian wilayah ionosfer dengan garis lintang tertentu telah digantikan oleh paradigma “kopling”. Gagasan kopling ini muncul karena pada faktanya semua peristiwa di ionosfer terkoneksi dalam suatu rangkaian sistem.

Koneksi antara Matahari dengan lapisan ionosfer tidak hanya dipandang sebagai sumber foton yang mengionisasi lapisan atmosfer

sehingga ionosfer terbentuk. Rangkaian prosesnya sangatlah kompleks, dimulai dari aktivitas Matahari yang menyebabkan perubahan karakteristik kerapatan, kecepatan, dan medan magnet plasma angin matahari, kemudian proses ini berlanjut hingga memodifikasi karakteristik lapisan ionosfer. Perubahan karakteristik ini bisa berupa kenaikan atau penurunan densitas elektron maupun perubahan ketebalan dari lapisan ionosfer. Ketika kondisi Matahari dan magnetosfer tenang, atau tidak ditemukan fenomena yang signifikan, tetapi lapisan ionosfer menunjukkan adanya variabilitas yang cukup besar, maka dapat disimpulkan terdapat sumber lain yang menjadi penyebabnya. Telah disebutkan sebelumnya, salah satu faktor terbesar yang memengaruhi variasi harian kerapatan elektron di lapisan ionosfer adalah dinamika ionisasi lokal yang dipicu oleh fenomena meteorologi. Hal inilah yang memunculkan konsep kopling dari lapisan atmosfer bawah dan melengkapi paradigma ionosfer sebagai suatu sistem plasma yang terhubung dari mulai Matahari sampai dengan atmosfer Bumi.

C. Perkembangan Penelitian Dinamika Ionosfer secara Global

Pada awal perkembangannya, penelitian dinamika ionosfer sangat terkait dengan kajian dan studi perambatan gelombang radio. Pada masa itu istilah ionosfer belum ada, tetapi hipotesis eksistensi lapisan terionisasi di lapisan atmosfer atas sebetulnya telah muncul sejak abad ke-18 oleh beberapa orang peneliti. Namun, bukti secara eksperimen baru terealisasi pada tanggal 12 Desember 1901 setelah pertama kalinya sambungan radio lintas samudera berhasil dilakukan oleh Guglielmo Marconi dan timnya. Atas keberhasilannya ini, Guglielmo Marconi dianugerahi hadiah nobel pada tahun 1909.

Selanjutnya pada tahun 1902, selang beberapa bulan setelah G. Marconi berhasil melakukan eksperimennya, Oliver Heaviside dan Arthur E. Kennelly secara independen memberikan penjelasan bahwa gelombang radio dapat ditransmisikan melintasi Samudera Atlantik melalui “rongga penghantar” pada lapisan atmosfer bagian atas Bumi. Lapisan ini dikarakterisasi oleh adanya partikel-partikel bermuatan

(lapisan terionisasi) sehingga gelombang radio dapat merambat. Pada waktu itu, lapisan tersebut dikenal sebagai lapisan Kennelly-Heaviside dan penyelidikan terus dilanjutkan untuk mengungkap morfologi dan karakteristiknya.

Pada tahun 1924, struktur vertikal lapisan Kennelly-Heaviside akhirnya dapat dijelaskan melalui eksperimen sistematis dan studi teoretis yang dilakukan oleh Edward V. Appleton. Pada periode ini istilah “ionosfer” mulai digunakan untuk lapisan Kennelly-Heaviside agar lebih umum. Konon, istilah ini muncul dan bermula dari diskusi antara Appleton dan Robert Watson Watt. Sejak saat itulah terminologi ionosfer untuk mendeskripsikan lapisan atmosfer bagian atas Bumi, yang terdiri dari partikel bermuatan, mulai digunakan dan menyebar secara luas. Hal tersebut juga menandakan dimulainya era penyelidikan ionosfer secara sistematis yang dilakukan oleh ilmuwan lainnya secara global. Berkat karya dan kontribusinya terhadap penelitian ionosfer, Edward V. Appleton dianugerahi hadiah nobel pada tahun 1947.

Setelah Appleton berhasil merumuskan dasar teori tentang lapisan ionosfer pada sekitar tahun 1920, sekitar tahun 1930 jaringan stasiun pengamatan lapisan ionosfer mulai berkembang secara luas. Perangkat utama yang digunakan di stasiun pengamatan ini adalah “ionosonda”. Ionosonda merupakan perangkat pengamatan ionosfer berupa radar HF yang menerapkan teknik *vertical sounding* standar, yaitu proses pemindaian transmisi sinyal gelombang radio dari 1 MHz hingga sekitar 20 MHz kemudian mengukur waktu tunda *echo*-nya. Hasil pengukuran tersebut dapat menggambarkan kerapatan elektron plasma ionosfer sebagai fungsi ketinggian dalam satu grafik. Grafik hasil pengukuran ionosonda disebut sebagai ionogram. Sejarah singkat, evolusi, dan proses pengembangan ionosonda dapat ditelaah secara lebih lengkap pada artikel yang ditulis oleh Klaus Bibl (1998).

Selama kurang lebih 80 tahun, ionosonda menjadi instrumen populer untuk melakukan pengukuran parameter-parameter lapisan ionosfer. Seiring dengan banyaknya aspek dinamika ionosfer yang perlu dipelajari, instrumen pengamatan ionosfer pun ikut berkembang

dan mengalami pembaruan. Pada perkembangannya, jenis radar untuk pengamatan lapisan ionosfer tidak hanya menggunakan teknik *vertical sounding*, tetapi dikembangkan juga jenis radar lain yang menerapkan teknik *scattering*. Dengan teknik *scattering* ini, dapat diperoleh profil kerapatan elektron, temperatur elektron dan ion, serta kecepatan ion di sepanjang garis medan magnet pada ketinggian sekitar 80–1.000 km. Selain radar, sinyal radio dari satelit GNSS misalnya satelit GPS yang biasanya digunakan untuk penentuan posisi, dapat juga dimanfaatkan untuk pengamatan ionosfer. Sinyal radio dari satelit ini akan mengalami “*delay*” ketika melewati lapisan ionosfer, dari *delay* sinyal ini dapat dihitung parameter TEC (*Total Electron Content*) ionosfer. TEC didefinisikan sebagai jumlah total elektron yang ada di sepanjang jalur antara pemancar sinyal (satelit) dan penerima sinyal (*receiver*). Selain menggunakan radar dan satelit yang memanfaatkan sinyal radio, lapisan ionosfer juga dapat diamati dengan menggunakan perangkat optik. Pengamatan lapisan ionosfer dengan menggunakan perangkat optik memanfaatkan emisi *airglow*. *Airglow* merupakan pendaran cahaya yang dihasilkan akibat fenomena eksitasi atom oleh radiasi sinar EUV. *Airglow* muncul pada ketinggian sekitar 80–300 km dengan lapisan emisi konstan untuk setiap panjang gelombang tertentu. Selain menggunakan instrumen landas bumi (*ground-based*), sejak berkembangnya eksplorasi antariksa dengan menggunakan roket dan satelit, pengamatan ionosfer juga dilakukan menggunakan sensor yang ditempatkan pada satelit atau roket secara *in situ*. Salah satu teknik yang biasa digunakan untuk pengamatan ionosfer menggunakan satelit adalah pemasangan *Langmuir probe*. *Langmuir probe* merupakan perangkat yang dirancang untuk mengukur kerapatan dan temperatur plasma.

Gelombang elektromagnetik dalam rentang frekuensi 3–30 MHz (gelombang radio HF) menjadi pita gelombang yang digunakan untuk komunikasi radio jarak jauh selama abad ke-20. Hal ini terkait dengan peningkatan kebutuhan militer akan komunikasi radio, khususnya selama Perang Dunia II. Pada masa ini, pemasangan ionosonda sebagai perangkat pengamatan ionosfer menyebar secara luas. Tujuan-

nya untuk digunakan dalam pemodelan dan pemetaan karakteristik ionosfer untuk komunikasi radio tersebut. Sejak awal dilakukannya penelitian lapisan ionosfer, sudah ditemukan bahwa variabilitas intrinsik lapisan ionosfer sangat penting untuk kinerja komunikasi radio dan pemilihan frekuensi radio terbaik untuk digunakan. Pemilihan parameter penting yang akan digunakan untuk komunikasi radio HF mendorong pengembangan model fisis dan empiris serta metode statistik untuk memprediksi kondisi lapisan ionosfer secara global. Setelah masa perang, metode prediksi ionosfer global, baik prediksi spasial maupun temporalnya, berkembang lebih jauh, tidak hanya digunakan untuk prediksi komunikasi radio HF.

Seperti yang telah diketahui, kondisi ionosfer merupakan salah satu aspek yang diperhatikan dalam cuaca antariksa, sehingga prediksi dan pemodelan kondisi ionosfer ini menjadi sangat penting. Sejak dimulainya era eksplorasi antariksa, ketergantungan manusia pada teknologi berbasis antariksa untuk berbagai keperluan, contoh: komunikasi, navigasi, dan pengelolaan sumber daya, berkembang sangat pesat. Infrastruktur yang mendukung teknologi tersebut ditempatkan di lingkungan antariksa sekitar Bumi dan sangat rentan terhadap gangguan yang disebabkan oleh peristiwa cuaca antariksa ekstrem serta evolusi kondisi atmosfer atas (ionosfer).

Komersialisasi antariksa di masa depan, ketika perusahaan membuka peluang bisnis dan menempatkan infrastrukturnya di daerah LEO (*Low Earth Orbit*) atau di dalam wilayah atmosfer atas (termosfer dan ionosfer), membuat kondisi lingkungan antariksa akan menjadi isu sosial yang harus diperhatikan. Oleh karena itu, tantangan utama dalam prediksi dan pemodelan ionosfer ke depannya adalah memahami secara lebih mendalam mekanisme kopling pada sistem MIA (Magnetosfer Ionosfer Atmosfer) karena entitas tersebut saling terkait satu sama lain. Salah satu tujuan dari pemodelan dan prediksi kondisi ionosfer, untuk saat ini dan di masa depan adalah peningkatan pemahaman dan mitigasi yang efektif terhadap dampak peristiwa cuaca antariksa ekstrem yang signifikan terhadap infrastruktur teknologi antariksa dan konektivitasnya dengan perangkat teknologi yang ada di Bumi.

D. Perkembangan Penelitian Dinamika Ionosfer Regional Indonesia

Di Indonesia, penelitian terkait lapisan ionosfer sudah mulai dilakukan sekitar tahun 1980 (Prabotosari et al., 1982; Jiyo, 2014). Penelitian ini diinisiasi dan dilakukan di LAPAN (Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional) yang merupakan lembaga penelitian sekaligus badan antariksa yang salah satu tugasnya adalah melakukan penelitian, pengembangan, pengkajian, dan penerapan dalam bidang sains antariksa (Perpres No. 49, 2015). Salah satu cabang sains antariksa yang dikaji di LAPAN adalah cuaca antariksa dan variasi kondisi ionosfer regional Indonesia termasuk di dalamnya (UU No. 21, 2013). Pada masa awal ini, penelitian ionosfer dilakukan dengan memanfaatkan data hasil observasi instrumen ionosonda yang dipasang di Balai Pengamatan Antariksa, Pameungpeuk (Garut) (Prabotosari et al., 1982; Prabotosari et al., 1986). Selain di Pameungpeuk, ionosonda juga dipasang di stasiun BMG Tangerang (Syamsudin dan Koeswadi, 1986).

Seperti yang telah disebutkan pada subbab sebelumnya, selain untuk tujuan ilmiah, pada awalnya hasil pengamatan rutin ionosfer global lebih banyak dimanfaatkan untuk keperluan prediksi komunikasi radio HF. Begitu juga di Indonesia, kajian utama yang dilakukan adalah pemanfaatan karakteristik lapisan ionosfer untuk prediksi komunikasi radio HF (Koeswadi et al., 1986a; Koeswadi et al., 1986b; Koeswadi et al., 1986c; Koeswadi et al., 1986d). Pada saat itu, perencanaan dan prediksi komunikasi HF sangat krusial karena digunakan secara luas, terutama atas permintaan dari institusi militer.

Selain Pameungpeuk (Garut) dan Tangerang, perangkat ionosonda juga dipasang di stasiun pengamatan lain, yaitu stasiun Biak. Sampai dengan tahun 1985, Indonesia mempunyai tiga stasiun pengamatan ionosfer. Kemudian, pemasangan ionosonda dilakukan secara bertahap di tempat lain seiring berkembangnya jumlah stasiun pengamatan, baik yang dimiliki oleh LAPAN sendiri maupun kerjasama dengan institusi lain. Pemasangan perangkat ionosonda di beberapa stasiun lain di antaranya: Pontianak, Tanjungsari (Sumedang),

Kototabang, Kupang, dan Manado. Pengamatan ionosfer pun secara rutin dan kontinu dilakukan di masing-masing stasiun tersebut. Namun, seiring berjalannya waktu, tidak semua stasiun dapat beroperasi secara optimal dan simultan. Beberapa stasiun berhenti beroperasi karena kerusakan perangkat sehingga harus diperbaiki dalam rentang waktu tertentu. Hal tersebut terjadi secara bergantian dari satu stasiun pengamatan ke stasiun pengamatan lainnya. Sampai dengan awal tahun 2021, LAPAN mempunyai empat stasiun pengamatan dengan perangkat ionosonda yang masih beroperasi, yaitu stasiun Kototabang, Kupang, Pameungpeuk, dan Pontianak. Sejak LAPAN dan semua lembaga penelitian di Indonesia diintegrasikan menjadi BRIN (Badan Riset dan Inovasi Nasional) maka operasional stasiun pengamatan yang sebelumnya di bawah koordinasi LAPAN secara otomatis menjadi tanggung jawab BRIN (Perpres No. 78, 2021).

Selain ionosonda, pengamatan ionosfer di wilayah Indonesia juga memanfaatkan perangkat-perangkat pengamatan lain. Perangkat ini, utamanya, dipasang atas adanya kerja sama antara Indonesia dan institusi luar negeri. Kerja sama ini tidak terbatas hanya pada LAPAN, tetapi juga dengan institusi, lembaga penelitian, dan universitas lain di Indonesia. Salah satu contohnya adalah kerjasama antara CRL (*Communication Research Laboratory*), *Ministry of Post and Telecommunication Japan* yang bekerja sama dengan ITB (Institut Teknologi Bandung) untuk melakukan pengamatan TEC dengan menggunakan perangkat *GPS receiver* sejak tahun 1993 (Manurung, 2001). Mulai tahun 1997, LAPAN Bandung juga memasang *GPS receiver Ashtech Z-12* untuk melakukan pengamatan TEC (Saroso, 1999). Selain pengamatan TEC, dilaksanakan juga kerjasama pemasangan beberapa jenis radar untuk pengamatan atmosfer atas (lapisan mesosfer dan termosfer bawah). Pada tahun 1992 pertama kalinya dilakukan pemasangan MWR (*Meteor Wind Radar*) di PUSPITEK, Tangerang. Selanjutnya, MF (*Medium Frequency*) Radar juga mulai dipasang di Pontianak pada tahun 1995. Proyek ini merupakan kolaborasi tiga negara antara Indonesia, Australia, dan Jepang (Tsuda et al., 1999). Secara spesifik, kedua radar tersebut

digunakan untuk mengamati karakteristik angin di lapisan mesosfer dan termosfer bawah pada ketinggian sekitar 70–100 km.

Sekitar tahun 1980, penelitian ionosfer dilakukan untuk menunjang prediksi komunikasi radio HF, seperti yang telah disebutkan sebelumnya. Pada masa ini, publikasi hasil penelitian lebih ditekankan ke arah karakteristik lapisan ionosfer di lokasi ionosonda terpasang berdasarkan parameter-parameter tertentu hasil *scaling* ionogram. Selain itu, dilakukan juga kajian literatur terkait hubungan antara karakteristik ionosfer dan propagasi gelombang radio. Media publikasi yang digunakan adalah prosiding, sebagai hasil kegiatan seminar internal lembaga maupun seminar dalam lingkup nasional. Selain prosiding, hasil kajian juga sering kali didiseminasikan dalam bentuk tulisan ilmiah/semi ilmiah populer di majalah ilmiah terbitan LAPAN.

Sekitar tahun 1987, instrumen pengamatan ionosfer di wilayah Indonesia mulai digunakan untuk penelitian dan kolaborasi dengan kolega dari luar negeri. Proyek yang tercatat pernah menggunakan data pengamatan ionosfer Indonesia untuk program kolaborasi internasional adalah *SUNDIAL campaign* (Walker et al., 1991, Abdu et al., 1993). Proyek ini dilaksanakan dalam rentang pengamatan antara 29 Mei 1987 sampai dengan 7 Juni 1987. Selama periode *campaign* ini, terjadi dua kali badai geomagnetik pada tanggal 29–30 Mei dan 6–7 Juni. Salah satu hasil menarik yang ditemukan dalam *campaign* ini adalah adanya struktur periodik pada parameter-parameter di lapisan F (f_oF_2 , h_pF_2 , $h'F_2$) dan lapisan E (f_oE , f_bE_s , $h'E_s$) ionosfer dan struktur gelombang tersebut merambat dalam arah meridional.

Penelitian terkait dinamika atmosfer regional Indonesia, termasuk juga dinamika ionosfer, mulai berkembang ketika dimulainya proyek CPEA (*Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere*) yang dilaksanakan kurang lebih selama enam tahun (2001–2007). Proyek ini diinisiasi oleh institusi penelitian dan beberapa universitas dari Jepang dengan pendanaan dari *Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology* (MEXT) (Fukao, 2006). Wilayah ekuator merupakan sumber dari sekian banyak proses unik di atmosfer Bumi. Dinamika atmosfer skala global bermula dari aliran konvektif kuat di sekitar

wilayah ekuator yang disebabkan oleh absorpsi radiasi Matahari secara maksimum (Andrews et al., 1987).

Wilayah kepulauan Indonesia terkenal dengan proses konvektif paling aktif (Nishida et al., 2000; Fukao, 2006) sehingga dinamika atmosfer wilayah ekuator Indonesia juga memberikan pengaruh yang signifikan terhadap variabilitas atmosfer global. Selain itu, proses elektrodinamika pada ketinggian di atas 100 km di wilayah ionosfer ekuator dan lintang rendah menunjukkan sifat unik, yaitu garis medan geomagnetiknya sejajar dengan permukaan bumi, atau tegak lurus terhadap gravitasi Bumi (Kelley, 2009). Berbagai macam proses dinamika dan elektrodinamika di wilayah atmosfer ekuator terkopling secara vertikal melalui gelombang atmosfer yang disebabkan oleh proses konveksi. Gelombang gravitasi atmosfer skala meso diyakini menjadi salah satu penyebab “*seeding*” ketidakstabilan plasma yang menghasilkan gelembung plasma di lapisan F ionosfer pada malam hari (Kelley et al., 1981; Hysell et al., 1990).

Berawal dari proyek CPEA tersebut, sekitar tahun 2000, data-data hasil pengamatan instrumen landas bumi (radar, *GNSS receiver*, maupun *optical imager*) yang dipasang di wilayah Indonesia semakin sering digunakan untuk penelitian ilmiah secara global. Sebagian besar instrumen pengamatan tersebut merupakan hasil kolaborasi antara LAPAN dengan institusi penelitian dan universitas di luar negeri. Beberapa penelitian yang memanfaatkan data pengamatan tersebut di antaranya, Lynn et al. (2000) yang menggunakan data ionosonda Tanjungsari (Sumedang) untuk mengkaji variasi lintang dari fenomena stratifikasi lapisan F2 ionosfer. Selain ionosonda Tanjungsari, penelitian ini juga menggunakan beberapa jaringan ionosonda yang beroperasi di wilayah Asia Tenggara selama tahun 1997. Kemudian, Thomas et al. (2001) menggunakan data *GPS receiver* yang dipasang di wilayah Australia dan Asia Tenggara untuk pemantauan fenomena sintilasi dan menganalisis variabilitasnya untuk dibandingkan dengan model. Untuk wilayah Indonesia, data pengamatan yang digunakan berasal dari Pontianak dan Pare Pare. Selanjutnya, Isoda et al. (2002) menggunakan data MF radar dari

Yamagawa, Pontianak, dan Christmas Island untuk melakukan analisis osilasi periodik kecepatan angin zonal dan meridional. Terakhir, Nakamura et al. (2003) berhasil melakukan analisis aktivitas gelombang gravitasi di lapisan MLT (*Mesosphere and Lower Thermosphere*) di atas Tanjungsari selama satu tahun pengamatan, mulai September 2000 sampai dengan September 2001.

Salah satu kolaborasi *campaign* besar yang diikuti jaringan pengamatan ionosfer landas Bumi di wilayah Indonesia adalah ERICA (*Equatorial Ionosphere Characterization in Asia*). Proyek *campaign* ERICA ini bertujuan untuk menemukan tanda interaksi yang saling memengaruhi antara magnetosfer-medan magnet Bumi serta ionosfer yang dapat menyebabkan perambatan sinyal radio dari satelit menuju *receiver* mengalami gangguan. Kegiatan proyek ini berfokus pada karakterisasi variabilitas ionosfer sekitar wilayah EIA di kawasan Asia Tenggara menggunakan instrumen landas Bumi, khususnya ionosonda, magnetometer, dan GNSS *receiver*. Proyek ini dilaksanakan selama kurang lebih tujuh bulan, dimulai dari bulan Maret 2015 dan berakhir pada awal Oktober 2015 (Povero et al., 2017).

Selain perluasan jaringan pengamatan dan penggunaan data secara global, selama dua dekade terakhir dari mulai tahun 2000 sampai dengan sekarang, perkembangan penelitian ionosfer di Indonesia cukup pesat, khususnya studi-studi yang dilakukan oleh para peneliti yang berafiliasi dengan institusi penelitian dan universitas di Indonesia. Jika pada perkembangan awal penelitian ionosfer di Indonesia hanya difokuskan untuk mendukung dan menunjang prediksi komunikasi radio HF, selama dua dekade terakhir ini tema penelitian yang dikerjakan pun semakin banyak dan beragam. Dari mulai analisis aktivitas gelombang gravitasi di daerah atmosfer atas (daerah MLT) (Perwitasari et al., 2018), iregularitas ionosfer (fenomena *spread F*) dan fenomena sintilasi serta prediksinya (Abadi et al., 2014; Abadi et al., 2015; Abadi et al., 2017; Abadi et al., 2021; Abadi et al., 2022; Abadi et al., 2023; Abadi et al., 2024), pemodelan Ionosfer dan aplikasinya untuk komunikasi dan navigasi (Muslim et al., 2015; Supriadi et al., 2019; Supriadi et al., 2022; Dear et al., 2024a; Dear et

al., 2024b, Supriadi et al., 2024), ionosfer dan kaitanya dengan prediksi gempa besar (Saroso et al., 2008), gangguan yang terjadi di ionosfer akibat fenomena antariksa, khususnya gerhana Matahari (Dear et al., 2020; Harjosuwito et al., 2023; Husin et al., 2024), serta gangguan yang diakibatkan oleh fenomena alam di permukaan bumi (seperti gempa Bumi dan erupsi gunung berapi) (Cahyadi et al., 2014; Cahyadi et al., 2015; Cahyadi et al., 2020; Muafiry et al., 2022; Cahyadi et al., 2022a; Cahyadi et al., 2022b; Cahyadi et al., 2022c; Cahyadi et al., 2024).

E. Pengembangan Studi Dinamika Ionosfer Regional Indonesia

Empat puluh tahun merupakan waktu yang cukup panjang dalam perkembangan penelitian dinamika ionosfer regional Indonesia. Sampai dengan saat ini, penelitian seputar dinamika ionosfer regional Indonesia serta aplikasinya untuk sistem komunikasi dan navigasi, aktif dilakukan di beberapa pusat riset BRIN serta beberapa institusi dan universitas lain. Umumnya hasil penelitian tersebut menggunakan data-data dari instrumen pengamatan landas Bumi yang dipasang di beberapa titik di wilayah Indonesia dan/atau dikombinasikan dengan data-data dari instrumen pengamatan berbasis antariksa (satelit)

Seperti yang telah disebutkan pada bagian sebelumnya, topik penelitian yang dikerjakan terkait dinamika ionosfer regional Indonesia selama dua dekade terakhir ini semakin banyak dan beragam. Dari publikasi yang telah dihasilkan, terlihat bahwa topik besar yang dikerjakan cenderung mengarah pada interaksi sistem magnetosfer, ionosfer, dan atmosfer bawah. Pada topik ini, secara garis besar, hal utama yang dikerjakan adalah bagaimana lapisan magnetosfer, ionosfer, dan atmosfer bawah saling memengaruhi satu sama lain (Hsiao et al., 2001; Tsuda et al., 2002; Isoda et al., 2004; Lynn et al., 2004; Lynn et al., 2006; Wrasse et al., 2006a; Wrasse et al., 2006b; Sridharan et al., 2006; Lynn et al., 2008).

Investigasi terkait dinamika ionosfer regional Indonesia, seperti yang telah disebutkan sebelumnya, mulai berkembang pesat ketika proyek CPEA dilaksanakan pada tahun 2001 sampai dengan 2007.

Tujuan utama proyek ini adalah untuk memahami proses dan mekanisme dasar kopling vertikal pada berbagai skala spasial dan temporal yang terjadi di lapisan atmosfer bawah, tengah, atas serta lapisan ionosfer untuk daerah sekitar ekuator. Salah satu kesuksesan proyek ini tidak lepas dari keberhasilan pembangunan dan pengembangan perangkat pengamatan utama yaitu *Equatorial Atmosphere Radar* (EAR).

EAR dibangun di lokasi dekat dengan ekuator geografis, tepatnya di daerah Bukit Kototabang, Sumatera Barat, Indonesia yang merupakan salah satu stasiun pengamatan atmosfer dan antariksa yang pada saat itu dimiliki oleh LAPAN. EAR merupakan radar VHF (*Very High Frequency*) yang dapat mengamati *echo* atmosfer sampai dengan ketinggian 20 km dan *echo* iregularitas ionosfer dari lapisan E dan F (Fukao et al. , 2003). Data hasil pengamatan dari EAR dapat diakses secara terbuka melalui tautan web berikut: <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear/data/>

Selain EAR, di stasiun Kototabang juga dipasang instrumen lain oleh beberapa institusi/konsorsium jaringan pengamatan ionosfer landas Bumi sebagai bagian dari proyek CPEA. Salah satu instrumen yang dipasang adalah ionosonda, yang tergabung dalam jaringan SEALION (*South-east Asia low-latitude ionospheric network*) (Maruyama et al., 2007). Selain ionosonda, ada juga *airglow imager*, VHF (30.8 MHz) radar, dan *GPS receiver* yang dipasang oleh Nagoya University (Jepang). Sebaran instrumen pengamatan di wilayah Indonesia semakin lengkap jika digabungkan dengan jaringan stasiun pengamatan LAPAN di beberapa wilayah lain, yaitu Bandung, Garut, Sumedang, Pontianak, Tomohon, Kupang, dan Biak. Jenis instrumen yang dipasang di stasiun-stasiun tersebut antara lain ionosonda, *GNSS receiver*, *Airglow Imager*, dan *ALE radio system*. Namun, kombinasi instrumen yang dipasang berbeda-beda dari satu stasiun ke stasiun lainnya. Umumnya, di setiap stasiun dipasang dua sampai tiga perangkat pengamatan yang berbeda.

Tidak dapat dimungkiri, salah satu aspek yang sangat berpengaruh besar terhadap perkembangan studi dinamika ionosfer regional

Indonesia sampai saat ini adalah kerja sama internasional terkait pengembangan dan perluasan jaringan pengamatan landas Bumi. Jika kita cermati, studi ionosfer ini dapat berkembang karena adanya tiga faktor penting, yaitu kerjasama dan perluasan pembangunan jaringan pengamatan, kontinuitas data hasil pengamatan (termasuk perbaikan instrumen secepat mungkin), dan keterbukaan akses terhadap data hasil pengamatan. Tiga faktor inilah yang menjadikan ekosistem penelitian dapat berjalan. Oleh karena itu, ke depannya, agar penelitian dinamika ionosfer regional Indonesia terus berkembang, ketiga faktor tadi harus tetap terjaga. Jika faktor-faktor tersebut tetap terjaga, proses penelitian dapat berkesinambungan dan banyak peneliti tertarik untuk memanfaatkan data-data dari jaringan pengamatan landas Bumi di wilayah Indonesia.

0Selain perluasan jaringan pengamatan untuk suatu instrumen tertentu, salah satu alternatif lain dalam pengembangan studi ionosfer regional, khususnya wilayah Indonesia adalah memanfaatkan data-data pengamatan *GNSS receiver* dari jaringan CORS (*Continuously Operating Receiver Station*). Saat ini, hampir semua negara di kawasan Asia Tenggara dan Oseania telah memiliki jaringan pengamatan GNSS CORS tersebut. Jaringan GNSS CORS terbesar di Indonesia, dikelola oleh BIG (Badan Informasi Geospasial).

Data pengamatan GNSS CORS memungkinkan kita untuk memetakan nilai TEC ionosfer dengan cakupan yang komprehensif, seperti yang telah dicontohkan cakupan TEC global dari *database* Madrigal yang dikelola oleh *MIT Haystack Observatory*. Peta TEC global dari *database* Madrigal masih memiliki kekosongan (*gap*) terutama di benua Afrika dan kawasan Asia Tenggara yang bersifat kepulauan. Terkait keberadaan *coverage gap* ini, data pengamatan GNSS CORS di Asia Tenggara memiliki potensi untuk digunakan pada pemetaan kondisi TEC ionosfer regional secara detail dan komprehensif. Misalnya dari Indonesia terdapat 200+ titik stasiun GNSS yang dapat digunakan, dari Malaysia 100+ titik stasiun, dari Thailand 150+ titik stasiun, dari Filipina 50+ titik stasiun, dari Vietnam 50+ titik stasiun, dan lain sebagainya. Apabila semua digabungkan, kualitas *coverage* yang dihasilkan akan sangat impresif.

Namun demikian, terdapat suatu kendala administratif terkait restriksi kontrol ekspor pada data mentah hasil pengamatan jaringan GNSS CORS nasional di masing-masing negara Asia Tenggara. Untuk merealisasikan harapan pemetaan TEC ionosfer kawasan Asia Tenggara yang komprehensif, kendala ini harus dapat diatasi secara efektif. Saat ini sedang diupayakan suatu inisiatif bersama untuk mengatasi kendala administratif tersebut melalui program *Joint Spatio-Temporal Ionospheric Mapping Initiative* (JSTIMI). Program tersebut diharapkan akan bisa menjembatani para peneliti sains antariksa/ionosfer di masing-masing negara Asia Tenggara. Tujuan dari program ini adalah agar negara-negara di Asia Tenggara dapat berkoordinasi terkait data GNSS TEC yang diproses, dianalisis, dan disahkan fondasi legalitasnya dan lebih lanjut data tersebut bisa di-*share* secara lintas negara untuk kepentingan kolaborasi ilmiah global (Badan Riset dan Inovasi Nasional, t.t.).

Dalam jangka waktu empat dekade ini, telah dihasilkan banyak sekali publikasi ilmiah terkait studi dinamika ionosfer regional dengan memanfaatkan data-data dari jaringan pengamatan di wilayah Indonesia. Artinya sudah banyak pengetahuan yang dihasilkan dari studi ini. Namun, salah satu karakter penelitian ilmiah adalah sains terkadang dibangun berdasarkan rasa keingintahuan terhadap suatu mekanisme/fenomena tertentu agar semua aspeknya dapat diketahui secara mendalam. Oleh karena itu, terkadang hasil penelitian ilmiah tidak dapat dirasakan secara langsung manfaatnya dalam jangka waktu yang relatif singkat. Hasilnya hanya dapat dirasakan dalam jangka waktu yang sangat panjang, mungkin akan dapat dirasakan pada 100 atau 200 tahun mendatang. Walaupun begitu, dari sisi sains, dengan semakin berkembangnya teknologi pengamatan ionosfer (baik perangkat pengamatan landas Bumi maupun yang berbasis antariksa) dan jaringan pengamatan yang semakin besar dan luas, kemudahan untuk mengakses data hasil pengamatan secara global, serta kemudahan untuk berkorespondensi dan berkolaborasi dengan peneliti lain di belahan Bumi mana pun, beberapa tahun ke depan, studi dinamika ionosfer regional di Indonesia akan semakin berkembang

dan memberikan kontribusi lebih banyak lagi untuk komunitas sains secara global.

Daftar Pustaka

- Abadi, P., Saito, S., & Srigutomo, W. (2014, January). Low-latitude scintillation occurrences around the equatorial anomaly crest over Indonesia. In *Annales Geophysicae*, 32(1), 7–17. Göttingen, Germany: Copernicus Publications.
- Abadi, P., Otsuka, Y., & Tsugawa, T. (2015). Effects of pre-reversal enhancement of $E \times B$ drift on the latitudinal extension of plasma bubble in Southeast Asia. *Earth, Planets and Space*, 67, 1–7.
- Abadi, P., Otsuka, Y., Shiokawa, K., Husin, A., Liu, H., & Saito, S. (2017). Equinoctial asymmetry in the zonal distribution of scintillation as observed by GPS receivers in Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(8), 8947–8958.
- Abadi, P., Otsuka, Y., Liu, H., Hozumi, K., Martinigrum, D. R., Jamjareegulgarn, P., ... & Otadoy, R. (2021). Roles of thermospheric neutral wind and equatorial electrojet in pre-reversal enhancement, deduced from observations in Southeast Asia. *Earth and Planetary Physics*, 5(5), 387–396.
- Abadi, P., Ahmad, U. A., Otsuka, Y., Jamjareegulgarn, P., Martinigrum, D. R., Faturahman, A., ... & Septiawan, R. R. (2022). Modeling post-sunset equatorial spread-F occurrence as a function of evening upward plasma drift using logistic regression, deduced from ionosondes in Southeast Asia. *Remote Sensing*, 14(8), 1896.
- Abadi, P., Ali Ahmad, U., Otsuka, Y., Jamjareegulgarn, P., Almahi, A., Perwitasari, S., ... & Septiawan, R. R. (2023). Assessing the potential of ionosonde for forecasting post-sunset equatorial spread F: an observational experiment in Southeast Asia. *Earth, Planets and Space*, 75(1), 185.
- Abdu, M. A., Walker, G. O., Reddy, B. M., De Paula, E. R., Sobral, J. H. A., & Fejer, B. G. (1993, July). Global scale equatorial ionization anomaly (EIA) response to magnetospheric disturbances based on the May-June 1987 SUNDIAL-coordinated observations. In *Annales Geophysicae* (Vol. 11, No. 7, 585–594).
- Andrews, D. G., Leovy, C. B., & Holton, J. R. (1987). Middle atmosphere dynamics (Vol. 40). Academic press.

- Badan Riset dan Inovasi Nasional. (t.t.). Inisiatif JSTIMI Buka Peluang Kolaborasi dalam Pengamatan Ionosfer di ASEAN. Diakses pada 6 Agustus, 2024, dari <https://brin.go.id/orpa/posts/kabar/inisiatif-jstimi-buka-peluang-kolaborasi-dalam-pengamatan-ionosfer-di-asean>
- Banks, P.M., Kockarts, G. (1973). *Aeronomy (Parts A and B)*. Academic Press, New York.
- Bibl, K. (1998). Evolution of the ionosonde. *Annals of Geophysics*, 41, 5–6.
- Cahyadi, M. N., Muslim, B., Muafiry, I. N., Gusman, A. R., Handoko, E. Y., Anjasmara, I. M., ... & Sri Sumantyo, J. T. (2024). 3D traveling ionospheric disturbances during the 2022 Hunga Tonga–Hunga Haʻapai eruption using GNSS TEC. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 129(3), e2023JA031806.
- Cahyadi, M. N., Arisa, D., Muafiry, I. N., Muslim, B., Rahayu, R. W., Putra, M. E., ... & Arief, S. (2022a). Directivity of coseismic ionospheric disturbances propagation following the 2016 West Sumatra Earthquake using three-dimensional tomography GNSS-TEC. *Atmosphere*, 13(9), 1532.
- Cahyadi, M. N., Arisa, D., Muafiry, I. N., Muslim, B., Rahayu, R. W., Putra, M. E., & Wulansari, M. (2022b). Three-Dimensional Tomography of Coseismic Ionospheric Disturbances Following the 2018 Palu Earthquake and Tsunami from GNSS Measurements. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 9, 890603.
- Cahyadi, M. N., Muslim, B., Pratomo, D. G., Anjasmara, I. M., Arisa, D., Rahayu, R. W., ... & Muafiry, I. N. (2022c). Co-seismic ionospheric disturbances following the 2016 West Sumatra and 2018 Palu earthquakes from GPS and GLONASS measurements. *Remote Sensing*, 14(2), 401.
- Cahyadi, M. N., Rahayu, R. W., Heki, K., & Nakashima, Y. (2020). Harmonic ionospheric oscillation by the 2010 eruption of the Merapi volcano, Indonesia, and the relevance of its amplitude to the mass eruption rate. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 405, 107047.
- Cahyadi, M. N., & Heki, K. (2015). Coseismic ionospheric disturbance of the large strike-slip earthquakes in North Sumatra in 2012: M w dependence of the disturbance amplitudes. *Geophysical journal international*, 200(1), 116–129.
- Cahyadi, M. N., & Heki, K. (2013). Ionospheric disturbances of the 2007 Bengkulu and the 2005 Nias earthquakes, Sumatra, observed with a regional GPS network. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(4), 1777–1787.

- Cander, L. R. (2019). *Ionospheric space weather* (pp. 95–113). Berlin: Springer.
- Dear, V., Husin, A., Anggarani, S., Harjosuwito, J., & Pradipta, R. (2020). Ionospheric effects during the total solar eclipse over Southeast Asia-Pacific on 9 March 2016: Part 1. Vertical movement of plasma layer and reduction in electron plasma density. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125(5), e2019JA026708.
- Dear, V., Mardiani, A. S., Dedi, N., Abadi, P., & Prananto, B. H. (2024). Capacity and reliability of ionosphere communication channel based on multi-carrier modulation technique and LUF-MUF variation. *IEICE Transactions on Communications*, 107(4), 357–367.
- Dear, V., Arifianto, M. S., Abadi, P., Purnomo, C., Husin, A., Kurniawan, A., & Iskandar, I. S. (2024). Ionospheric channel impulse response measurement system for NVIS propagation mode over Java Island based on low-cost SDR platform. *Radio Science*, 59(6), e2023RS007877.
- Fukao, S., Hashiguchi, H., Yamamoto, M., Tsuda, T., Nakamura, T., Yamamoto, M. K., ... & Yabugaki, Y. (2003). Equatorial Atmosphere Radar (EAR): System description and first results. *Radio Science*, 38(3).
- Fukao, S. (2006). Coupling processes in the equatorial atmosphere (CPEA): A project overview. *Journal of the Meteorological Society of Japan* (84A), 1–18.
- Harjosuwito, J., Husin, A., Dear, V., Muhamad, J., Faturahman, A., Bahar, A., ... & Pradipta, R. (2023, April). Ionosonde and GPS total electron content observations during the 26 December 2019 annular solar eclipse over Indonesia. In *Annales Geophysicae*, 41(1), pp. 147–172). Göttingen, Germany: Copernicus Publications.
- Hsiao, C. C., Liu, J. Y., Tsunoda, R. T., Fukao, S., Saroso, S., Nozaki, K., ... & Yamamoto, M. (2001). Evidence for the geographic control of additional layer formation in the low-latitude ionosphere. *Advances in Space Research*, 27(6–7), 1293–1297.
- Husin, A., Harjosuwito, J., Anggarani, S., Dear, V., Faturahman, A., & Pradipta, R. (2024). Ionospheric effects during the total solar eclipse over South-East Asia-Pacific on 9 March 2016, Part 2: Total electron content reduction and fluctuation patterns. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 262, 106295.

- Hysell, D. L., Kelley, M. C., Swartz, W. E., & Woodman, R. F. (1990). Seeding and layering of equatorial spread F by gravity waves. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 95(A10), 17253–17260.
- Isoda, F., Tsuda, T., Nakamura, T., Murayama, Y., Igarashi, K., Vincent, R. A., ... & Manurung, S. L. (2002). Long-Period wind oscillations in the mesosphere and lower thermosphere at Yamagawa (32° N, 131° E), Pontianak (0° N, 109° E) and Christmas Island (2° N, 157° W). *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, 64(8–11), 1055–1067.
- Isoda, F., Tsuda, T., Nakamura, T., Vincent, R. A., Reid, I. M., Achmad, E., ... & Nuryanto, A. (2004). Intraseasonal oscillations of the zonal wind near the mesopause observed with medium-frequency and meteor radars in the tropics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D21).
- Jiyo. (2014, 1 Juni). Riset Ionosfer Regional Indonesia dan Pengaruhnya Terhadap Sistem Komunikasi dan Navigasi Modern. *Berita Dirgantara*. https://jurnal.lapan.go.id/index.php/berita_dirgantara/article/view/2069
- Kelley, M. C., Larsen, M. F., LaHoz, C., & McClure, J. P. (1981). Gravity wave initiation of equatorial spread F: A case study. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 86(A11), 9087–9100.
- Kelley, M. C. (2009). *The Earth's ionosphere: Plasma physics and electrodynamics* (2nd Edition). Academic press.
- Knipp, D.J., 2011. *Understanding Space Weather and the Physics Behind It*. McGraw Hill, Boston, MA.
- Koeswadi dan Sulaeman. (1986a). Prediksi frekuensi komunikasi HF Pulau Jawa tahun 1985. *Proceeding Program Penelitian Pusat Riset Dirgantara LAPAN 1983/1984 Buku II: 6*, 73–79. ISSN 0216-4663. <https://karya.brin.go.id/id/eprint/21276/>
- Koeswadi, Suhartini, S., Herwita S., and Yasminal A. (1986b). Penggunaan frekuensi radio komunikasi yang sesuai dengan kondisi lapisan ionosfer di atas Pulau Jawa. *Proceeding Program Penelitian Pusat Riset Dirgantara LAPAN 1983/1984 Buku II: 5*, 62–79. ISSN 0216-4663. <https://karya.brin.go.id/id/eprint/21274/>
- Koeswadi, Suhartini, S., M. Syarifudin S., Herwita S. (1986c) Penelitian perambatan gelombang radio Republik Indonesia: Jakarta, Bogor, Bandung, dan Cirebon. *In: Proceeding Program Penelitian Pusat Riset Dirgantara LAPAN*. <https://karya.brin.go.id/id/eprint/20259/>

- Koeswadi dan Sulaeman. (1986d). Prediksi frekuensi komunikasi HF Pulau Jawa tahun 1985. *Proceeding Program Penelitian Pusat Riset Dirgantara LAPAN 1983/1984 Buku II: 6*, 73–79. ISSN 0216-4663. <https://karya.brin.go.id/id/eprint/21276/>
- Kusano, K. (Ed.). (2023). *Solar-terrestrial environmental prediction*. Springer Nature.
- Lynn, K. J. W., Harris, T. J., & Sjarifudin, M. (2000). Stratification of the F 2 layer observed in Southeast Asia. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 105(A12), 27147–27156.
- Lynn, K. J. W., Sjarifudin, M., Harris, T. J., & Le Huy, M. (2004, September). Combined TOPEX/Poseidon TEC and ionosonde observations of negative low-latitude ionospheric storms. In *Annales Geophysicae*, 22(8), 2837–2847). Göttingen, Germany: Copernicus Publications.
- Lynn, K. J. W., Harris, T. J., & Sjarifudin, M. (2006, July). Relationships between electron density, height and sub-peak ionospheric thickness in the night equatorial ionosphere. In *Annales Geophysicae*, 24(5), 1343–1353. Göttingen, Germany: Copernicus Publications.
- Lynn, K. J. W., Gardiner-Garden, R., Sjarifudin, M., Terkildsen, M., Shi, J., & Harris, T. J. (2008). Large-scale travelling atmospheric disturbances in the night ionosphere during the solar-terrestrial event of 23 May 2002. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70(17), 2184–2195.
- Manurung, S.L. (2001). Model total electron content lintang rendah: persamaan TEC di Bandung dan sekitarnya. LAPAN. <https://karya.brin.go.id/id/eprint/16158/>
- Materassi, M., Forte, B., Coster, A. J., & Skone, S. (Eds.). (2019). *The dynamical ionosphere: A systems approach to ionospheric irregularity*. Elsevier.
- Maruyama, T., Kawamura, M., Saito, S., Nozaki, K., Kato, H., Hemmakorn, N., ... & Ha Duyen, C. (2007, July). Low latitude ionosphere-thermosphere dynamics studies with ionosonde chain in Southeast Asia. In *Annales Geophysicae*, 25(7), 1569–1577). Göttingen, Germany: Copernicus Publications.
- Moldwin, M. (2022). *An introduction to space weather*. Cambridge University Press.
- Muafiry, I. N., Meilano, I., Heki, K., Wijaya, D. D., & Nugraha, K. A. (2022). Ionospheric disturbances after the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha’apai Eruption above Indonesia from GNSS-TEC observations. *Atmosphere*, 13(10), 1615.

- Muslim, B., Haralambous, H., Oikonomou, C., & Anggarani, S. (2015). Evaluation of a global model of ionospheric slab thickness for foF2 estimation during geomagnetic storm. *Annals of Geophysics*, 58(5), A0551-A0551.
- Nakamura, T., Aono, T., Tsuda, T., Admiranto, A. G., Achmad, E., & Suranto. (2003). Mesospheric gravity waves over a tropical convective region observed by OH airglow imaging in Indonesia. *Geophysical research letters*, 30(17).
- Nishida, M., Shimizu, A., Tsuda, T., Rocken, C., & Ware, R. H. (2000). Seasonal and longitudinal variations in the tropical tropopause observed with the GPS occultation technique (GPS/MET). *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 78(6), 691–700.
- Perwitasari, S., Nakamura, T., Kogure, M., Tomikawa, Y., Ejiri, M. K., & Shiokawa, K. (2018, November). Comparison of gravity wave propagation directions observed by mesospheric airglow imaging at three different latitudes using the M-transform. In *Annales Geophysicae*, 36(6), 1597–1605. Göttingen, Germany: Copernicus Publications.
- Peraturan Presiden (Perpres) Nomor 49 Tahun 2015 tentang Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional. (2015). <https://peraturan.bpk.go.id/Details/41785/perpres-no-49-tahun-2015>
- Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 78 Tahun 2021 tentang Badan Riset dan Inovasi Nasional. (2021). <https://peraturan.bpk.go.id/Details/178084/perpres-no-78-tahun-2021>
- Povero, G., Alfonsi, L., Spogli, L., Di Mauro, D., Cesaroni, C., Dovis, F., ... & Flouy, N. (2017). Ionosphere monitoring in South East Asia in the ERICA study. *Navigation: Journal of The Institute of Navigation*, 64(2), 273–287.
- Prabotosari, S. K., Saroso, S., dan Yasminal. (1982). Analisa data ionosonde variabel. *Working Paper Pusat Riset Dirgantara LAPAN*. <https://karya.brin.go.id/id/eprint/20988/>
- Prabotosari, S. K., Saroso, S., Ristanti, N., dan M. Syaifudin S. (1986). Beberapa karakteristik lapisan ionosfer di atas Pameungpeuk. In: *Proceeding Program Penelitian Pusat Riset Dirgantara LAPAN*. <https://karya.brin.go.id/id/eprint/20270/>
- Ratcliffe, J.A. (Ed.). (1960). *Physics of the Upper Atmosphere*. Academic Press.
- Rawer, K. (1975). The historical development of forecasting methods for ionospheric propagation of HF waves. *Radio Science*, 10(7), 669–679.

- Rees, M.H. (1989). *Physics and Chemistry of the Upper Atmosphere*. Cambridge University Press.
- Rishbeth, H., Garriott, O.K. (1969). *Introduction to Ionospheric Physics*. Academic Press.
- Saroso, S. (1999, 1 Juli). Penentuan TEC dengan menggunakan data kode dan data fase dari satelit GPS. *Majalah LAPAN*. <https://karya.brin.go.id/id/eprint/20089/>
- Saroso, S., Liu, J. Y., Hattori, K., & Chen, C. H. (2008). Ionospheric GPS TEC Anomalies and $M \geq 5.9$ Earthquakes in Indonesia during 1993–2002. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 19(5).
- Schunk, R.W., Nagy, A.F., 2009. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics and Chemistry*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Sridharan, S., Tsuda, T., Nakamura, T., & Vincent, R. A. (2006). A report on radar observations of 5-8-day waves in the equatorial MLT region. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 84A, 295–304.
- Supriadi, S., Abadi, P., Saito, S., Bangkit, H., Prabowo, D. U., Purwono, A., & Nugroho, G. A. (2024). Assessment of corrected time-step method for nominal ionospheric gradient calculation: A comparative analysis with spatial approaches. *Earth and Planetary Physics*.
- Supriadi, S., Abidin, H. Z., Wijaya, D. D., Abadi, P., Saito, S., & Prabowo, D. U. (2022). Construction of nominal ionospheric gradient using satellite pair based on GNSS CORS observation in Indonesia. *Earth, Planets and Space*, 74(1), 71.
- Supriadi, S., & Saito, S. (2019). Simulation study of mitigation of plasma bubble effects on GBAS using a VHF radar. *Navigation*, 66(4), 845–855.
- Syamsudin, S. dan Koeswadi. (1986). Indeks bias lapisan ionosfer di atas Tangerang untuk tahun 1981. In: *Proceeding Program Penelitian Pusat Riset Dirgantara LAPAN*. <https://karya.brin.go.id/id/eprint/20263/>
- Thomas, R. M., Cervera, M. A., Eftaxiadis, K., Manurung, S. L., Saroso, S., Ramli, A. G., ... & Wang, Y. (2001). A regional GPS receiver network for monitoring equatorial scintillation and total electron content. *Radio Science*, 36(6), 1545–1557.
- Tsuda, T., Ohnishi, K., Yoshida, S., Shimizu, A., Nakamura, T., Vincent, R. A., ... & Sribimawati, T. (1999). Observations of atmospheric waves in the tropical Pacific with radars and Radiosondes. *Advances in Space Research*, 24(11), 1591–1600.

- Tsuda, T., Yoshida, S., Isoda, F., Nakamura, T., Nuryanto, A., Manurung, S., ... & Reid, I. M. (2002). Long-term variations of atmospheric wave activity in the mesosphere and lower thermosphere region over the equatorial Pacific. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, 64(8–11), 1123–1129.
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 21 Tahun 2013 tentang Keantariksaan. (2013). <https://peraturan.bpk.go.id/Details/38897/uu-no-21-tahun-2013>
- Walker, G. O., Wong, W. Y., Huang, Y. N., Kikuchi, T., Soegijo, J., Badillo, V., & Szuszczeicz, E. P. (1991). Periodic behaviour of the ionosphere in South East Asia on storm and quiet days during the May/June SUNDIAL campaign, 1987. *Journal of atmospheric and terrestrial physics*, 53(6–7), 627–641.
- Wrasse, C. M., Nakamura, T., Tsuda, T., Takahashi, H., Medeiros, A. F., Taylor, M. J., ... & Admiranto, A. G. (2006). Reverse ray tracing of the mesospheric gravity waves observed at 23 S (Brazil) and 7 S (Indonesia) in airglow imagers. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 68(2), 163–181.
- Wrasse, C. M., Nakamura, T., Takahashi, H., Medeiros, A. F., Taylor, M. J., Gobbi, D., ... & Admiranto, A. G. (2006, December). Mesospheric gravity waves observed near equatorial and low–middle latitude stations: wave characteristics and reverse ray tracing results. In *Annales Geophysicae*, 24(12), 3229–3240. Göttingen, Germany: Copernicus Publications.
- Zolesi, B., & Cander, L. R. (2014). *Ionospheric prediction and forecasting*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Bab VIII

Penguasaan Teknik Pelapisan Nosel Roket Padat Penting bagi Pengembangan Teknologi Roket

Setiadi, Ahmad Novi Muslimin, dan M. Dito Saputra

A. Perkembangan dan Kendala Teknologi Roket Indonesia

Seperti halnya kendaraan pada umumnya, sebuah roket bekerja dengan memanfaatkan hukum ketiga Newton, ketika setiap aksi akan menghasilkan reaksi. Pada kendaraan bermotor seperti mobil, roda akan mendorong jalan untuk menghasilkan pergerakan mobil ke depan. Contoh lainnya adalah seperti saat kita memukul bola kasti atau tenis, kita akan menghasilkan aksi berupa bola yang terpental akibat pukulan dan gaya dorong balik yang kita rasakan di tangan sebagai reaksi. Sebuah roket memiliki ruang bakar yang berisi propelan, baik berupa padatan, cairan, atau campuran keduanya. Di dalam ruang tersebut, propelan dibakar dan menghasilkan gas dengan suhu dan tekanan tinggi. Gas ini kemudian dikeluarkan melalui nosel di bagian

Setiadi*, A. N. Muslimin & M. D. Saputra

*Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail*: seti1159@gmail.com

© 2025 Editor & Penulis

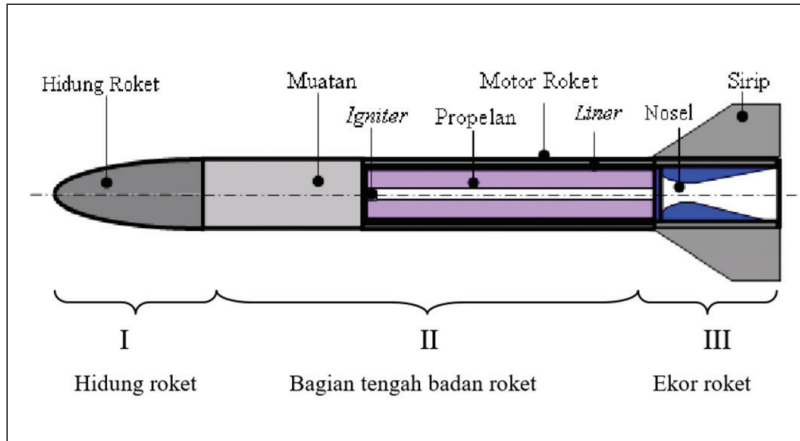
Setiadi, Muslimin, A. N. & Saputra, M. D. Penguasaan Teknik Pelapisan Nosel Roket Padat Penting bagi Pengembangan Teknologi Roket. Dalam T. Djamaluddin & F. Nuraeni (Ed.), *Keantarikaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi* (251–283).

Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1425.c1491 E-ISBN: 978-602-6303-86-8

belakang roket dengan kecepatan sangat tinggi. Momentum dari aksi mengeluarkan massa gas ini ke satu arah, menciptakan momentum reaksi yang sama dan berlawanan arah, sehingga mendorong roket ke depan. Proses untuk menghasilkan gaya dorong dengan mengeluarkan material propelan ini disebut dengan propulsi roket.

Seperti yang telah kita ketahui sebelumnya roket merupakan wahana yang mempunyai mesin konversi energi yang memungkinkan roket bergerak sesuai dengan gaya dorong yang dihasilkan dari proses pembakaran. Energi panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar di ruang bakar motor roket diubah menjadi energi panas, yang kemudian menghasilkan tekanan yang dapat menimbulkan gaya dorong melalui nosel roket, yang memungkinkan roket bergerak ke arah berlawanan dengan gaya dorong tersebut. Dalam proses ini, energi kinetik dihasilkan sebagai hasil dari perubahan energi kimia bahan bakar menjadi energi panas (Bintoro, 2013). Secara umum roket digunakan sebagai transportasi antariksa yang digunakan untuk meluncurkan manusia, satelit, dan pesawat luar angkasa ke orbit Bumi atau lebih jauh. Kemudian roket juga digunakan sebagai wahana untuk eksplorasi ilmiah yang memungkinkan sensor dan peralatan ilmiah disematkan di roket kemudian dikirim ke luar angkasa untuk mempelajari radiasi, medan magnet, dan cuaca. Dengan pengembangan roket juga ternyata dapat meningkatkan perkembangan teknologi seperti material, mesin, dan teknologi elektronik terus mengalami kemajuan berkat pembuatan dan peluncuran roket. Roket juga digunakan pada bidang militer dan pertahanan seperti dengan dikembangkannya rudal balistik dan menjadi wahana untuk mengirim satelit militer.

Komponen utama roket berbahan bakar padat, terdiri dari tiga bagian: bagian depan, yang merupakan hidung roket; bagian tengah, yang merupakan selongsong berbentuk silinder; dan bagian pangkal, yang merupakan ekor roket. Hidung roket, yang biasanya berbentuk kerucut atau busur, diikuti oleh tabung muatan, yang berfungsi sebagai kompartemen muatan roket, termasuk peralatan penunjang dan sensor kendali. Motor roket terdiri dari bahan bakar padat atau propelan, liner, igniter, dan nosel. Bagian pangkal roket, yaitu ekor



Sumber: Bintoro (2013)

Gambar 8.1 Konfigurasi Komponen Roket

atau sirip, berfungsi untuk mengontrol stabilitas aerodinamika roket saat terbang. Sirip roket biasanya berbentuk segitiga delta, segiempat trapesium, atau bentuk lainnya. Konfigurasi komponen roket dapat dilihat pada Gambar 8.1.

Undang-undang No. 21 Tahun 2013 memberikan landasan hukum bagi Indonesia untuk mengeksplorasi dan memanfaatkan ruang angkasa guna meningkatkan kesejahteraan, pertahanan, dan keamanan nasional (Handoyo, 2016). Ini mencakup pemanfaatan ruang angkasa untuk komunikasi, navigasi, dan penginderaan jauh, yang berperan penting dalam berbagai sektor seperti pertanian, mitigasi bencana, dan manajemen sumber daya alam. Pengembangan teknologi roket nasional merupakan salah satu kunci untuk mendukung kegiatan eksplorasi dan pemanfaatan ruang angkasa tersebut.

Penguasaan pengembangan dan penelitian mengenai teknologi roket di Indonesia saat ini telah mengalami kemajuan yang cukup pesat. Pengembangan teknologi pelapisan roket di Indonesia dimulai dengan berdirinya Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN). LAPAN adalah badan pemerintah yang bertanggung jawab atas pengembangan teknologi antariksa di Indonesia dan sekarang

Buku ini tidak diperjualbelikan.

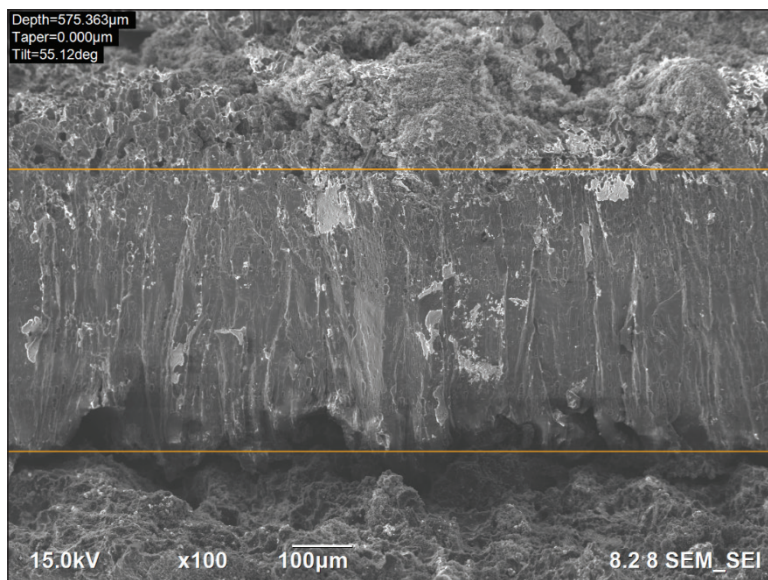
berubah menjadi Organisasi Riset Penerbangan dan Antariksa di bawah BRIN. Sejak pendiriannya, LAPAN telah fokus pada pengembangan roket buatan lokal, seperti roket RX series. Tercatat dalam periode tahun 2015–2020 Pusat Riset Teknologi Roket BRIN (dahulu Pusat Teknologi Roket LAPAN) telah mampu mengembangkan berbagai tipe dan jenis roket, beberapa di antaranya RX-550, RX-450, RX-320, RX-1220, RKX-200 EDF, RKX-200 TJ, RCX-1000. Dari antara tipe-tipe tersebut, RX-450, RX-320, RX-1220, RKX-200 EDF, dan RKX200 TJ telah dilakukan hingga pengujian dinamis roket (Mariani, 2021; Sutrisno, 2019).

Pengembangan dan penelitian roket yang dilakukan oleh Pusat Riset Teknologi Roket pastinya tidak terlepas dari berbagai macam kendala. Kendala yang sering ditemukan yaitu sering terjadi kerusakan pada bagian *divergent nosel* roket saat dilakukan pengujian statik. Pada saat terjadi propulsi bagian dalam, permukaan nosel roket akan mengalami tekanan, hantaman ablasi, dan lingkungan suhu yang sangat tinggi, bahkan di atas 1500°C. Bagian *divergent nosel* adalah bagian dari nosel yang memiliki bentuk melebar. Diameter nosel mulai membesar setelah melewati titik tersempit yang disebut kerongkongan (*throat*). Fungsi utama bagian ini adalah untuk mempercepat aliran gas yang telah mengalami ekspansi. Hal ini dapat dicapai dengan memperbesar ruang, mengurangi tekanan, dan meningkatkan kecepatan gas hingga mencapai kecepatan supersonik. Bagian *convergent* merupakan bagian awal dari nosel, tempat diameter nosel secara bertahap mengecil. Fungsi bagian ini adalah untuk mempercepat aliran gas panas yang keluar dari ruang pembakaran. Salah satu contoh kegagalan yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 8.2.

Selain hantaman dan tekanan ablasi, nosel roket juga akan mengalami proses pembentukan deposisi yang dihasilkan dari residu pembakaran propelan. Deposisi hasil pembakaran tersebut akan memengaruhi sifat aerodinamis dari roket yang ada. Ketebalan deposisi hasil pembakaran roket mencapai sekitar 0.5 mm. Ketebalan ini akan terus bertambah seiring dengan lamanya proses pembakaran.



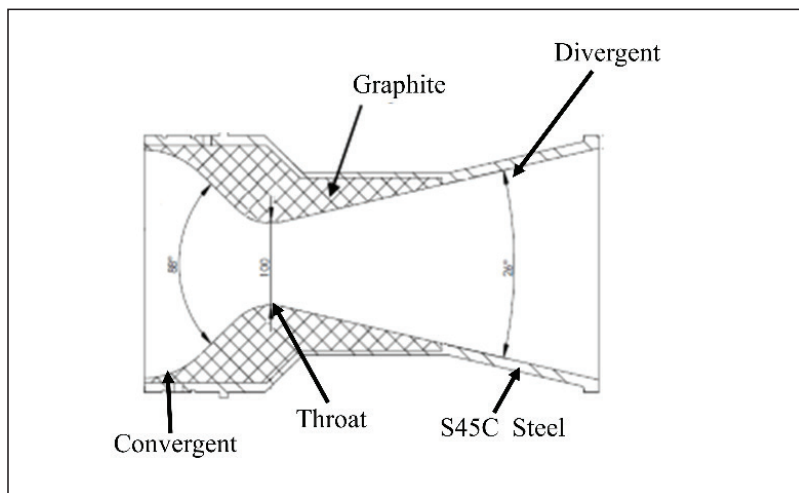
Gambar 8.2 Kegagalan yang terjadi pada *divergent* nosel roket saat uji *static*.



Gambar 8.3 Morfologi ketebalan deposisi hasil proses pembakaran pada permukaan substrat nosel roket.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Hingga saat ini desain nosel roket yang digunakan oleh Pusat Riset Teknologi Roket menggunakan kombinasi bahan grafit dan baja karbon. Material grafit digunakan pada bagian *convergent* dan *throat*, sedangkan baja karbon digunakan pada bagian *divergent nosel*. Pembagian ini dilakukan untuk meminimalisasi beban aerodinamis yang dihasilkan oleh bagian nosel roket (Sugondo et al., 2010). Pada aplikasinya, substrat nosel tersebut belum mampu menanggulangi efek proses propulsi yang terjadi seperti pada Gambar 8.2 dan 8.3 yang ada. Oleh karena itu, salah satu pendekatan solusi yang dilakukan untuk mengurangi kegagalan pada bagian *convergent*, *throat*, dan *divergent* nosel roket tanpa harus mengganti material nosel dan melakukan desain ulang roket yang ada, yaitu penggunaan teknik proteksi berbasis pelapisan. Dengan dilakukannya teknik pelapisan ini, dimensi permukaan nosel dapat dikurangi, sehingga massa nosel yang dimiliki akan lebih ringan dan performa kekuatan permukaan nosel juga meningkat (Sugondo et al., 2010).



Sumber: Setiadi et al. (2022)

Gambar 8.4 Konfigurasi nosel roket Pusat Riset Teknologi Roket-BRIN

Terdapat banyak teknik pelapisan yang dapat diaplikasikan pada permukaan nosel roket. Teknik umum yang digunakan dan mudah diaplikasikan yaitu *Physical Vapor Deposition* (PVD), *Chemical Vapor Deposition* (CVD), dan *Thermal Spray*. Ketiga teknik ini merupakan metode pelapisan yang umum digunakan dalam teknologi pelapisan nosel roket karena metode-metode pelapisan tersebut mampu memberikan pelapisan keramik pada permukaan nosel roket yang memiliki lingkungan kerja pada suhu lingkungan yang sangat tinggi. Lapisan bahan keramik akan mampu memberikan kekuatan secara mekanis permukaan nosel roket yang mengalami proses abrasi dan pemanasan suhu tinggi pada saat proses pembakaran terjadi.

Oleh karena itu, pada subbab selanjutnya akan dibahas secara detail mengenai teknik pelapisan dan beberapa aplikasi teknik pelapisan yang telah dikembangkan pada permukaan nosel roket padat yang telah dikembangkan oleh Pusat Riset Teknologi Roket BRIN.

B. Teknik Pelapisan Nosel Roket

Teknik pelapisan (*coating*) nosel roket merupakan teknik yang sudah digunakan sejak pertengahan abad ke-20, yaitu selama dan pasca-Perang Dunia II. Pelapisan nosel roket merupakan teknik penting yang bertujuan untuk meningkatkan daya tahan dan efisiensi nosel roket terhadap suhu tinggi, tekanan, dan korosi yang dihasilkan dari proses pembakaran. Pada awal pengembangan roket, bahan yang digunakan untuk nosel sering kali sederhana dan tidak dilapisi secara khusus. Seiring meningkatnya kebutuhan akan kinerja dan daya tahan yang lebih tinggi, penelitian dan pengembangan teknik pelapisan mulai berkembang (Sutton & Biblarz, 2011). Pada dekade 1960-an dan 1970-an, material keramik seperti zirkonia yang distabilkan dengan yttria (YSZ) dan logam tahan panas seperti tantalum dan niobium mulai digunakan untuk pelapisan nosel. Teknik seperti *Chemical Vapor Deposition* (CVD) dan *Physical Vapor Deposition* (PVD) juga mulai diperkenalkan. Pada era modern, pelapisan nosel roket terus berkembang dengan penggunaan material komposit dan teknik pelapisan yang lebih canggih seperti *plasma spray* dan *advanced CVD*. Material

komposit, termasuk serat karbon yang diperkuat dengan matriks keramik atau logam, digunakan untuk meningkatkan performa termal dan mekanis. Saat ini, teknik pelapisan nosel digunakan dalam berbagai program antariksa komersial dan militer. Misalnya, SpaceX dan Blue Origin menggunakan teknik pelapisan canggih untuk meningkatkan efisiensi dan masa pakai roket mereka.

Penggunaan teknik pelapisan pada nosel roket telah mengalami evolusi signifikan sejak awal pengembangan roket. Inovasi dalam material dan teknik pelapisan telah memungkinkan peningkatan kinerja dan ketahanan nosel, yang sangat penting dalam mencapai keberhasilan misi-misi antariksa modern.

Berikut adalah penjelasan mengenai beberapa teknik pelapisan nosel roket.

1. Pelapisan Keramik

Pelapisan keramik merupakan teknik pelapisan yang menggunakan bahan-bahan keramik untuk memberikan perlindungan pada permukaan substrat yang dilapisi. Beberapa bahan keramik yang sering digunakan pada nosel roket yaitu Zirkonia yang disetabilkan dengan yttria (YSZ), karbida, nitrida, dan oksida keramik. Keunggulan dari pelapisan keramik ini yaitu keramik memiliki titik leleh yang sangat tinggi dan konduktivitas termal yang rendah, yang membantu melindungi nosel dari suhu ekstrem.

Contoh penggunaan dan studi kasus yaitu pelapisan keramik adalah pada nosel roket yang menggunakan pelapis YSZ untuk memberikan isolasi termal dan meningkatkan ketahanan terhadap korosi dan oksidasi. Studi kasus seperti pada program antariksa tertentu, nosel roket yang dilapisi dengan YSZ menunjukkan peningkatan signifikan dalam ketahanan terhadap suhu tinggi dan erosi dibandingkan dengan nosel tanpa pelapisan keramik. Penelitian menunjukkan bahwa lapisan YSZ mampu mempertahankan integritas struktural nosel selama siklus termal yang berulang sehingga mengurangi kebutuhan untuk penggantian atau perawatan yang sering.

2. Pelapisan Logam

Pelapisan logam digunakan sebagai pelindung pada bagian-bagian nosel yang mengalami beban mekanis tinggi serta lingkungan yang sangat reaktif. Beberapa bahan yang sering digunakan yaitu molibdenum, tantalum, dan tungsten. Keunggulan dari lapisan logam ini adalah memiliki kekuatan tinggi pada suhu tinggi serta tahan terhadap oksidasi dan korosi.

Contoh penggunaan dan studi kasus yaitu pada nosel roket yang dilapisi dengan nikel melalui *electroplating* menunjukkan peningkatan signifikan dalam ketahanan terhadap korosi dan suhu tinggi dan memperpanjang umur pakai komponen tersebut. Studi kasus yaitu pada salah satu program antariksa, nosel roket yang dilapisi dengan paduan kobalt menggunakan *thermal spray coating* berhasil meningkatkan ketahanan terhadap erosi partikel padat dalam aliran gas panas. Hasilnya menunjukkan peningkatan umur pakai hingga 30% dibandingkan nosel tanpa pelapisan logam.

3. Pelapisan Komposit

Teknik pelapisan ini menggunakan kombinasi bahan seperti matriks logam dengan serat keramik atau serat karbon. Keunggulan kombinasi material dapat memberikan kekuatan mekanis yang tinggi serta ketahanan termal yang baik.

Contoh Penggunaan dan studi kasus yaitu pada nosel roket yang dilapisi dengan komposit silikon karbida (SiC) menunjukkan peningkatan signifikan dalam ketahanan terhadap suhu tinggi dan erosi dan memperpanjang umur pakai komponen tersebut. Studi kasus yaitu pada salah satu program antariksa, nosel roket yang dilapisi dengan komposit nikel-keramik menggunakan *thermal spray coating* berhasil meningkatkan ketahanan terhadap erosi partikel padat dalam aliran gas panas. Hasilnya menunjukkan peningkatan umur pakai hingga 40% dibandingkan nosel tanpa pelapisan komposit.

4. Pelapisan CVD (*Chemical Vapor Deposition*)

Teknik pelapisan ini merupakan teknik yang memanfaatkan reaksi kimia gas prekursor pada permukaan substrat untuk membentuk lapisan tipis. Keunggulan dari teknik ini yaitu lapisan yang dihasilkan sangat seragam dan memiliki adhesi yang baik pada substrat.

5. Pelapisan PVD (*Physical Vapor Deposition*)

Teknik deposisi uap fisik melibatkan penguapan material pelapis yang kemudian mengendap pada substrat. Keunggulan dari teknik ini yaitu mampu memberikan kontrol yang baik atas ketebalan dan komposisi lapisan.

6. Pelapisan *Thermal Spray*

Teknik ini dilakukan dengan cara menyemprotkan partikel material pelapis yang dilebur menggunakan suhu tinggi. Keunggulan teknik ini yaitu mampu menghasilkan lapisan tebal dan tahan lama.

Setiap teknik pelapisan memiliki kelebihan dan kekurangan tersendiri, dan pemilihan teknik tergantung pada spesifikasi operasional roket, termasuk jenis bahan bakar, suhu pembakaran, tekanan, dan durasi penggunaan. Dengan menggunakan teknik pelapisan yang tepat, nosel roket dapat dioptimalkan untuk performa yang lebih baik dan masa pakai yang lebih panjang. Pelapisan yang tepat untuk nosel roket sangat penting untuk memastikan kinerja optimal dan umur panjang komponen dalam kondisi operasional yang ekstrem. Referensi yang disebutkan dapat digunakan untuk mempelajari lebih dalam teknik-teknik pelapisan tersebut.

C. Teknik Pelapisan *Physical Vapor Deposition* (PVD) pada Substrat Nosel Roket

Pelapisan PVD telah menggantikan beberapa jenis lapisan *electroplating* konvensional dan lapisan cat tradisional dengan teknologi lapisan baru yang memberikan tampilan dekoratif juga memiliki kekerasan yang superior, ketahanan aus, tidak akan cepat memudar atau korosi.

Deposisi lapisan adalah lapisan keramik sangat tipis, ketebalan kurang dari 0,5 mikron, dan dalam beberapa kasus deposisi pelapisan PVD dapat diaplikasikan di atas bahan substrat yang sudah dilapisi *chrome*, termasuk kuningan, *die-casting*, baja, aluminium, dan plastik ABS. Pelapisan PVD dapat diaplikasikan langsung ke beberapa bahan seperti *stainless steel*, titanium dan *tools steel*.

Sejak diperkenalkan pada akhir 1980-an, PVD telah terbukti berhasil pada berbagai macam aplikasi fungsional, untuk meningkatkan kinerja dengan peningkatan kekerasan, ketahanan aus, ketahanan oksidasi, mengurangi gesekan, dan fungsi biomekanik (Sproul, 1996). Secara umum tahapan proses PVD pada permukaan substrat noel roket diawali dengan proses pembersihan permukaan substrat untuk menghilangkan kotoran, minyak, dan oksida yang dapat mengganggu adhesi lapisan. Proses selanjutnya yaitu evaporasi material pelapis seperti logam atau keramik dipanaskan hingga mencapai titik uap dalam ruang vakum. Kondisi pelapisan tersebut dilakukan dalam kondisi pemanasan yang bersumber dari pemanasan resistif, sinar elektron, atau laser. Proses ini memastikan transportasi material yang seragam. Setelah deposisi selesai, substrat didinginkan dan dapat menjalani proses tambahan seperti *annealing* untuk mengoptimalkan sifat mekanis dan termal lapisan (Mattox, 2010).

Bahan pelapis yang umum digunakan pada permukaan nosel roket yaitu titanium nitrida (TiN) biasanya digunakan untuk meningkatkan kekerasan permukaan dan ketahanan terhadap oksidasi. Kemudian tungsten (W) yang digunakan untuk memberikan ketahanan termal dan mekanis yang tinggi. Selanjutnya kromium nitrida (CrN) digunakan untuk ketahanan korosi dan oksidasi. Kemudian yang terakhir yaitu aluminium oksida (Al_2O_3) digunakan untuk menyediakan isolasi termal dan ketahanan terhadap erosi (Vossen & Kern, 1991).

Physical Vapor Deposition (PVD) adalah teknik pelapisan yang penting dalam meningkatkan performa dan daya tahan komponen nosel roket. Nosel roket harus menahan suhu dan tekanan ekstrem, sehingga memerlukan pelapisan yang mampu memberikan ketahanan

tinggi terhadap panas, korosi, dan aus. Berikut ini adalah penjelasan mengenai berbagai teknik PVD *coating* yang digunakan untuk nosel roket, mencakup prinsip kerja, aplikasi, dan keunggulannya.

1. *Sputtering*

Sputtering adalah salah satu metode PVD yang paling sering digunakan. Proses ini melibatkan pembentukan plasma gas, biasanya menggunakan argon, untuk menumbuk material target. Atom-atom dari material target terlepas dan mengendap pada substrat, membentuk lapisan tipis. Terdapat dua macam teknik *sputtering* yaitu *magnetron sputtering* dan *reactive sputtering*.

Pada *magnetron sputtering*, medan magnet digunakan untuk meningkatkan kepadatan plasma, sehingga meningkatkan laju *sputtering*. Teknik ini sangat efektif untuk pelapisan yang seragam dan tahan lama. *Magnetron sputtering* digunakan untuk melapisi nosel roket dengan bahan yang memiliki ketahanan tinggi terhadap panas dan aus, seperti titanium nitrida (TiN) dan kromium nitrida (CrN) (Kelly & Arnell, 2000).

Reactive Sputtering merupakan metode dengan menambahkan gas reaktif (seperti oksigen atau nitrogen) ke dalam ruang *sputtering*. Gas reaktif bereaksi dengan atom target untuk membentuk senyawa baru pada substrat. Untuk nosel roket, pelapisan seperti titanium alumina (TiAlN) yang dihasilkan dari reaksi antara titanium dan gas nitrogen, memberikan ketahanan yang lebih tinggi terhadap oksidasi dan korosi pada suhu tinggi (Biederman et al., 2004).

Berikut beberapa keunggulan *Sputtering*:

- a. Dapat menghasilkan lapisan yang sangat seragam dan padat.
- b. Ketebalan lapisan dapat dikontrol dengan presisi tinggi.
- c. Lapisan yang dihasilkan memiliki adhesi yang baik dan sifat mekanis yang kuat.

2. Evaporation

Evaporation adalah teknik PVD ketika material pelapis diuapkan dalam vakum dan kemudian mengendap pada substrat. Ada dua metode utama dalam *evaporation*, yaitu *thermal evaporation* dan *electron beam evaporation*.

Thermal evaporation menggunakan material pelapis yang dipanaskan hingga mencapai titik didih menggunakan elemen pemanas resistif, lalu menguap dan mengendap pada substrat. Teknik ini cocok untuk melapisi nosel roket dengan material yang memiliki titik leleh rendah hingga sedang, seperti aluminium dan tembaga, yang dapat meningkatkan ketahanan panas dan konduktivitas termal nosel (Mattox, 2010; Ohring, 2001).

Electron beam evaporation menggunakan sinar elektron untuk memanaskan material target. Sinar elektron fokus pada material, menyebabkan penguapan lokal yang intens. Metode ini cocok untuk material dengan titik leleh tinggi seperti tungsten dan tantalum. Nosel roket yang dilapisi dengan bahan ini akan memiliki ketahanan yang sangat tinggi terhadap suhu ekstrem dan aus (Ohring, 2001).

Berikut beberapa keunggulan teknik *evaporation*.

- a. Mampu menghasilkan lapisan tipis dengan kemurnian tinggi.
- b. Proses dalam vakum mencegah kontaminasi, menghasilkan lapisan berkualitas tinggi.
- c. Cocok untuk material dengan berbagai titik leleh.

3. Ion Plating

Ion Plating menggabungkan penguapan material pelapis dan ionisasi. Material yang diuapkan diionisasi sebelum mencapai substrat, yang diberi bias negatif untuk menarik ion ke permukaannya. Teknik ini menghasilkan lapisan dengan densitas tinggi dan adhesi yang kuat.

Arc Ion Plating (AIP) menggunakan busur listrik untuk menguapkan material pelapis. Ion-ion yang dihasilkan diarahkan ke substrat yang dibias negatif, membentuk lapisan yang sangat padat dan melekat kuat. Teknik ini sering digunakan untuk pelapisan nosel roket dengan material yang keras dan tahan aus seperti zirconium nitride (ZrN).

Beberapa keunggulan *Ion Plating*.

- a. Lapisan yang dihasilkan memiliki densitas tinggi dan adhesi yang superior.
- b. Proses dapat dilakukan pada suhu yang lebih rendah, mengurangi potensi kerusakan pada substrat.
- c. Meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus lapisan.

4. Pulsed Laser Deposition (PLD)

Pulsed Laser Deposition menggunakan pulsa laser intensitas tinggi untuk menguapkan material target (Mattox, 2010). Material yang diuapkan kemudian mengembun pada substrat, membentuk lapisan tipis yang presisi.

Beberapa keunggulan PLD adalah sebagai berikut.

- a. Mampu menghasilkan lapisan dengan komposisi yang sangat mirip dengan material target.
- b. Cocok untuk material kompleks dan multi-elemen, seperti pelapis superkonduktor atau material keramik khusus.
- c. Ideal untuk aplikasi yang membutuhkan lapisan tipis dan seragam, seperti komponen nosel roket yang memerlukan kontrol presisi tinggi terhadap ketebalan lapisan.

5. Cathodic Arc Deposition

Cathodic Arc Deposition melibatkan penguapan material target menggunakan busur listrik berenergi tinggi, menghasilkan plasma ionik yang kemudian diarahkan ke substrat untuk membentuk lapisan tipis.

Beberapa keunggulan *Cathodic Arc Deposition* adalah sebagai berikut.

- a. Menghasilkan lapisan dengan densitas tinggi dan adhesi yang sangat baik.
- b. Prosesnya cepat dan efisien, cocok untuk produksi massal.
- c. Ideal untuk pelapisan alat-alat pemotong, komponen mesin, dan aplikasi dekoratif.

Aplikasi PVD *Coating* pada nosel roket beberapa memiliki beberapa aplikasi utama, yaitu sebagai berikut.

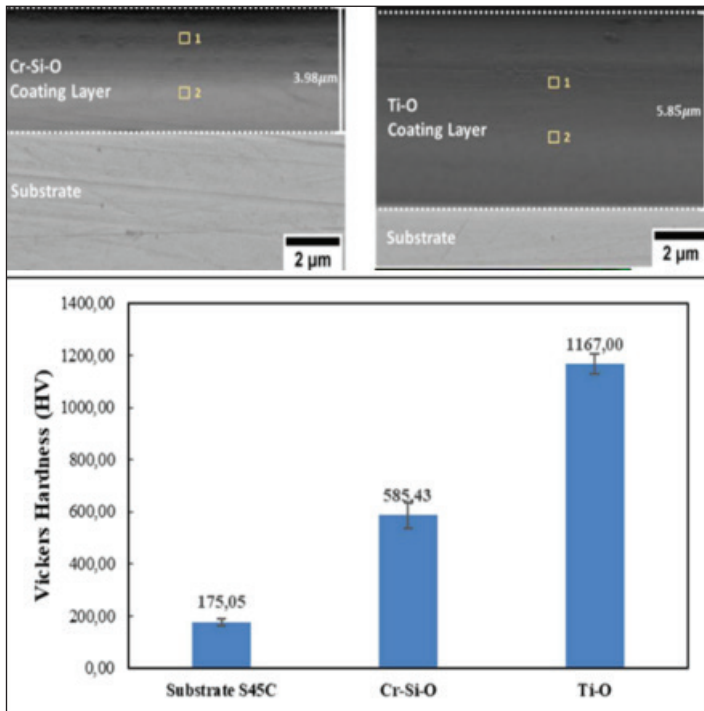
- a. Ketahanan panas: PVD digunakan untuk melapisi nosel roket dengan material yang mampu menahan suhu sangat tinggi, seperti nitrida logam (TiN, CrN) dan keramik (Al_2O_3 , ZrO_2). Lapisan ini membantu nosel roket bertahan lebih lama dalam kondisi pembakaran yang ekstrem.
- b. Ketahanan korosi dan oksidasi: Nosel roket terpapar pada lingkungan yang sangat reaktif selama operasi. Pelapisan dengan material seperti titanium alumina (TiAlN) atau zirconium nitride (ZrN) memberikan perlindungan tambahan terhadap oksidasi dan korosi.
- c. Peningkatan kekerasan dan ketahanan aus: Lapisan PVD meningkatkan kekerasan permukaan nosel, mengurangi keausan selama operasi dan meningkatkan umur pakai nosel. Ini sangat penting untuk memastikan bahwa nosel dapat menahan erosi dari gas panas dan partikel padat yang dihasilkan selama pembakaran bahan bakar roket.

Keunggulan PVD Coating untuk Nosel Roket meliputi :

- a. Ketahanan termal: Pelapisan PVD mampu menahan suhu ekstrem, yang sangat penting untuk nosel roket yang terpapar suhu tinggi selama operasi.
- b. Adhesi yang kuat: Teknik PVD menghasilkan lapisan yang sangat melekat pada substrat, memastikan integritas struktural dan performa optimal nosel roket.
- c. Lapisan tipis dan seragam: PVD memungkinkan deposisi lapisan yang sangat tipis dan seragam, mengoptimalkan berat dan performa nosel.
- d. Proses yang ramah lingkungan: PVD adalah metode pelapisan yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan teknik pelapisan lainnya karena tidak menggunakan bahan kimia berbahaya.

- e. Versatilitas material: Berbagai material dapat digunakan untuk pelapisan PVD, memungkinkan kustomisasi lapisan sesuai kebutuhan spesifik nosel roket.

Adapun teknik pelapisan PVD yang telah berhasil diaplikasikan pada nosel roket pada saat ini yaitu menggunakan bahan berbasis Cr-Si-O dan Ti-O. Dari hasil pelapisan tersebut diketahui bahwa nilai kekerasan dan lapisan Cr-Si-O dan Ti-O meningkat dan lapisan yang terbentuk sangat homogen (Muslimin et al., 2024). Berikut morfologi lapisan Cr-Si-O dan Ti-O hasil pelapisan PVD beserta nilai kekerasan yang dimiliki.



Sumber: Muslimin et al., (2024)

Gambar 8.5 Morfologi ketebalan lapisan Cr-Si-O ,Ti-O dan hasil pengukuran kekerasan lapisan

Dari proses pelapisan PVD yang telah dilakukan pada permukaan nosel roket tersebut dapat diketahui dengan menggunakan teknik PVD, nosel roket dapat memperoleh pelapisan yang sangat tahan terhadap kondisi operasional yang ekstrem, meningkatkan kinerja, dan masa pakai. Teknik ini memungkinkan kontrol yang sangat baik atas sifat lapisan, menjadikannya ideal untuk aplikasi yang memerlukan presisi tinggi dan ketahanan luar biasa.

D. Teknik Pelapisan *Chemical Vapor Deposition* (CVD) pada Substrat Nosel Roket

Chemical Vapor Deposition (CVD) adalah teknik pelapisan yang melibatkan reaksi kimia gas prekursor pada permukaan substrat untuk membentuk lapisan tipis material. Proses ini dilakukan dalam lingkungan terkontrol pada suhu tinggi, memungkinkan deposisi material yang seragam dan memiliki ikatan kuat dengan substrat (Carlsson & Martin, 2010). Secara umum proses pelapisan substrat nosel roket dengan teknik CVD diawali dengan membersihkan substrat nosel roket yang biasanya terbuat dari logam atau keramik untuk menghilangkan kontaminan dan memastikan adhesi lapisan yang baik. Kemudian dilanjutkan dengan pengisian gas prekursor yang mengandung bahan pelapis diintroduksi ke dalam reaktor CVD. Contoh gas prekursor termasuk silan (SiH_4) untuk pelapisan silikon karbida (SiC) atau titanium tetrachloride (TiCl_4) untuk pelapisan titanium nitrida (TiN). Proses selanjutnya yaitu pemanasan reaktor hingga suhu tinggi, biasanya antara 500°C hingga 1000°C , tergantung pada material pelapis dan substrat. Pada akhirnya gas prekursor terurai atau bereaksi secara kimia di permukaan substrat, membentuk lapisan padat dari material pelapis (Pierson, 1999). Dalam CVD terdapat beberapa bahan umum yang digunakan untuk pelapis nosel roket seperti karbon (C) yang digunakan untuk pelapisan nosel yang memerlukan ketahanan termal tinggi, silikon karbida (SiC) yang digunakan untuk memberikan ketahanan aus dan korosi yang baik, tungsten yang (W) digunakan untuk meningkatkan kekuatan mekanis pada suhu tinggi, serta titanium nitrida (TiN) yang digunakan untuk

memberikan kekerasan tinggi dan ketahanan terhadap oksidasi. Dengan teknik CVD, nosel roket dapat memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap kondisi operasional ekstrem, memperpanjang masa pakai, dan meningkatkan efisiensi roket secara keseluruhan.

Berikut adalah penjelasan mendalam mengenai berbagai teknik CVD *coating* yang digunakan untuk nosel roket, meliputi prinsip kerja, aplikasi, dan keunggulannya.

1. *Thermal CVD*

Thermal CVD adalah salah satu metode CVD yang paling umum, ketika prekursor gas diuraikan secara termal pada permukaan substrat yang dipanaskan untuk membentuk lapisan tipis. Prosesnya dengan menggunakan prekursor gas yang dimasukkan ke dalam reaktor yang mengandung substrat nosel roket. Suhu substrat dinaikkan hingga suhu yang cukup untuk menguraikan prekursor gas, yang kemudian bereaksi dan membentuk lapisan padat pada permukaan nosel. Aplikasi dari *thermal CVD* digunakan untuk menghasilkan lapisan keramik seperti silikon karbida (SiC) dan silikon nitrida (Si_3N_4), yang memiliki ketahanan tinggi terhadap oksidasi dan korosi pada suhu tinggi. Pelapisan ini sangat penting untuk nosel roket yang beroperasi dalam lingkungan pembakaran yang ekstrem (Pawłowski, 2018).

Berikut beberapa keunggulan *Thermal CVD*.

- a. Dapat menghasilkan lapisan yang sangat murni dan seragam.
- b. Prosesnya relatif sederhana dan dapat diterapkan pada skala industri.
- c. Mampu melapisi permukaan kompleks dan geometri yang sulit dijangkau.

2. *Plasma Enhanced CVD (PECVD)*

Plasma Enhanced CVD menggunakan plasma untuk meningkatkan reaktivitas prekursor gas, memungkinkan deposisi lapisan pada suhu yang lebih rendah dibandingkan dengan *thermal CVD*. Prosesnya menggunakan prekursor gas diionisasi dalam plasma sebelum mencapai substrat. Plasma memberikan energi tambahan yang diperlukan

untuk memecah prekursor gas, memungkinkan deposisi pada suhu substrat yang lebih rendah. Aplikasi dari PECVD yaitu untuk melapisi nosel roket dengan material seperti *diamond-like carbon* (DLC) dan titanium nitrida (TiN). Lapisan ini memberikan ketahanan aus yang tinggi dan mengurangi gesekan, yang penting untuk meningkatkan efisiensi dan umur pakai nosel roket (Hitchman & Jensen, 1993).

Berikut beberapa keunggulan PECVD.

- a. Deposisi pada suhu yang lebih rendah mengurangi risiko deformasi substrat.
- b. Mampu menghasilkan lapisan dengan sifat khusus, seperti kekerasan tinggi dan ketahanan aus.
- c. Prosesnya fleksibel dan dapat disesuaikan untuk berbagai material pelapis.

3. Low Pressure CVD (LPCVD)

Low Pressure CVD dilakukan pada tekanan yang lebih rendah daripada atmosfer untuk meningkatkan homogenitas dan kualitas lapisan. Prosesnya menggunakan prekursor gas yang diintroduksi ke dalam reaktor pada tekanan rendah. Penurunan tekanan meningkatkan *mean free path* molekul gas, yang meningkatkan distribusi dan reaktivitas prekursor di seluruh permukaan substrat (Seshan, 2002). Aplikasi dari LPCVD yaitu sering digunakan untuk melapisi nosel roket dengan material tahan panas seperti tungsten (W) dan molybdenum (Mo). Lapisan ini memberikan ketahanan yang sangat baik terhadap erosi dan oksidasi pada suhu tinggi.

Berikut ini beberapa keunggulan LPCVD.

- a. Menghasilkan lapisan yang sangat seragam dan bebas dari *voids*.
- b. Memungkinkan kontrol yang lebih baik terhadap ketebalan dan komposisi lapisan.
- c. Dapat melapisi substrat dengan geometri yang kompleks.

4. *Metal-Organic CVD (MOCVD)*

Metal-Organic CVD menggunakan senyawa organologam sebagai prekursor untuk deposisi lapisan. Prosesnya dengan menggunakan prekursor metal-organik yang diuapkan dan diintroduksi ke dalam reaktor CVD, kemudian mereka terdekomposisi pada substrat yang dipanaskan untuk membentuk lapisan logam atau senyawa logam. Aplikasi dari MOCVD digunakan untuk melapisi nosel roket dengan material seperti alumina (Al_2O_3) dan yttria-stabilized zirconia (YSZ). Lapisan ini menawarkan ketahanan termal yang sangat tinggi dan stabilitas kimia, yang penting untuk aplikasi dalam lingkungan suhu tinggi dan reaktif (Pawłowski, 2018).

Berikut ini beberapa keunggulan MOCVD.

- a. Dapat digunakan untuk melapisi material yang sulit deposisi dengan metode lain.
- b. Memungkinkan deposisi lapisan multi-elemen dan komposit.
- c. Fleksibel dalam hal pemilihan prekursor dan kondisi proses.

5. *Atomic Layer Deposition (ALD)*

Atomic Layer Deposition adalah teknik CVD yang sangat presisi, tempat lapisan terbentuk satu atom pada satu waktu melalui siklus reaksi. Proses pelapisan ALD melibatkan pengenalan bergantian dari prekursor gas dan reaktan ke dalam reaktor. Setiap siklus deposisi menghasilkan lapisan atomik yang sangat tipis dan seragam. Aplikasi ALD digunakan untuk melapisi nosel roket dengan material seperti hafnium nitrida (HfN) dan tantalum karbida (TaC). Lapisan ini menawarkan ketahanan yang luar biasa terhadap suhu tinggi dan korosi (Hitchman & Jensen, 1993).

Berikut ini beberapa keunggulan ALD.

- a. Menghasilkan lapisan dengan ketebalan yang sangat terkontrol dan seragam.
- b. Dapat melapisi substrat dengan geometri yang sangat kompleks, termasuk pori-pori dan celah kecil.

- c. Ideal untuk aplikasi yang memerlukan presisi tinggi dan lapisan tipis.

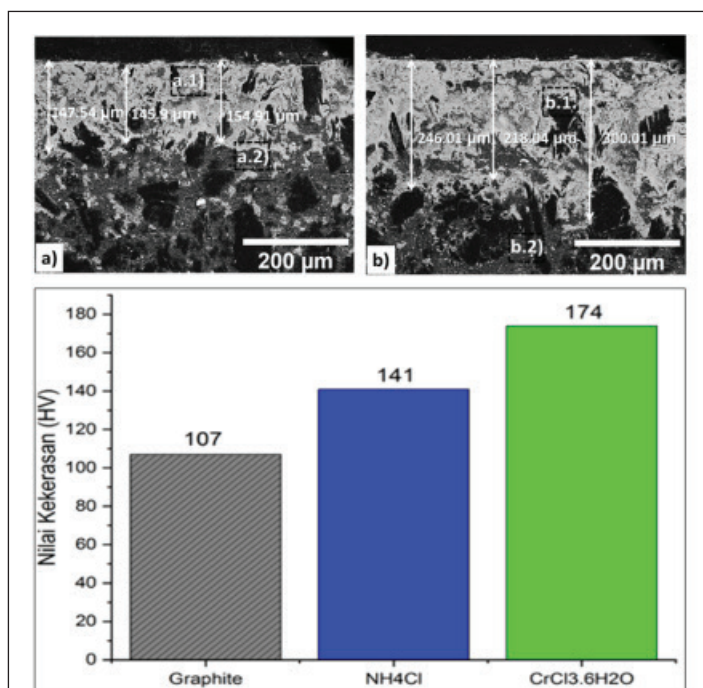
Aplikasi CVD *coating* pada nosel roket memiliki berbagai aplikasi penting, termasuk ketahanan terhadap suhu ekstrem yaitu nosel roket harus menahan suhu yang sangat tinggi selama operasi. Lapisan CVD seperti silikon karbida (SiC) dan tungsten (W) memberikan perlindungan termal yang diperlukan. Ketahanan terhadap erosi dan aus yaitu gas panas dan partikel padat yang dihasilkan selama pembakaran dapat menyebabkan erosi pada nosel roket. Pelapisan dengan material seperti *diamond-like carbon* (DLC) dan titanium nitrida (TiN) meningkatkan ketahanan terhadap erosi dan aus. Ketahanan terhadap oksidasi dan korosi yaitu nosel roket beroperasi dalam lingkungan yang sangat reaktif. Lapisan CVD seperti alumina (Al_2O_3) dan yttria-stabilized zirconia (YSZ) memberikan perlindungan terhadap oksidasi dan korosi, memperpanjang umur pakai nosel.

Berikut beberapa keunggulan CVD *Coating* untuk nosel roket

- a. Ketahanan termal: Teknik CVD mampu menghasilkan lapisan yang tahan terhadap suhu ekstrem, penting untuk operasi nosel roket yang intens.
- b. Ketahanan mekanis: Lapisan CVD memiliki kekerasan dan ketahanan aus yang tinggi, mengurangi erosi dan kerusakan mekanis pada nosel.
- c. Lapisan seragam dan bebas cacat (*defect*): CVD menghasilkan lapisan yang sangat seragam dan bebas dari *voids*, memastikan kinerja optimal.
- d. Fleksibilitas material: CVD memungkinkan deposisi berbagai material dengan sifat yang dapat disesuaikan sesuai kebutuhan aplikasi spesifik.
- e. Proses yang terukur: CVD dapat diterapkan pada skala industri, memungkinkan produksi massal dengan konsistensi tinggi.

Adapun teknik CVD konvensional yang telah dilakukan di Pusat Teknologi Roket BRIN yaitu CVD dengan menggunakan teknik *pack-cementation*. Proses pelapisan dilakukan untuk membentuk lapisan silikon karbida (SiC) protektif pada permukaan grafit nosel roket. Dari pelapisan yang dilakukan diperoleh lapisan SiC terbentuk pada permukaan grafit dan mengisi seluruh permukaan poros substrat grafit. Nilai kekerasan permukaan grafit juga mengalami peningkatan setelah terbentuknya lapisan SiC pada permukaan grafit. Berikut morfologi lapisan SiC dan hasil pengujian kekerasan SiC dengan menggunakan *packcementation activator* yang berbeda.

Keramik silikon karbida (SiC) telah terbukti efektif sebagai lapisan pelindung komposit karbon/karbon terhadap oksidasi dan keausan karena stabilitas kimianya yang luar biasa, kinerja tribologis yang



Keterangan: a) CrCl₃.6H₂O; b) NH₄Cl dan hasil pengukuran kekerasan lapisan

Gambar 8.6 Morfologi ketebalan lapisan SiC dengan aktivator

sangat baik, dan kinerja yang baik. SiC menciptakan kompatibilitas secara fisika dan kimia dengan substrat karbon. Terlebih lagi, SiC juga memiliki kekerasan dan stabilitas termal yang tinggi, yang dapat membawa manfaat tambahan yaitu memberikan peningkatan ketahanan terhadap erosi (Panakarajupally et al., 2021).

Dengan memanfaatkan teknik CVD, nosel roket dapat dilapisi dengan material yang meningkatkan daya tahan, kinerja, dan efisiensi, memastikan bahwa komponen ini dapat bertahan dan berfungsi optimal dalam kondisi operasional yang sangat menantang.

E. Teknik Pelapisan *Thermal Spray* pada Substrat Nosel Roket

Thermal spray adalah salah satu teknik pelapisan yang digunakan untuk meningkatkan kinerja dan daya tahan nosel roket. Teknik ini melibatkan peleburan material pelapis dan penyemprotan material tersebut pada permukaan substrat nosel roket, yang membentuk lapisan pelindung yang kuat dan tahan terhadap kondisi ekstrem. Prinsip dasar proses pelapisan dari teknik *thermal spray* yaitu dimulai dari pembersihan substrat yang dilanjutkan dengan penyemprotan material pelapis yang telah mencair ke permukaan substrat.

Berbagai teknik *thermal spray* dapat digunakan, tergantung pada jenis material pelapis dan aplikasi spesifik. Beberapa teknik utamanya adalah sebagai berikut.

1. *Flame Spray*

Prinsip dasar dari *flame spray* yaitu menggunakan nyala api untuk melelehkan material pelapis. Material yang meleleh kemudian disemprotkan pada substrat menggunakan gas pembawa. Proses pelapisan dengan melakukan campuran gas bahan bakar dan oksigen dibakar untuk menghasilkan nyala api yang cukup panas untuk melelehkan partikel serbuk atau kawat pelapis. Partikel meleleh ini kemudian disemprotkan ke substrat nosel roket. Aplikasi dari *flame spray* digunakan untuk melapisi nosel roket dengan material seperti aluminium dan molybdenum. Lapisan ini memberikan perlindungan

terhadap oksidasi dan korosi, serta meningkatkan ketahanan termal (Pawłowski, 2018).

Berikut beberapa keunggulan *Flame Spray*.

- a. Proses yang lebih sederhana dan biaya peralatan yang lebih rendah dibandingkan teknik lain.
- b. Dapat digunakan untuk melapisi area yang luas dengan cepat.
- c. Fleksibilitas dalam penggunaan berbagai jenis material pelapis.

2. Arc Spray

Prinsip dasar *arc spray* yaitu menggunakan busur listrik untuk melelehkan kawat logam, yang kemudian disemprotkan pada substrat. Proses pelapisannya meliputi persiapan dari beberapa hal berikut.

- a. Kawat: Dua kawat logam (biasanya dari bahan pelapis yang diinginkan) ditempatkan sebagai elektroda.
- b. Pembentukan busur: Arus listrik diterapkan melalui kawat, menciptakan busur listrik yang melelehkan ujung kawat.
- c. Pengiriman partikel: Gas pembawa menyemprotkan partikel logam cair ke substrat, membentuk lapisan pelapis yang padat dan seragam.

Aplikasi *arc spray* pada nosel roket yaitu *arc spray* digunakan untuk melapisi nosel roket dengan berbagai material yang meningkatkan ketahanan terhadap suhu tinggi, korosi, dan erosi.

Berikut adalah beberapa aplikasi spesifik dari *arc spray*.

- a. Ketahanan termal dan oksidasi: Material seperti aluminium dan molybdenum digunakan untuk memberikan lapisan pelindung yang tahan terhadap oksidasi pada suhu tinggi.
- b. Ketahanan erosi dan korosi: Pelapisan dengan bahan seperti stainless steel dan nikel digunakan untuk meningkatkan ketahanan erosi dan korosi, yang sangat penting dalam lingkungan agresif selama pembakaran roket.

Berikut beberapa keunggulan *Arc Spray*..

- a. Efisiensi proses: Arc spray memiliki laju deposisi yang tinggi, memungkinkan pelapisan cepat dan efisien pada area yang luas.
- b. Fleksibilitas material: Berbagai material logam dan paduan dapat digunakan sebagai kawat pelapis, memungkinkan penyesuaian sifat lapisan sesuai kebutuhan aplikasi spesifik.
- c. Biaya relatif rendah: Peralatan dan bahan habis pakai untuk arc spray relatif lebih murah dibandingkan dengan beberapa teknik thermal spray lainnya, seperti HVOF atau plasma spray.
- d. Lapisan seragam dan adhesi baik: Arc spray menghasilkan lapisan yang seragam dengan adhesi yang baik pada substrat, meningkatkan kinerja dan daya tahan nosel.

3. Plasma Spray

Prinsip dasar *plasma spray* yaitu menggunakan plasma (gas ionisasi tinggi) untuk melelehkan material pelapis. Material yang meleleh kemudian disemprotkan pada substrat.

Keunggulan teknik ini yaitu dapat digunakan untuk material dengan titik leleh tinggi seperti keramik. Proses *plasma spray* menggunakan gas seperti argon, hidrogen, atau nitrogen diionisasi dalam obor plasma, menciptakan plasma berenergi tinggi yang dapat melelehkan partikel serbuk. Partikel meleleh ini kemudian disemprotkan ke permukaan nosel roket untuk membentuk lapisan pelindung. Aplikasi dari *plasma spray* digunakan untuk melapisi nosel roket dengan material keramik seperti zirconia (ZrO_2) yang distabilkan dengan yttria (YSZ). Lapisan ini memberikan ketahanan tinggi terhadap suhu dan korosi, serta isolasi termal yang sangat baik.

Berikut beberapa keunggulan *plasma spray*.

- a. Mampu melapisi material dengan titik leleh tinggi.
- b. Menyediakan ketebalan lapisan yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan.
- c. Menghasilkan lapisan yang padat dan tahan lama.

4. *High-Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Spray*

Prinsip dasar teknik ini yaitu menggunakan campuran gas bahan bakar dan oksigen yang dibakar untuk menghasilkan jet gas berkecepatan tinggi yang melelehkan dan menyemprotkan material pelapis. Keunggulan teknik ini adalah dapat menghasilkan lapisan dengan kepadatan tinggi dan adhesi yang sangat baik. Proses dari HVOF yaitu gas bahan bakar (seperti propana atau hidrogen) dan oksigen dicampur dan dibakar dalam ruang pembakaran untuk menghasilkan gas berkecepatan tinggi. Partikel serbuk pelapis dimasukkan ke dalam aliran gas ini, meleleh, dan disemprotkan ke substrat dengan kecepatan tinggi. Aplikasi dari HVOF digunakan untuk melapisi nosel roket dengan material logam dan paduan seperti tungsten *carbide-cobalt* (WC-Co) dan *chromium carbide-nickel chromium* (Cr₃C₂-NiCr). Lapisan ini memberikan ketahanan aus dan erosi yang sangat baik, serta ketahanan terhadap oksidasi pada suhu tinggi (Pawłowski, 2018).

Berikut beberapa keunggulan HVOF *Spray*.

- a. Menghasilkan lapisan dengan densitas tinggi dan porositas rendah.
- b. Meningkatkan adhesi lapisan pada substrat.
- c. Menghasilkan lapisan yang sangat keras dan tahan aus.

5. *Cold Spray*

Cold Spray adalah teknik *thermal spray* yang unik karena menggunakan gas berkecepatan tinggi pada suhu rendah untuk mendepositkan partikel pelapis tanpa melelehkannya. Prosesnya meliputi pemberian gas bertekanan tinggi (biasanya helium atau nitrogen) dipercepat melalui nozel untuk menciptakan aliran gas berkecepatan tinggi. Partikel serbuk pelapis diinjeksi ke dalam aliran gas ini dan didepositkan pada substrat nosel roket melalui deformasi plastis. Aplikasi dari *cold spray* digunakan untuk melapisi nosel roket dengan material seperti aluminium, tembaga, dan titanium. Lapisan ini memberikan ketahanan terhadap oksidasi dan korosi, serta mempertahankan sifat mekanis asli material pelapis karena tidak terjadi perubahan fase akibat panas (Pawłowski, 2018).

Berikut beberapa keunggulan *cold spray*.

- a. Menghasilkan lapisan dengan sifat mekanis yang mirip dengan material bulk.
- b. Tidak ada perubahan fase termal, mengurangi risiko oksidasi dan keretakan.
- c. Proses yang cepat dan efisien dengan kontrol ketebalan yang baik.

6. *Detonation Gun Spray*

Detonation Gun Spray menggunakan ledakan gas terkontrol untuk menghasilkan aliran gas berkecepatan tinggi yang melelehkan dan menyemprotkan partikel pelapis. Prosesnya menggunakan campuran gas bahan bakar dan oksigen diledakkan secara berulang dalam ruang ledakan. Ledakan ini menciptakan gelombang kejut yang mempercepat dan melelehkan partikel serbuk pelapis, yang kemudian disemprotkan ke substrat nosel roket. Aplikasi dari *detonation gun spray* digunakan untuk melapisi nosel roket dengan material seperti tungsten karbida (WC) dan alumina (Al_2O_3). Lapisan ini memberikan ketahanan yang sangat baik terhadap abrasi dan erosi (Pawłowski, 2018).

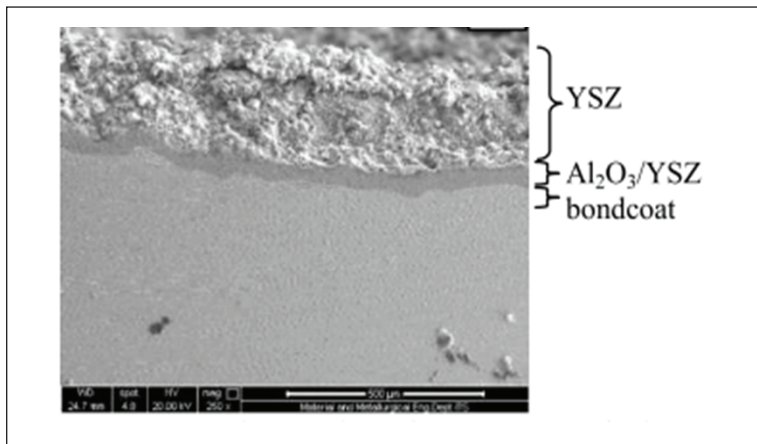
Berikut beberapa keunggulan *detonation gun spray*.

- a. Menghasilkan lapisan yang sangat padat dan keras.
- b. Meningkatkan ketahanan aus dan umur pakai komponen.
- c. Dapat digunakan untuk material dengan titik leleh tinggi.

Keunggulan *thermal spray* untuk nosel roket lapisan yang dihasilkan oleh *thermal spray* dapat menahan suhu tinggi yang dialami oleh nosel roket selama pembakaran bahan bakar. Penggunaan material seperti zirconia (ZrO_2) yang distabilisasi yttria (YSZ) dalam *plasma spray* memberikan isolasi termal yang sangat baik. Lapisan hasil *thermal spray* dapat meningkatkan kekuatan mekanis nosel, memungkinkan mereka menahan tekanan tinggi dan gaya erosi selama peluncuran dan penerbangan. Kemudian teknik seperti HVOF dapat menghasilkan lapisan yang tahan terhadap erosi dan oksidasi,

memperpanjang masa pakai nozel. Pelapisan dengan karbida, seperti tungsten karbida (WC), memberikan ketahanan aus yang sangat baik. Selanjutnya lapisan *thermal spray* memiliki adhesi yang kuat pada substrat, mengurangi risiko delaminasi atau pengelupasan selama operasi. *Thermal spray* memungkinkan penggunaan berbagai jenis material pelapis, termasuk logam, keramik, dan komposit, sehingga dapat disesuaikan dengan kebutuhan spesifik aplikasi nosel roket.

Teknik *thermal spray* sangat banyak dilakukan, karena proses dan efisiensi daya yang digunakan juga tidak terlalu banyak. Di Pusat Teknologi Roket BRIN beberapa teknik *thermal spray* yang pernah dilakukan yaitu salah satunya penggunaan teknik HVOF dengan menggunakan bahan pelapis berbasis keramik komposit $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YSZ}$. Dari proses pelapisan yang dilakukan diperoleh lapisan komposit $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YSZ}$ pada lapisan ikatan NiCrAlY membentuk lapisan keramik penghalang termal (TBC). Telah ditemukan bahwa lapisan komposit $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YSZ}$ ini akan berpengaruh pada stabilitas termal dan struktur mikro sistem TBC karena memperlambat penetrasi oksigen ke dalam lapisan ikatan (Widyastuti et al., 2015). Berikut morfologi lapisan yang telah dikembangkan.



Sumber: Widyastuti et al., (2015)

Gambar 8.7 Morfologi lapisan $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YSZ}$ pada permukaan substrat dengan menggunakan teknik *thermal spray* HVOF

Dari penjelasan teknik pelapisan *thermal spray* tersebut dapat diketahui bahwa Dengan menggunakan teknologi thermal spray, nozel roket dapat dilapisi dengan material yang meningkatkan daya tahan dan kinerja, memungkinkan roket beroperasi dengan efisien dalam kondisi ekstrem.

F. Penutup

Hingga saat ini Indonesia telah dan masih akan terus melakukan pengembangan teknologi pelapisan pada nozel roket guna meningkatkan kemajuan teknologi pada bidang antariksa dan kedirgantaraan. Pelapisan merupakan elemen penting dalam konstruksi roket, terutama untuk nozel, yang merupakan komponen krusial dalam sistem propulsi. Nozel roket harus menahan suhu dan tekanan yang sangat tinggi selama operasi. Oleh karena itu, teknik pelapisan yang tepat sangat diperlukan untuk meningkatkan daya tahan dan efisiensi roket. Seperti yang dijelaskan pada subbab sebelumnya, teknik pelapisan yang telah digunakan di Pusat Riset Teknologi Roket BRIN adalah *thermal spray*, CVD, dan PVD. *Thermal spray* adalah teknik pelapisan ketika partikel-partikel material pelapis dipanaskan hingga meleleh atau hampir meleleh, kemudian disemprotkan ke substrat dengan kecepatan tinggi. Teknik ini termasuk beberapa metode, seperti *flame spray*, *plasma spray*, *HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) spray*, *arc spray*, dan *cold spray*. *Thermal spray* digunakan untuk menghasilkan lapisan yang tahan terhadap suhu tinggi dan abrasi. Keunggulan *thermal spray* di antaranya antara lain mampu menahan suhu sangat tinggi; bisa menghasilkan lapisan yang tebal; serta dapat digunakan untuk berbagai jenis material pelapis. Selanjutnya Chemical Vapor Deposition (CVD) yang merupakan proses ketika gas prekursor kimia diuraikan pada permukaan substrat yang dipanaskan untuk membentuk lapisan material yang diinginkan. Proses ini dilakukan dalam lingkungan terkontrol dengan suhu tinggi. Keunggulan CVD antara lain lapisan yang dihasilkan dapat menahan suhu ekstrem; lapisan memiliki kekuatan mekanis tinggi; serta mampu menghasilkan lapisan yang sangat beragam. Kemudian *Physical Vapor Deposition*

(PVD) melibatkan penguapan material pelapis dan deposisinya ke substrat dalam bentuk uap. Metode ini mencakup *sputtering* dan evaporasi. Keunggulan PVD yaitu mampu menghasilkan lapisan tipis dengan ketahanan tinggi; dapat digunakan untuk logam, keramik, dan komposit; serta parameter proses dapat disesuaikan untuk mengontrol sifat lapisan.

Tantangan dalam pengembangan teknologi pelapisan di Indonesia mencakup beberapa aspek seperti :

1. Keterbatasan teknologi dan sumber daya

Pengembangan teknologi pelapisan yang canggih memerlukan peralatan dan sumber daya yang mahal. Indonesia menghadapi tantangan dalam hal ini, karena banyak peralatan pelapisan canggih masih diimpor.

2. Keterbatasan pengetahuan dan keahlian

Pendidikan dan pelatihan yang memadai dalam bidang material sains dan teknologi pelapisan masih diperlukan. Meskipun sudah ada upaya untuk meningkatkan hal ini, masih diperlukan lebih banyak program pendidikan dan pelatihan yang fokus pada teknologi pelapisan canggih.

3. Kolaborasi internasional

Kolaborasi dengan negara-negara maju yang memiliki teknologi pelapisan canggih sangat penting. Indonesia perlu memperluas jaringan dan bekerja sama dengan institusi internasional untuk mengakses teknologi terbaru dan meningkatkan kemampuan domestik.

Untuk menanggulangi tantangan tersebut terdapat beberapa langkah yang dapat dilakukan yaitu (Rafikasari, 2021):

1. Investasi dalam penelitian dan pengembangan

Pemerintah dan sektor swasta perlu meningkatkan investasi dalam penelitian dan pengembangan teknologi pelapisan. Ini termasuk mendanai proyek-proyek inovatif yang fokus pada pengembangan material baru dan teknik pelapisan yang lebih efisien.

2. Peningkatan pendidikan dan pelatihan

Meningkatkan pendidikan dan pelatihan di bidang material sains dan teknologi pelapisan sangat penting. Ini dapat dilakukan melalui kerja sama dengan universitas dan lembaga penelitian, serta dengan menawarkan beasiswa dan program pelatihan khusus.

3. Memperkuat kolaborasi internasional

Indonesia harus terus memperkuat kolaborasi internasional dengan negara-negara yang memiliki teknologi pelapisan canggih. Ini dapat dilakukan melalui kemitraan riset, pertukaran peneliti, dan program pelatihan bersama.

4. Pengembangan industri dalam negeri

Mendorong pengembangan industri dalam negeri yang mampu memproduksi dan menerapkan teknologi pelapisan canggih juga sangat penting. Ini termasuk mendukung perusahaan lokal yang bergerak di bidang manufaktur dan teknologi material.

Pengembangan teknologi pelapisan untuk nosel roket di Indonesia masih dalam tahap awal, tetapi telah menunjukkan kemajuan yang signifikan. Dengan upaya yang berkelanjutan dalam penelitian dan pengembangan, peningkatan pendidikan dan pelatihan, serta kolaborasi internasional, Indonesia dapat mencapai kemajuan lebih lanjut dalam teknologi pelapisan. Ini akan membantu memperkuat kemampuan negara dalam pengembangan roket dan teknologi antariksa, mendukung ambisi Indonesia untuk menjadi pemain utama dalam industri kedirgantaraan global.

Daftar Pustaka

- Biederman, H., Kudrna, P., & Slavinska, D. (2004). Hard plasma polymers, composites and plasma polymer films prepared by rf sputtering of conventional polymers. *Plasma Polymer Films*, 289–324.
- Bintoro, A. (2013). *Desain Konfigurasi Roket Padat* (Sutrisno & G. Prabowo (eds.); I). Indonesia Book Project (IBP).

- Carlsson, J.-O., & Martin, P. M. (2010). Chemical vapor deposition. In *Handbook of Deposition Technologies for films and coatings*, 314–363. Elsevier.
- Handoyo, B. H. C. (2016). Peraturan Perundang-Undangan implementasi UU No. 21 Tahun 2013 Tentang Keantariksaan yang diprioritaskan untuk disusun. *Prosiding Seminar Nasional 2016 Pengembangan Kebijakan Dan Regulasi Penerbangan dan Antariksa: Problema Dan Tantangan*, 33–37.
- Hitchman, M. L., & Jensen, K. F. (1993). *Chemical vapor deposition: principles and applications*. Academic Press.
- Kelly, P. J., & Arnell, R. D. (2000). *Magnetron sputtering : a review of recent developments and applications*. 56, 159–172.
- Mariani, L. (2021). *Laporan Akuntabilitas Kinerja PUSTEKROKET 2020*. LAPAN.
- Mattox, D. M. (2010). *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing*. William Andrew.
- Muslimin, A. N., Sugiarti, E., Asshidiqi, Z., Budiman, Y., Setiadi, & Wicaksono, B. (2024). Structural and mechanical properties of Cr-Si-O and Ti-O thin coatings deposited by Arc-PVD coating. *5th International Seminar on Metallurgy and Materials (ISMM2022)*, 020099. <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/5.0187054>
- Ohring, M. (2001). *Materials science of thin films: depositon and structure*. Elsevier.
- Panakarajupally, R. P., Mirza, F., El Rassi, J., Morscher, G. N., Abdi, F., & Choi, S. (2021). Solid particle erosion behavior of melt-infiltrated SiC/SiC ceramic matrix composites (CMCs) in a simulated turbine engine environment. *Composites Part B: Engineering*, 216(January), 108860. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108860>
- Pawłowski, L. (2018). Fundamentals of oxide manufacturing. *Industrial Chemistry of Oxides for Emerging Applications*, 25.
- Pierson, H. O. (1999). *Handbook of chemical vapor deposition: principles, technology and applications*. William Andrew.
- Rafikasari, A. (2021). *Strategi Diplomasi Pertahanan Indonesia Melalui Kerja Sama Keantariksaan dalam Era*. 27–41. <https://doi.org/10.30536/jkkpa.v2n1.2>
- Seshan, K. (2002). *Handbook of thin film deposition techniques principles, methods, equipment and applications, second editon*. CRC Press.

- Setiadi, Wicaksono, B., Muzayadah, N. L., Wandono, F. A., & Nurtiaso, T. S. (2022). Investigation on the Mechanical Properties of the Post-Static Fire Testing Effect of Graphite Material used in the RX320 Rocket Motor Nozzle. *Journal of Physics: Conference Series*, 2243(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2243/1/012050>
- Sproul, W. D. (1996). Physical vapor deposition tool coatings. *Surface and Coatings Technology*, 81, 1–7.
- Sugondo, Langenati, R., Futichah, & Mujtahid. (2010). PELAPISAN NOSEL ROKET DENGAN BORON KARBIDA 50. *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*, 6(1), 50–68.
- Sutrisno. (2019). *Laporan Akuntabilitas Kinerja Instansi Pemerintah Tahun 2019*. [https://kinerja.lapan.go.id/getfilepublic/public/LAKIN-98579424-Lakin Pustekroket 2019.pdf](https://kinerja.lapan.go.id/getfilepublic/public/LAKIN-98579424-Lakin%20Pustekroket%202019.pdf)
- Sutton, G. P., & Biblarz, O. (2011). *Rocket propulsion elements*. John Wiley & Sons.
- Vossen, J. L., & Kern, W. (1991). *Thin film processes II* (Vol. 2). Gulf Professional Publishing.
- Widyastuti, Parindra, K., Mariani, L., Ardhyanta, H., & Sulistijono. (2015). Analysis of YSZ-Al₂O₃/YSZ Flame Sprayed Thermal Barrier Coating to Thermal Resistance. *Advanced Materials Research*, 1112, 338–344. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1112.338>

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Bab IX

Upaya Mewujudkan Propelan Padat Komposit Andal

Kendra Hartaya, Luthfia Hajar Abdillah, dan
Retno Ardianingsih

A. Peran Roket dalam Perkembangan Teknologi Keantariksaan

Perkembangan teknologi keantariksaan tidak dapat lepas dari kemajuan yang terjadi dalam teknologi roket. Roket adalah wahana (kendaraan) antariksa yang membawa satelit ke lintasan tertentu yang disesuaikan dengan tujuan atau misi satelit tersebut. Satelit beresolusi spasial tinggi, pada umumnya memiliki orbit yang lebih rendah dibandingkan dengan satelit beresolusi spasial rendah. Dalam hal ini, rencana orbit dan beban satelit akan menjadi pertimbangan penting dalam menentukan kebutuhan spesifikasi daya roket.

Secara garis besar roket terdiri dari dua bagian, yaitu bagian depan dan bagian belakang. Bagian depan berisi misi roket. Misi roket berisi

K. Hartaya, L. H. Abdillah & R. Ardianingsih*

*Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail*: re_ardian@yahoo.com

© 2025 Editor & Penulis

Hartaya, K., Abdillah, L. H., & Ardianingsih, R. Upaya Mewujudkan Propelan Padat Komposit Andal. Dalam T. Djameluddin & F. Nuraeni (Ed.), *Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi* (285–312). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1425.c1492
E-ISBN: 978-602-6303-86-8

Buku ini tidak diperjualbelikan.

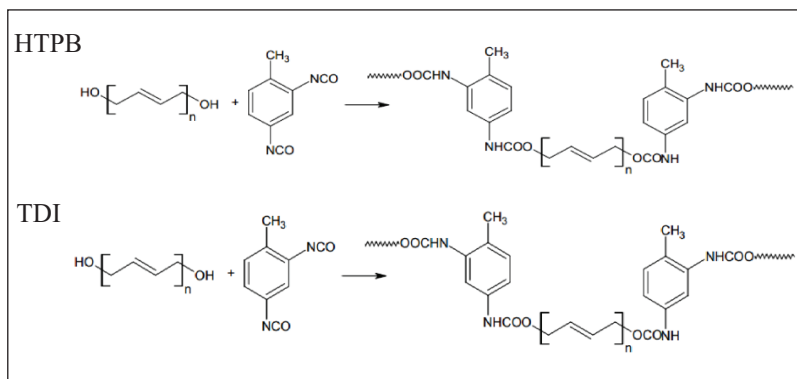
bahan dan alat yang digunakan untuk tujuan tertentu, misalnya untuk penelitian, ataupun untuk persenjataan. Bagian belakang merupakan motor roket yang menggerakkan roket agar meluncur ke angkasa. Penelitian dan pengembangan motor roket umumnya dilakukan melalui pengembangan propulsi, pengembangan struktur, dan pengembangan propelan. Propelan merupakan zat yang digunakan untuk menciptakan daya dorong melalui pemuaiian atau pengeluaran gas, cairan, atau padatan. Pengembangan propelan dirasakan penting menjadi pijakan untuk pengembangan lainnya karena pengembangan bagian-bagian motor roket menuntut adanya propelan yang andal.

Dalam roket, propelan dapat berupa padat atau cair. Sebutan roket padat adalah roket dengan bahan bakar padat, bahan bakar ini dibuat dengan mencampur komponen penyusun dan dipadatkan. Roket cair adalah roket dengan bahan bakar cair. Di Indonesia, roket padat lebih banyak dikembangkan daripada roket cair. Beberapa lembaga/institusi pemerintah, bahkan perguruan tinggi, berpartisipasi dalam pengembangan roket ini.

Propelan yang andal bertumpu pada proses yang baku, dengan kata lain proses yang baku akan menghasilkan propelan yang andal. Propelan andal adalah propelan yang dibuat pada waktu kapan pun, dengan bahan baku yang kualitasnya sama, dan akan menghasilkan kinerja serta sifat-sifat yang sama. Propelan andal ini akan memudahkan evaluasi terhadap hasil-hasil penelitian motor roket. Jika propelan tidak andal, hasil pengembangan motor roket akan banyak kendala dalam evaluasi kinerja propelan. Lebih jauh, hal itu juga akan menimbulkan banyak kesulitan dalam evaluasi kinerja roket secara keseluruhan. Hal tersebut yang menjadi alasan penting perlunya mewujudkan propelan andal melalui pembakuan proses dan pembakuan pengujian.

B. Komponen dan Proses Umum Pembuatan Propelan Padat

Propelan padat komposit tersusun atas bahan-bahan padat dan cair. Bahan padat meliputi *ammonium perklorat* (AP) sebagai oksidator,



Gambar 9.1 Struktur kimia HTPB dan TDI

dan aluminium (Al) sebagai sumber energi termal. Bahan cair meliputi *hydroxyl terminated polybutadiene* (HTPB) sebagai prepolimer (polimer rantai pendek) dan *toluene diisocyanate* (TDI) sebagai pematang. Struktur kimia HTPB dan TDI tersaji pada Gambar 9.1. Selain bahan padat dan bahan cair tersebut, ada beberapa bahan yang ditambahkan dalam kuantitas sedikit sesuai karakter propelan yang diinginkan seperti besi oksida Fe_2O_3 sebagai katalis pembakaran, bahan pemlastis dioktil adipat (DOA).

Perlu diketahui bahwa komponen propelan yang digunakan dalam pembuatannya adalah komponen-komponen teknis, bukan murni. Mayoritas komponen tersebut diperoleh secara mengimpor. Sementara bahan aditif, misalnya besi oksida dan DOA, ditambahkan dengan jumlah sedikit dalam bentuk murni (pa).

Proses pembuatan propelan dilakukan dengan mencampur bahan penyusun satu demi satu ke dalam mesin pencampur yang sudah dikondisikan. Mesin pencampur diselubungi oleh jaket berisi aliran air hangat dan dilengkapi dengan pengaduk bilah tunggal dengan 60 rotasi per menit. Mesin pencampur ini dirancang dan dibuat oleh penelitian yang dilakukan tersendiri dengan kapasitas tiga kilogram adonan. Pembuatan propelan diawali dengan pencampuran HTPB dan Al, diaduk selama waktu tertentu hingga dianggap homogen. Kemudian ditambahkan AP dan diaduk lagi hingga homogen, dan di-

akhiri dengan pemasukan TDI, diaduk lagi hingga dianggap homogen. Proses ini dinamakan proses *mixing*. AP yang selama ini digunakan adalah dua ukuran, kasar dan halus. AP merupakan sumber oksigen yang paling banyak kandungannya dibanding sumber-sumber oksigen lainnya. Kandungan AP dalam propelan dibuat melimpah agar mampu membakar Al sebagai bahan bakar utama dan mampu membakar komponen lainnya.

Setelah selesai proses *mixing*, adonan dituang ke dalam cetakan berbentuk silinder yang sudah disiapkan untuk dibentuk sesuai keinginan. Proses ini disebut *casting*. Lalu ditusukkan *mandrel* ke dalam adonan yang sudah memenuhi cetakan (proses *coring*). Penukusan *mandrel* ini untuk membuat bentuk permukaan bagian dalam silinder propelan (*grain*). Terakhir, adonan yang sudah berada dalam cetakan, dan *mandrel* di dalamnya, dimasukkan ke dalam oven untuk dipanaskan pada suhu dan waktu tertentu guna menyempurnakan pematangan/pemadatan. Setelah matang, propelan hasil (padat) dilepas dari cetakan dan *mandrel* (proses *decoring*). Propelan hasil siap dilakukan berbagai pengujian, termasuk uji *homogeny*, yaitu pengujian sebaran komponen, apakah merata atau tidak.

Gambar 9.2 menyajikan beberapa peralatan yang digunakan untuk pembuatan propelan padat komposit, yaitu mesin pencampur, ruang pencetakan vakum, kompresor, pelapisan cetakan dengan lembaran aluminium dan penyemprotan dengan McLube, *mandrel*, cetakan yang terpadat dalam ruang vakum, propelan yang dihasilkan dan propelan yang sudah terpasang pada motor roket siap uji statis, dan nyala propelan yang menyembur akibat adanya tekanan dalam ruang bakar.

Cetakan yang ada di laboratorium komposisi, LAPAN Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (sekarang BRIN, Badan Riset dan Inovasi Nasional) ada dua jenis yaitu berbentuk balok dan berbentuk silinder. Bentuk balok ditujukan jika kita mengharapkan pengujian sampel propelan, sedangkan untuk cetakan silinder dimaksudkan jika kita menginginkan untuk uji *static* guna mengetahui kinerja propelan (nilai Isp). Pengujian karakteristik propelan yang bisa dilakukan di



Keterangan:

a.Mesin pencampur; b. Ruang cetak vakum; c.Kompresor; d.Cetakan berlapis Al; e. Madrel silinder; f.Cetakan dalam Vakum; g.Propelan hasil; h.Propelan dalam Motor roket; i.Nyala propelan.

Gambar 9.2 Peralatan untuk pembuatan propelan padat komposit

laboratorium pusat teknologi roket di antaranya, uji densitas, uji kekerasan, uji kekeroposan dengan sinar-x, uji kuat tarik, uji *static* untuk mengetahui kinerja propelan (impuls spesifik, Isp).

Biasanya evaluasi kinerja propelan dilakukan dengan menghubungkan antara komposisi propelan dengan impuls spesifik (Isp). Impuls spesifik adalah ukuran energi propelan per satuan massa, yang juga menunjukkan seberapa efektif sebuah mesin roket menggunakan propelan. Sebelum tahun 2017, banyak sekali dijumpai data yang tidak punya hubungan yang jelas antara komposisi propelan dengan impuls spesifik. Beberapa kasus yang terkadang muncul:

- a. Komposisi propelan sama, tetapi impuls spesifik berbeda
- b. Komposisi propelan beda, tetapi impuls spesifik dekat
- c. Kandungan Al dalam propelan rendah, tetapi impuls spesifik tinggi
- d. Kandungan Al dalam propelan tinggi, tetapi impuls spesifik rendah.
- e. Tidak ada *tren* hubungan yang jelas antara Al dengan impuls spesifik

Tidak adanya tren hubungan yang jelas antara kandungan Al dengan impuls spesifik, mengakibatkan kesulitan mendapatkan nilai kinerja yang sesungguhnya. Karena tidak ada alasan yang logis untuk meyakini bahwa nilai tersebut adalah nilai yang sesungguhnya sehingga nilai kinerja tersebut tidak bisa digunakan sebagai pijakan penelitian dan pengembangan berikutnya.

Menurut reaksi kimia pembakaran, reaksi pembakaran Al menghasilkan besaran energi tertentu per gram. Sehingga bisa dikatakan bahwa kandungan Al akan berhubungan dengan Isp. Makin tinggi kandungan Al makin tinggi Isp, dan sebaliknya makin rendah kandungan Al makin rendah Isp. Kalau pun banyaknya data yang dihasilkan pada masa lalu, bisa dibuat tren hubungan antara kandungan Al dengan Isp, meskipun masih ada pertanyaan, apakah benar bahwa Isp itu benar-benar nilai yang sesungguhnya dari kandungan Al tersebut.

Hal inilah yang menjadi dasar pengembangan berikutnya untuk membakukan proses pembuatan propelan agar diperoleh propelan yang andal. Propelan andal adalah propelan yang memiliki karakteristik sama pada komposisi yang sama meskipun dibuat pada waktu yang berlainan. Tentu saja, kualitas bahan baku diasumsikan tidak mengalami degradasi selama penyimpanan. Berikut ini diuraikan pencapaian tentang pembakuan tersebut dalam bentuk kekayaan intelektual yang sudah ada baik dalam proses terdaftar maupun yang sudah dikabulkan (*granted*).

C. Pengembangan Propelan

Berikut adalah beberapa pengembangan yang telah dilakukan untuk mewujudkan propelan andal di Indonesia, khususnya di Badan Riset dan Inovasi Nasional.

1. Uji Homogenitas Propelan Padat Komposit

Hasil pengembangan ini telah memperoleh paten dengan nomor IDP000064239 (2019), yang dapat menunjukkan uji homogenitas propelan padat komposit dengan data densitas dan kekerasan. Sampel diambil dengan memotong dari silinder propelan hasil cetakan. Dalam sekali mencetak (satu komposisi) atau sekali proses, menghasilkan 3 silinder propelan. Tiap-tiap silinder diambil sebanyak 15 buah sampel dari atas ke bawah, sehingga mendapatkan 45 sampel dari 3 silinder tersebut. Pengambilan sampel diupayakan pada posisi yang sama antara satu silinder dengan silinder yang lain untuk memperkecil kesalahan dalam analisis data.

Setiap sampel tersebut diukur kekerasannya, dilanjutkan dengan pengukuran densitas dalam air, sehingga setiap sampel memiliki dua data, yaitu densitas dan kekerasan. Karena tiap silinder propelan diambil 15 sampel, maka tiap silinder propelan memiliki 15 data kekerasan dan 15 data densitas. Untuk silinder kedua dan silinder ketiga juga diambil data kekerasan dan data densitas. Pengolahan data dilakukan dengan metode statistik analisis variansi satu jalur (anova satu jalur), dengan taraf signifikansi 5%. Dengan menggunakan anova

ini, bisa dihitung rerata densitas tiap-tiap silinder. Rerata densitas silinder kesatu ini dibandingkan rerata densitas silinder kedua dan rerata densitas silinder ketiga. Dengan perhitungan anova, ketiga rerata densitas ini akan diperoleh nilai “F hitung (Fh)”. Nilai sebagai rujukan diambil dari *table* anova, “F table” (Ft) dengan derajat kebebasan N-1 (N banyaknya sampel=45). Jika Fh lebih kecil daripada Ft maka dinyatakan ketiga silinder tidak berbeda. Dengan cara yang sama, pembedaan ketiga silinder juga dilakukan terhadap data kekerasan. Jika dengan data kekerasan ternyata tidak ada perbedaan dari ketiga silinder maka dinyatakan ketiga silinder propelan tidak berbeda. Dengan kata lain, propelan adalah homogen (sebaran komponen penyusun merata).

Adakalanya dari ketiga silinder diperoleh kesimpulan bahwa tidak ada perbedaan dari data densitas, tetapi ada perbedaan pada data kekerasan. Oleh sebab itu, propelan dianggap homogen apabila baik rerata densitas maupun rerata kekerasan menunjukkan tidak adanya perbedaan. Perulangan dilakukan pada langkah proses pembuatan yang sama dengan komposisi yang berbeda. Perbedaan komposisi ini hanya pada kandungan aluminium. Kandungan aluminium sangat menentukan kinerja propelan karena pembakaran aluminium akan menghasilkan energi yang jauh lebih besar daripada pembakaran binder. Proses pembakaran propelan pada dasarnya pembakaran aluminium (Al) dan pembakaran binder (HTPB, TDI) dengan sumber oksigen dari ammonium perklorat (AP).

Dalam paten ini, hal yang utama adalah pengenalan cara uji homogenitas propelan. Propelan yang homogeni akan memiliki densitas dan kekerasan yang sama pada semua bagian. Karena propelan homogen, maka adonan dalam cetakan selama proses pematangan dalam oven tidak akan mengalami penurunan (proses menurun dari atas ke bawah) komponen penyusun terutama komponen padat (AP, Al). Uji semacam ini disebut uji merusak karena silinder asal sampel mengalami kerusakan sehingga silinder yang ditinggalkan rusak dan tidak bisa dipakai lagi uji berikutnya terutama uji kinerja (uji *static*) yang menggunakan silinder propelan utuh. Pada paten

ini, uji homogenitas memang dilakukan dengan data yang diambil dengan merusak sampel. akan lebih baik lagi jika dilakukan dengan tanpa merusak sampel agar propelan yang diuji homogenitas bisa dipakai lagi untuk uji lainnya seperti uji statik untuk mengetahui kinerja propelan berupa impuls spesifik (Isp).

Pengembangan propelan berikutnya adalah dengan memperkenalkan uji homogen tidak merusak sampel yaitu melalui film sinar-x. Upaya ini telah memperoleh paten dengan nomor IDS000002503 (2019). Film sinar-x merupakan hasil pemindaian propelan padat komposit hasil cetakan. Untuk meyakinkan bahwa film sinar-x bisa digunakan untuk uji homogenitas, maka setelah dipindai kemudian propelan diambil 15 sampel untuk diukur data densitasnya. Karena data densitas lebih sensitif dari pada data kekerasan, maka pengukuran hanya dilakukan untuk data densitas.

Melalui perhitungan dengan anova satu jalur, data densitas dihitung reratanya tiap silinder untuk memperoleh nilai F_h . Pembandingan nilai F_h dengan F_t dilakukan untuk melihat ada-tidaknya perbedaan. Jika F_h lebih kecil daripada F_t , disimpulkan tiga silinder propelan adalah tidak berbeda (homogeni, sebaran komponen penyusun merata). Dengan menggunakan alat densitometer, gelap-terang (tingkat kegelapan) film sinar-x bisa dibaca. Nilai “gelap-terang” yang tinggi menunjukkan banyaknya kandungan padatan (terutama Al) yang kecil, sedangkan nilai gelap-terang yang rendah menunjukkan kandungan Al yang besar. Nilai gelap-terang akan berbanding terbalik dengan nilai kinerja propelan (Impuls spesifik, Isp). Keuntungan uji homogenitas ini adalah tidak banyak biaya yang dikeluarkan, tetapi agak sulit mendapatkan potongan sampel yang tidak berubah selama pengambilan.

Proses perhitungan dengan anova satu jalur juga dilakukan terhadap data gelap-terang film sinar-x. Rerata gelap-terang ketiga silinder propelan dihitung untuk memperoleh nilai F_h . Pembandingan F_h dengan F_t dilakukan untuk mendapatkan kesimpulan ada-tidaknya perbedaan dari ketiga silinder propelan tersebut. Jika ketiga silinder propelan dengan data gelap-terang tersebut ternyata tidak berbeda,

disimpulkan bahwa ketiga silinder propelan adalah homogen (sebaran komponen penyusun merata). Kesesuaian antara kesimpulan dari data densitas dengan kesimpulan dari data gelap-terang menunjukkan bahwa uji homogenitas dengan data gelap-terang dari film sinar-x dapat digunakan.

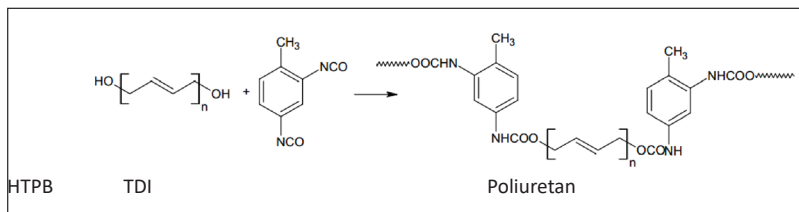
Salah satu keuntungan uji homogenitas dengan paten ini adalah tidak merusak sampel sehingga sampel masih bisa digunakan untuk uji lainnya, seperti uji static untuk mengetahui nilai impuls spesifik sebagai ukuran kinerja propelan. Ke depannya, metode ini bisa dikembangkan sebagai dasar pembuatan *software* dengan komputisasi untuk lisensi uji homogen. Untuk propelan ukuran besar, akan memerlukan banyak film sinar-x untuk mengambil data ke semua bagian propelan dan memerlukan biaya yang tidak sedikit.

Dari paten uji homogenitas baik secara merusak atau tidak merusak, bisa dilakukan pembakuan proses propelan agar hasil propelan yang diperoleh andal. Andal dalam arti propelan dibuat kapan pun akan memiliki kinerja yang sama selama komposisi dan kualitas bahan baku sama. Karena energi utama propelan berasal dari aluminium, maka akan ada hubungan yang pasti antara kandungan aluminium dengan kinerja propelan. Dengan kata lain, perubahan kandungan aluminium akan mencerminkan perubahan nilai kinerja propelan (Isp).

2. Pengembangan Proses Andal

Penulis dan tim telah berhasil memperoleh paten (IDS000002980, 2020) yang menyajikan pembuatan langkah kerja (urutan proses) yang andal (baku) dalam pembuatan propelan. Di antara bahan baku (komponen penyusun) propelan tersebut, semua akan bercampur secara fisik, kecuali HTPB dan TDI. Bahan HTPB dan TDI akan mengalami reaksi kimia polimerisasi. HTPB adalah propelimer (polimer rantai pendek) yang kedua ujung rantainya memiliki gugus kimia hidroksil (-OH), sedangkan TDI adalah senyawa kimia yang kedua ujungnya memiliki gugus kimia isocyanat (-NCO). Bila gugus -OH bertemu dengan -NCO, keduanya akan bereaksi secara polimerisasi dan

menghasilkan poliuretan (-NH-COO-). Poliuretan (polimer uretan) yang dihasilkan makin lama makin panjang rantainya, makin besar berat molekulnya, makin kental (naiknya viskositas) adonan. Reaksi polimerisasi berhenti sampai salah satu reaktannya habis. Dalam hal ini kandungan TDI jauh lebih sedikit daripada kandungan HTPB. Jika kandungan TDI banyak, dengan cepat terjadi pengerasan sehingga tidak ada kesempatan memasukkan komponen lainnya. Oleh sebab itu, sebelum proses pembuatan propelan, lebih dulu diadakan penelitian pendahuluan untuk mengetahui pada rasio berapa HTPB/TDI yang tepat sebagai *binder* (perekat) komponen propelan. Reaksi polimerisasi antara HTPB (gugus diol) dan TDI (gugus NCO) bisa dilihat pada Gambar 9.3.



Sumber: Mahanta et al. (2010)

Gambar 9.3 Reaksi antara HTPB (diol) dengan Diisosianat (TDI)

Pengadukan tiap-tiap penambahan bahan baku dilakukan dalam waktu yang besarnya ditentukan. Karena hanya HTPB dan TDI yang bereaksi secara kimia, maka TDI ditambahkan pada tahap akhir. Hal tersebut menyebabkan pada pembakuan proses pembuatan propelan, pencapaian homogenitas campuran dilakukan dengan variasi lamanya pengadukan (periode) sebelum penambahan TDI. Hal yang dilakukan adalah membuat variasi periode pengadukan terhadap tingkat homogenitas propelan. Dari variasi periode pengadukan 20 menit, 35 menit, 50 menit, 65 menit, ditemukan tingkat homogenitas paling tinggi pada periode 50 menit sebesar 83%.

Dengan menggunakan paten di atas, diaplikasikan untuk membuat tren kandungan Al dengan Isp, propelan yang dihasilkan sekali proses adalah tiga silinder dengan *grain* silinder. Hasil pengujian

Tabel 9.1 Impuls spesifik (Isp) Propelan dengan %Al

Kandungan Al	Isp, detik
8%	215–220
10%	217–224
12%	225–228

disajikan pada Tabel 9.1. Nilai Isp silinder propelan yang ketiga berada dalam rentang tersebut. Dari tabel di bawah tampak pada kandungan Al 10%, Isp memiliki rentang 7 detik. Rentang sebesar ini masih dianggap besar. Hasil yang diharapkan penyimpangan Isp sebesar maksimum 5 detik. Ketika hasil menunjukkan rentang Isp 7 detik, proses perlu diulangi pada komposisi tersebut. Hal lain yang bisa juga dilakukan adalah memperhalus variasi kandungan Al di sekitar periode pencampuran 50 detik, atau malah justru lebih lama daripada 50 detik. Dengan proses yang dibakukan dalam bentuk paten ini diharapkan di masa depan bisa diyakini hasil yang sesungguhnya dan bisa menjadi pijakan pengembangan berikutnya, baik pengembangan dalam kegiatan *in-house*, kerja sama dengan institusi luar, maupun untuk kepentingan riset pendidikan.

Dengan suksesnya pembakuan proses pembuatan propelan sesungguhnya sudah tercapai upaya mewujudkan propelan andal. Namun bagaimana pun kondisi homogenitas adonan yang bisa dicapai pada upaya ini tidaklah sempurna (100%). Oleh sebab itu, di masa depan perlu diupayakan penyempurnaan proses agar homogenitas bisa mencapai 100%. Namun, selain homogenitas, upaya lain yang perlu dilakukan untuk mendapatkan produk propelan yang utuh dan tidak cacat, terutama cacat fisik, yaitu paten pelapisan *mandrel* agar cacat permukaan dalam propelan menjadi minimal. Bagaimana pun hal ini penting dilakukan mengingat biaya untuk mendapatkan propelan utuh memang mahal. Hal lain lagi yang perlu diupayakan adalah mengantisipasi kegagalan nyala penyal awal (*igniter*) dengan penerapan filamen ganda pada isian penyalan awal. Kegagalan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

penyalaaan *igniter* membuat propelan tidak nyala dan cacat sehingga membuat seluruh proses pengembangan propelan menjadi gagal juga.

3. Pengembangan Penggunaan Pelumas dan Filamen

Pengembangan propelan terus dilakukan dengan menyajikan penggunaan pelumas dua jenis untuk melapisi mandrel dan cetakan. Langkah ini telah dipatenkan dalam paten IDP000075279 (2021). Cacat fisik pada propelan yang dihasilkan sangat dihindari agar tidak menimbulkan masalah pada pembakarannya saat uji *static*. Cacat fisik terutama retak biasanya terjadi akibat pencabutan dari cetakan atau saat pelepasan *mandrel*. Agar propelan bisa dilepas dengan mudah dari cetakan, pada tabung harus diberi lapisan berupa lembaran aluminium. Lalu lembaran aluminium ini disemprot dengan pelumas agar mudah dilepas dari propelan hasil. Pelepasan propelan dan aluminium dari cetakan dilakukan dengan cara didorong keluar dengan mudah. Pelepasan lembaran aluminium dari propelan dilakukan hati-hati agar permukaan propelan luar tidak cacat fisik. Hal yang paling sulit adalah pelepasan *mandrel* dari propelan. *Mandrel* pun sebelum ditusukkan ke dalam adonan, dilapisi pelumas dua jenis dengan cara disemprotkan. Penyemprotan tersebut dilakukan dua kali dengan cara dikeringkan dan diangin-anginkan di udara terbuka.

Pengembangan dan penelitian propelan ukuran kecil ini menggunakan *mandrel* bentuk silinder, sehingga tidak banyak meninggalkan cacat permukaan bagian dalam propelan dan mudah pelepasannya. Namun begitu, dengan menggunakan pelumas, proses pelepasan *mandrel* menjadi lebih mudah karena kesulitan pelepasan bukan hanya akibat kuatnya ikatan antara propelan dengan *mandrel*, tetapi juga karena tekanan propelan kepada *mandrel*. Penggunaan pelumas pada *mandrel* berbentuk bintang sangat penting karena permukaan dalam propelan yang berbentuk bintang mudah cacat fisik, bahkan patah.

Cacat permukaan fisik sebelah dalam sangat dihindari karena tidak mudah dilihat dengan mata telanjang. Munculnya cacat fisik permukaan dalam merupakan kegagalan proses yang tidak murah,

karena bahan baku dan biaya deteksi termasuk mahal, serta ada juga kerugian aspek lainnya. Selain itu, pemusnahan propelan yang gagal menimbulkan masalah tersendiri. Sebelum digunakannya pelumas untuk pelapisan *mandrel*, cara-cara lain sudah digunakan, seperti pelapisan *mandrel* dengan selotip dan bahan lain semacam minyak. Pada akhirnya pelumas jenis McLube 1725 dan McLube 1733 dipakai dan menjadi pelapis *mandrel* terbaik.

Selain penggunaan pelumas, pengembangan propelan andal juga dilakukan dengan penambahan filamen. Paten (IDP000080162, 2021) menyajikan pentingnya penambahan filamen dengan nilai tahanan (resistor) yang sama secara paralel pada *squib* untuk memperbesar kemungkinan menyala bagi *igniter* pembakaran motor roket. Tindakan ini didasari oleh gagasan bahwa persamaan matematis antara arus listrik dan voltase yang melibatkan resistor yaitu $V=IR$ dengan V adalah tegangan, I adalah arus listrik, dan R adalah resistor. Pada tegangan yang tidak berubah, dengan memperkecil nilai resistor, maka arus yang akan mengalir menjadi lebih besar. Ketika resistor disusun secara seri, maka resistor resultan (pengganti) akan menjadi lebih besar. Namun, ketika resistor disusun secara paralel, resistor resultan akan menjadi lebih kecil sehingga arus yang mengalir akan menjadi besar. Hal tersebut menyebabkan tingkat kegagalan pembakaran oleh *igniter* akan makin kecil.

Selama ini, resistor yang digunakan dalam *squib* adalah tunggal. Pernah ada berita bahwa uji *static* gagal nyala. Meski kegagalan nyala belum bisa dipastikan bersumber dari kegagalan nyala *squib*, tetapi penggunaan *squib* filamen paralel ini mengantisipasi kegagalan nyala karena *squib*. Kegagalan nyala bisa saja karena *squib* propelan tidak homogen. Propelan yang tidak homogen bisa saja karena Al banyak di dalam propelan atau Al banyak di permukaan dalam. Permukaan dalam propelan yang banyak mengandung Al akan lebih mudah terbakar daripada permukaan dalam propelan yang lebih sedikit mengandung Al. Pentingnya penggunaan propelan homogen adalah bisa mempermudah analisis jika terjadi kegagalan nyala. Bahkan,

penggunaan propelan homogen tersebut bisa menjadi bahan evaluasi kinerja alat penyalat awal pembakaran motor roket.

4. Evaluasi Kinerja

Setelah rangkaian pengembangan propelan berakhir pada uji *static*, perlun dilakukan perbandingan antara kurva-kurva yang diperoleh dari uji *static* untuk melihat ada-tidaknya perbedaan, meskipun hasil Isp yang diperoleh tidak berbeda secara signifikan. Hal ini penting dilakukan sebagai bahan evaluasi di masa depan. Paten IDS000004276 (2021) yang telah diperoleh menyajikan cara mengetahui perbandingan kinerja satu motor roket dengan kinerja motor roket yang lain pada komposisi propelan yang sama. Selain sudah ada pernyataan bahwa propelan yang digunakan andal pada komposisi yang sama, kinerja motor roket pun bisa dibandingkan melalui kurva uji *static* yang dihasilkan. Caranya, kedua kurva ditempatkan ke dalam koordinat X-Y. Kedua kurva dibagi menjadi segmen-segmen yang bisa dibandingkan. Kemudian, pada titik-titik sumbu X, dibaca nilai sumbu Y-nya. Kemudian tiap segmen dari dua kurva tersebut nilai rerata Y dibandingkan dengan menggunakan statistik uji beda. Dari hasil uji beda, bisa dilihat pada segmen mana terdapat perbedaan. Lebih lanjut, bisa dievaluasi faktor-faktor apa yang mengakibatkan perbedaan. Hasil evaluasi ini bisa menjadi bahan pertimbangan dalam pengembangan berikutnya.

Melalui inspirasi dari paten uji homogenitas dengan tidak merusak sampel, upaya mewujudkan propelan andal merambah ke propelan dengan ukuran besar. Hal ini mungkin dilakukan karena tersedianya film-film sinar-x hasil pemindaian propelan ukuran besar. Upaya mewujudkan propelan ukuran besar yang andal penting dilakukan karena panjang propelan yang diperlukan untuk motor roket tidak dipenuhi oleh panjang propelan hasil sekali cetak sehingga masih ada penambahan panjang.

Paten dengan nomor IDS000003686 (2021) ini sesungguhnya dibuat dengan berangkat dari fakta bahwa tidak ada jaminan propelan andal dan propelan yang tersedia tidak sepanjang yang dibutuhkan.

Propelan yang dibutuhkan adalah propelan dengan panjang 200 cm *grain* ganda (*hollow* dan bintang), sedangkan propelan yang tersedia sebagai hasil cetakan adalah propelan dengan panjang 120 cm *grain hollow* atau *grain* bintang. Dalam sekali cetak hanya satu bentuk *grain*. Jika memerlukan propelan dengan *grain* ganda, harus mencetak *grain hollow* dan *grain* bintang. Kemudian propelan *grain* ganda yang dibutuhkan disiapkan dengan penyambungan kedua *grain* tersebut.

Propelan dengan panjang 200 cm dengan *grain* ganda (*hollow* dan bintang) dipenuhi dengan penyambungan *grain hollow* dengan *grain* bintang. Sekali cetak, propelan sepanjang 120 cm. Agar bisa mendapatkan propelan andal, perlu mengatur bagian-bagian yang akan diambil (dipotong). Baik *grain* bintang maupun *grain hollow*, kita bagi menjadi tiga segmen, yaitu bagian atas, bagian tengah, dan bagian bawah, masing masing sepanjang 40 cm. Pembagian tersebut dilakukan agar lebih mudah mengaturnya dalam penyambungan. Karena selama proses *curing* propelan berdiri tegak dalam ruang pemanas, ada dugaan terjadi aliran komponen padat menurun sehingga densitas bagian bawah akan lebih besar daripada densitas bagian atas. Kehadiran paten ini akan mengantisipasi perbedaan densitas tersebut, sehingga propelan yang dihasilkan pascapenyambungan akan senantiasa tidak berbeda.

Proses penyambungan tersebut dilakukan dengan cara sebagai berikut. Propelan *grain hollow* dibagi menjadi tiga segmen masing-masing sepanjang 40 cm ; A (segmen atas), T (segmen tengah), B (segmen bawah). Sementara itu, propelan *grain* bintang dibagi juga tiga segmen masing masing sepanjang 40 cm ; a (segmen atas), t (segmen tengah), b (segmen bawah). Dengan berlakunya asumsi bahwa densitas segmen tengah sama dengan rerata dari densitas segmen atas dan densitas segmen bawah, maka dibuat kombinasi sebagaimana tersaji pada Tabel 9.2.

Tabel 9.2 Kombinasi Susun Segmen Propelan

ATBAb	ATBBa	ATBTt
-------	-------	-------

Dengan memperhatikan kombinasi di atas, maka perlu dicetak empat buah propelan *grain hollow* dan satu buah propelan *grain* bintang untuk tiga kali pemakaian dan propelan hasil perakitan bisa diharapkan senantiasa andal. Jika propelan yang dicetak dari adonan, ada jaminan homogen, maka aturan yang telah dijadikan invensi ini tidak berlaku karena di bagian mana pun tidak ada perbedaan densitas. Propelan yang homogen, tidak ada penurunan komponen padat selama proses *curing* dengan posisi berdiri dalam oven sehingga densitas segmen bawah sama dengan densitas segmen tengah sama dengan densitas segmen atas.

Bisa saja mendapatkan propelan andal sepanjang 200 cm tanpa memperhatikan homogen-tidak homogen, yaitu dengan cara sekali cetak 200 cm. Bisa juga dengan cara mencetak dengan panjang kelipatan, yaitu sepanjang 100 cm dengan dua kali cetak atau 50 cm dengan empat kali cetak, dan lain-lain.

Pemenuhan kebutuhan propelan sepanjang 200 cm, akan memerlukan perubahan banyak hal, yaitu

- a. Ruangan proses casting, proses coring, proses decorating perlu ditinggikan,
- b. Wadah cetakan, mandrel, stick mandrel perlu diperpanjang,
- c. Instalasi proses coring dan proses decorating perlu diperpanjang, dan
- d. Kebutuhan sarana lainnya seperti tangga untuk casting dan coring perlu disesuaikan

Uji homogenitas tanpa merusak sampel bisa diterapkan pada propelan ukuran besar. Namun penggunaan film sinar-x akan mempersulit proses dan mahal biayanya. Oleh karena itu, perlu diterapkan penggunaan data digital. Agar bisa diperoleh data digital, media film sinar-x harus diganti dengan media lainnya, seperti media DR (*direct radiography*) atau media CR (*computerized radiography*).

Paten S00201905226 (2019) ini menyajikan cara uji homogenitas propelan padat komposit dengan data digital hasil pemindaian pro-

pelan dengan sinar-x. Paten ini merupakan pengembangan dari uji tak merusak (*non-destructive test*). Kalau pada metode sebelumnya, pemindaian propelan dengan sinar-x menghasilkan film sinar-x. Dari film ini, data gelap-terang dibaca pada film sinar-x dengan menggunakan alat densitometer. Kemudian hasil pembacaan film berupa sekelompok data gelap-terang beberapa bagian dalam sampel propelan dibandingkan reratanya. Pembandingan rerata dengan menggunakan statistik uji beda atau anova satu jalur, untuk melihat ada tidaknya perbedaan. Dalam paten ini juga mirip cara pengujiannya. Bedanya dalam paten ini, data gelap-terang diperoleh secara digital.

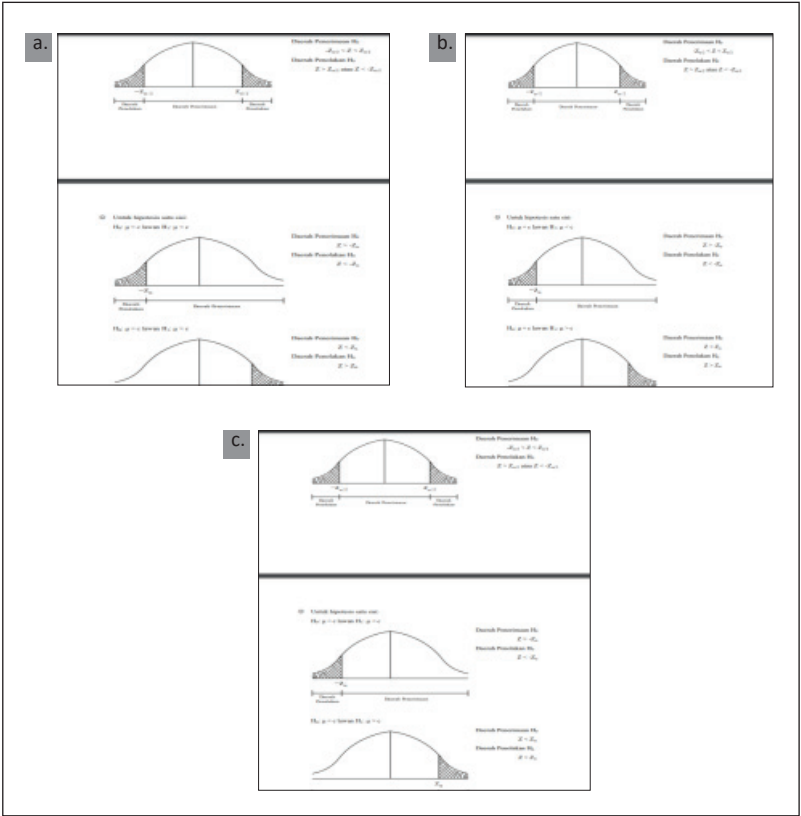
Dalam paten ini, hasil pemindaian propelan padat komposit tidak lagi menggunakan film sinar-x, tetapi berupa media *computed radiography* (CR) atau *directed radiography* (DR). Dari kedua media ini nilai gelap-terang berupa data digital. Data digital ini memiliki banyak digit di belakang koma, sehingga hasil kesimpulan homogenitas propelan bisa lebih halus. Keuntungan paten ini adalah sebagai berikut.

- a. Hasil kesimpulan uji homogenitas lebih halus
- b. Tidak lagi menggunakan film sinar-x yang mahal
- c. Pengerjaannya lebih mudah dan cepat
- d. Di masa depan bisa menjadi dasar pembuatan lisensi software uji homogenitas
- e. Tidak merusak sampel sehingga sampel bisa digunakan lagi untuk uji lainnya

D. Pengujian

Statistik uji beda digunakan di sini untuk menguji ada tidaknya perbedaan. Statistik uji beda ada dua macam yaitu uji beda satu sampel dan uji beda dua sampel. Uji beda (uji t) satu sampel adalah untuk melihat ada tidaknya perbedaan rerata kelompok data dengan suatu nilai tertentu. Sementara itu, uji beda dua sampel adalah untuk mengetahui ada tidaknya perbedaan antara kelompok pertama dengan kelompok kedua. Uji beda dua sampel terdiri dari 2 macam, yaitu uji

beda dua kelompok data yang bebas dan uji beda kelompok data yang tidak bebas. Kurva yang digunakan dalam statistik uji beda ini adalah kurva distribusi *student* (Gambar 9.4). Dalam proses pengujiannya, perlu mendapatkan nilai t-hitung (th) dari kelompok data tersebut. Kemudian nilai t-hitung dibandingkan dengan nilai t-tabel (tt) pada taraf signifikansi tertentu. Nilai t-tabel dilihat pada tabel nilai t.



Keterangan: a. Uji beda sisi kiri; b. Uji beda dua sisi; c. Uji beda sisi kanan

Gambar 9.4 Kurva *Statistic Student*

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Dalam uji beda, cara uji bisa dilakukan dengan 3 cara, yaitu uji dua pihak, uji pihak kiri, dan uji pihak kanan. Pada uji dua pihak, hipotesis nol H_0 : tidak terdapat perbedaan pada rerata X_1 dan rerata X_2 , dan hipotesis alternative H_a : terdapat perbedaan pada rerata X_1 dan rerata X_2 . Daerah penerimaan hipotesis H_0 berada di tengah kurva distribusi, sedangkan daerah penolakan hipotesis (H_a) berada pada daerah di ekor kanan dan ekor kiri. Nilai t-hitung untuk uji dua pihak adalah $-th$ dan $+th$, sedangkan nilai t-hitung uji satu pihak adalah $+th$. Kesimpulan ada tidaknya perbedaan terlihat pada posisi nilai t-hitung berada pada sebelah kanan (lebih besar) atau sebelah kiri (lebih kecil) nilai t-tabel.

Pada uji beda satu pihak, uji kanan dengan hipotesis nol H_0 : nilai rerata X_1 lebih kecil sama dengan rerata X_2 , hipotesis alternative H_a : rerata X_1 lebih besar daripada rerata X_2 . Daerah H_0 berada pada sebelah kiri, sedangkan daerah H_a berada di sebelah kanan. Pada uji kiri dengan hipotesis nol H_0 : rerata X_1 lebih besar sama dengan rerata X_2 , sedangkan hipotesis alternative H : rerata X_1 lebih kecil rerata X_2 . Daerah H_0 berada pada sebelah kanan, sedangkan daerah H_a berada di sebelah kiri pada kurva. Untuk lebih jelasnya, bisa dilihat pada kurva *statistic student* (Gambar 9.4).

Statistik uji beda untuk melihat ada tidaknya perbedaan di antara 2 kelompok data atau kelompok data lama dengan kelompok data baru (setelah mendapat perlakuan/*treatment*), biasanya digunakan penelitian pendidikan atau penelitian ilmu sosial. Dari teori-teori yang dibangun, diharapkan dugaan terhadap klas yang mendapat *treatment* akan memiliki rerata yang berbeda (naik) dibanding klas yang tidak mendapat *treatment*. Pada awalnya kedua klas tersebut tidak berbeda dalam reratanya sebelum ada *treatment* terhadap salah satu klas. Upaya *treatment* tersebut tidak lain adalah menaikkan nilai t-hitung agar nilai t-hitung klas yang mendapat *treatment* naik memasuki daerah penolakan hipotesis (daerah H_a). Jika upaya perlakuan bisa menghasilkan nilai t-hitung yang jatuh pada daerah H_a , penelitian bisa dianggap berhasil. Meski pada awalnya kedua klas tidak berbeda, setelah salah satu klas mendapat *treatment* maka kedua klas menjadi

berbeda, atau klas yang baru memiliki perbedaan dengan klas yang lama setelah klas lama diberi *treatment*.

Berbeda dengan suasana klas dalam penelitian ilmu sosial atau ilmu pendidikan di atas, upaya mewujudkan homogenitas campuran propelan ini adalah peristiwa sebaliknya. Dalam campuran yang belum diaduk, antarbagian memiliki komposisi yang berbeda. Namun setelah diaduk lama, kondisi homogen tercapai dan bagian-bagian tersebut memiliki komposisi yang sama. Kalau dalam contoh peristiwa klas di atas, *treatment* itu menaikkan nilai hitung sehingga nilainya menjadi lebih besar dari nilai *t*-tabel (masuk daerah H_a). Namun, dalam pengadukan campuran bahan baku propelan (proses homogenisasi), hal tersebut justru menurunkan nilai *t*-hitung menuju nilai yang lebih rendah daripada nilai *t*-tabel sehingga yang diinginkan diterimanya H_0 (tidak ada perbedaan).

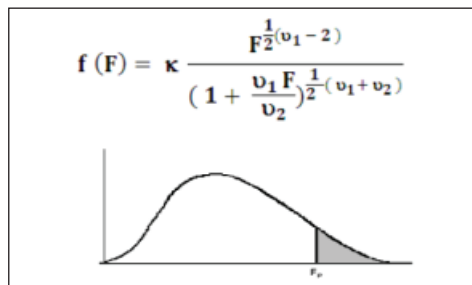
Di sini, uji homogenitas propelan menggunakan uji beda, untuk melihat terdapat perbedaan densitas atau tidak. Hasil yang homogen adalah tidak terdapat perbedaan densitas di bagian mana pun. Pada awalnya uji homogenitas dilakukan dengan uji yang namanya benar-benar “uji homogenitas”. Namun meskipun propelan dinyatakan homogen dari data propelan (berupa densitas), hasil uji *static* menunjukkan bahwa propelan memiliki nilai *Isp* yang jauh (selisihnya besar) padahal komposisinya sama. Bahkan pada komposisi yang berbeda memiliki *Isp* yang mirip (selisih kecil). Hal ini menjadi alasan untuk mengevaluasi cara uji homogenitas tersebut. Kemudian muncul gagasan untuk menggunakan cara statistik uji beda, dan berhasil. Di masa depan, metode uji beda ini menjadi dasar-dasar untuk menyusun paten-paten di propelan.

Ternyata pengertian uji homogenitas dalam statistik yang benar-benar dengan kata “uji homogen” adalah untuk prasyarat analisis digunakannya statistik parametris. Artinya agar metode uji beda bisa digunakan maka kelompok data harus homogen dan pengujiannya dilakukan dengan uji homogen. Selain uji homogen, prasyarat analisis lainnya adalah kelompok data harus berdistribusi normal (uji normalitas) dan pengambilan sampel harus acak.

Pengadukan campuran dalam upaya mencapai kondisi campuran homogen dilakukan dengan cara menurunkan nilai t-hitung. Dari besar menjadi kecil, dari daerah H_a (terdapat perbedaan) mengarah ke daerah H_o (tidak ada perbedaan). Dengan pemahaman ini maka dapat disimpulkan kondisi homogenitas tertinggi adalah jika nilai t-hitung mendekati nol.

Statistik analisis variansi satu jalur (Anova), merupakan perluasan dari uji beda. Uji beda hanya membandingkan rerata dari dua kelompok data, sedangkan anova satu jalur membandingkan rerata lebih dari dua kelompok data. Jika jumlah kelompok data masih sedikit, misalnya 2 hingga 4 kelompok, pelaksanaan uji beda tidak lebih lama dilakukan daripada pelaksanaan anova satu jalur, apalagi bisa dilakukan dengan komputer (terutama dengan program excel). Hal itu karena dengan menggunakan anova satu jalur, jika hasilnya menunjukkan perbedaan, perlu dilanjutkan menguji dengan uji Tuckey untuk melihat kelompok data mana yang menunjukkan perbedaan tersebut.

Untuk menguji ada tidaknya perbedaan dengan anova satu jalur, kurva yang digunakan tidak lagi kurva *statistic student*, tetapi kurva F (Gambar 9.5). Nilai F hitung (F_h) dihitung dari kelompok data yang digunakan, lalu nilai F_h dibandingkan dengan F-tabel (F_t) pada taraf signifikansi tertentu. Ketika F_h lebih kecil daripada F_t , maka disimpulkan tidak terdapat perbedaan (campuran homogen) di antara kelompok data yang diuji. Jika F_h lebih besar daripada F_t , berarti terdapat perbedaan, kemudian dilakukan uji Tuckey untuk menemukan kelompok data mana yang berbeda.



Gambar 9.5 Kurva F

Korelasi dan regresi linier statistik anova juga bisa digunakan untuk mengetahui homogenitas kelompok data, yaitu dengan cara membagi variansi terbesar dengan variansi terkecil di antara kelompok data tersebut. Hasil bagi ini disebut sebagai F-hitung (F_h) yang kemudian nilai F_h dibandingkan dengan F-tabel (F_t) pada taraf signifikansi tertentu (biasanya $\alpha=5\%$). Bila F_h lebih kecil dari F_t , bisa disimpulkan kelompok data adalah homogen. Agar kelompok data homogen dan normal, biasanya data yang digunakan untuk penelitian sebanyak minimal 30.

Selain uji beda dan anova satu jalur, ada bab statistik yang kadang digunakan dalam penelitian yaitu korelasi. Korelasi ini sudah umum dan banyak digunakan dalam penelitian pendidikan dan sosial. Biasanya korelasi berpasangan dengan regresi, terutama regresi linier. Korelasi bermakna “hubungan” yaitu hubungan antara sesuatu dengan sesuatu yang lain, hubungan antara variabel bebas dengan variabel terikat. Korelasi bisa digunakan untuk menghitung sejauh mana besarnya hubungan antara variabel bebas (X) dengan variabel terikat (Y). korelasi juga bisa digunakan untuk menghitung besarnya hubungan antara variabel ganda (X_1, X_2) dengan variabel terikat (Y), atau hubungan parsial antara X_1 dengan Y jika X_2 dijaga tetap. Nilai korelasi akan punya makna jika memang ada teori yang menghubungkan antara variabel bebas dengan variabel terikat. Tanpa adanya teori tersebut, korelasi tidak punya makna apapun meskipun nilainya besar, karena memang dua kelompok data pun bisa dibuat korelasi dan hasilnya bahkan sangat kuat.

Hubungan memiliki beberapa jenis, yaitu hubungan lurus (atau sejajar, linier, positif) dan hubungan terbalik (atau timbal balik, *reciprocal*, negatif). Hubungan lurus adalah suatu hubungan yang jika variabel bebas naik, variabel terikat juga naik. Hubungan terbalik adalah jika variabel bebas naik, variabel terikat justru menurun. Kekuatan hubungan bisa dilihat dari nilai korelasinya, sebagaimana tersedia dalam Tabel 9.3.

Regresi (linier) bisa dibuat jika jelas-jelas ada hubungan yang signifikan antara variabel bebas dengan variabel terikat. Makna signi-

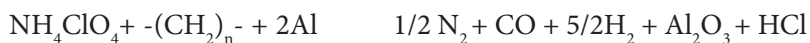
Tabel 9.3 Kekuatan Korelasi

Rentang Korelasi	Makna
Kurang dari 0,2	Sangat lemah
0,2 – 0,4	Lemah
0,4 – 0,6	Sedang
0,6 – 0,8	kuat
Lebih dari 0,8	Sangat kuat

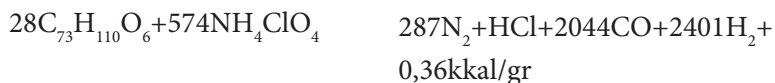
fikan adalah bahwa hubungan tersebut memang karena hasil penelitian (*treatment*) bukan karena kesalahan *sampling* atau kesalahan yang lain. Persamaan linier biasanya dinyatakan secara matematis dengan rumus $Y=aX+b$; a merupakan *slope* atau kemiringan garis (*gradient*) sedangkan b adalah nilai Y jika $a=0$, nilai dasar yang dimiliki, bukan akibat *treatment* (Sudjana, 1995).

Ketika tingkat homogenitas sudah bisa ditentukan, periode pengadukan komponen propelan sudah ada ketentuannya, serta proses yang baku sudah dihasilkan, maka tabulasi antara komposisi propelan dengan kinerjanya (impuls spesifik) bisa diwujudkan. Di antara komponen penyusun propelan yang terbakar, aluminium adalah komponen yang menghasilkan energi yang besar, sedangkan energi yang dihasilkan dari pembakaran komponen penyusun lainnya hanya sepertujuhnya. Hal ini bisa dilihat pada reaksi kimia di bawah ini,

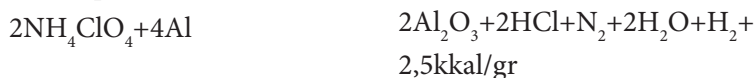
Reaksi pembakaran propelan [Muray, 2009]



Reaksi pembakaran binder [Martin et al, 2003]



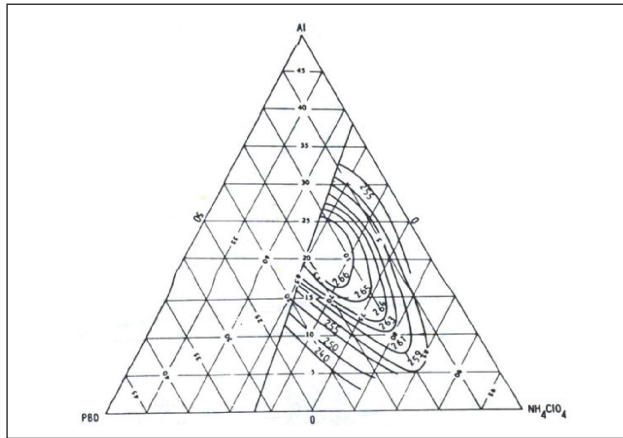
Reaksi pembakaran Al



Dari reaksi pembakaran Al Nampak bahwa energi yang dihasilkan relatif besar sekali, sehingga bisa dikatakan bahwa sumbangan energi terhadap kinerja propelan sangat tergantung pada kandungan Al. Variasi kandungan Al dalam propelan dengan kinerja propelan (Impuls spesifik) bisa ditabulasikan mulai dari kandungan Al yang kecil, misalnya 6%Al hingga 18%Al. Bahkan, lebih lanjut bisa ditabulasikan antara Isp propelan dengan jarak jangkauan tembak pada sudut tertentu, atau berbagai sudut, untuk roket militer. Pengembangan dan penelitian berikutnya setelah propelan andal terwujud bisa mengarah pada optimasi dalam bidang-bidang lainnya, seperti struktur atau propulsi.

Jika berhasil mentabulasikan variasi kandungan Al terhadap impuls spesifik, dengan regresi linier bisa membuat persamaan matematis $Y=aX+b$ antara kandungan Al (X) dengan impuls spesifik (Y), dengan spesifikasi komponen penyusun propelan yang diketahui. Dengan persamaan matematis variasi kandungan Al terhadap impuls spesifik, bisa diperkirakan nilai impuls spesifik. Nilai ini akan menjadi bahan untuk mengevaluasi hasil uji *static* motor roket. Jika perkiraan ini benar, bisa mengurangi biaya uji *static*. Sekiranya berhasil dibuat persamaan matematis ini, kita tidak tahu sejauh mana linieritas dari hubungan Isp sebagai fungsi kandungan Al tersebut. Karena memang ada diagram lain, yang berbentuk segitiga, yang menghubungkan antara kandungan Al terkait dengan kandungan AP, HTPB terhadap Isp, sebagaimana disajikan dalam Gambar 9.6.

Regresi untuk membuat persamaan linier matematis perlu dicoba untuk hubungan antara gelap-terang dengan Isp propelan. Nilai gelap-terang memiliki hubungan negatif dengan Isp. Makin tinggi nilai gelap-terang, makin rendah nilai Isp. Propelan dengan kandungan padatan (Al, AP) tinggi memiliki nilai gelap-terang rendah. Jika persamaan matematis gelap-terang bisa diwujudkan, prediksi Isp melalui nilai gelap-terang propelan bisa dilakukan. Lebih lanjut, persamaan ini bisa digunakan untuk memperkirakan Isp propelan dari roket yang diluncurkan. Selama ini nilai impuls spesifik propelan yang digunakan dalam roket diasumsikan sama dengan nilai impuls spesifik saat uji statik.



Sumber: Timnat (1987) & William (1989)

Gambar 9.6 Impuls spesifik (Isp) sebagai fungsi %AP, %PB, %Al

E. Penutup

Roket adalah kendaraan antariksa yang bisa digunakan untuk keperluan penelitian atau untuk keperluan militer. Roket padat adalah roket berbahan bakar padat dan roket ini banyak dikembangkan di Indonesia melalui beberapa lembaga pemerintah atau perguruan tinggi. Bahan bakar roket disebut propelan yang tersusun atas komponen pokok HTPB, TDI, Aluminium, dan Amonium Perklorat. Propelan dibuat dengan mencampur (proses *mixing*) komponen penyusun, mencetak adonan yang berbentuk bubuk / *slurry* (proses *casting*) ke dalam cetakan berbentuk silinder, kemudian menusukkan mandrel untuk membuat bentuk permukaan dalam propelan (proses *coring*), pematangan dalam oven agar padat pada suhu dan periode tertentu (proses *curing*), dan diakhiri dengan pelepasan produk propelan dari cetakan dan *mandrel* (proses *decoring*). Setelah propelan padat dilepas dari cetakan, bisa dilanjutkan untuk pengujian-pengujian, misalnya uji kekerasan, uji densitas, uji homogenitas, uji kekeroposan, uji kekuatan (kuat tarik), serta uji kinerja. Untuk uji kinerja, propelan dimasukkan ke dalam tabung motor roket yang dilengkapi alat pengukur parameter saat pembakaran berlangsung dan lalu dibakar. Hasil

pembakaran motor roket berupa grafik lawan waktu pembakaran yang memperlihatkan tekanan ruang bakar, gaya dorong, impuls spesifik (Isp), dan periode bakar. Impuls spesifik (Isp) merupakan ukuran kinerja yang diutamakan. Impuls spesifik berbeda-beda sesuai banyaknya kandungan aluminium dalam propelan. Aluminium adalah sumber utama energi roket padat. Makin banyak kandungan aluminium, makin tinggi Isp; makin rendah aluminium, makin rendah Isp. Persoalan yang muncul terkadang pada komposisi Al yang sama tetapi memperlihatkan hasil Isp yang berbeda, atau pada kandungan Al yang berbeda menghasilkan Isp yang sama. Dengan kata lain tren Isp tidak mengikuti *tren* kandungan aluminium. Dari persoalan ini perlu diketahui homogenitas (sebaran merata komponen penyusun) adonan melalui produk propelan tercetak.

Uji homogenitas dilakukan dengan statistik uji beda atau analisis variansi satu jalur. Uji ini bisa dilakukan dengan data densitas (uji merusak sampel) atau melalui film sinar-x (uji tidak merusak sampel). Propelan dibagi menjadi beberapa bagian, tiap bagian diambil beberapa data densitas. Rata-rata nilai densitas suatu bagian dibandingkan dengan rata-rata bagian lainnya. Pembandingan ini dilakukan dengan statistik uji beda atau statistik anova satu jalur. Jika hanya ada dua bagian, dilakukan dengan uji beda, tetapi jika lebih dari 3 bagian, dilakukan dengan anova satu jalur dilanjutkan dengan *statistic* uji *tuckey* untuk mengetahui letak perbedaan di antara bagian-bagian yang berbeda. Jika perlu mengetahui *tren* kinerja propelan (Isp) dengan kandungan Al, bisa dilakukan dengan korelasi asalkan *tren* tersebut linier. Korelasi bisa digunakan untuk bahan evaluasi pengembangan berikutnya. Bahkan korelasi penting dalam mentabulasikan tabel tembak untuk roket militer untuk berbagai sudut tembak.

Daftar pustaka

- Martin, et al. (2003). *Variable burn rate propellant*. US paten No.6, 503, 350 B2.
- Muray S., Cohen. (2009). *Advanced Binders for Solid Propellant-Review*
- Hunley J. D. History of Solid Propellant Rocketry.

- Sudjana. (1995). *Statistik Pendidikan*.
- Timnat, Y. M. (1987). *Advanced Chemical Rocket Propulsion*. Academic press Ltd, London.
- Paten 1. (IDP000064239,2019). *Metode uji homogenitas adonan propelan berdasar kesamaan secara simultan dari dua sifat beberapa propelan padat hasil*.
- Paten 2. (IDS000002503,2019). *Metode pengujian homogenitas tak-merusak untuk produk propelan komposit*
- Paten 3. (IDS000002980,2020). *Metode pembuatan propelan padat komposit dengan mixer balde horisontal RPM 60*.
- Paten 4. (IDP000075279,2021). *Metode pelapisan mandrel menggunakan pelumas dua jenis*.
- Paten 5. (IDP000080162,2021). *Penerapan filamen paralel pada squib untuk memperbesar probabilitas keberhasilan penyalaan igniter*.
- Paten 6. (IDS000004276,2021). *Metode uji kesamaan gaya dorong motor roket padat komposit untuk diaplikasikan pada motor roket keron, motor roket 100, motor roket 1220, motor roket 320, motor roket 450, motor roket 550*.
- Paten 7. (IDS000003686,2021). *Metode penyiapan propelan padat komposit 1220 dari propelan hasil cetakan berdasar data gelap terang film x-ray*.
- Paten 8. (S00201905226,2019). *Metode uji homogenitas propelan padat komposit menggunakan data digital hasil pemindaian sinar-x dengan media Direct Radiography (DR) atau Computed Radiography (CR). Metode ini diaplikasikan pada propelan dengan ukuran Keron, propelan ukuran 100, propelan ukuran 1220, propelan ukuran 320, propelan ukuran 550*.

Bab X

Batas Jendela Pengamatan Hilal pada Bulan Sabit

Zaid Nasrullah

A. Sistem Perhitungan Waktu dalam Peradaban

Peradaban manusia dimulai seiring berjalannya waktu. Sistem perhitungan waktu memberi informasi *setting* terjadinya peristiwa sejarah. Dimulai dari kalender tertua, Kalender Yahudi, yang dikenal dengan tahun Ibrani bertepatan dengan 5784 tahun silam berdasarkan kalender lunisolarnya (berbasis bulan-matahari). Kalender China dengan perayaan Imleknya sudah melewati tahun ke-2574. Kalender Julian dimulai sejak 1 Januari 45 Sebelum Masehi (SM) diperkenalkan oleh Julius Caesar berdasarkan nasihat seorang astronom Sosigenes menetapkan satu tahun 365,25 hari. Kalender Hindu dengan tahun Saka saat ini berumur 1944. Kalender Persia dimulai 622 M dikenal solar hijriah yang berusia 1401 tahun. Kalender Islam dimulai pada tahun 1445 silam. Terakhir, pada tahun 1582 bertepatan dengan hari

Z. Nasrullah

Pesantren Persatuan Islam 1 Bandung/BHRD Kota Cimahi,
e-mail: zaidnasrullah5@gmail.com

© 2025 Editor & Penulis

Nasrullah, Z. Batas Jendela Pengamatan Hilal pada Bulan Sabit. Dalam T. Djameluddin & F. Nuraeni (Ed.), *Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi* (313–341). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1425.c1493 E-ISBN: 978-602-6303-86-8

Kamis, 4 Oktober 1582 M atas kekeliruan Kalender Julian, akhirnya direvisi oleh Paus Gregorius XIII, besoknya diputuskan hari Jum'at, 15 Oktober 1582 M sekaligus menggantinya berdasarkan Kalender Gregorian memperbaiki ketidakakuratan dengan menghapus tiga hari dalam 400 tahun. Artinya tidak ada tanggal 5–14 Oktober. Sampai saat ini di seluruh dunia menggunakan sistem Kalender Gregorian.

Kemudian, terakhir sistem penanggalan yang digunakan dalam astronomi untuk menyusun dan mencatat tanggal dengan cara yang lebih tepat dan universal menggunakan *Julian Day* (JD). JD diperkenalkan oleh seorang matematikawan sekaligus astronom Prancis, Joseph Justus Scaliger, sebagai penghargaan kepada ayahnya bernama Julius Caesar Scaliger, pada tahun 1583 M. JD digunakan sebagai alat bantu dalam penanggalan astronomi. Berbagai sistem penanggalan di dunia ini tidak lepas dari ritual keagamaan, termasuk Islam, yang menjadi dasar dan patokan dalam melaksanakan ibadah puasa, baik sunnah maupun wajib, dua hari raya dengan puncak ibadah haji, hari raya Jum'at, dan pendistribusian zakat fitrah.

Polemik seputar perbedaan pelaksanaan waktu ibadah puasa dan lebaran kerap terjadi secara berulang setiap tahunnya antara organisasi masyarakat (ormas) dan pemerintah di Indonesia. Hal ini disebabkan karena miskonsepsi pemaknaan *hilal* itu sendiri, baik secara bahasa maupun istilah, serta perbedaan metode dalam penentuan awal bulan Kamariah. Dalam bab ini akan dipaparkan mengenai batasan jendela pengamatan hilal, dalam konteks keperluan umat Islam dalam upaya mengurai miskonsepsi tersebut.

Dengan melihat pola dasar gerak Matahari yang terbit dan terbenam cenderung teratur, pada akhirnya membagi ke dalam 12 jam siang dan 12 jam malam. Matahari senantiasa bergeser terhadap timur yang dimulai pada pertengahan akhir bulan Maret ke arah utara kemudian berbalik ke arah selatan pada pertengahan akhir bulan Juni hingga pertengahan akhir Desember – kembali ke arah utara menuju titik awal timur pada pertengahan akhir Maret, yang menjadi patokan bilangan dalam satu tahun tropis rata-rata 365,2422 hari atau setara dengan 365 hari 5 jam 48 menit 45,25 detik yang mengindikasikan

Bumi mengelilingi Matahari mengakibatkan pergantian musim di berbagai belahan dunia baik utara maupun selatan khatulistiwa.

Bulan merupakan benda langit yang berevolusi mengelilingi Bumi mengakibatkan adanya perubahan paras Bulan, diikuti keterlambatan terbit atau terbenam setiap hari sebesar $12^{\circ} 11' 26,70''$ atau sekitar 49 menit, mengindikasikan Bulan mengelilingi Bumi dalam waktu satu tahun terdiri dari 12 bulan. Kedua benda langit ini melahirkan sistem kalender Matahari dan sistem kalender Bulan. Titik acuan pada kalender Bulan didasarkan pada penampakan sabit bulan pertama yang bisa diamati, sebagaimana diriwayatkan oleh Imam Bukhari di dalam kitabnya menerangkan sebab memulai pelaksanaan ibadah puasa dan berbuka (lebaran) adalah hilal (bulan sabit pertama) yang bisa diamati (Al-Bukhari, 2001). Berdasarkan keterangan yang disampaikan tersebut, nyatalah bahwa batasan hilal itu bisa diamati, dan praktiknya dengan cara *ru'yat* (pengamatan langsung) dengan kasat mata. Hal ini dikarenakan keterbatasan pada masa itu dalam menghitung secara rumit, sehingga berlaku ketentuan kaidah, '*baik ada atau tidak, hukum berjalan bersama dengan 'illat (alasan nya).*' (Al-Bassäm, 1992). Secara umum, memang masyarakat Arab saat itu hanya bisa menghitung secara sederhana, sebagaimana bentuk pengaplikasian matematika dalam perniagaan seperti penjumlahan dan selisih. Hanya segelintir orang yang mampu menghitung secara rumit seperti halnya orang Yahudi.

Jika menilik dari sisi kebahasaan, antara bahasa Indonesia (bulan sabit), Inggris (Crescent), dan Arab (Hilal) memiliki arti dan pengertian yang berbeda dalam memaknai batasan fase bulan terutama bulan sabit. Secara bahasa, fase bulan sabit dalam bahasa Arab ada tiga term yang digunakan dalam satu lunasi: sebelum, ketika, dan setelah *konjungsi*. *Prakonjungsi* dikenal dengan kata atau kalimat *Da-da* (دَا دَا); Ketika *konjungsi*, disebut *alMuhäq* (المحاق); dan terakhir, *pascakonjungsi* dikenal dengan *Hilal* (الهلال). *Da-da* dimulai saat fase bulan sabit mengecil saat malam 28 hingga masuk fase *alMuhäq*. Ketika *ijtima'* atau *konjungsi* terjadi, bulan masuk fase *alMuhäq* dalam bahasa Inggris disebut *New Moon* atau *Dark Moon* karena pada fase

ini bulan sabit tidak bisa diamati karena terlalu tipis dan dekat dengan Matahari. Terakhir, istilah *Hilal* digunakan saat bulan sabit pertama kali bisa diamati. Hanya ada satu fase saat bulan sabit tidak bisa diamati, yaitu pada fase *alMuhäq*.

Dari sisi metodologi, ada tiga istilah yang digunakan, yaitu rukyat (observasi), hisab (perhitungan), dan imkan rukyat (menggabungkan kedua metode). Tidak bisa dipungkiri bahwa pelaksanaan rukyat memiliki kedudukan lebih kuat dibandingkan dengan perhitungan mengingat praktik pada masa-masa awal syariat diturunkan, yaitu dengan cara melihat langsung. Meskipun demikian, perhitungan pun memiliki sumber dari *nash* (sumber hukum) yang ada dalam al-Qur'an. Berdasarkan kaidah dalam hukum Islam bahwa, '*Tidak ada ruang untuk ijtihad jika ada sumber nash* (teks hukum yang tegas dan jelas secara tersurat)' (Al-Bassäm, 1992). Hal ini menjelaskan konteks hukum Islam yang merujuk pada situasi ijtihad tidak diperbolehkan karena tersurat dalam al-Qur'an maupun as-Sunnah. Selain itu terdapat juga kaidah bahwa '*Mengamalkan dua dalil sekaligus lebih utama daripada meninggalkan salah satunya selama masih memungkinkan*'. Kaidah ini menitikberatkan pentingnya mempertimbangkan dan menggabungkan semua dalil yang ada untuk diamalkan selama memungkinkan ketika membuat atau menentukan suatu keputusan hukum sehingga hukum asalnya tetap mengamalkan dalil tersebut sesuai dengan al-Qur'an dan as-Sunnah. Berdasarkan hal tersebut dapat digabungkan beberapa prosedur atau metode maupun data ke dalam satu kesatuan yang lebih besar atau lebih komprehensif. Melalui beberapa kaidah yang digunakan, maka berlaku kaidah '*Apa yang ditetapkan atas dasar syari'at lebih didahulukan daripada yang ditetapkan atas dasar kesepakatan*.' (Al-Bassäm, 1992)

Hal ini sejalan dengan sudut pandang astronomis yang memandang rukyat dan hisab adalah bagian dari perkembangan pemahaman sains kaum muslimin secara terintegrasi mengingat banyak bukti yang ditulis oleh para ulama yang saintis membangun batasan sabit bulan pertama yang bisa diamati sesuai perkembangan zaman era keemasan Islam masing-masing melalui tulisan tinta emasnya. Hal itu

dimulai oleh alKhawārizmī, diikuti Ibnu Maymūn dan Ibnu Qurra, dilanjutkan oleh alBattānī, ashShūfī, alBirūnī, dan lainnya. Semua kajian itu akhirnya bermuara dengan menggabungkan dua dalil yang melahirkan metode *imkānūr rukyat* (kemungkinan rukyat) yang berarti kemampuan atau kesanggupan melihat sabit bulan pertama atau disebut juga visibilitas hilal (ketampakan hilal) mengingat perkembangan astronomi menunjukkan bahwa hisab dan rukyat selalu beriringan dan secara bersama saling memacu kemajuan.

Pada masa keemasan peradaban dan ilmu pengetahuan di Bagdad sampai akhir abad ke-15, umat Islam mampu memprediksi dan mensimulasikan gerak benda langit melalui astrolab. Dari hasil pengamatan gerak Matahari dan Bulan selama bertahun-tahun bahkan hingga ratusan tahun ini, didapatkanlah suatu pola, kemudian para cendekiawan membuat model matematika untuk memprediksi gerak benda langit sehingga muncul perhitungan atau disebut juga sebagai hisab. Hasil perhitungan ini terus diuji validitasnya, tatkala hasilnya tidak sesuai dengan hukum-hukum di alam, rumusnya dimodifikasi secara terus-menerus mengalami *trial-error* hingga mendekati hasil observasi. Jadi, hal yang wajar hasil hitungan ini divalidasi secara terus-menerus berdasarkan bukti empiris di lapangan. Sejatinya, hisab dan/atau *rukyat* merupakan suatu alat untuk mengetahui hilal bisa diamati atau belum.

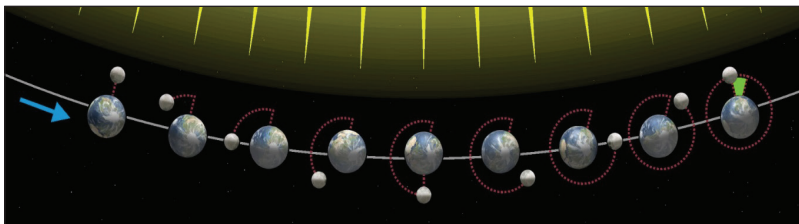
Selain itu, teknologi pun berevolusi dan terus berkembang, termasuk bidang keantariksaan yang telah memainkan peranan penting di semua lini kehidupan. Kemajuan peradaban manusia dipengaruhi oleh kemampuan untuk mengumpulkan data dari bintang dan planet, mengirim satelit ke antariksa, dan memantau hukum alam di antariksa untuk mempelajari cuaca, memantau Bumi, navigasi, dan telekomunikasi. Sistem perhitungan dan pengamatan menggunakan instrumen keantariksaan seperti teleskop, kamera, dan perangkat lunak analisis citra telah membantu umat Islam menemukan hilal dengan lebih akurat dan objektif. Ini pun termasuk dalam bidang perhitungan dan pengamatan antariksa telah meningkatkan akurasi dan efisiensi dalam menjaga waktu. Sekarang, didukung dengan kemajuan

teknologi dengan adanya pengolahan citra bahkan bisa dimaksimalkan secara otomatis dengan bantuan AI (kecerdasan artifisial) sehingga memiliki kemampuan setara dengan cara kerja mata.

B. Fase-Fase Bulan

Perubahan paras pada Bulan, terjadi karena Bulan berevolusi terhadap Bumi. Periode Bulan menyelesaikan satu putaran (putaran 360 derajat membutuhkan waktu selama 27,3217 hari atau sepadan dengan $27^{\text{hari}} 7^{\text{jam}} 43^{\text{menit}} 11,51^{\text{detik}}$) dikenal dengan periode *sideris*. Berdasarkan simulasi posisi Bulan terhadap Bumi sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 10.1. berada di sisi paling kiri gambar (tanda panah warna biru) sebagai permulaan sampai ilustrasi posisi Bulan–Bumi kedua dari paling kanan (posisi Bulan seperti perjalanan pertama di sisi kiri), dimulai dari satu titik hingga kembali ke tempat yang sama di antara Matahari dan Bumi dalam melakukan perjalanan satu putaran penuh.

Di sisi lain, Bumi pun berevolusi terhadap Matahari, sekaligus memboyong Bulan. Hal ini menjadikan titik acuan menjadi berbeda, yaitu ditandai dari satu fase ke fase yang sama (dari fase hilal ke hilal berikutnya atau dari purnama ke purnama berikutnya) memerlukan waktu lebih lama, selama 29,5306 hari atau sebanding dengan 29 hari 12 jam 44 menit 2,89 detik. Periode tersebut dikenal periode *sinodis*. Sama halnya simulasi pada periode *sideris*, definisi satu putaran penuh Bulan tidak lagi di tempat yang sama tetapi bergeser pada posisi paling

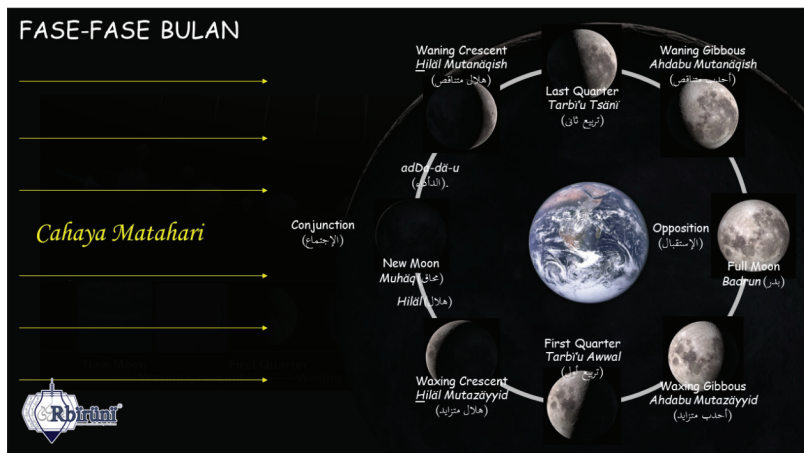


Sumber: diadaptasi dari Tttrung (2020)

Gambar 10.1 Gerak revolusi Bumi mengitari Matahari dan bulan mengitari bumi menyebabkan terjadinya fase-fase Bulan.

kanan ditandai dengan adanya sapuan luasan arsiran berwarna hijau, supaya kembali mengarah ke Matahari maka memerlukan waktu lebih, selama 2 hari 5 jam 0 menit 51,38 detik. Akibatnya, Bulan selalu terbit terlambat 48 menit 45,78 detik dengan perbedaan $12^{\circ}11'26,70''$ setiap harinya. Uniknya, Bulan mengorbit Bumi membentuk sudut $5^{\circ}09'$ (bervariasi dari $4^{\circ}58'$ sampai $5^{\circ}19'$) terhadap bidang orbit Bumi mengelilingi Matahari yang disebut ekliptika. Jarak rata-rata Bumi-Bulan 384.400 km. Hal ini menyebabkan gerhana tidak selalu terjadi pada setiap bulan.

Perbedaan paras Bulan terlihat mencolok setiap harinya. Fase-fase Bulan digolongkan ke dalam delapan fase besar, yaitu : 1. Bulan Mati/ Baru (*Dark Moon/New Moon*); 2. Bulan Sabit Membesar; 3. Kuartier Pertama; 4. Cembung Membesar; 5. Purnama; 6. Cembung Mengecil; 7. Kuartier Kedua; 8. Bulan Sabit Mengecil; kemudian kembali lagi ke awal sebagaimana pada Gambar 10.2. Pada fase pertama saat *konjungsi* atau *ijtimak* dengan sebutan fase *New Moon* yang diartikan ke dalam Bahasa Indonesia menjadi bulan baru, posisi Bumi – Bulan – Matahari dalam keadaan segaris. Berhubung orbit bulan melintas bidang edar



Gambar 10.2 Beragam fase-fase bulan berdasarkan gerak revolusinya mengelilingi Bumi.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Bumi sebesar $5^{\circ}09'$, menyisakan atau meloloskan cahaya Matahari kemudian dipantulkan ke Bumi sehingga membentuk sabit yang sangat tipis sekali, sampai tidak bisa diamati, hanya bisa dideteksi. Kedelapan fase ini pun sesuai dengan yang diilustrasikan oleh Quthbu adDīn asySyīrāzī dalam manuskrip berjudul *Nihāyatul Idrāki fi Dirāyatil Aflāk*.

C. Hilal: Bulan Sabit Pertama

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa paras Bulan dalam fase sabit terjadi paling tidak tiga kali kesempatan dalam satu lunasi; sebelum, ketika, dan setelah *konjungsi*. Fase pertama adalah *prakonjungsi* dikenal dengan sebutan *Da-da-un* sebagaimana dalam kitab *Lisānul 'Arab*, Ibnu Mandlūr menyampaikan, “Seiring berjalannya waktu pada bulan sabit mengecil, Da-da mulai memudar. Ini terjadi ketika bulan berada di ujung fase bulan yang berada pada posisi menurun (mendekati Matahari) dan semakin memudar.” Pada kitab yang sama, Azharī mengatakan bahwa, “Bulan mulai memudar pada malam terakhir dari malam-malam bulan Rajab, dan disebut juga sebagai adDa-dā-u atau adDi-dā-u pada malam ke-25, 26, dan 27.” Tsa'lab menambahkan, “Orang-orang Arab menyebut malam tanggal 28 dan 29 dengan sebutan adDādi-u, dan satu malam disebut Dādā-atun”. Sedangkan dalam ashShihāh menuturkan di dalam kitab yang sama, “adDādi-u adalah tiga malam terakhir sebelum malam alMuhāq, alMuhāq itu merupakan akhirnya.” (Ibnu Mandlūr, 1993).

Kemudian fase kedua adalah fase *alMuhāq* yaitu tepat ketika *konjungsi* atau *ijtimak*, Bulan memiliki sabit yang paling tipis apalagi jika terjadi gerhana Matahari saat Maghrib, ia cenderung tidak bisa dilihat atau dideteksi sekalipun. Lalu fase terakhir adalah hilal, yaitu Sabit Bulan yang bisa diamati. Ada yang berpendapat bahwa ini terjadi hingga malam kedua atau ketiga. Hal ini tertuang di dalam manuskrip berjudul *Nihāyatul Idrāki fi Dirāyatil Aflāk* karangan Quthbu adDīn asySyīrāzī, “ketika *ijtimā* terjadi, bagian wajah bulan ... dan bagian yang terlihat adalah sisi gelapnya, oleh karena itu tidak dapat dilihat dan disebut alMuhāq” (asySyīrāzī, t.t.).

Secara bahasa, kata hilal memiliki asal-usul kata sebagaimana dalam Kamus Al-Munawwir pada halaman 1514 menerangkan “*Halla wa Ahalla alHilalu*” yang berarti tampak atau terlihat (Munawwir, 1997). AzZamakhshari pun menjelaskan dalam kitab *alFä-iq*-nya halaman 111, “Hilal itu makna asalnya adalah putih.” (azZamakhshari, t.t.). Seorang filolog, azZabidi menuturkan dalam kitab *Täjul ‘Arüs* pada halaman 146 mendefinisikan, “Hilal adalah warna putih yang tampak pada pangkal kuku.” (azZabidi, t.t.). Lebih lanjut, Ibnu Mandlür memberikan definisi, “*Hilal adalah cahaya bulan ketika orang-orang meneriakinya pada waktu awal bulan.*” pada Juz 11 halaman 702 dalam Kitabnya (Ibnu Mandlür, 1993).

Selain ditinjau dari tinjauan etimologinya, jika menilik pola kalimat yang berkaitan dengan pasangan kata *ra-a* dan *Hilal* hanya terdiri dari satu *maf’ül* seperti pada hadits pertama sebagai kata ganti ‘nya’ merujuk kepada kata sebelumnya, yaitu *Hilal* dalam kalimat *shümü lirukyatihi*. Ibnu Mandlür dalam *Lisänu’l ‘Arab* memberikan pedoman pada Juz 14 halaman 291 dengan ungkapan, “Kata *ra-a* artinya melihat dengan mata apabila muta’addi kepada satu *maf’ul*, sedangkan arti mengetahui apabila muta’addi kepada dua *maf’ul*.” (Ibnu Mandlür, 1993).

Ketika terjadi perbedaan pendapat tentang malam pertama hilal dimulai, diambil keputusan berdasarkan hadis yang menyatakan bahwa jika hilal terlihat, dimulailah bulan baru pada malam itu juga, melalui jalur Muslim (anNaysäbüri, t.t.). Pada kitab dan jalur yang sama di halaman 766 dapat dinyatakan bahwa jika Bulan itu tertutup dari pandangan dalam artian tidak terlihat, bilangannya disempurnakan menjadi tiga puluh hari (anNaysäbüri, t.t.).

Kesimpulannya, pada dasarnya, satu bulan itu 29 hari. Jika tidak bisa diamati, dikenakan menjadi 30 hari. Tidak bisa diamati ini bukan hanya diartikan sebagai mendung belaka sebagaimana Gambar 10.3, akan tetapi cahaya senja berwarna merah sebagai latar depan jauh lebih terang daripada bulan sabit itu sendiri sehingga tidak bisa dilihat. Dalam hal seperti itu maka bulan berjalan harus dikenakan menjadi 30 hari.

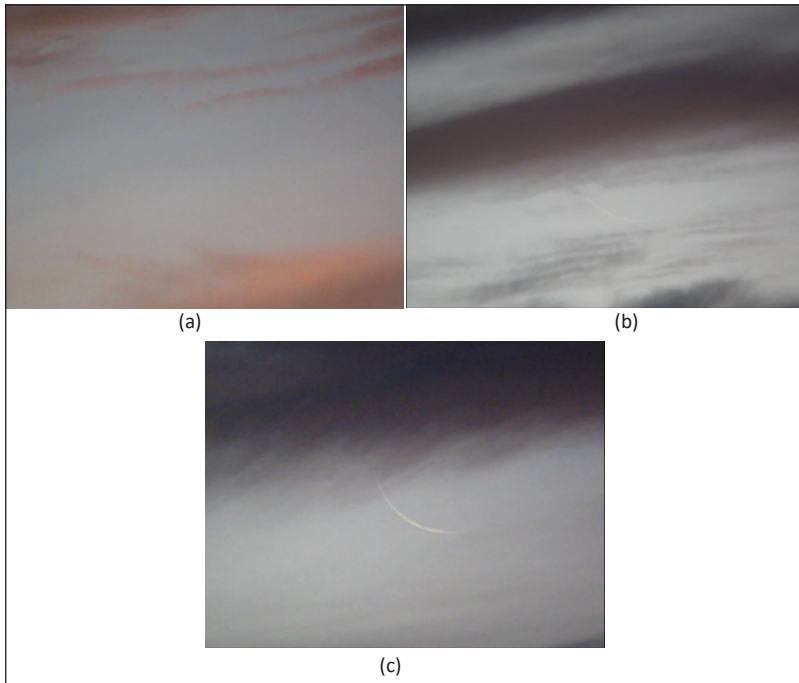


Foto: Hendro Setyanto

Keterangan: (a) Atmosfer lebih terang ketika Maghrib; (b) Seiring berjalannya waktu, posisi Matahari semakin rendah sehingga hamburan cahaya atmosfer semakin redup dan Hilal dapat diamati (kasat teleskop); (c) cahaya atmosfer jauh lebih redup hingga akhirnya Hilal dapat dikesani dengan mudah (kasatmata).

Gambar 10.3 Urutan ketampakan Hilal dengan kondisi

Terdapat empat peristiwa yang pernah terjadi di masa lalu terkait penentuan hilal dan jumlah hari dalam suatu bulan. Peristiwa pertama adalah berdasarkan wahyu, hal ini sebagaimana diriwayatkan oleh Imam alBukhārī dari Anas bin Mālik r.a. dalam Bab Shalāt di Atas Atap, Mimbar, dan Kayu pada *Juz* 1 halaman 85, dan pada riwayat yang sama melalui jalur Ibnu Abbās r.a. di dalam Kitab Perbuatan-Perbuatan Zalim dan Merampok pada hadis ke-2468, Rasulullah SAW menjawab, “*Bulan itu berjumlah dua puluh sembilan hari.*” Pada bulan itu memang berjumlah 29 hari (Al-Bukhārī, 2001). Dari hadis ini

jelas, secara umum (kebiasaan), pada bulan itu berumur 30 hari tetapi karena wahyu yang turun, maka bulan itu berumur 29 hari. Peristiwa kedua adalah berdasarkan laporan para sahabat ketika masyarakat berusaha mengamati hilal. Ibnu 'Umar r.a., salah seorang di antara kerumunan berhasil melihatnya kemudian mengabarkan kepada Rasulullah SAW yang kemudian memerintahkan untuk berpuasa sebagaimana diabadikan dalam Kitab Puasa Bab Kesaksian Seorang Laki-Laki atas Pengamatan Hilal Ramadhän yang diriwayatkan oleh Abü Däwud melalui Ibnu 'Umar pada *Juz 2* halaman 302. (asSijistäni, t.t.). Kemudian peristiwa ketiga terjadi berdasarkan kesaksian Arab Badwi, seperti diriwayatkan dalam hadis riwayat Ahmad dan hadis riwayat Abu Dawud. Peristiwa terakhir yaitu kesaksian para kafilah yang bersaksi telah melihat hilal kemarin, hal ini diriwayatkan dalam hadis Abi Däwud (1): 300.

Berdasarkan kronologi keterlihatan *Hilal* dari laporan Arab Badwi dan kafilah tampak memiliki hubungan yang saling terkait. Boleh jadi hadis-hadis tersebut menceritakan peristiwa yang sama. Jika melihat topografi Madinah (Gambar 10.4), hal itu berkaitan dengan adanya bukit yang menghalangi pandangan ufuk barat tempat terbenamnya Matahari dan Bulan. Ketinggian bukit paling tinggi mencapai 967 meter dari permukaan laut (mdpl) sedangkan di sekitar masjid 603 mdpl sehingga didapatkan selisih 364 meter dengan radius 5,73 km. Dari informasi ini kita bisa memperkirakan halangan bukit sampai ketinggian sekitar $3,6^\circ$. Sangat dimungkinkan ketika maghrib ketinggian hilal mencapai sekitar 7° dan cahaya senja masih terang, beberapa saat kemudian ketika cahaya senja mulai meredup ketinggian hilal sudah turun menjadi sekitar 3° , tetapi terhalang oleh bukit sehingga hilal tidak berhasil diamati.

Medan pandang dari Masjid Nabawi terhalang oleh bukit yang membentang selebar $46,36^\circ$ pada rentang azimuth $\sim 235,30^\circ$ hingga $\sim 281,66^\circ$. Pada bulan Syawal yang disajikan pada Tabel 1, Bulan terbenam dari azimuth $239,5^\circ$ sampai $268,5^\circ$. Dari kesembilan data yang disajikan, data nomor 1, 3, 4, dan 9 memiliki ketinggian yang cukup tinggi untuk diamati setelah matahari terbenam dengan durasi

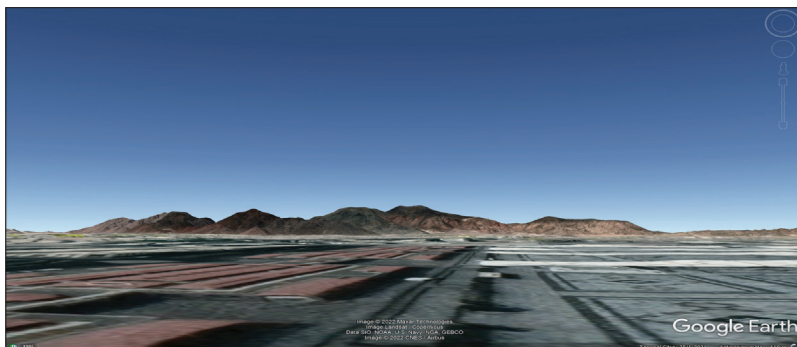


Foto: Google Earth

Gambar 10.4 Kondisi topografi di masjid Nabawi ke arah Barat yang terhalang bukit.

yang cukup panjang, 40 menit atau lebih. Sementara itu, pada nomor 8, 7, dan 6 ketinggiannya terlalu kecil, dengan sendirinya tereliminasi. Adapun nomor 2, variasi ketinggian dan elongasi kurang memadai sehingga besar kemungkinan terjadi pada 11 Februari 628M dengan kombinasi ketinggian $04^{\circ}31'07''$ dan azimut $251^{\circ}34'39''$ serta elongasi $06^{\circ}49'42''$, pada posisi azimut demikian ketinggian Bulan minimal $\sim 2^{\circ}$ didapatkan dari variasi 151 meter sejauh 4,18 km. Selang beberapa menit setelah Matahari terbenam, bertepatan dengan ketinggian $\sim 2^{\circ}$ penduduk Madinah tidak bisa melihat hilal karena terhalang oleh gunung. Berbeda halnya orang yang berada di batas Madinah, semakin jauh, ketinggian bukit semakin rendah (batas minimal ketinggian gunung setinggi $\sim 1^{\circ}$, pengamat berada pada jarak 18 km) dan alhasil mereka pun bisa melihat hilal.

Tabel 10.1 Sebaran data posisi Bulan Sabit awal bulan Syawal

No.	Tanggal	Altitude	Azimut	Elongasi	Durasi
1.	25 - 03 - 624	$07^{\circ}51'53''$	$268^{\circ}36'29''$	$10^{\circ}04'37''$	39m 35d
2.	14 - 03 - 625	$02^{\circ}50'40''$	$264^{\circ}00'15''$	$06^{\circ}06'27''$	16m 56d
3.	04 - 03 - 626	$07^{\circ}58'43''$	$259^{\circ}52'33''$	$09^{\circ}56'17''$	40m 55d
4.	22 - 02 - 627	$12^{\circ}10'39''$	$255^{\circ}47'14''$	$13^{\circ}44'01''$	1j 49d

No.	Tanggal	Altitude	Azimut	Elongasi	Durasi
5.	11 - 02 - 628	04°31'07"	251°34'39"	06°49'42"	22m 34d
6.	30 - 01 - 629	01°40'09"	248°00'50"	04°37'08"	12m 09d
7.	19 - 01 - 630	01°36'30"	244°58'50"	04°23'03"	12m06d
8.	08 - 01 - 631	00°43'38"	242°56'41"	03°35'10"	7m 55d
9.	29 - 12 - 631	08°47'45"	239°31'12"	10°58'13"	49m 55d

Terkait kesaksian melihat hilal, perlu ketajaman penglihatan yang cukup baik untuk dapat melihatnya. Bahkan hal ini pun pernah terjadi di masa lalu sebagaimana diriwayatkan dalam hadis Muslim, “Anas bin Mälik berkata, kami bersama ‘Umar di antara Makkah dan Madinah. Kami melihat Hilal. Aku adalah orang yang berpenglihatan tajam, aku melihatnya. Tetapi tidak seorang pun yang melihatnya kecuali aku. Anas berkata kepada ‘Umar, “Apa kau tidak melihatnya?” Ia tidak melihatnya. Ia berkata, “Aku akan melihatnya dengan berbaring di atas hamparanku.” (HR Muslim: 5120).

D. Sains tentang Deteksi Hilal

Manusia diciptakan dengan sepasang organ mata sebagai detektor yang berfungsi untuk menerima informasi cahaya pada panjang gelombang kasat mata dalam berbagai rentang kecerlangan. Detektor alami ini terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu kornea, lensa mata, iris, pupil, dan retina. Cahaya masuk melalui kornea menuju pupil, fungsi yang dijalankan kornea analog dengan fungsi lensa pada kamera. Iris berfungsi dalam mengatur lama bukaan (*aperture*) sekaligus mengatur jumlah cahaya yang masuk ke mata. Selanjutnya, cahaya yang masuk diteruskan ke lensa mata. Kornea ini merupakan lengkungan transparan yang melindungi iris dan pupil, bersama lensa mata membelokkan (membiaskan) cahaya yang datang sehingga jatuh atau difokuskan ke retina. Cahaya yang masuk ke retina akan direkam melalui reaksi fotokimia. Retina dilengkapi dengan alat deteksi cahaya bernama sel fotoreseptor – pada neurosensori, berupa sel batang dan

sel kerucut. Ketika cahaya melewati substansi fotokimia, sel fotoreseptor pada retina mengkonversikan cahaya menjadi gelombang elektrik yang akan mengirimkan sinyal-sinyal elektrik melalui saraf optik bagian korteks visual primer pada area oksipital di otak. Otak memproses sinyal-sinyal tersebut menjadi sebuah bayangan untuk mengenali, membedakan, ataupun mendeskripsikan objek lainnya dalam hal kontras, ukuran, dan bentuk dengan persepsi penglihat.

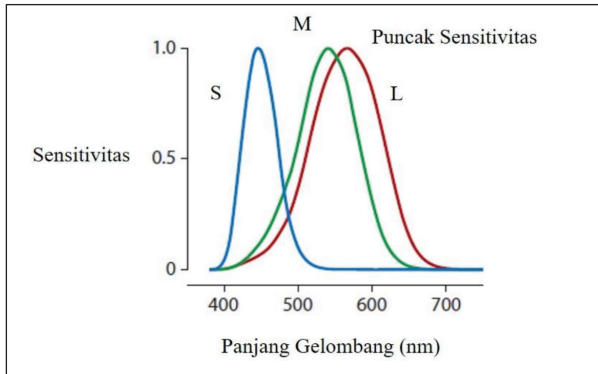
Pada jaman dahulu manusia mengekspresikan anugerah penglihatan dengan mengabadikan objek benda langit, yaitu melukiskan ke dinding gua atau yang lainnya untuk diwariskan ke generasi berikutnya. Seiring berjalannya peradaban, objek-objek tersebut kemudian dilukiskan pada media batu maupun logam. Terakhir, sebelum era kamera, telah digunakan juga media kertas. Dunia mengenal sosok Galileo Galilei yang mengarahkan teleskop buatan sendiri ke langit dengan mengabadikan hasil pengamatan bulan, gugus bintang, nebula, planet Jupiter yang diiringi satelit-satelitnya, dan Saturnus melalui goresan senyawa karbon ke dalam lukisan berupa sketsa kemudian dibukukan berjudul *Sidereus Nuncius* atau *the Sidereal Messenger*. Jauh sebelum Galileo mengintip langit malam, enam abad sebelumnya ada Ibnu Yünus melakukan pekerjaan yang sama kemudian dituangkan ke dalam kitab berupa tabel posisi benda langit dikenal dengan *Zij alKabir alHäkimi*. Akhirnya, dengan penemuan metode *pinhole* oleh Ibnu Haytsam pada abad ke-10 di Mesir diperkenalkan *Qumrah* sebagai kamera *obscura* (ruang gelap). Orang Barat mendengarnya sebagai kamera, kemudian istilah ini dikenal dan digunakan hingga saat ini.

Di samping memerlukan waktu yang cukup lama untuk meniru atau merekam objek, tidak semua saintis dianugerahi kemampuan seni lukis. Kamera *obscura* pun berevolusi, semula hanya berupa proyeksi cahaya yang masuk ke dalam ruang gelap. Terakhir, tahun 1990-an perkembangan kamera fotografi, objek hasil foto masih disimpan menggunakan roll film negatif atau klise foto. Perkembangan berikutnya masa kontemporer, kamera fotografi berubah menjadi digital hingga dapat direkayasa dengan *image processing* (olah citra).

Jembatan penghubung antara semesta dan manusia untuk berkomunikasi adalah melalui gelombang elektromagnetik (GEM). Dari panjang gelombang paling besar hingga terkecil adalah gelombang radio sampai sinar gamma. Meskipun gelombang radio memiliki panjang gelombang paling besar, akan tetapi energinya sangat lemah, sedangkan sinar gamma, panjang gelombangnya sangat pendek tetapi memiliki energi yang paling besar. Di antara rentang panjang gelombang yang sangat bervariasi ini, ada secuil yang dapat kita tangkap melalui indra penglihatan pada spektrum kasat mata berkisar 380 sampai 740 nm dimulai dari warna nila-ungu hingga merah.

Yuna (2021) menyimpulkan, rangsangan cahaya pada sel fotoreseptor kerucut yang sensitif terhadap panjang gelombang tertentu menyebabkan persepsi warna, yang merupakan sensorik subjektif. Spektrum kasat mata normal mampu membedakan antara 7–10 juta warna, dan retina manusia memiliki 100–125 juta sel batang dan 6–7 juta sel kerucut, sehingga rasio perbandingannya adalah 20:1 segmen luar dan dalam sel fotoreseptor. Sel batang berfungsi dalam penglihatan skotopik atau monokromatik dalam cahaya redup, dan sel kerucut berfungsi dalam penglihatan fotopik dan warna. Sel batang hanya terdiri dari satu jenis sel, sehingga mereka tidak dapat membedakan warna. Komposisi spektral cahaya dari objek ke mata memengaruhi persepsi warna. Persepsi warna juga dapat dipengaruhi oleh cahaya sekitar objek dan tingkat adaptasi visual subjek. Penglihatan normal warna adalah penglihatan trikromatik yang dimediasi oleh tiga jenis sel fotoreseptor kerucut yang dibedakan berdasarkan sensitivitas spektralnya. Sel kerucut terdiri dari tiga jenis: Pertama, sel kerucut S peka terhadap panjang gelombang pendek dan melihat warna biru-kuning; Kedua, sel kerucut M peka terhadap panjang gelombang menengah dan melihat warna hijau; Ketiga, sel kerucut L peka terhadap panjang gelombang panjang dan melihat warna merah.

Jenis sel kerucut M dan L merupakan yang paling dominan pada retina. Sel kerucut S hanya berkisar 5–10% dan tidak ditemukan di fovea sentral. Kerucut M dan L memiliki banyak kesamaan histologi, fisiologi, dan genetik sebanyak 96%. Fotopigmen M dan L ditemukan



Sumber: Yuna (2021)

Gambar 10.5 Grafik sensitivitas warna pada kerucut S, M, dan L panjang gelombang visual.

dalam susunan kromosom X, sedangkan fotopigmen S ditemukan pada kromosom 7. Kerucut S memiliki kesamaan 43% dengan fotopigmen M dan L seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.5.

Ketajaman pengamat, sensitivitas kontras, medan pandang lihat, pembeda warna, dan stereoskopis merupakan beberapa keajaiban fungsi mata yang sangat menakjubkan. Secara umum pada astronomi, kontras gelap-terang dan kontras warna adalah dua komponen yang paling penting dalam pengamatan bulan sabit muda. Hal ini berkaitan dengan kemampuan untuk membedakan dua stimulus yang berbeda dalam ruang dan latar belakang kontras yang tinggi adalah penyebabnya.

E. Kontras Gelap-Terang

Sensitivitas kontras biasanya digunakan untuk mengukur dan menilai kemampuan sistem penglihatan dalam membedakan suatu objek terhadap latar belakangnya. Ini didefinisikan sebagai kemampuan mengenali objek pada kontras yang rendah. Objek hitam dengan latar belakang putih memiliki kontras yang tinggi sehingga mudah dibedakan, sedangkan objek abu-abu dengan latar belakang yang lebih terang

memiliki kontras yang rendah. Sensitivitas kontras sangat penting untuk fungsi visual seperti deteksi gerak, bidang visual, dan adaptasi visual. Sensitivitas kontras ini dapat dilihat dengan menggunakan pencahayaan dan kecerahan yang baik pada latar belakang yang tepat sehingga memudahkan kita untuk melihat.

Pada aplikasi kontras gelap-terang seperti pada Gambar 10.6, huruf V di samping pojok kiri atas dapat dikenali dengan sangat mudah. Hal ini berkaitan antara warna huruf dan latar belakangnya memiliki kontras yang maksimum. Berbeda halnya dengan huruf apa pun yang ada di pojok kanan bawah, kita tidak bisa mengenali



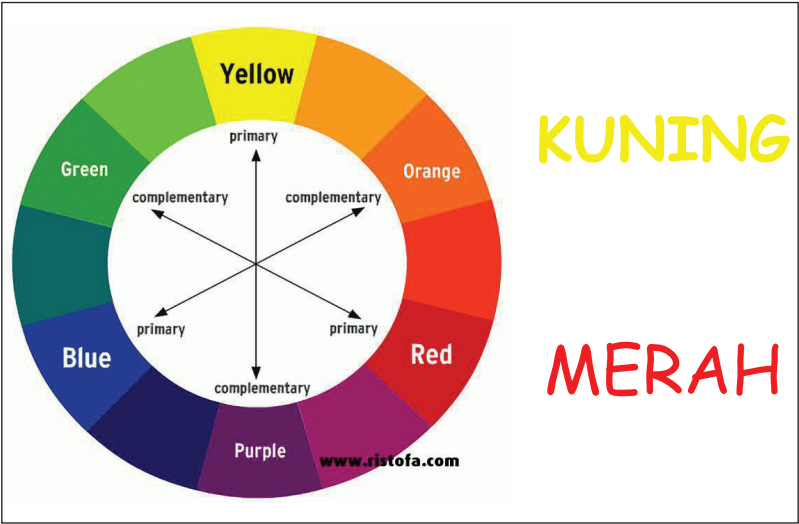
Sumber: Precision Vision (t.t.).

Gambar 10.6 Kartu sensitivitas kontras Pelli-Robson

Buku ini tidak diperjualbelikan.

huruf-huruf tersebut karena kontrasnya sangat rendah. Sedangkan aplikasi kontras warna seperti pada diagram warna Gambar 10.7, tampak kontras warna yang paling tinggi dengan warna yang berseberangan seperti warna kuning dengan warna ungu, merah dengan hijau, biru dengan jingga dan sebagainya. Pada bagian bawahnya, ada juga gabungan dua warna dengan kontras paling tinggi seperti yang ditunjukkan dengan tulisan kuning pada latar berwarna ungu. Objek dengan kontras seperti ini sangat mudah untuk dibaca atau dikenali, sedangkan tulisan merah dengan latar belakang warna merah muda memiliki kontras yang lebih rendah, juga memiliki kemiripan warna yang lebih redup sehingga untuk dapat melihatnya perlu dilakukan dengan cara saksama.

Selain itu, terdapat dua faktor yang mengatur kemampuan mata dalam mengadaptasi cahaya, yaitu kecerlangan latar belakang dan kecerlangan permukaan (*surface brightness*) objek. Kecerlangan permukaan adalah jumlah total cahaya dibagi dengan luasan area sebaran cahaya. Adaptasi gelap mata dipengaruhi oleh suatu proses



Sumber: Diadaptasi dari AutorenGruppe (t.t.)

Gambar 10.7 Kartu sensitivitas kontras Pelli-Robson

kimia, pada keadaan gelap disebut sebagai rhodopsin (*visual purple*) yang dibangun oleh sel-sel batang dan kerucut. Jumlah visual purple akan mengatur kesensitifan mata.

Sebelum lampu ditemukan, polusi cahaya dan udara sangatlah minim sehingga taburan 3.000 bintang dengan berbagai tingkat kecerlangan amat sangat mudah dilihat. Meskipun demikian, pada saat itu satu-satunya penyumbang polusi cahaya terbesar adalah Bulan saat fase purnama. Cahaya Bulan berasal dari pantulan cahaya matahari oleh permukaan bulan kemudian diterima oleh partikel-partikel di atmosfer Bumi sehingga cakrawala malam lebih terang daripada biasanya. Siang hari, Mataharilah sumber terkuat. Hamburan cahaya warna biru saat siang dan cahaya langit senja bercorak jingga hingga merah berasal dari hamburan partikel-partikel di atmosfer Bumi yang mengalami efek hamburan Rayleigh.

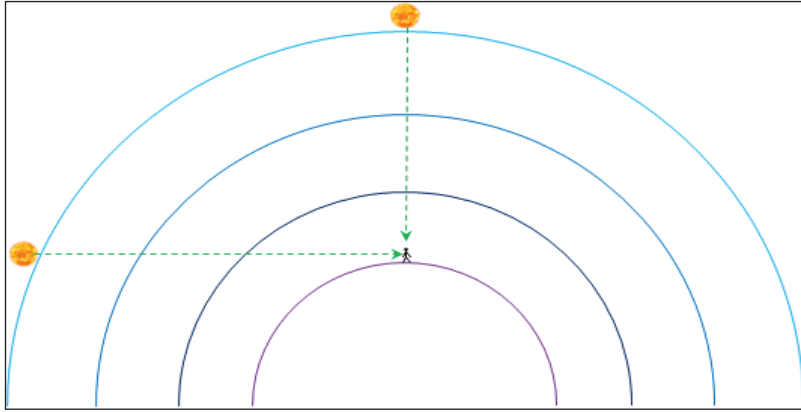
Cara pandang dan hidup manusia kemudian berubah karena Revolusi Industri 1.0 pada abad ke-18. Lapisan atmosfer dekat dengan permukaan Bumi yang disebut lapisan Troposfer yang semula didominasi oleh karbon dioksida (CO_2) dan uap air (H_2O), menjadi semakin padat dipenuhi partikel-partikel yang berbahaya seperti karbon monoksida (CO), nitrogen (N), chlorofluorocarbon (CFC), sulfur dioksida (SO_2), hidrokarbon (HC), timah (Sn), benda partikulat, dan sebagainya. Atmosfer pun yang semula terdispersi warna biru tua, semakin memudar, sekaligus menjadi indikator polusi udara sekitar cukup tinggi; semakin muda warna birunya, semakin kotor udaranya. Efek dari polusi, berimbas pada jarak pandang kita pada objek semakin redup karena banyaknya partikel-partikel yang berhamburan di sekitar laksana terpenjara dalam kabut. Kungkungan kabut ini akan semakin terlihat jelas ketika kita melihat objek yang jauh terhalang oleh kabut. Padahal menurut pandangan penduduk yang berada jauh dari lokasi tadi, boleh jadi merasa tidak terkungkung oleh kabut. Pada Gambar 10.8 dapat kita lihat pada bukit yang dekat memiliki kontras yang besar dibandingkan dengan bukit yang jauh berada di balik bukit. Semakin jauh, warna atau kontras bukit atau gunung semakin pudar seperti pada Gambar 10.8.



Sumber: Anggoro (2019)

Gambar 10.8 Tampak barisan pegunungan dari yang paling dekat hingga jauh dengan kontras yang berbeda-beda.

Distribusi partikel atmosfer yang semakin padat menyebabkan hambatan pada jalur penerimaan informasi benda langit yang merambat dalam gelombang cahaya ke Bumi. Setiap berkas cahaya mengalami penghamburan sehingga objek yang jauh kontrasnya semakin rendah. Dilihat dari posisi benda langit terhadap pengamat, ada perbedaan yang cukup besar antara benda langit yang berada di zenit atau puncak pengamat (atas kepala) atau ketika ia berada di ufuk atau kaki langit sebagaimana pada Gambar 10.9. Posisi benda langit yang berada di zenit cenderung memiliki jalur yang pendek dibandingkan dengan ketika di ufuk yang cenderung lebih panjang. Konsekuensinya, cahaya yang berasal dari benda langit pada jalur yang lebih panjang akan memiliki kontras yang semakin rendah. Untuk menyiasati kontras yang rendah ini, dapat digunakan detektor kamera hitam putih. Selain itu, penggunaan lampu yang tidak bijak berdampak pada polusi cahaya yang semakin tidak terkendali, sehingga berimbas pada semakin redupnya benda langit karena langit malam semakin terang.



Gambar 10.9 Jalur cahaya dari benda langit antara di kaki langit cukup panjang dibandingkan di atas kepala.

Dengan adanya hambatan baru yang berasal dari campur tangan manusia berupa polusi cahaya ini, para astronom berusaha keras mencari solusi cara meningkatkan teknologi pencitraan yang mampu meningkatkan kontras objek benda langit dari cahaya latar depan. Saat ini, teknologi pencitraan yang paling sensitif menggunakan detektor kamera video astronomi CCD (*Charge-Coupled Device*) atau CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) untuk merekam gambar. Meskipun demikian, sensitivitas detektor kamera tidak mampu mengatasi polusi cahaya yang relatif cemerlang sehingga muncul olah citra.

Seiring berkembangnya teknologi, sejurus dengan perkembangan kosa kata baru, semula dikenal dengan lihat, kini ada kosa kata baru dikenal dengan deteksi. KBBI menjelaskan pengertian dari deteksi yaitu usaha menemukan dan menentukan keberadaan, anggapan, atau kenyataan. Semula terbatas pada panjang gelombang visual, dengan adanya kosa kata baru menjadi sepanjang gelombang EM dimulai dari sinar gamma hingga radio; hal ini biasa dilakukan oleh para astronom untuk menggali informasi semesta.

Dengan target pengamatan ambang batas sabit bulan yang dapat dideteksi instrumen pengamatan pada siang hari cukup sulit dan

menantang, maka persiapan yang diperlukan harus matang. Dimulai dari peralatan pendukung dan pengaturan teleskop. Di samping detektor kamera berbasis CCD atau CMOS pada warna hitam putih agar objek dengan lingkungan sekitar lebih kontras, bahan tambahan yang menjadi ujung tombak keberhasilan mendeteksi sabit bulan adalah *baffle* (instrumen untuk mengurangi cahaya artifisial di lingkungan sekitar terutama Matahari yang tertangkap sistem optik teleskop) berupa selongsong tabung yang cukup panjang. Selain itu, diperlukan perangkat pengolahan citra dengan cara menumpukan hingga ratusan citra untuk menghasilkan citra sabit bulan yang kontras dengan hamburan cahaya atmosfer latar depan. Filter Inframerah digunakan untuk menambah kontras cahaya dari bulan sabit terhadap cahaya langit latar depan yang lebih dominan ke warna biru. Hal ini dapat kita lihat pada spektrum kasat mata dari frekuensi rendah ke tinggi MeJiKuHiBiNiU (Merah, Jingga, Kuning, Hijau, Biru, Nila, Ungu). Tampak, warna merah berada pada ujung sisi kiri sedangkan biru berada di ujung sebelah kanan setelah ungu-nila, sehingga memiliki perbedaan warna yang sangat jelas. Inilah alasan para pengamat melakukan pengamatan ketika pagi menjelang siang atau siang menjelang sore ketika langit cerah berwarna biru untuk mendapatkan citra sabit bulan yang kontras secara maksimal.

Selanjutnya, *setting* teleskop berupa proses *polar alignment* bertujuan untuk menyelaraskan gerak teleskop dengan gerakan benda langit dan pembuatan *pointing model*. Membuat *pointing model* berdasarkan letak-letak bintang terang yang bertujuan untuk memperoleh penguncian objek berakurasi sekaligus presisi yang tinggi ketika teleskop diarahkan ke suatu objek sehingga dapat terus-menerus mengikuti pergerakan objek tersebut. Ketika dua proses ini telah selesai dilakukan, teleskop diarahkan ke Bulan ketika terbit di atas kaki langit atau horizon dan dapat mengikuti gerakannya sepanjang hari. Metode pengamatan seperti ini dilakukan setiap harinya hingga menjelang *konjungsi/ijtima*’.

Indikator pasca *konjungsi* adalah Matahari lebih dulu terbit kemudian disusul oleh Bulan atau paling lambat Matahari lebih dulu



Sumber: Observatorium Bosscha (2022)

Gambar 10.10 Tampak selongsong panjang berwarna biru yang dipasang di depan teleskop.

terbenam dibandingkan Bulan meskipun selisih waktunya hanya beberapa menit. Pengamatan pada Gambar 10.10 menggunakan teleskop *portable* jenis refraktor berdiameter 106 mm dilengkapi detektor kamera berbasis CMOS yang dipasang filter inframerah yang bertujuan untuk mendapatkan pencitraan pada panjang gelombang inframerah dekat (*imaging near infrared*). Pada bagian depan teleskop dipasang instrumen bantu berupa *baffle* sepanjang 1,2 meter berwarna biru. Citra yang ditangkap oleh kamera kemudian diproses menggunakan perangkat pengolahan citra untuk meningkatkan tampilan sabit Bulan. Secara umum, perangkat pengolahan citra ini disediakan secara bebas oleh pihak lain dengan nama IRIS dan sejenisnya kemudian proses selanjutnya menggunakan Photoshop. Berbeda halnya dengan perangkat lunak yang dikembangkan secara mandiri oleh M. Yusuf, seorang peneliti di Observatorium Bosscha, yang bisa membuat hasilnya otomatis terintegrasi serta seketika.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

15-Jul-2015 09:33:51.5

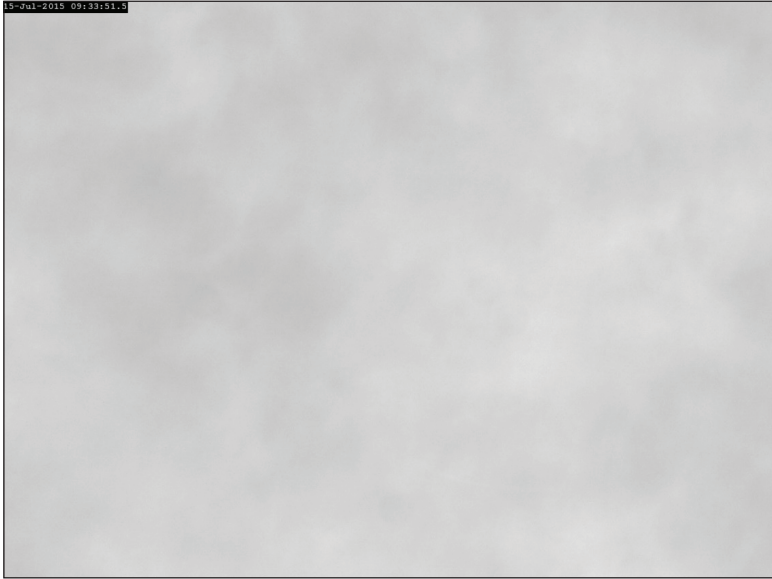


Foto: Zainuddin dan Zain Nasrullah (2022)

Gambar 10.11 Hasil pemotretan dilakukan secara manual dengan satu kali potret dalam satu frame.

Hasil dari selarasnya teleskop dan bulan sabit didapatkan citra yang didominasi warna putih kelabu sebagaimana pada Gambar 10.11. Selain dipotret untuk membandingkan citra asli dengan pengolahan citra, citra sabit Bulan direkam untuk beberapa saat. Kemudian hasil dari rekaman satu video tersebut dipisah-pisah menjadi ratusan *frame* foto dengan bantuan *software* IRIS. Melalui *software* yang sama, ratusan *frame* tersebut digabungkan kembali untuk diolah citranya menjadi satu foto dan hasil akhirnya dibantu dengan *software* Photoshop hingga citra sabit Bulan dapat dideteksi sebagaimana pada Gambar 10.12.

Tampak hasil perbandingan antara Gambar 10.11. sebagai citra sebelum diolah dan Gambar 10.12 setelah diolah mengalami perbedaan yang sangat signifikan. Secara visual pun bulan sabit tidak bisa diamati tetapi dengan teknik pengolahan citra bulan sabit bisa

Buku ini tidak diperjualbelikan.

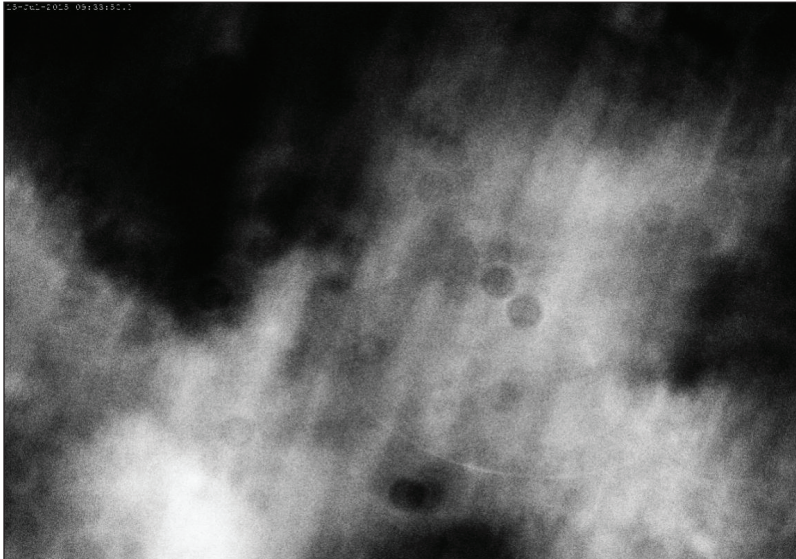


Foto: Zainuddin dan Zain Nasrullah (2022)

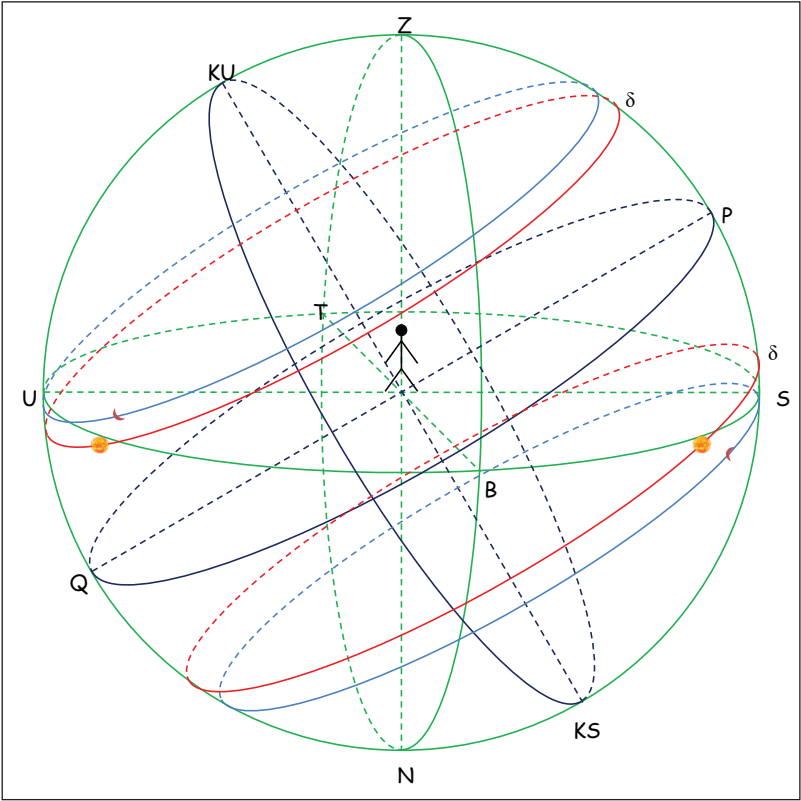
Gambar 10.12 Hasil olah citra sabit bulan yang terdeteksi yang didominasi oleh awan dan terdapat gelembung-gelembung kecil oleh debu.

dideteksi dengan cukup mudah. Hal ini akan memiliki konsekuensi hukum yang berbeda. Jika tidak bisa diamati maka masuk ke dalam fase *Muhäq* meskipun hasil olah citra bisa dideteksi sebagaimana telah dijelaskan pada fase-fase bulan serta tinjauan etimologi dan terminologinya maka hukum dalam menetapkan puasa atau Hari Raya menjadi tertolak karena tidak sesuai dengan *miqat zamani*.

E. Keunikan Sirkumpolar

Sebaran manusia tidak hanya ada di wilayah khatulistiwa yang khas beriklim tropis maupun subtropis dengan iklim empat musimnya, kondisi ekstrem khas kutub pun ada penghuninya. Semakin mendekati wilayah kutub, gerak benda langit tidak hanya ke atas, akan tetapi menyamping baik searah jarum jam untuk kawasan Kutub Utara ataupun berlawanan arah jarum jam untuk kawasan Kutub Selatan.

Konsekuensi gerak benda langit yang menyamping menyebabkan salah satu durasi siang atau malam semakin panjang bahkan hingga 20 jam. Satu keadaan pada musim panas, kondisi langit untuk malam hari tidak memungkinkan untuk gelap, tetapi yang sesungguhnya terjadi kondisi langit hanya sampai sebatas pada kondisi senja. Dalam astronomi, senja dibagi ke dalam tiga bagian, yaitu senja sipil, senja nautika, dan senja astronomi yang masing-masing memiliki kedalaman Matahari berbeda 6° pada tiap kategorinya. Begitu pula sebaliknya saat musim dingin, kondisi langit untuk siang hari tidak memungkinkan



Sumber:

Gambar 10.13 Ilustrasi gerak Matahari ketika musim panas dan musim dingin pada kawasan Kutub Utara cenderung berada dekat ufuk Utara maupun ufuk Selatan.

untuk siang tetapi cenderung fajar kemudian tenggelam kembali kemudian malam sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 10.13.

Hal ini akan memengaruhi kondisi keterlihatan bulan sabit terhadap kontras latar depan saat musim panas ataupun kondisi bulan sabit yang lebih dulu terbenam sebelum Matahari terbenam ketika musim dingin. Pada kondisi musim panas, kedalaman Matahari belum terlalu jauh ke bawah yang memungkinkan cahaya senja lebih redup dibandingkan sabit Bulan. Dengan demikian, posisi bulan sabit harus lebih jauh dari cahaya senja Matahari yang terlalu terang. Kondisi ini memaksa di daerah kutub harus menambah hari dibandingkan dengan daerah yang normal agar bulan sabit ini bisa diamati. Begitu pula saat musim dingin, ketika posisi bulan sabit cukup jauh dari Matahari akan tetapi bulan lebih dulu terbenam dibandingkan dengan Matahari sehingga memaksa menambah hari. Pada daerah yang normal, umur Hilal mencapai dua atau tiga hari sedangkan di daerah kutub, baru mengawali fase Hilal. Pada bahasan Tinjauan Terminologi, fase bulan sabit disebut Hilal maksimal tiga hari, selanjutnya disebut bulan sabit membesar hingga masuk fase Kuartier Pertama sebagai bulan Setengah. Kaidah fiqh mengajarkan kepada kita melalui kaidah “Jika tidak bisa seluruhnya maka jangan tinggalkan seluruhnya”. Meskipun kondisi bulan sabit tidak bisa diamati karena cahaya senja masih terang atau ketika Bulan berada di bawah horizon akan tetapi parameter sudah memenuhi kriteria maka bisa digunakan sebagai acuan dalam penetapan awal bulan qamariyah.

F. Batasi pada Jendela Pengamatan Visual

Berdasarkan hasil pemaparan sebelumnya, adanya perbedaan definisi antara melihat dan mendeteksi. Melihat artinya menggunakan mata untuk memandang atau dalam arti fisis terbatas pada panjang gelombang visual (kasat mata) yaitu 400-800 nm dan apa adanya sedangkan mendeteksi artinya usaha menemukan dan atau menentukan keberadaan yang tidak dibatasi pada panjang gelombang visual semata sehingga tidak ada batasan. Perbandingan pada kasat mata dan filter inframerah dekat sebagaimana pada Gambar 10.11. dan 10.12. Pada

Gambar 10.11 sabit bulan tidak dapat dilihat sedangkan Gambar 10.12 dapat dideteksi dengan jelas. Meskipun mata adalah produk yang paling sempurna dibandingkan dengan kamera, akan tetapi kamera memiliki sensitivitas yang dapat ditingkatkan lebih dari kemampuan mata. Apalagi menggunakan filter dengan panjang gelombang inframerah sekitar 800 sampai 2500 nm sehingga parameter kriteria yang ada bisa diperkecil dari sesungguhnya. Hal ini berimbas pada *istinbath hukum* jendela pengamatan bulan sabit yang perlu dibatasi sesuai dengan al-Qur'an dan asSunnah, yaitu pada panjang gelombang visual dengan ketampakan objek apa adanya sesuai yang ada di lapangan tanpa adanya olah citra sehingga mempertegas bahwa yang diamati benar-benar *Hilal* bukan *Muhäq*.

Daftar Pustaka

- Al-Bassäm, ' b. (1992). *Tawdhilul Ahkäm min Bulüghil Maräm*. Jedah: Därl Qiblat Littsaqäfatil Islämiyah. https://perpustakaanislamdigital.com/pdf/hd_skk25.pdf
- Al-Bukhâri, M. B. (2001). *Shahih Al-Bukhâri* (Vol. 3). Beirut: Däru Thauq An-Najäh.
- Al-Qur'an, L. P. (2023, Maret 15). *Qur'an Kemenag*. Diambil kembali dari <https://quran.kemenag.go.id/>
- Anggoro, D. (2019). Tempat wisata gunung yang ada di Lembang. Abang Dayu. <https://www.abangdayu.com/tempat-wisata-gunung-yang-ada-di-lembang/>
- anNaysäbüri, M. b. (t.t.). *Shahih Muslim*. Beirut: Därun Ihyä atTuräts al'Arabî.
- asySyiräzi, M. b. (t.t.). *Nihäyatul Idräki fi Diräyatil Afläk*. British Library. Dipetik April 23, 2023, dari https://www.qdl.qa/en/archive/81055/vdc_100023627369.0x0000ba
- AutorenGruppe. (t.t.). Warna [Foto]. Wattpad. Diakses pada 21 Oktober 2025 dari <https://www.wattpad.com/888694241-graphic-class-3-warna>
- azZabidi, M. b. (t.t.). *Täjul 'Arüs min Jawähiril Qämüs*. t.t.: Därl Hidäyah.
- azZamakhshari, A. b. (t.t.). *alFä-iq fi Gharibil Hadits wal Atsar*. Libanon: Därl Ma'rifat.

- Gunawan, Liani Mulasari. 2020. *Tajam Penglihatan dan Sensitivitas Kontras*. Departemen Ilmu Kesehatan Mata Rumah Sakit Mata Cicendo. Bandung. <https://perpustakaanrsmcicendo.com/2020/04/13/tajam-penglihatan-dan-sensitivitas-kontras/>
- Ibnu Mandlür, M. b. (1993). *Lisānul ‘Arab*. Beirut: Däru Shādir.
- Munawwir, A. W. (1997). *Al Munawwir: Kamus Arab - Indonesia*. Surabaya: Pustaka Progressif.
- Observatorium Bosscha. (2022, 20 Mei). Rangkaian pengamatan hilal Ramadhan dan Syawal 1443H. <https://bosscha.itb.ac.id/id/berita/aktivitas/2022-05-18-pengamatan-hilal-ramadhan-syawal-2022/>
- Precision Vision. (t.t.). Pelli-Robson contrast sensitivity chart [Ilustrasi produk]. Diakses pada 21 Oktober dari <https://precision-vision.com/products/contrast-sensitivity-tests/peak-contrast-sensitivity/pelli-robson/pelli-robson-contrast-sensitivity-chart/>
- Raharto, Moedji. 2010. *Memahami Fasa bulan Sebagai Acuan Kalendar bulan dan Pengantar Sains Hilal*. Astronomi ITB. Bandung
- Tttrung. (2020, 7 Desember). Moon phase no text [Ilustrasi]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moon_phase_no_text.png
- Yuna, U. N. (2021). *Fisiologi Penglihatan Warna*. Bandung: Perpustakaan Rumah Sakit Mata Cicendo. Dipetik April 13, 2023, dari <https://perpustakaanrsmcicendo.com/2021/10/01/fisiologi-penglihatan-warna/>

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Bab XI

Epilog: Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi

Thomas Djamaluddin

Kajian tentang sains dan teknologi keantariksaan untuk masyarakat dan bangsa dimulai dengan ulasan tentang aktivitas Matahari. Parameter aktivitas Matahari yang paling banyak digunakan adalah bintik Matahari atau *sunspot*. Matahari sebagai bintang terdekat berperan besar bagi Bumi. Selain sebagai sumber energi utama, Matahari juga ternyata sebagai sumber gangguan. Gangguan dari badai matahari bersumber dari aktivitas magnetik Matahari yang ditunjukkan dengan bintik matahari dan fenomena yang terkait.

Aktivitas Matahari, terutama berupa letupan (*flare*) Matahari dapat berdampak pada lingkungan Bumi. Seperti halnya cuaca di Bumi, cuaca antariksa bersifat dinamis, bergantung kondisi aktivitas Matahari sebagai sumber gangguan. Dampak paling dirasakan adalah potensi gangguan pada satelit, terputusnya komunikasi radio gelom-

T. Djamaluddin

Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail*: thom001@brin.go.id

© 2025 Editor & Penulis

Djamaluddin, T. Epilog: Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi.

Dalam T. Djamaluddin & F. Nuraeni (Ed.), *Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi* (343–359). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1425.c1494

E-ISBN: 978-602-6303-86-8

Buku ini tidak diperjualbelikan.

bang pendek, gangguan jaringan listrik di negara-negara dekat kutub, dan gangguan navigasi berbasis satelit. Oleh karena itu banyak negara mempunyai lembaga yang bertugas untuk mengamati dan memprediksi aktivitas Matahari. Di Indonesia, tugas itu dilaksanakan oleh Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Sebelumnya tugas itu dilaksanakan oleh Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN).

Unit kerja di LAPAN yang melaksanakan tugas pengamatan Matahari adalah Balai Pengamatan Antariksa dan Atmosfer (BPAA) di Pasuruan dan Sumedang. Balai pengamatan di Pasuruan mencatat sejarah panjang pengamatan bintik matahari yang datanya dikirimkan ke pusat data internasional di Belgia. Pengamatan bintik matahari di balai Pasuruan menggunakan teleskop yang dilengkapi filter peredup cahaya. Bintik matahari dibuat sketsanya untuk menunjukkan pola perubahannya dan dihitung jumlahnya sesuai dengan metode yang berlaku. Pengamatan bintik matahari menggunakan teleskop merupakan metode modern yang terus dikembangkan.

Generasi awal pengamatan bintik matahari dalam sejarah dunia tercatat masih menggunakan mata dengan teknik peredup cahaya yang ada pada masa itu. Itu sebabnya, sampai abad ke-16 hanya tercatat bintik matahari yang besar saja dengan periode ketampakan rata-rata setiap dekade. Hal yang menarik, pada periode pertengahan abad ke-17 sampai awal abad ke-18 tidak banyak laporan terlihatnya bintik matahari, walau pengamatan saat itu sudah relatif banyak. Ternyata, setelah dianalisis, memang pada periode itu jumlah bintik matahari sedang minim, yang kemudian dikenal sebagai “minimum Maunder” sesuai nama penelitiannya. Data pengamatan selama sekitar 40 tahun Samuel Heinrich Schwabe menunjukkan periodisitas sekitar 11 tahun yang saat ini dikenal sebagai siklus matahari. Hal ini menjelaskan alasan terlihatnya bintik matahari secara visual rata-rata setiap dekade. Standardisasi penghitungan jumlah bintik matahari dilakukan Rudolf Johann Wolf setelah mengumpulkan data dari berbagai observatorium di Eropa. Penghitungan jumlah bilangan bintik matahari yang baku tersebut kemudian dikenal sebagai bilangan Wolf (*Wolf Number*) atau bilangan bintik matahari (*sunspot number*).

Bintik matahari menjadi indikator aktivitas matahari karena bintik tersebut dibangkitkan oleh medan magnetik Matahari. Ketampakan sebagai bintik yang hitam karena suhunya lebih rendah dari pada daerah di sekitarnya. Titik paling hitam yang disebut umbra adalah lokasi munculnya garis-garis medan magnet. Bintik matahari yang kecil hanya bertahan beberapa hari, tetapi bintik matahari berukuran besar bisa bertahan cukup lama, sekitar 1–3 bulan. Hal yang menarik, siklus Matahari sekitar 11 tahunan bukan hanya ditandai oleh jumlah bintik matahari, tetapi juga oleh posisi bintik matahari tersebut.

Saat Matahari minimum, jumlah bintik matahari sangat sedikit, bahkan kadang tidak ada sama sekali. Lalu awal siklus dimulai dengan kemunculan bintik matahari di lintang tinggi, baik di utara maupun di selatan. Dengan bertambahnya waktu, jumlah bintik matahari makin bertambah dan posisinya makin mendekati ekuator matahari. Ketika jumlahnya paling banyak, saat itulah disebut matahari maksimum. Jumlahnya bisa mencapai sekitar 100 bintik. Kemudian jumlahnya makin berkurang dan posisinya makin dekat ekuator. Jumlah dan posisi bintik matahari sepanjang siklus kalau digambarkan pada belahan utara dan selatan Matahari tampak membentuk seperti pola sayap kupu-kupu. Oleh karena itu, diagram posisi bintik matahari sering disebut diagram kupu-kupu.

Para pengamat Matahari memperhatikan bentuk bintik matahari yang berkelompok. Bila jumlahnya banyak, itu menunjukkan kompleksitas medan magnet matahari di daerah tersebut. Kondisi medan magnetik yang kompleks tersebut yang perlu di waspadai. Medan magnetik yang kompleks tersebut bisa memicu terjadinya letupan (*flare*) matahari. Bila letupan tersebut besar, itu yang menyebabkan gangguan cuaca antariksa yang disebut badai matahari. Keragaman bentuk kelompok bintik matahari telah diklasifikasikan untuk identifikasi dan potensi terjadinya letupan matahari.

Untuk pembakuan indeks aktivitas Matahari telah digunakan bilangan bintik matahari (*sunspot number*). Definisinya mengalami perubahan, mulai dari lokal observatorium Zurich sampai pembakuan untuk multi-observatorium. Indonesia pun berkontribusi dengan data

pengamatan di fasilitas LAPAN Pasuruan. Pusat datanya yang semula di Zurich kini beralih ke Belgia. Kegiatannya di bawah pengawasan lembaga internasional terkait, yaitu International Union of Radio Sciences (URSI), International Astronomical Union (IAU), dan International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG). Di bawah program internasional Sunspot Index and Long-term Solar Observations (SILSO), data pengamatan bintik matahari bukan hanya untuk kepentingan komunikasi radio serta kajian geofisika dan astronomis, tetapi juga untuk kajian perubahan iklim global. Dari kajian jangka panjang tersebut diketahui bahwa iklim di Bumi juga dipengaruhi oleh tingkat aktivitas Matahari. Diketahui bahwa saat aktivitas Matahari minimum, cuaca musim dingin juga cukup ekstrem (Jones, 2011).

Metode penghitungan indeks aktivitas Matahari beberapa kali diubah sesuai dengan perkembangan hasil penelitian. Demikian juga dengan metode dan peralatan pengamatan berkembang sesuai dengan kemajuan teknologi. Di LAPAN/BRIN Pasuruan, sampai tahun 2022 pengamatan bintik matahari dilakukan dengan menggambarkan sketsa matahari pada kertas yang menampilkan proyeksi bayangan matahari melalui teleskop dan pengamatan digital.

Lebih lanjut, gelombang radio dari objek astronomi baru ditemukan pada abad ke-20. Penemuan itu pun tidak sengaja. Gelombang tersebut semula dikira pancaran gelombang radio dari matahari. Namun, dari pengamatan lebih dalam, disimpulkan bahwa pancaran gelombang radio itu berasal dari pusat galaksi, jauh di luar tata surya. Berkaitan dengan hal tersebut, teleskop radio pertama baru dibangun pada tahun 1930-an.

Pengamatan objek astronomi dengan teleskop radio lebih terbuka daripada dengan teleskop optik. Hal itu karena gelombang radio tidak terganggu cuaca dan serapan atmosfer lainnya. Lebih dari itu, pancara gelombang radio juga tidak terhalang oleh awan antarbintang sehingga bisa mengungkap objek-objek yang tersembunyi di dalam nebula gelap. Namun, pengamatan dengan gelombang radio lebih rendah resolusinya dari pada pengamatan dengan gelombang cahaya tampak. Hal itu terjadi karena resolusi (kemampuan untuk mengenali

objek astronomi secara rinci) berkaitan dengan panjang gelombang dan diameter teleskop. Karena gelombang radio lebih panjang dari gelombang cahaya tampak, untuk mendapatkan resolusi yang setara dengan teleskop optik, teleskop radio harus menggunakan teleskop radio yang lebih besar diameter parabolaunya.

Untuk memperkecil resolusinya, maka diameter antena harus diperbesar. Namun, tentu ada batasnya untuk memperbesar antena. Oleh karena itu, digunakan susunan antena yang seolah membentuk antena besar dengan prinsip interferometri. Dengan cara kerja interferometri, sinyal radio dari beberapa antena yang terpisah jauh kemudian digabungkan seolah berasal dari antena tunggal yang berdiameter sangat besar. Bila teleskop radio antarbenua yang digunakan, akan terbentuk satu sistem interferometri yang luar biasa besarnya yang disebut Very Long Baseline Interferometry (VLBI). Contoh penggunaan VLBI yang terkenal adalah pengamatan citra gas panas di sekitar lubang hitam (Lutz, 2019).

Pengembangan teleskop radio secara global diarahkan untuk meningkatkan sensitivitas antena dan resolusinya. Peningkatan resolusi antena dilakukan dengan memperbesar diameter antena atau dengan jejaring interferometer. Di Indonesia, penggunaan teleskop radio diawali di Observatorium Bosscha ITB dengan antena berukuran 2,3 meter dan 6 meter serta spektrograf radio matahari di LAPAN Sumedang dengan antena berukuran sekitar 4 meter. Ada juga teleskop radio CALLISTO (Compound Astronomical Low cost Low frequency Instrument for Spectroscopy and Transportable Observatory) di Observatorium Bosscha dan LAPAN Sumedang. Callisto di LAPAN Sumedang kini sudah dipindahkan ke Observatorium Nasional Timau. VLBI Global Observing System (VGOS) hasil kerja sama ITB dengan mitra internasional sedang dibangun di Observatorium Bosscha.

Rencana pengembangan teleskop radio berdiameter 20 meter oleh BRIN di kawasan Observatorium Nasional Timau saat ini masih dalam tahap perencanaan dan kajian-kajian. Ada juga rencana mengonversikan stasiun bumi telekomunikasi di Jatiluhur dan stasiun

bumi penginderaan jauh di Parepare menjadi teleskop radio. Saat ini masih dalam tahap kajian-kajian. Namun, perkembangan itu menunjukkan bahwa Indonesia juga segera akan menjadi bagian jejaring pengamatan semesta dengan teleskop radio.

Kajian selanjutnya adalah tentang sampah antariksa. Roket peluncur setelah menyelesaikan tugasnya akan jadi sampah di antariksa. Satelit pun ada batas umur operasionalnya. Setelah tidak berfungsi lagi, satelit jadi sampah yang melayang di antariksa. Selain sampah yang utuh berupa roket bekas dan satelit mati, banyak juga sampah antariksa berupa pecahan logam. Pecahan logam tersebut hasil dari tabrakan objek antariksa. Bisa sampah dengan sampah atau satelit aktif dengan sampah. Ada juga pecahan hasil eksperimen senjata anti-satelit yang ditembakkan dari darat.

Sampah antariksa berukuran setelapak tangan atau lebih jumlahnya sekitar 20.000. Bila memperhitungkan pecahan yang lebih kecil, jumlahnya bisa jutaan sampah yang memenuhi ruang orbit satelit. Sebagian besar orbitnya berada di orbit rendah (ketinggiannya kurang dari 2.000 km), tetapi banyak juga yang berada di orbit geostasioner pada ketinggian 36.000 km. Dan di orbit menengah, walaupun tidak banyak. Sampah antariksa bergerak dengan gaya gravitasi. Kecepatannya sekitar 10.000 km/jam di orbit tinggi sampai sekitar 20.000 km/jam di orbit rendah. Hal itu sangat berbahaya bagi satelit aktif di orbitnya bila bertabrakan dengan sampah antariksa.

Makin padatnya lingkungan antariksa menambah risiko tabrakan satelit aktif dengan sampah antariksa. Salah satu contoh tabrakan satelit dengan sampah antariksa terjadi pada 10 Februari 2009. Sampah antariksa berupa satelit bekas milik Rusia COSMOS 2251 menabrak satelit aktif IRIDIUM 33 milik Amerika Serikat. Tabrakan tersebut menghasilkan lebih dari 2200 sampah baru (Celestrak, 2009). Bahaya tabrakan juga mengancam akibat sampah-sampah berukuran kecil yang sulit terdeteksi. Sampah-sampah kecil itu bisa merusak komponen satelit aktif yang akan mengganggu kinerja satelit. Bahkan sampah antariksa berukuran kecil pun bisa membahayakan astronot yang sedang berada di luar wahana antariksa. Baju antariksa bisa rusak tertembus sampah antariksa.

Akibat gesekan atmosfer, sampah antariksa di orbit rendah mengalami efek pengereman dan ketinggiannya makin menurun. Sampah antariksa yang berada pada ketinggian sekitar 500 km bisa bertahan beberapa tahun sebelum akhirnya jatuh. Sampah antariksa pada ketinggian sekitar 300 km akan jatuh dalam hitungan bulan. Sementara itu, sampah antariksa pada ketinggian 150 km akan jatuh dalam hitungan hari. Indonesia telah kejatuhan beberapa sampah antariksa berukuran besar, dari sampah antariksa milik Rusia, China, dan Amerika Serikat. Apakah hal itu berbahaya? Tumbukan langsung tentu sangat berbahaya. Namun, kejadiannya sangat-sangat jarang karena luasnya permukaan bumi. Sebagian besar sampah antariksa jatuh di wilayah tidak berpenghuni, seperti lautan, gurun, dan hutan. Walaupun demikian, potensi bahaya juga dihadapi pesawat yang sedang terbang bila kejatuhan sampah antariksa, walaupun ukurannya kecil.

Populasi sampah antariksa yang semakin meningkat juga mengganggu pengamatan astronomi. Sampah antariksa dan ribuan satelit konstelasi bisa menimbulkan jejak goresan pada citra pengamatan objek langit beberapa saat sesudah Matahari terbenam dan sebelum Matahari terbit. Pantulan cahaya matahari oleh objek pengorbit Bumi itulah yang terekam sebagai jejak garis pada rekaman citra astronomi.

Makin banyaknya sampah antariksa menimbulkan kekhawatiran akan keberlanjutan program keantariksaan. Bagaimanapun banyaknya sampah antariksa bisa mengancam operasional satelit aktif. Oleh karenanya, berbagai upaya dilakukan melalui Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB). PBB melalui pembahasan-pembahasan di forum keantariksaan akhirnya membuat pedoman mitigasi bahaya sampah antariksa. Dalam pedoman itu antara lain diatur tentang pencegahan pecahnya roket atau satelit di orbit. Ada juga upaya untuk menangkap dan menjatuhkan sampah antariksa secara aktif, walau belum diope-rasionalkan. Namun secara umum pemantauan sampah antariksa perlu dilakukan untuk mengurangi risiko tabrakan atau jatuhnya di wilayah berpenduduk.

Indonesia secara aktif memantau sampai antariksa, khususnya yang melintasi wilayah Indonesia pada saat ketinggian kritis menjelang jatuh. Kegiatan itu dilakukan dengan memanfaatkan data orbit sampah antariksa dan aplikasi penjejak orbit satelit. Dengan pemantauan itu, ketika ada sampah antariksa jatuh, LAPAN/BRIN dengan cepat bisa memastikan identitas sampah tersebut, terutama negara pemiliknya dan ada/tidaknya potensi bahaya. Sampai saat ini sudah tercatat ada tujuh sampah antariksa yang jatuh di wilayah Indonesia. Negara pemiliknya adalah Uni Soviet/Rusia, China, dan Amerika Serikat. Selain dengan aplikasi, diusulkan juga pemantauan dengan menggunakan jejaring teleskop dan *all sky camera*.

Bahaya tumbukan dengan benda jatuh antariksa sesungguhnya bukan hanya disebabkan sampah antariksa. Ada juga objek langit alami yang juga mengancam Bumi. Ukurannya beragam. Ada yang berukuran kecil seperti kerikil sampai yang berukuran besar, beberapa meter sampai beberapa kilometer. Objek langit yang berukuran kecil yang menabrak bumi sering kita lihat sebagai meteor. Namun sejarah mencatat ada objek besar puluhan meter pernah jatuh di Tunguska, Siberia, pada tahun 1908 yang menghancurkan hutan seluas Jakarta. Ada juga yang jauh lebih besar, berukuran puluhan kilometer, yang jatuh 65 tahun lalu di semenanjung Yukatan, Meksiko. Tumbukan asteroid raksasa tersebut menyebabkan dampak luar biasa yang berujung punahnya dinosaurus (Uri, 2023).

Kekhawatiran jatuhnya asteroid besar telah mendorong para astronom memantau asteroid yang orbitnya dekat Bumi yang disebut NEOs (Near Earth Objects). Khusus asteroid disebut NEAs (Near Earth Asteroids). Salah satunya adalah Asteroid 99942 Apophis. Diduga asteroid Apophis akan mengancam Bumi. Apakah benar demikian? Hal itulah yang dikaji dengan analisis orbit dan gangguannya.

Ada empat jenis asteroid yang berpotensi membahayakan Bumi yang disebut PHAs (Potentially Hazardous Asteroids). Dari empat jenis tersebut, terdapat dua jenis asteroid yang orbitnya berpotongan dengan orbit Bumi. Pertama, asteroid kelompok Apollo yang setengah sumbu panjang orbitnya lebih dari 1 AU (Astronomical Unit, satuan

astronomi, jarak rata-rata bumi-matahari). Kedua, kelompok Aten yang setengah sumbu panjang orbitnya kurang dari 1 AU. Dua jenis asteroid lainnya orbitnya tidak berpotongan dengan orbit bumi. Ketiga, asteroid kelompok Amor yang setengah sumbu panjangnya lebih dari 1 AU. Keempat, asteroid kelompok Atira yang setengah sumbu panjangnya kurang dari 1 AU.

Saat pertama kali ditemukan pada 2004, Asteroid 99942 Apophis diduga berpotensi menabrak Bumi pada 2029. Namun, data orbit berikutnya menyimpulkan bahwa asteroid Apophis tidak akan menabrak Bumi pada 2029. Walaupun demikian, peluang untuk menabrak Bumi pada masa mendatang masih terbuka. Oleh karena itu, perhitungan orbit jangka panjang dengan memperhitungkan beragam faktor gangguan perlu dilakukan. Simulasi yang dilakukan adalah dengan membuat model dinamika orbit N-benda. Dari hasil simulasi diperoleh jarak terdekat lintasan Apophis dari Bumi dalam 100 tahun mendatang akan terjadi pada 13 April 2029 dan 30 Maret 2036. Namun pada kedua perlintasan tersebut Bumi masih dalam kondisi aman. Pola orbitnya berubah dengan gangguan gravitasi Bumi saat melintas pada 2029. Pola orbitnya berubah dari pola Aten menjadi pola Apollo dengan perubahan setengah sumbu panjang orbitnya makin besar.

Hal yang menarik, ketika asteroid Apophis melintas terlalu dekat dengan Bumi dan mengenai atmosfer atas, kejadian yang mungkin terjadi adalah ledakan di atmosfer. Asteroid berkecepatan tinggi akan berinteraksi dengan atmosfer menghasilkan gelombang kejut. Bisa jadi kejadian Tunguska 1908 juga disebabkan ledakan di atmosfer akibat melintasnya asteroid besar di atmosfer atas (Koberlein, 2020).

Adanya atmosfer menyebabkan Bumi relatif terlindungi dari ancaman batuan antariksa, termasuk asteroid kecil. Atmosfer akan meredam kecepatan meteoroid (batuan bakal meteor) dan asteroid kemudian membakarnya. Sebagian besar batuan antariksa itu habis terbakar di atmosfer sehingga tidak membahayakan Bumi. Selain atmosfer, bumi juga mempunyai pelindung kedua yaitu medan magnet Bumi. Setelah membahas asteroid Apophis, dilanjutkan

dengan membahas magnetosfer sebagai pelindung Bumi. Magnetosfer adalah lapisan medan magnet yang melindungi Bumi dari partikel bermuatan dan berenergi tinggi dari Matahari. Magnetosfer juga berperan melindungi atmosfer agar tidak tersapu habis oleh angin matahari (Buis, 2021).

Inti bumi terdiri dari besi dan nikel yang bersifat feromagnetik. Inti bumi inilah yang menjadi sumber utama medan magnet bumi (geomagnet). Ibarat batang magnet raksasa, Bumi juga mempunyai kutub utara dan kutub selatan magnetik. Posisinya berdekatan dengan kutub utara dan kutub selatan poros bumi. Akibat interaksi dengan angin matahari dan medan magnet matahari, bentuk magnetosfer (lapisan magnet bumi) terdistorsi. Bagian yang menghadap Matahari lebih pendek daripada bagian yang menjauhi Matahari. Bagian yang menjauhi Matahari membentuk ekor yang disebut magnetotail. Partikel bermuatan dan berenergi tinggi dari Matahari terperangkap oleh medan magnet bumi. Wilayah tempat terperangkap partikel bermuatan itu disebut sabuk Van Allen. Sabuk bagian luar terdiri dari elektron, sedangkan sabuk bagian dalam terdiri dari proton dan neutron.

Medan magnetik bumi bisa terganggu oleh aktivitas Matahari. Bila gangguan tersebut tinggi, maka disebut badai gemagnetik. Aktivitas Matahari yang menyebabkan gangguan medan magnetik bumi adalah *flare* (letupan di matahari), CME (Coronal Mass Ejection, lontaran massa matahari), dan lubang korona. Bila CME mengarah ke Bumi akan menyebabkan badai geomagnetik yang berpotensi mengganggu satelit, sinyal GPS, dan jaringan listrik di wilayah dekat kutub.

Medan magnet bumi bisa mengalami pembalikan polaritas, kutub utara magnetik menjadi kutub selatan. Itu dibuktikan dari bahan feromagnetik yang tersimpan di lava yang membeku pada masa lampau. Pergeseran titik kutub magnetik juga menunjukkan pergeseran yang mengarah pembalikan kutub magnetik. Namun, periode pembalikan polaritas tidak tentu dengan rentang waktu puluhan ribu tahun. Pembalikan polaritas juga disertai dengan penurunan

kekuatan magnetiknya walaupun tidak jelas dampak langsung pada iklim dan kehidupan di Bumi.

Alat pengukur geomagnet disebut magnetometer. Alat tersebut ada yang bersifat skalar (hanya mengukur besarnya medan magnet) dan ada yang bersifat vektor (mengukur besar dan arah medan magnetik). Magnetometer vektor biasanya dipasang permanen di stasiun pengamatan geomagnet. LAPAN/BRIN saat ini mempunyai beberapa stasiun pengamatan geomagnet yang tersebar di seluruh Indonesia, mulai di Biak di wilayah timur sampai di Agam di wilayah barat. Satelit LAPAN-A3 juga membawa muatan magnetometer untuk pengukuran medan magnet bumi secara global dari antariksa. Penelitian magnetosfer di Indonesia dikaitkan dengan dampak cuaca antariksa pada lingkungan Bumi, khususnya terkait dengan keamanan satelit, penerbangan, telekomunikasi radio, dan navigasi.

Lapisan atmosfer atas yang langsung berinteraksi dengan magnetosfer adalah ionosfer atau lapisan ion (partikel bermuatan) di atmosfer. Bahasan tentang magnetosfer dilanjutkan dengan ionosfer ini menarik untuk dilihat. Ionosfer adalah lapisan atmosfer yang terdiri dari gas terionisasi dan elektron bebas. Posisinya mulai ketinggian 60 sampai 1000 km. Sinar X dan ultraviolet ekstrem dari Matahari yang menyebabkan gas-gas terionisasi dan melepaskan elektron bebas.

Parameter penting yang menggambarkan kondisi di ionosfer adalah kerapatan elektron. Berdasarkan kerapatan elektronnya, ionosfer terbagi menjadi tiga sub-lapisan. Lapisan D adalah yang paling rendah dan berada di ketinggian 60–90 km. Lapisan E sebagai lapisan menengah berada pada ketinggian 90–150 km. Lapisan paling tinggi adalah lapisan F dan berada pada ketinggian 150–1.000 km. Dari segi perbedaan lintang magnetiknya, ionosfer terbagi menjadi ionosfer lintang rendah (0–20 derajat lintang magnetik utara/selatan), lintang menengah (20–60 derajat lintang magnetik utara/selatan), dan lintang tinggi (60–90 lintang magnetik utara/selatan).

Kondisi dinamis ionosfer bergantung pada radiasi matahari yang menyebabkannya, kondisi magnetosfer yang melingkupinya, serta pengaruh dari atmosfer bawah, karena ionosfer pun bagian dari at-

mosfer Bumi. Kondisi dinamis ini yang memengaruhi navigasi berbasis GPS dan telekomunikasi radio HF (*High Frequency*) atau gelombang pendek (SW, *short wave*) (IPS, tt). Untuk mempelajari karakteristik dan dinamika ionosfer tersebut, bisa digunakan perangkat ionosonda, yaitu semacam radar yang memancarkan gelombang radio lalu diterima pantulannya dari berbagai berbagai lapisan ionosfer. Gambaran parameter ionosfer hasil pengukuran dengan ionosonda disebut ionogram. Pancaran sinyal GPS yang mengalami keterlambatan akibat faktor ionosfer juga digunakan untuk menentukan kandungan elektron di ionosfer (*Total Electron Content*, TEC). Pengamatan optik untuk merekam pendaran cahaya di atmosfer (*airglow*) digunakan untuk menggambarkan wilayah yang mengalami ionisasi.

Pengamatan ionosfer di Indonesia dimulai sekitar tahun 1980-an oleh LAPAN. Tujuan utamanya untuk prakiraan frekuensi komunikasi radio HF dan kajian gangguan navigasi serta kajian kopling magnetosfer, ionosfer, dan atmosfer bawah. Stasiun ionosonda dan GPS Receiver ditempatkan di beberapa titik di wilayah Indonesia. Kolaborasi internasional terutama dilakukan dengan mitra Jepang dan Australia. Kolaborasi dengan Universitas Kyoto telah mewujudkan Equatorial Atmospheric Radar (EAR) di Kototabang, Agam. Salah satu fungsi EAR adalah untuk mempelajari kopling ionosfer-atmosfer bawah. Jejaring pengamatan nasional dan global juga memperkuat riset ionosfer. Jejaring penerima GPS oleh BIG (Badan Ionosfer Geospasial) dimanfaatkan untuk pengukuran TEC yang lebih luas. Diharapkan jejaring diperluas secara regional Asia Tenggara dengan kebijakan alih data yang lebih baik.

Beberapa aspek sains antariksa untuk masyarakat sudah dibahas, mulai dari aktivitas Matahari, teleskop radio, sampah antariksa, asteroid, magnetosfer, sampai ionosfer. Selanjutnya beralih pada kajian teknologi antariksa, yaitu roket. Roket adalah wahana peluncur dengan memanfaatkan prinsip kerja teori Newton, yaitu aksi akan menghasilkan reaksi. Prinsip kerja utamanya, ada bahan bakar yang disebut propelan di dalam ruang bakar berbentuk tabung. Propelan yang dibakar menghasilkan gas bertekanan tinggi yang menyembur

melalui nozel atau mulut penyembur. Semburan tersebut merupakan aksi. Selanjutnya roket terdorong maju, itu merupakan reaksinya. Karena daya dorong berasal dari pembakaran propelan saja, roket dapat meluncur dalam kondisi hampa udara seperti di antariksa (Price and Biblarz, 2024).

Secara umum, roket terbagi menjadi tiga bagian. Bagian depan terdiri dari moncong roket dan kompartemen muatan roket serta berbagai sensor kendali. Bagian tengah terdiri dari motor roket. Bagian belakang terdiri dari nozel dan sirip kendali stabilitas aerodinamis. Riset tentang struktur, motor roket, dan kendali stabilitas roket adalah kegiatan utama yang telah lama dilakukan oleh Pusat Riset Teknologi Roket sejak masa LAPAN sampai BRIN saat ini. LAPAN/BRIN berupaya menguasai pengembangan teknologi roket mulai dengan seri RX, Roket Eksperimen, juga dirintis seri RCX (Roket Cair Eksperimen), dan RKX (Roket Kendali Eksperimen).

Bagian krusial dalam sistem propulsi (sistem pendorong) roket adalah bagian nozel atau lubang pelepasan gas panas. Suhu dan tekanan sangat tinggi dialami bagian nozal ini. Itu sebabnya bagian nozel ini sering menjadi sumber kegagalan roket. Untuk mengatasi masalah kegagalan roket karena nozel yang tidak berfungsi saat proses pembakaran propelan dan pelepasan gas panas, maka dikembangkan teknik pelapisan keramik pada nozel. Ada beragam teknik pelapisan nozel yang pernah diujicoba oleh Pusat Riset Teknologi Roket. Teknik pelapisan ini bisa mengurangi dimensi nozel serta meningkatkan kinerjanya.

Ada tiga teknik pelapisan keramik yang biasa dilakukan dengan keunggulan masing-masing, yaitu *Thermal Spray*, *Chemical Vapor Deposition* (CVD), dan *Physical Vapor Deposition* (PVD). Teknik *Thermal Spray* dilakukan dengan memanaskan material pelapis sampai meleleh atau hampir meleleh kemudian disemprotkan pada bagian yang perlu dilapisi. Keunggulan teknik ini adalah bisa memberikan lapisan yang tebal dan tahan panas. Teknik CVD dilakukan dengan memanaskan gas kimia pelapis dengan suhu tinggi. Hasilnya adalah pelapisan yang merata, memiliki kekuatan mekanis, dan tahan suhu

tinggi. Teknik PVD dilakukan dengan menguapkan material pelapis yang menghasilkan lapisan tipis tetapi mempunyai ketahanan tinggi. Masing-masing teknik pelapisan memiliki tantangan tersendiri terkait dengan investasi peralatan dan sumber daya manusianya. Kolaborasi dengan mitra internasional dan industri sangat diperlukan.

Tantangan lain dalam pengembangan roket di Indonesia adalah mewujudkan propelan padat komposit yang andal. Daya jangkau roket dan beban muatan roket menjadi pertimbangan utama dalam perencanaan daya dorong roket. Daya dorong bergantung pada propelan (bahan bakar roket) dan sistem motor roketnya. Secara umum, propelan terdiri dari dua macam: propelan padat dan cair. Saat ini kajian yang ada di Indonesia masih fokus pada pengembangan propelan padat komposit. Dalam pembuatannya, propelan padat menggunakan bahan padat dan cair. Bahan padat adalah Ammonium Perklorat (AP) yang berfungsi sebagai oksidator dan aluminium (Al) yang berfungsi sebagai sumber energi termal. Bahan cair terdiri dari *Hydroxyl Tterminated Polybutadiene* (HTPB) sebagai prepolimer (polimer rantai pendek) dan *Toluene Diisocyanate* (TDI) sebagai pematang. Selain itu, ditambahkan juga bahan lain dalam jumlah sedikit, seperti besi oksida Fe_2O_3 sebagai katalis pembakaran dan bahan pemlastis dioktil adipat (DOA).

Pembuatan propelan dilakukan dengan mencampurkan bahan-bahan baku tersebut dalam mesin pencampur. Dimulai dengan pencampuran HTPB dan Al. Lalu dilanjutkan dengan AP dan disusul TDI. Penambahan setiap bahan dilakukan setelah pencampuran tahap sebelumnya telah homogen. Adonan bahan kemudian dimasukkan ke pencetak dan dipanaskan untuk pemadatan propelan dengan teknik-teknik tertentu. Gambaran pembuatan propelan padat bisa dilihat di akun YouTube BPS Space (2023), walaupun dengan komposisi tambahan yang berbeda. Propelan yang diperoleh kemudian diuji sifat fisisnya dan uji statik untuk mengukur daya dorongnya (impuls spesifik, Isp). Penelitian dilakukan untuk mendapatkan komposisi terbaik yang menghasilkan Isp yang tinggi dengan sifat fisis terbaik. Namun, tantangannya adalah penambahan Al yang secara teoritis

bisa meningkatkan Isp, dalam pengujian tidak selalu meningkatkan Isp. Riset terus dilakukan untuk mendapatkan komposisi propelan yang terbaik.

Untuk mengakhiri bahasan keantariksaan untuk masyarakat di buku ini, diulas masalah pengamatan hilal yang biasanya ramai diperbincangkan menjelang Ramadhan, Idul Fitri, dan Idul Adha. Polemiknya bersumber pada perbedaan pemaknaan hilal (bulan sabit pertama) dari segi dalil fikih (dasar hukum agama) maupun metode penentuan awal bulan qamariyah, khususnya Ramadhan, Syawal, dan Dzulhijjah. Hilal awalnya menjadi dasar observasional (rukyat) penentuan bulan pada kalender Islam. Lalu berkembang ilmu hisab atau perhitungan astronomi untuk menghitung posisi bulan. Saat ini rukyat dan hisab bisa digabungkan sebagai satu kriteria imkan rukyat (kemungkinan terlihatnya hilal) atau secara astronomi disebut kriteria visibilitas hilal.

Dari dalil fikih memang Rasul hanya mengajarkan metode rukyat dalam penentuan awal bulan. Namun ada dalil juga yang dimaknai penentuan awal bulan bisa diprakiraan, salah satunya dengan menghitung posisi bulan. Secara astronomi memang akurasi penentuan posisi bulan saat ini sudah sangat akurat. Karenanya wajar ada pihak yang percaya sepenuhnya pada hasil hisab (perhitungan) tanpa menunggu hasil rukyat (pengamatan). Menarik, pada ulasan disebutkan Rasul yang memerintahkan metode rukyat tidak pernah secara langsung melihat hilal. Ada karena isyarat dari wahyu bahwa bulan telah berakhir. Ada berdasarkan laporan sahabat yang menyaksikan hilal. Ada yang berdasarkan laporan orang Badwi (orang Arab pedalaman). Dan ada yang berdasarkan kesaksi kafilah yang melihat hilal kemarin malam.

Alasan fisis tidak terlihatnya hilal di Madinah, tetapi ada laporan dari orang Badwi dan Kafilah, diulas berdasarkan topografi Madinah yang berbukit di ufuk barat. Akibatnya hilal tidak terlihat oleh Rasul dan para sahabat dari Madinah, tetapi bisa dilihat dari luar Madinah oleh orang Badwi dan kafilah. Ada juga peristiwa dalam hadis yang menyatakan terlihatnya hilal bergantung pada sensitifitas mata

pengamatnya. Ada sahabat yang bisa melihat, namun lainnya tidak bisa melihat. Secara sains, keterlihatan hilal juga bergantung pada kontras hilal yang sangat tipis dengan cahaya senja di latar depan yang masih cukup terang.

Perkembangan teknologi telah menggeser pengamatan hilal dengan mata, baik langsung maupun dibantu teleskop, ke arah deteksi hilal dengan kamera. Saat ini kamera pun dilengkapi dengan filter dan pemroses citra untuk meningkatkan kontras hilal. Citra kamera pun bisa ditumpuk beberapa puluh atau bahkan beberapa ratus citra untuk mempertajam ketampakan hilal (Djamaluddin, 2022). Hasil hisab dengan kriteria visibilitas hilal diharapkan makin mendekati dengan hasil rukyat dengan teknik fotografi hilal yang dibantu olah citra. Dengan demikian kriteria imkan rukyat atau visibilitas hilal makin diterima sebagai metode titik temu bagi pengamal rukyat dan pengamal hisab.

Daftar Pustaka

- BPS Space. (2023). "Mixing and casting rocket propellant - simplex ep 2". <https://www.youtube.com/watch?v=E0bnPb1WIuc>
- Buis, A. (2021). "Earth's magnetosphere: Protecting our planet from harmful space energy". <https://science.nasa.gov/science-research/earth-science/earths-magnetosphere-protecting-our-planet-from-harmful-space-energy/>
- Celestrak. (2009). "Iridium 33/Cosmos 2251 Collision". <https://celestrak.org/events/collision/>
- Djamaluddin, T. (2022). "Mengkaji "Hilal Syar'i" secara astronomi". <https://tdjamaluddin.wordpress.com/2022/05/07/mengkaji-hilal-syari-secara-astronomi/>
- IPS. (tt). "Introduction to HF radio propagation". <https://www.sws.bom.gov.au/Category/Educational/Other%20Topics/Radio%20Communication/Intro%20to%20HF%20Radio.pdf>
- Jones, T. (2011). Clear link between solar activity and winter weather revealed. <https://phys.org/news/2011-10-link-solar-winter-weather-revealed.html>

- Koberlein, B. (2020). "The tunguska explosion could have been caused by an asteroid that still orbits the sun". <https://www.universetoday.com/146111/the-tunguska-explosion-could-have-been-caused-by-an-asteroid-that-still-orbits-the-sun/>
- Lutz, O. (2019). How scientists captured the first image of a black hole. <https://www.jpl.nasa.gov/edu/news/2019/4/19/how-scientists-captured-the-first-image-of-a-black-hole/>
- Price, E. W. and Biblarz. (2024). "Rocket". Encyclopedia britannica. <https://www.britannica.com/technology/rocket-jet-propulsion-device-and-vehicle>
- Uri, J. (2023). 115 years ago: the tunguska asteroid impact event. <https://www.nasa.gov/history/115-years-ago-the-tunguska-asteroid-impact-event/>

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Glosarium

Ablasi	: Proses pengikisan material dari permukaan nosel akibat paparan suhu tinggi dan tekanan yang ekstrem selama pembakaran bahan bakar roket.
Al	: Aluminium yang akan dibakar saat terjadi pembakaran dengan oksigen dari AP
Amonium perklorat	: Bahan kimia padat sebagai sumber oksigen
Amor	: Kelompok Asteroid Dekat Bumi dengan sumbu semimayor > 1.0 sa dan jarak perihelion 1.017 sa < 1.3 sa.
Angin Matahari	: Plasma Matahari di antariksa yang didominasi oleh ion H^+ dan He^{++} dan dapat diukur dengan empat variabel utama yaitu densitas, kecepatan, temperatur, dan medan magnet.

Annealing	: Proses perlakuan panas yang digunakan untuk mengubah sifat fisik dan kadang-kadang kimia bahan untuk meningkatkan keuletan dan mengurangi kekerasan, sehingga membuat bahan lebih mudah untuk dikerjakan.
Aphelion	: Titik pada garis edar suatu planet yang terjauh dari Matahari.
Apollo	: Kelompok Asteroid Dekat Bumi dengan sumbu semimayor 1.0 sa dan jarak perihelion 1.017 sa .
Arus cincin	: Lapisan yang akan muncul di magnetosfer bagian dalam selama badai magnet dan memberikan kontribusi signifikan terhadap gangguan karakteristik medan magnet Bumi yang diamati di garis lintang rendah.
Aten	: Kelompok Asteroid Dekat Bumi dengan sumbu semimayor $> 1.0 \text{ sa}$ dan jarak aphelion $> 0.983 \text{ sa}$.
Atira	: Kelompok Asteroid Dekat Bumi dengan sumbu semimayor $< 1.0 \text{ sa}$ dan jarak aphelion $< 0.983 \text{ sa}$.
Badai geomagnet	: Gangguan pada magnetosfer Bumi yang terjadi yang disebabkan oleh gelombang kejut angin Matahari
Bipolar	: Memiliki dua kutub
Bow shock	: Lapisan yang terbentuk sebagai gelombang kejut akibat interaksi angin Matahari dan medan magnet Bumi.
Casting	: Proses pencetakan adonan propelan menjadi bentuk yang diinginkan
Chemical Vapor Deposition	: Teknik pelapisan yang melibatkan reaksi kimia gas prekursor pada permukaan substrat untuk membentuk lapisan tipis material.

Coring	: Proses pemasukan mandrel kedalam adonan yang sudah penuh dalam cetakan
Coronal Mass Ejection	: Peristiwa terlontarnya plasma dan medan magnet dari matahari dalam jumlah besar yang seringkali berasosiasi dengan prominensa atau flare.
Co-rotating Interaction region	: Interaksi angin Matahari berkecepatan tinggi dengan angin Matahari yang lebih lambat.
CORS (Continuously Operating Receiver Station)	: Stasiun receiver GNSS yang beroperasi secara kontinu dan digunakan untuk mendukung pengukuran geodesi, navigasi, dan aplikasi lain yang membutuhkan data GNSS yang akurat.
Cuaca Antariksa	: Kondisi lingkungan antariksa di sekitar Bumi yang dipengaruhi oleh aktivitas Matahari, termasuk dampaknya pada angin Matahari, magnetosfer, dan lapisan ionosfer.
Curing	: Proses pematangan adonan ke dalam oven (pemanas) agar padat
Decoring	: Proses pelepasan mandrel dari propelan hasil, setelah selesai proses curing
Deposisi	: Perubahan fase di mana gas berubah menjadi padat tanpa melewati fase cair
Difraksi	: Fenomena fisika ketika gelombang (seperti cahaya, suara, atau gelombang radio) menyebar atau membelok ketika melewati celah atau penghalang.
Divergen nosel	: Bagian nosel yang melebar ke arah luar roket, berfungsi untuk mempercepat gas buang hingga mencapai kecepatan supersonik.
DOA	: Bahan kimia cair yang berfungsi memudahkan campuran menuju homogen dalam proses pembuatan

<i>Echo</i>	: Gelombang yang dipantulkan kembali setelah mengenai permukaan atau penghalang tertentu. Dalam konteks komunikasi atau radar, echo ini digunakan untuk mendeteksi jarak atau karakteristik objek yang memantulkan sinyal.
EIA (<i>Equatorial Ionization Anomaly</i>)	: Fenomena terkumpulnya konsentrasi elektron maksimum pada lapisan ionosfer yang membentuk dua puncak ionisasi di kedua sisi ekuator magnetik Bumi (sekitar 15o lintang magnetik).
Eksentrisitas	: Rasio antara jarak fokus dan sumbu semi-mayor orbit (menggambarkan kelengkungan orbit terhadap pusat sistem).
Electroplating	: Proses pelapisan permukaan suatu objek dengan lapisan tipis logam menggunakan arus listrik.
Epoch	: Sebuah masa atau waktu tertentu.
Flare	: Peristiwa peningkatan intensitas radiasi pada berbagai panjang gelombang yang berlangsung sangat kuat dan cepat di atmosfer Matahari.
Fotoionisasi	: Proses ketika atom atau molekul menyerap foton dan melepaskan elektron serta menghasilkan ion.
Foton	: Partikel elementer cahaya dan semua bentuk lain dari radiasi elektromagnetik. Foton memiliki energi dan momentum tetapi tidak memiliki massa.
Fotosfer	: Lapisan luar matahari atau bintang yang tampak bulat putih berpijar dan sinarnya sangat menyilaukan

Gelombang atmosfer	: Gelombang yang dihasilkan pada atmosfer Bumi akibat berbagai proses gangguan, termasuk perubahan suhu, tekanan, dan angin.
Gelombang elektromagnetik	: Gelombang yang terdiri dari medan listrik dan magnetik yang berosilasi dan merambat melalui ruang. Contoh gelombang elektromagnetik meliputi cahaya, sinar X, gelombang radio, dan sinar gamma.
<i>Geostationary Earth Orbit</i>	: Orbit satelit yang memiliki ketinggian lebih besar dari 35.780 km
Global Positioning System	: Sistem navigasi satelit yang dikembangkan oleh Amerika Serikat, yang memungkinkan pengguna di seluruh dunia menentukan posisi geografis dengan presisi tinggi menggunakan sinyal dari satelit GPS.
GNSS (<i>Global Navigation Satellite System</i>)	: Sistem navigasi satelit global yang memungkinkan pengguna menentukan posisi geografis dengan presisi tinggi menggunakan sinyal dari beberapa satelit. Contoh GNSS adalah GPS, GLONASS, Galileo, dan BeiDou.
Grain	: Bentuk permukaan dalam propelan yang dibentuk oleh mandrel
<i>High Speed Stream</i>	: Angin Matahari dengan kecepatan tinggi yang berasal dari lubang korona.
HTPB	: Bahan kimia cair kental berfungsi untuk merekatkan campuran
Indeks AE	: Indeks untuk mengukur aktivitas elektrojet global di zona aurora yang dihasilkan oleh peningkatan arus ionosfer yang mengalir di bawah dan di dalam daerah aurora.

Indeks Dst	: Indeks untuk mengukur gangguan di lintang rendah yang dihitung dari rata-rata komponen horizontal medan magnet dari empat stasiun lintang rendah.
Indeks K	: Indeks K adalah pengukuran aktivitas geomagnetik dengan periode 3 jam-an dari data komponen H.
Indeks Kp	: Rata-rata indeks K dari 13 stasiun pengamatan di lintang menengah.
Inklinasi	: Sudut antara bidang orbit dengan bidang ekliptika (atau bidang referensi lain)
<i>International Sunspot Number</i>	: Nilai harian dari jumlah bintik matahari yang tersedia dari stasiun-stasiun di jaringan SILSO
Ionosfer	: Lapisan atmosfer bumi yang tingginya mulai dari 50–1.000 km yang merupakan lapisan yang terdiri atas ion-ion bebas yang dihasilkan oleh radiasi matahari
Iregularitas ionosfer	: Ketidakteraturan distribusi kerapatan elektron di ionosfer, yang dapat memengaruhi propagasi sinyal radio dari satelit, pada skala spasial tertentu fenomena ini dapat menyebabkan fenomena sintilasi dan gangguan komunikasi.
Julian Date	: Hitungan hari berkesinambungan sejak awal periode Julian
Konvergen nosel	: Bagian nosel yang menyempit, berfungsi untuk mengarahkan aliran gas buang ke throat.
Koordinat	: Koordinat bujur dan lintang Matahari heliografik

<i>Low Earth Orbit</i> (LEO)	: Orbit satelit yang memiliki ketinggian antara 180 km sampai 2.000 km
Lubang korona	: Daerah di korona matahari yang terlihat lebih gelap karena memiliki temperatur dan densitas plasma lebih rendah dibandingkan dengan lingkungan di sekelilingnya dan terbuka menuju heliosfer.
Magnetometer	: Instrumen yang dapat mengamati perubahan fisis suatu medan magnet secara <i>real time</i> .
Magnetopause	: Lapisan di Magnetosfer luar dimana terdapat keseimbangan tekanan antara angin Matahari dan medan magnet Bumi.
Magnetosfer	: Lapisan medan magnet yang menyelubungi Bumi sebagai hasil interaksi angin Matahari dan medan magnet Bumi.
Magnetotail	: Lapisan Magnetosfer bagian malam yang dapat memanjang hingga ratusan radius Bumi.
Mandrel	: Benda pembentuk permukaan dalam silinder propelan
McLube	: Pelumas agar mandrel mudah dicopot dari propelan
Medan magnet antar-planet	: Komponen dari medan magnet Matahari yang dibawa oleh angin Matahari menyelimuti Tata Surya.
Medan magnet Bumi	: Medan magnet yang memiliki polaritas positif di utara Bumi dan polaritas negatif di selatan Bumi berasal dari interaksi atom inti Bumi dan meluas ke antariksa, berinteraksi dengan angin Matahari membentuk Magnetosfer.
<i>Medium Earth Orbit</i> (MEO)	: Orbit satelit yang memiliki ketinggian antara 2.000 km sampai 35.780 km

<i>Mixing</i>	: Proses pencampuran bahan baku propelan
Nosel	: Lubang keluaran gas buang pada motor roket, dengan bentuk tertentu
Penumbra	: Bayangan samar-samar di sekeliling umbra
Perihelion	: Titik pada garis edar suatu benda langit yang terdekat ke Matahari.
<i>Physical Vapor Deposition</i>	: Teknik deposisi uap fisik melibatkan penguapan material pelapis yang kemudian mengendap pada substrat
Plasmasheet	: Lapisan di Magnetosfer dalam yang memiliki plasma dengan densitas rendah, terdiri dari ion dan elektron dari angin Matahari.
Plasmasphere	: Lapisan di Magnetosfer dalam yang terdiri dari partikel berenergi rendah yang bergerak dari ionosfer.
Propelan	: Bahan bakar roket , terbuat dari campuran beberapa komponen, bisa dibentuk silinder
Propulsi	: Proses menghasilkan gaya dorong dengan mengeluarkan material propelan
Radiasi elektromagnetik	: Radiasi yang muncul akibat kombinasi antara medan magnet dan juga medan listrik
Radio HF	: <i>High Frequency</i> , Frekuensi radio dengan rentang dari 3 hingga 30 MHz, yang sering digunakan untuk komunikasi jarak jauh karena gelombangnya dapat dipantulkan oleh ionosfer.
Radioaktif	: Partikel yang dipancarkan dari inti sebagai akibat dari ketidakstabilan nuklir
Rotasi diferensial	: Rotasi <i>sunspot</i> yang memiliki kecepatan yang berbeda-beda berdasarkan lintang Matahari

Sabuk radiasi van allen	: Lapisan di Magnetosfer dalam yang terdiri dari partikel berenergi tinggi terperangkap di dua wilayah, yaitu sabuk radiasi luar yang didominasi elektron dan sabuk radiasi dalam yang didominasi proton dan neutron.
Scattering	: Proses ketika gelombang atau partikel menyebar setelah bertabrakan dengan partikel lain atau penghalang.
Sintilasi	: Fluktuasi pada amplitudo dan fase sinyal radio yang disebabkan oleh iregularitas ionosfer.
Skala Palermo	: Sebuah skala yang lebih kompleks yang digunakan untuk menilai potensi bahaya dari tabrakan objek dekat Bumi dengan Bumi nilainya dapat berupa negatif atau positif.
Skala Torino	: Sebuah skala yang digunakan untuk mengukur risiko tabrakan antara objek dekat Bumi dan Bumi yang berkisar dari 0 hingga 10.
Solar Energetic Particle	: Proton dengan energi yang mencapai ratusan MeV dan memiliki kecepatan yang lebih tinggi dibanding partikel di antariksa.
Solar <i>zenith angle</i>	: Sudut antara garis tegak lurus permukaan Bumi dan garis yang mengarah langsung ke sinar Matahari.
Sumbu semimayor	: Panjang setengah diameter orbit elips.
Sunspot Number	: Nilai numerik arbitrer yang digunakan untuk mendeskripsikan bintik matahari yang bergantung pada peralatan dan persamaan pribadi pengamat
Sunspot	: Bintik di permukaan Matahari yang terbentuk karena pengaruh medan magnet yang kuat

TDI	: Bahan kimia cair yang dengan HTPB bisa bereaksi menghasilkan polimer yang makin lama makin kental, sehingga TDI dan HTPB bisa membungkus komponen penyusun propelan, menjadi padat
Throat nosel	: Bagian nosel yang paling sempit, di mana gas buang mengalami percepatan hingga kecepatan sonic
Umbra	: Bagian gelap pada bintik matahari
Unipolar	: Memiliki satu kutub
Variabilitas	: Tingkat perubahan dalam suatu sistem atau proses dari waktu ke waktu. Dalam konteks atmosfer dan ionosfer, variabilitas merujuk pada fluktuasi kondisi besaran tertentu seperti suhu, tekanan, dan kerapatan elektron.
<i>Vertical sounding</i>	: Teknik pengukuran yang digunakan untuk menentukan profil vertikal dari suatu parameter ionosfer dengan cara memancarkan sinyal ke atas dan menganalisis pantulan sinyalnya.
Wolf Number	: Indeks yang digunakan untuk karakterisasi tingkat aktivitas <i>sunspot</i>

Daftar Singkatan

Al	: Aluminium
AP	: Ammonium perklorat
ATLAS	: Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System.
BIG	: Badan Informasi Geospasial
BRIN	: Badan Riset dan Inovasi Nasional)
CIR	: Co-rotating Interaction Region
CME	: Coronal Mass Ejection
CME	: Coronal Mass Ejection
CORS	: <i>Continuously Operating Receiver Station</i>
CPEA	: <i>Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere</i>
CRL	: <i>Communication Research Laboratory</i>
CSS	: Catalina Sky Survey
DART	: Double Asteroid Redirection Test.
DOA	: Dioktil adipat

EAR	: <i>Equatorial Atmosphere Radar</i>
EIA	: <i>Equatorial Ionization Anomaly</i>
ERICA	: <i>Equatorial Ionosphere Characterization in Asia</i>
EUV	: <i>Extreme Ultraviolet</i>)
f	: jumlah umbra dan penumbra
Fh	: Nilai F hitung
Ft	: Nilai F tabel
g	: jumlah grup <i>sunspot</i>
GEO	: Geostationary Earth Orbit
Gi	: jumlah kelompok <i>sunspot</i> yang teramati oleh pengamat <i>i</i>
GN	: Sunspot Group Number
GNSS	: <i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	: <i>Global Positioning System</i>
HF	: <i>High Frequency</i>
HSS	: High Speed Stream
HTPB	: Hydroxyl terminated polybutadiene
IAU	: International Astronomical Union
IMF	: Interplanetary Magnetic Field
ISN	: International Sunspot Number
Isp	: Impuls Spesifik
ITB	: Institut Teknologi Bandung
IUGG	: International Union of Geodesy and Geophysics
JPL	: Jet Propulsion Laboratory.
JSTIMI	: <i>Joint Spatio-Temporal Ionospheric Mapping Initiative</i>
k	: koefisien pengamat
ki	: faktor koreksi pengamat ke- <i>i</i>
LAPAN	: Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional)
LEO	: Low Earth Orbit

LINEAR	: Lincoln Near-Earth Asteroid Research
MEO	: Medium Earth Orbit
MF	: <i>Medium Frequency</i>
MIA	: Magnetosfer Ionosfer Atmosfer)
MLT	: <i>Mesosphere and Lower Thermosphere</i>
MWR	: <i>Meteor Wind Radar</i>
NEA	: Near Earth Asteroid
NEO	: Near Eart Object.
NEOWISE	: Near-Earth Object Wide-field Infrared Survey Explore.
OSIRIS-REx	: Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, Security, Regolith Explorer.
Pan-STARRS	: Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System.
PDCO	: Planetary Defense Coordination Office.
R	: nilai SN
RG	: Nilai jumlah grup relative
SA	: Satuan Astronomi.
SBDL	: Small Bodies Database Lookup.
SEALION	: <i>South-east Asia low-latitude ionospheric network</i>
SEP	: Solar Energetic Particle
SIDC	: Sunspot Index Data Center
SILSO	: Sunspot Index and Long-term Solar Observations
SN	: Sunspot Number SN
SOON	: Solar Observing Optical Network
TDI	: Toluene diisocyanate
TEC	: <i>Total Electron Content</i>)
TNT	: Trinitrotoluena.
URSI	: International Union of Radio Sciences
USAF	: U.S. Air Force

VHF	: <i>Very High Frequency</i>
WDC	: World Data Center
WISE	: Wide-field Infrared Survey Explorer
ZSN	: Zurich Sunspot Number

Indeks

- ablasi, 15, 254, 257
- Al_2O_3 , 265, 270, 271, 277, 278, 283, 308
- aluminium, 117, 118, 261, 263, 273, 276, 286, 288, 292, 294, 297, 308, 311, 356, 361
- American Sunspot Number, 41
- anava, 302, 306, 307, 311
- andal, 16, 17, 18, 286, 291, 294, 296, 298, 299, 300, 301, 309, 356
- angin matahari, 183, 184, 185, 186, 188, 189, 193, 194, 195, 213, 214, 215, 228, 230, 352
- annealing, 261
- AP, 286, 287, 288, 292, 309, 310, 356, 361, 371
- arc spray, 274, 275, 279
- arus cincin, 186, 194, 195
- Atomic Layer Deposition, 270
- badai geomagnet, 12, 24, 55, 183, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 194, 207, 208, 212, 213, 380, 381
- bahan bakar roket, 128, 129, 265, 356, 361
- baja karbon, 256
- bow shock, 184, 185, 217, 220
- BRIN, 1, 8, 14, 15, 17, 23, 25, 39, 45, 46, 47, 48, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 59, 71, 83, 105, 130, 132, 133, 134, 147, 181, 197, 200, 201, 214, 223, 235, 239, 251, 254, 256, 257, 272, 278, 279, 285, 288, 313, 343, 344, 346, 347, 350, 353, 355, 371, 379, 383, 384, 385, 387, 388, 389, 390, 392, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402

casting, 261, 288, 301, 310, 358
 CCD, 20, 43, 53, 134, 333, 334, 394
 cold spray, 276, 277, 279
 coring, 288, 301, 310
 Coronal Mass Ejection, 24, 188,
 352, 363, 371
 Co-rotating Interaction region, 363
 curing, 300, 301, 310, 363
 decoring, 288, 301, 310
 densitas, 17, 96, 182, 183, 186, 228,
 230, 263, 264, 276, 290, 291,
 292, 293, 294, 300, 301, 305,
 310, 311, 361, 367, 368
 deposisi, 15, 254, 255, 260, 261,
 265, 267, 268, 269, 270, 271,
 275, 368
 Detonation Gun Spray, 277
 DOA, 287, 356, 364, 371
 electroplating, 259, 260
 evaporation, 263
 flame spray, 273, 279
 flare, 24, 30, 188, 191, 193, 206, 213,
 343, 345, 352, 363
 gaya dorong, 251, 252, 311, 312,
 368
 gelap-terang, 293, 302, 309, 328,
 329
 Geostationary Earth Orbit (GEO),
 207
 grafit, 256, 272
 group sunspot, 49
 High-Velocity Oxy-Fuel (HVOF)
 Spray, 276
 homogen, 18, 95, 266, 287, 288,
 292, 293, 294, 298, 299, 301,
 305, 306, 307, 356, 364
 HTPB, 287, 292, 294, 295, 309, 310,
 356, 365, 370, 372
 impuls, 17, 290, 293, 294, 308, 309,
 311, 356
 indeks Dst, 190, 192, 193, 194, 195
 indeks K, 366
 indeks Kp, 192
 International Union of Radio Sci-
 ences, 37, 346, 373, 374
 ISN, 38, 39, 40, 42, 372
 Isp, 18, 288, 290, 293, 294, 295, 296,
 299, 305, 309, 310, 311, 356,
 357, 372
 Julian Date, 49, 51, 366
 kekerasan, 17, 260, 261, 264, 265,
 266, 267, 268, 269, 271, 272,
 273, 290, 291, 292, 293, 310,
 362
 ketahanan korosi, 261
 ketahanan termal, 259, 261, 267,
 270, 274
 kinerja, 16, 17, 18, 114, 207, 233,
 257, 258, 260, 261, 267, 271,
 272, 273, 275, 279, 283, 286,
 288, 290, 292, 293, 294, 299,
 309, 310, 311, 348
 klasifikasi McIntosh, 34
 klasifikasi Zurich, 32, 34, 49
 korelasi, 67, 307, 311
 linier, 307, 308, 309, 311
 Low Earth Orbit (LEO), 207, 367

- magnetometer, 197, 198, 199, 200, 201, 238, 353
- magnetopause, 184, 185, 186, 215, 217
- magnetosfer, 14, 183, 184, 185, 187, 188, 189, 191, 194, 203, 205, 206, 207, 211, 213, 214, 215, 216, 228, 229, 230, 238, 239, 352, 353, 354, 362, 363, 380, 394, 399
- magnetotail, 184, 186, 187, 216, 352
- magnetron sputtering, 262
- mandrel, 17, 288, 296, 297, 298, 301, 310, 312, 363, 365, 367
- material keramik, 257, 264, 275
- material komposit, 257
- medan magnet antar-planet, 184
- medan magnet bumi, 194, 195, 199, 200, 201, 203, 206, 228, 352, 353
- Medium Earth Orbit (MEO), 207, 368
- mixing, 17, 288, 310
- muatan roket, 252, 355, 356
- nosel roket, 14, 15, 252, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 281
- periode, 27, 30, 86, 117, 135, 183, 191, 231, 236, 254, 295, 296, 308, 310, 311, 318, 344, 352, 366
- Physical Vapor Deposition (PVD), 15, 257, 260, 261, 279, 355
- plasma sheet, 186, 187
- plasma sphere, 185
- plasma spray, 257, 275, 277, 279
- propelan, 16, 17, 18, 251, 252, 254, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 305, 308, 309, 310, 311, 312, 354, 355, 356, 357, 362, 363, 365, 367, 368, 370
- propulsi, 16, 252, 254, 256, 279, 286, 309, 355
- Pulsed Laser Deposition (PLD), 264
- radiasi elektromagnetik, 207, 364
- radioaktif, 117, 182
- regresi, 18, 307, 309
- roket, 2, 4, 6, 7, 13, 14, 15, 16, 18, 106, 107, 109, 110, 111, 112, 115, 117, 119, 126, 128, 129, 130, 139, 140, 225, 232, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 281, 285, 286, 288, 289, 290, 298, 299, 309, 310, 311, 312, 348, 349, 354, 355, 356, 361, 363, 368, 402, 403
- sinar-x, 290, 293, 294, 299, 301, 302, 311, 312
- solar energetic particle, 217
- sputtering, 262, 280, 281, 282
- stainless steel, 117, 261, 274
- substrat nosel, 255, 256, 267, 268, 273, 276, 277

suhu, 15, 17, 137, 194, 209, 251,
 254, 257, 258, 259, 260, 261,
 262, 263, 264, 265, 267, 268,
 269, 270, 271, 274, 275, 276,
 277, 279, 288, 310, 355, 361,
 365, 370
sunspot, 8, 9, 24, 25, 26, 27, 28, 29,
 30, 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38,
 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 48,
 49, 50, 51, 52, 55, 56, 57,
 343, 344, 369, 370, 372
 Sunspot Index and Long-term Solar
 Observations, 38, 346, 373,
 374
 Sunspot Index Data Center, 37, 373,
 374
 TDI, 287, 288, 292, 294, 295, 310,
 356, 370, 373, 374
 tekanan, 15, 23, 92, 93, 115, 117,
 155, 176, 185, 215, 251, 252,
 254, 257, 260, 261, 269, 277,
 279, 288, 297, 311, 355, 361,
 365, 367, 370
 thermal spray, 259, 273, 275, 276,
 277, 278, 279
 uji statik, 18, 293, 309, 356
 waktu, 12, 16, 17, 19, 20, 21, 23, 26,
 27, 29, 30, 39, 40, 42, 43, 44,
 48, 49, 51, 55, 64, 65, 79, 80,
 81, 82, 106, 114, 116, 121,
 123, 126, 133, 134, 152, 153,
 156, 158, 159, 160, 161, 162,
 163, 164, 170, 172, 175, 183,
 185, 187, 188, 194, 200, 202,
 211, 215, 224, 227, 231, 235,
 239, 242, 270, 286, 287, 288,
 291, 295, 311, 313, 314, 315,
 317, 318, 319, 320, 321, 322,
 326, 345, 352, 364, 370, 387,
 404, 405
 World Data Center, 37, 374
 --

Tentang Editor



Thomas Djamaluddin

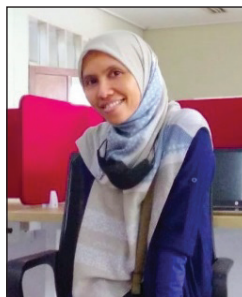
Thomas Djamaluddin, seorang Peneliti Ahli Utama/Profesor Riset Astronomi Astrofisika, LAPAN/BRIN (2009–sekarang). Beliau pernah menjabat sebagai Kepala LAPAN (2014–2021), Deputy Sains, LAPAN (2011–2014), Kepala Pusat Pemanfaatan Sains Atmosfer dan Iklim, LAPAN, Kepala Bidang Matahari dan Antariksa, LAPAN dan Kepala Komputer Induk, LAPAN. Dengan bekal pendidikan S-1 Astronomi ITB (AS '81) S-2 dan S-3 Astronomi Universitas Kyoto, Jepang, Thomas Djamaluddin banyak melakukan kegiatan riset dalam bidang astronomi, seperti struktur galaksi, materi antar bintang, pembentukan bintang, hubungan antariksa – bumi, astronomi untuk masyarakat, dan etnoastronomi. Telah banyak

Buku ini tidak diperjualbelikan.

juga penghargaan yang diperolehnya, seperti penghargaan sebagai profesor riset 2009, penghargaan Elshinta 2012, penghargaan terbaik I Diklatpim II 2007, penghargaan Sarwono 2013 (LIPI), penghargaan Ganesa Widya Jasa Adiutama 2015 (ITB), dan lain-lain. Selain itu, Thomas Djamaluddin sempat menjadi perwakilan beberapa kegiatan internasional seperti International Conference: Jordan (1998), Jepang (2002, 2005, 2007), AS (2002), Slovakia (2003), Rusia (2014), Anggota delegasi RI: APRSAF (Jepang 2005, India 2007, Vietnam 2008 & 2013, Thailand 2010, Australia 2010, Singapura 2011), WMO (Swiss 2009), UNCOPUOS (Austria 2011, 2012, 2013), Studi banding (Brazil 2012), Ketua Delegasi RI: APRSAF (Jepang 2014, Filipina 2016, India 2018, Jepang 2019), UNCOPUOS (Austria 2014 – 2019), UNESCAP (Thailand 2014 – 2019), CSTEAP (India 2011, 2012), RCSTEAP (RRT 2014), Space Agency Summit (Meksiko, 2015), GSTC (Singapura 2017, 2018), IAF (2017), Space Dialog (AS 2019), Bilateral (RRT 2015 & 2019, Prancis 2016, Korea 2016, Jerman 2017), dan menjadi First Vice Chairman UNCOPUOS (2019).

Editor dapat dihubungi melalui surel: thom001@brin.go.id dan t_djamal@yahoo.com

Fitri Nuraeni



Editor adalah seorang Peneiti Ahli Muda di bidang geomagnet. Dengan latar belakang pendidikan S-1 Geofisika ITB dan S-2 sains Kebumihan ITB, Fitri Nuraeni mengembangkan riset-risetnya dan menghasilkan berbagai karya tulis mengenai efek termal dalam medan magnet magnetosfer satelit LAPAN, arus ionosferik ekuivalen pada berbagai level badai geomagnet, Fenomena Medan

Magnet Antariksa berdasarkan Satelit LAPAN-A3, Karakteristik Fluks Elektron Akibat Pengaruh Fenomena di Matahari, Model Prediksi

Indeks Dst untuk Cuaca Antariksa, Pengembangan model prediksi badai geomagnet Indonesia berbasis multi input (CME dan Coronal Hole, Solar wind, IMF), Development of Coronal Holes Index For Study of Coronal Hole Geo Effectiveness, Low-Latitude Fluctuation of Ionospheric Magnetic Field Measured by LAPAN-A3 Satellite , dan sebagainya. Selain itu, editor aktif di beberapa kegiatan seminar maupun simposium internasional.

Editor dapat dihubungi melalui surel: fitrinur.fn@gmail.com dan fitr008@brin.go.id

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Tentang Penulis

Silmie Vidiya Fani



Silmie Vidiya Fani memulai karirnya pada tahun 2014 sebagai perekayasa di Balai LAPAN Biak yang saat ini menjadi BRIN Biak. Pekerjaan yang ditekuni saat itu terkait dengan operasional stasiun bumi untuk mengakomodasi akuisisi data satelit LAPAN dan juga data penginderaan jauh. Pada tahun 2018 melanjutkan studi Pasca Sarjana di Institut Sepuluh Nopember (ITS) jurusan Sistem Informasi dan menamatkannya tahun 2020. Pada tahun 2021, Silmie sapaan akrabnya bergabung dengan BRIN Pasuruan. Pekerjaan yang ditekuni saat itu terkait operasional akuisisi data Antariksa dan Atmosfer salah satunya adalah pengamatan Matahari. Tahun 2023, Silmie bergabung dengan Pusat Riset Antariksa BRIN dan bergabung dengan kelompok riset DILAN (Dinamika

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Lingkungan Antariksa). Karya terakhir yang telah dipublikasikan berjudul “U-Net Based Water Region Segmentation for LAPAN-A2 MSI”. Penulis dapat dihubungi melalui surel: silm001@brin.go.id dan fani.vidiya@gmail.com

Rian Pramudia Salasa



Seorang periset di Pusat Riset Antariksa, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang memiliki pengalaman dalam melakukan pengamatan Matahari lebih dari sembilan tahun. Pada tahun 2009, Rian memperoleh gelar sarjana Ilmu Komputer di Universitas Gadjah Mada. Pria yang kini berusia 37 tahun ini sempat menjadi *system engineer* di salah satu Bank BUMN. Rian kemudian beralih menjadi perekayasa di LAPAN dan aktif dalam pengoperasian teleskop dan berbagai peralatan pengamatan lainnya. Pada tahun 2020, pria kelahiran Bali ini memperoleh gelar Magister Ilmu Komputer di Universitas Indonesia. Rian juga sering terlibat dalam berbagai kegiatan riset di bidang Matahari, atmosfer, lingkungan antariksa serta sains data. Penulis dapat dihubungi melalui surel: rian010@brin.go.id

Siska Filawati



Penulis merupakan peneliti dengan bidang kepakaran Fisika Plasma. Penelitian berfokus pada pengaruh Angin Matahari dan Magnetosfer Bumi serta Sabuk Radiasi Elektron. Selain itu, penulis mengembangkan penelitian pengaruh Sabuk Radiasi Elektron terhadap kondisi Ionosfer, dengan memanfaatkan data pengamatan yang dimiliki BRIN dan data dari instansi terkait. Penulis

juga mengembangkan perhitungan komputasi dan simulasi Angin Matahari-Magnetosfer-Ionosfer yang telah dikembangkan sebelumnya. Karya terakhir yang dipublikasikan berjudul Two-dimensional MHD Simulation of The Earth's Magnetosphere tahun 2023. Penulis dapat dihubungi melalui surel: sisk005@brin.go.id

Farahhati Mumtahana



Farahhati Mumtahana lahir di kota Yogyakarta pada tahun 1990. Setelah menyelesaikan studi Sarjana Astronomi di ITB pada tahun 2012, ia bekerja sebagai peneliti di Pusat Sains Antariksa, LAPAN, yang saat ini bernama Pusat Riset Antariksa, ORPA, BRIN. Melalui beasiswa LAPAN, Farahhati melanjutkan pendidikan Magister Astronomi di ITB dan lulus pada tahun 2021. Saat ini, ia terlibat dalam berbagai penelitian, termasuk pengolahan data teleskop radio dan studi quiescent filament Matahari, dengan minat pada objek Tata Surya. Ia juga berperan sebagai salah satu forecaster untuk memprediksi aktivitas cuaca antariksa harian dalam program SWIFTS.

Selain menulis artikel ilmiah, ia juga memiliki minat pada edukasi Astronomi, salah satunya disalurkan dengan menulis beberapa artikel sains populer yang pernah diterbitkan di Buletin Cuaca Antariksa. Salah satu topik penelitian yang dikerjakan saat ini adalah pemanfaatan data teleskop radio ALMA, yang bertujuan untuk memahami kondisi atmosfer icy-giant planets dari pengamatan millimeter/submillimeter.

Penulis dapat dihubungi melalui surel: fara006@brin.go.id dan karya lainnya dapat dilihat pada https://scholar.google.co.id/citations?hl=en&user=YX6oKV8AAAAJ&view_op=list_works&sortby=pubdate

Ibnu Nurul Huda



Ibnu Nurul Huda merupakan salah satu peneliti yang berfokus di bidang Astronomi dan Geodesi. Ia memperoleh gelar Doktor di Paris Observatory, Prancis, pada tahun 2019. Setelah itu, ia juga memiliki pengalaman bekerja sebagai peneliti postdoctoral di Institut Teknologi Bandung (2019) dan Nanjing University, China (2024). Saat ini ia bekerja sebagai salah satu peneliti di Badan Riset dan Inovasi

Nasional. Ibnu tertarik dengan berbagai bidang yang berhubungan dengan astronomi dan geodesi, diantaranya rotasi Bumi, reference frames, VLBI, dan mekanika benda langit. Karya-karyanya dapat dilihat pada tautan berikut: <https://scholar.google.com/citations?user=06Mbnf4AAAAJ&hl=ja&oi=ao>

Sahlan Ramadhan



Sahlan Ramadhan lahir di Jakarta pada tahun 1993. Ia lulus dari program studi Sarjana Astronomi ITB pada tahun 2016 dan program studi Magister Astronomi ITB pada tahun 2021. Topik penelitiannya adalah astronomi radio. Selama menjadi mahasiswa, ia juga aktif di Observatorium Bosscha sebagai edukator astronomi sekaligus sebagai asisten peneliti. Saat ini, ia melanjutkan studi Doktornya dalam bidang

astronomi radio di Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, di kota Mito, Prefektur Ibaraki, Jepang. Penulis dapat dihubungi melalui surel: ramadhan.sahlan@gmail.com

Retno Dyah Hapsari



Retno Dyah Hapsari adalah lulusan program sarjana Astronomi Institut Teknologi Bandung yang memiliki minat pada alam semesta sejak usia sekolah. Impiannya tercapai menjadi sarjana sains dari Program Studi Astronomi Institut Teknologi Bandung pada tahun 2012. Dalam menyelesaikan studinya, ia terlibat dalam pengembangan salah satu teleskop radio di Observatorium Bosscha. Fokus penelitiannya saat itu adalah melakukan karakterisasi instrumen dengan pengamatan matahari. Saat ini, ia sedang menikmati waktu kebersamaan kedua anaknya. Penulis dapat dihubungi melalui surel: retnodyahhapsari@gmail.com

Mario Batubara



Mario Batubara adalah seorang peneliti pada Pusat Riset Antariksa, Organisasi Riset Penerbangan dan Antariksa, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Pada tahun 2004, dia memperoleh gelar Sarjana Fisika dari Universitas Padjadjaran pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Setelah itu, dia melanjutkan pendidikan dan meraih gelar double master degree, Master of Science dari Universitas Kanazawa-Kanazawa, Jepang pada Division of Mathematical and Physical Sciences, Graduate School of Natural Science and Technology pada tahun 2014 dan Master of Sains dari Institut Teknologi Bandung, Prodi Sains Komputasi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam pada tahun 2015. Setelah itu, dia memperoleh gelar Ph.D. dari Kochi University of Technology-Kochi,

Jepang, Department of Engineering, Graduate School of Engineering pada tahun 2020. Minat penelitiannya saat ini berkisar pada studi dinamika atmosfer berdasarkan pengamatan gelombang infrasonic dan radio; Sains Antariksa; Fisika Magnetosfer dan Ionosfer; Teknologi Radar, Gelombang Milimeter dan Gelombang Mikro; Computational Fluid Dynamic; Instrumentasi pengamatan atmosfer dan fenomena geologi. Tulisan-tulisannya dapat dilihat pada laman <https://scholar.google.com/citations?user=WZ2m-NoAAAAJ&hl=en>; <https://www.researchgate.net/profile/Mario-Batubara-2>

Timbul Manik



Penulis lahir di Sidikalang, Kabupaten Dairi, Sumatera Utara pada 19 Maret 1961. Menyelesaikan pendidikan Sarjana dari Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara (USU) pada tahun 1987. Mulai bekerja di Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) pada tahun 1987, pertama kali ditempatkan di Pusat Riset Dirgantara LAPAN Bandung. Pada tahun 1994 melanjutkan studi pendidikan

Magister di Jepang, dan lulus dari Department of Electrical and Computer Engineering, Nagoya Institute of Technology, Jepang. Turut berkontribusi dalam pembangunan Radar Ekuator Atmosfer (EAR) di Kototabang Sumatera Barat yang telah beroperasi sejak tahun 2001, dan beberapa radar atmosfer yang dioperasikan di LAPAN. Juga turut berkontribusi dalam Pembangunan Observatorium Nasional Timau di Kupang Nusa Tenggara Timur. Sejak tahun 2021 bertugas di Pusat Riset Antariksa Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) sebagai Peneliti Madya, menggeluti bidang penelitian sains Antariksa, dan juga pembangunan pengembangan teleskop radio di Observatorium Nasional Timau. Penulis dapat dihubungi melalui surel: timbu001@brin.go.id

Musthofa Lathif



Penulis lahir di Purworejo, pada tahun 1980. Tahun 2003 menyelesaikan gelar Sarjana Teknik Elektro di Universitas Muhammadiyah Malang dan menyelesaikan gelar Magister Teknik Elektro di Institut Teknologi Bandung (ITB) pada tahun 2016. Tahun 2008 bergabung menjadi pegawai Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) di Pusat Pemanfaatan Sains Antariksa sebagai Perekayasa dengan melakukan penelitian, pengembangan dan perekayasaan teknologi pengamatan antariksa. Pada tahun 2021 hingga saat ini menjadi Periset pada Pusat Riset Antariksa, Organisasi Riset Penerbangan dan Antariksa (ORPA), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) dengan fokus penelitian pada teknologi pengamatan antariksa, termasuk gelombang radio, infrasound, radio astronomy, sistem penerima dan pengolahan datanya.

Peberlin Parulian Sitompul



Penulis lahir di Desa Lumban Jaean, Kabupaten Tapanuli Utara, Sumatera Utara pada 02 Februari 1978. Menyelesaikan pendidikan Sarjana dari Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Medan (ITM) pada tahun 2003. Mulai bekerja di Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) pada tahun 2006, pertama kali ditempatkan di Pusat Pemanfaatan Sains Antariksa, LAPAN Bandung. Pada tahun 2009 melanjutkan studi pendidikan Magister di Institut Teknologi Bandung (ITB), jurusan Teknik Elektro, Sekolah Teknik Elektro dan Informatika (STEI). Pada tahun 2017 melanjutkan program S-3 di Universitas Chiba di Jepang, jurusan Graduate School of Science and Engineering.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Turut berkontribusi dalam pembangunan Radar VHF LAPAN di Pameungpeuk Garut. Juga turut berkontribusi dalam Pembangunan Observatorium Nasional Timau di Kupang Nusa Tenggara Timur. Sejak tahun 2021 bertugas di Pusat Riset Antariksa, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) sebagai Peneliti Madya, menggeluti bidang penelitian Sains Antariksa, Radar FMCW dan Radar Cuaca, Antena dan pengembangan teleskop radio di Observatorium Nasional Timau, Kupang.

Rasdewita Kesumaningrum



Rasdewita Kesumaningrum adalah seorang peneliti pada Pusat Riset Antariksa, Organisasi Riset Penerbangan dan Antariksa BRIN. Setelah menyelesaikan studi sarjana Astronomi dari ITB, ia bekerja sebagai peneliti di Pusat Sains Antariksa LAPAN sejak 2005. Pada tahun 2010, ia melanjutkan pendidikan magister astronomi di ITB dengan topik filamen Matahari. Sampai saat ini, ia banyak terlibat dalam penelitian terkait aktivitas matahari dan cuaca antariksa. Selain itu ia juga terlibat aktif sebagai salah satu forecaster untuk memprediksi aktivitas cuaca antariksa harian dalam program SWIFtS.

Taufiq Hidayat



Penulis lahir di Surabaya, 27 April 1965, adalah pengajar di Program Studi Astronomi FMIPA, ITB. Menamatkan pendidikan S-1 di Jurusan Astronomi ITB tahun 1989 dan kemudian melanjutkan studi pascasarjannya tahun 1992 di Ecole Doctorale d'Astronomie et Astrophysique d'Ile de France, Doctorat d'Astrophysique et Techniques Spatiales, Université Paris Diderot,

Sorbonne Paris Cité, di Paris, Prancis. Selama studinya, dia pernah bekerja di Institut d'Astrophysique Spatiale di Orsay, di Institut de Radio Astronomie Millimétrique (IRAM), Grenoble (Prancis) dan Granada (Spanyol), dan terutama di Observatoire de Paris – Campus de Meudon. Di program doktoral, dia mendalami bidang astronomi radio milimeter/submilimeter. Tahun 1997, dia meraih gelar Docteur ès Sciences dari universitas tersebut. Dalam organisasi profesi, dia anggota Himpunan Astronomi Indonesia (HAI), Société Française des Spécialistes d'Astronomie (SFSA), dan International Astronomical Union (IAU). Taufiq Hidayat pernah menjabat Ketua Departemen Astronomi ITB, tahun 1999–2004, Kepala Observatorium Bosscha ITB, tahun 2006–2010, dan Ketua Program Studi Sarjana dan Pascasarjana Astronomi, tahun 2011–2013. Tahun 2010, salah satu dari Asteroid Sabuk Utama Nomor 5030 T-3 oleh IAU dinamakan 12179 Taufiq sebagai penghargaan. Bidang astronomi radio terus dia tekuni hingga sekarang, dengan aplikasi pada atmosfer planet, pencarian molekul di awan antar bintang, serta studi inti galaksi aktif, termasuk menggunakan teknik VLBI (Very Long Baseline Interferometry) bersama kolega di luar negeri. Dia juga aktif dalam mengembangkan instrumentasi astronomi radio di berbagai panjang gelombang. Sejak 2014, Taufiq Hidayat menjabat sebagai Guru Besar Astronomi FMIPA, ITB.

Abdul Rachman



Abdul Rachman memulai karirnya sebagai peneliti di Pusat Pemanfaatan Sains Antariksa LAPAN di Bidang Matahari dan Antariksa pada tahun 2005. Melanjutkan topik orbit satelit yang digelutinya sejak kuliah, Abdul banyak meneliti tentang gangguan yang dialami oleh satelit-satelit buatan terutama yang dipicu oleh dinamika lingkungan antariksa. Dia juga banyak mengkaji tentang pengaruh

lingkungan antariksa (yang banyak dipengaruhi oleh aktivitas matahari) pada populasi sampah antariksa. Selain menganalisis data orbit yang diperoleh dari internet, Abdul juga menggunakan data yang diperolehnya langsung dari teleskop-teleskop optik. Semenjak bergabungnya LAPAN ke BRIN tahun 2021, Abdul juga menjabat sebagai PIC di Observatorium Nasional Gunung Timau yang berlokasi di kaki Gunung Timau, Kab. Kupang, Prov. NTT.

Gelar S-1 dan S-2 diperolehnya dari Program Studi Astronomi ITB. Adapun gelar S-3 dari *Astronomical Institute of University of Bern* (AIUB) di Swiss dengan disertasi berjudul *Understanding attitude behavior of inactive GLONASS satellites using spin period evolution*. Karya terakhir yang dipublikasikan berjudul *Photometric observation of defunct satellites using small telescopes: preliminary results* yang datanya diperoleh fasilitas pengamatan yang terpasang di Kupang, Nusa Tenggara Timur. Penulis dapat dihubungi melalui surel: abd001@brin.go.id atau rachmanabd@yahoo.com. Beberapa tulisannya dapat dibaca di <https://rachmanabdul.wordpress.com/>.

Thasman Aditya Singh



Thasman Aditya Singh lulus S-1 dari Program Studi Sains Atmosfer dan Keplanetan di Institut Teknologi Sumatera (ITERA). Selama masa studi, saya mendalami berbagai aspek terkait meteorologi, klimatologi, dan astronomi. Saya juga terlibat dalam beberapa penelitian yang berfokus pada ekoplanet, fisika tata surya, simulasi n-body, benda kecil Tata Surya, sistem penanggalan kalender maupun pengamatan fotometri dan spektroskopi. Mempunyai pengalaman riset astronomi bersama BRIN-Pusat Riset Antariksa, The National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ), Astrobiology Center Japan dan Southwest Research Institute, Space Science Department, USA. Selain itu, saya aktif dalam organisasi kemahasiswaan maupun di luar kampus

seperti Himupnan Mahasiswa Sains Atmosfer dan Keplanetan (Himasaka) Arkananta ITERA, Space Generation Advisory Council, HAAJ, dan KALA. Dengan latar belakang pendidikan ini, saya bertekad untuk berkontribusi dalam pengembangan ilmu penelitian di bidang astronomi untuk kemajuan masyarakat dan bangsa Indonesia. Hubungi kontak saya jika ingin berkolaborasi dalam penelitian ataupun tanya jawab seputar astronomi pada laman *e-mail*: singhthasman@gmail.com dan LinkedIn: <https://www.linkedin.com/in/thasman-aditya-singh-6579581a0/>

Praza Gumilang Kembaren



Praza Gumilang Kembaren menyelesaikan S-1 di program studi Sains Atmosfer dan Keplanetan, Institut Teknologi Sumatera dengan penelitian dinamika orbit Temporary Captured Object (TCO): 2022 NX1. Berbagai aktivitas penelitian, pendidikan, dan pelatihan ia lakukan selama menempuh pendidikan di Institut Teknologi Sumatera. Bidang yang ditekuninya adalah Fisika

Tata Surya, Benda Kecil Tata Surya, Mekanika Benda Langit, dan Astrofisika. Penulis dapat dihubungi melalui surel: prazakembaren@gmail.com

David Maulana Raihan



David Maulana Raihan adalah lulusan Program Studi Sains Atmosfer dan Keplanetan ITERA yang memiliki pengalaman sebagai asisten di OAIL (Observatorium Astronomi ITERA Lampung) selama dua tahun. Minat utamanya terletak pada Fisika Tata Surya, Astrofisika, Instrumentasi, Bulan Sabit (Hilal), Sains Komputasi, dan Fisika Galaksi. Pada tahun 2023,

penulis terlibat dalam penelitian kondisi runag antarplanet dan magnetosfer Bumi selama gerhana matahari hibrida tanggal 20 April 2023 di Pusat Riset Antariksa (PRA BRIN) Saat kerja praktek/ Magang. Selain itu, saya juga pernah melakukan penelitian analisis potensi astroturisme berdasarkan parameter astronomi dan parameter meteorologi di Camping Ground Danau Lebar, Kawasan Wisata Suoh, Lampung Barat, untuk mendukung Sustainable Development Goals (SDGs). Tugas Akhirnya melakukan studi tentang pengukuran kontras Bulan Sabit menggunakan CCD (Charge-Coupled Device) dan filter inframerah. Prestasi akademisnya termasuk mendapatkan Sertifikat Penghargaan (Dies Natalis Program Studi SAP 2023 & 2024) dalam kategori Prestasi Akademik serta medali emas dalam Kompetisi Sains Indonesia (KSI) 2021 bidang Kimia.

Christian Vieri



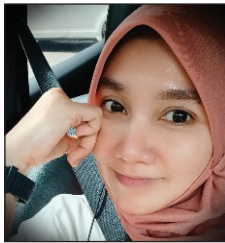
Christian Vieri adalah mahasiswa tingkat akhir program studi Sains Atmosfer dan Keplanetan, Institut Teknologi Sumatera. Berbagai aktivitas di Himpunan Mahasiswa Sains Atmosfer dan Keplanetan (Himasaka) Arkananta ITERA, penelitian, pendidikan, dan pelatihan yang lakukan selama menempuh pendidikan di Institut Teknologi Sumatera. Bidang yang ditekuninya adalah pembelajaran mesin, orbit satelit, instrumentasi terkait meteorologi dan astronomi. Penulis dapat dihubungi melalui surel: vierisinulingga27@gmail.com

Mira Juangsih



Penulis merupakan peneliti yang bekerja di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang mempelajari Sains Antariksa. Peneliti lulusan S-1 jurusan Matematika FMIPA dan melanjutkan S-2 jurusan Sains Kebumian FITB Institut Teknologi Bandung. Karya terakhir yang dipublikasikan adalah “The Occurrence Of Geomagnetic Storm In Solar Cycles 23 And 24 And Their Correlation With Cycle Peaks”, tahun 2024.

Visca Wellyanita



Setelah menamatkan pendidikan SMA, penulis melanjutkan kuliah S-1 di jurusan Geofisika FIKTM Institut Teknologi Bandung (ITB). Setelah lulus kuliah, penulis diangkat menjadi calon peneliti dan kemudian menjadi peneliti bidang Geomagnet dan Magnet Antariksa di Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN). Untuk mengembangkan karirnya penulis kembali melanjutkan pendidikan S-2 di Sains Kebumian FITB ITB. Pada tahun 2021 penulis menjadi peneliti di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) sampai dengan saat ini. Karya terakhir yang dipublikasikan adalah “Solar Flare Effect to Sq Variation of Geomagnetic Field Observed at Biak Station”.

Setyanto Cahyo Pranoto



Seorang peneliti yang telah bekerja sebagai pegawai negeri sipil di lingkungan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) sejak tahun 2008 dan bergabung dengan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) sejak tahun 2021. Peneliti dengan bidang kepakaran fisika magnetosferik dan ionosferik. Minat diluar kepakaran pada fisika instrumentasi dan fisika komputasi. Karya terakhir yang dipublikasikan adalah berupa paten sederhana tentang “Metode Evaluasi dan Prediksi Aktivitas Geomagnet Terintegrasi ” tahun 2023.

Anwar Santoso



Peneliti senior dengan bidang kepakaran Sains Antariksa sebagai peneliti Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Menamatkan pendidikan S-1 Jurusan Fisika di Universitas Airlangga Surabaya dan S-2 dengan jurusan yang sama di Institut Teknologi Sepuluh Noverember (ITS) Surabaya. Karya yang pernah dipublikasikan diantaranya adalah “Development of Coronal Holes Index For Study of Coronal Hole Geo-Effectiveness, February 2022”, “Model Badai Ionosfer Indonesia Terkait Badai Geomagnet (Indonesia Ionospheric Storm Model Related To Geomagnetic Storm), 2018”. Penulis dapat dihubungi melalui surel: war92_2000@yahoo.com

Elvina Ayu Ratnasari



Penulis lahir di Kota Bandung pada tanggal 10 Oktober 1993. Penulis merupakan seorang peneliti yang saat ini bekerja di Pusat Riset Antariksa, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Menamatkan studi jenjang S-1 Fisika di Institut Teknologi Bandung tahun 2016. Penulis memulai karir sebagai peneliti di bidang geomagnet dan cuaca antariksa pada tahun 2019. Selama kurang lebih dua tahun penulis mempelajari ilmu baru terkait geomagnet, antariksa, ionosfer, dan matahari dari kelompok peneliti serta beradaptasi dengan atmosfer kerja di PRA-BRIN.

Selama bekerja di PRA-BRIN yang dahulu merupakan LAPAN, penulis berperan aktif dalam berbagai pertemuan ilmiah diantaranya mengikuti prosiding *Asian Physics Symposium* (APS 2021) dengan menyumbang tulisan ilmiah berjudul *the study of geomagnetic activity from 2017 to 2020 period* (DOI: 10.1088/1742-6596/2243/1/012025), *International Symposium on Space Science* (ISSS 2021) dengan menyumbang tulisan ilmiah bertopik *development of 24 hours DST index from solar wind data and IMF Bz using NARX* (DOI: 10.1088/1742-6596/2214/1/012024) dan presentasi oral bertopik *the analysis of auroral electrojet index (AE) from 2010-2014*. Penulis juga aktif menulis beberapa artikel di majalah/Buletin Cuaca Antariksa yang dikeluarkan oleh LAPAN (terakreditasi ISSN). Beberapa tulisan tersebut diantaranya berjudul: Mini-Magnetosfer dan Aplikasinya pada Eksplorasi Luar Angkasa Masa Depan (1 Juli 2020), Aktivitas Geomagnet pada Desember 2020–Februari 2021 (1 April 2021) dan Tren Misi Antariksa 10 Tahun Mendatang: Eksplorasi Mars (1 Juli 2021).

Selain aktif dalam kegiatan penelitian dan penulisan karya ilmiah, saya juga aktif dalam kegiatan *forecaster* cuaca antariksa. Tim *forecaster* tersebut bertugas untuk memantau, menghimpun data, dan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

melakukan analisis kondisi dan dinamika lingkungan antariksa dalam rangka melakukan prediksi terkait cuaca antariksa setiap hari. Hasil-hasil analisis dan prediksi cuaca antariksa dapat diakses masyarakat pada laman SWIFtS (*Space Weather Information Forecast System*), yang dapat diakses secara gratis melalui tautan: www.swifts.brin.go.id Penulis dapat dihubungi melalui surel: elvi005@brin.go.id dan hasil penelitiannya bisa diakses pada google scholar melalui tautan <https://scholar.google.com/citations?user=zrQvfWgAAA&hl=id>.

Rizal Suryana



Penulis lahir di Jakarta pada tanggal 28 Oktober 1978. Penulis merupakan seorang peneliti yang saat ini bekerja di Pusat Riset Antariksa, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Menamatkan studi jenjang S-1 Teknik Elektro Universitas Jenderal Achmad Yani Bandung tahun 2003. Penulis memulai karir sebagai peneliti di bidang Komputer dan Ionosfer pada tahun 2006. Pada tahun 2019, Penulis menyelesaikan program master di Kyushu Institute of Technology pada jurusan Space Engineering. Karya yang pernah dipublikasikan diantaranya adalah “A Study for a Radio Telescope in Indonesia: Parabolic Design, Simulation of a Horn Antenna, and Radio Frequency Survey in Frequency of 0.045–18 GHz” and “Ambient VLF Noise Levels in the Lower Latitude Region”.

La Ode Muhammad Musafar



Penulis lahir di Muna, Sulawesi Tenggara. Menempuh pendidikan sarjana Fisika di Universitas Hasanuddin dan menekuni bidang fisika teori. Sejak tahun 1997 berkarir sebagai peneliti dan kemudian melanjutkan Pendidikan di Universitas Kyushu, Jepang untuk bidang elektromagnetisme antariksa. Saat ini adalah peneliti di Badan Riset dan Inovasi Nasional dengan bidang keahlian Fisika Magnetosfer dan Ionosfer. Minat riset adalah tentang interaksi plasma angin Surya dengan magnetosfer bumi, dinamika lingkungan antariksa, geomagnet, kopling sistem magnetosfer-ionosfer serta dampak cuaca antariksa terhadap satelit.

Agri Faturahman



Agri Faturahman merupakan peneliti di Pusat Riset Antariksa BRIN (Badan Riset dan Inovasi Nasional) dan tergabung dalam kelompok riset Ionosfer dan Propagasi Gelombang Radio. Agri menyelesaikan pendidikan S-1 dan S-2 di program studi Fisika, Institut Teknologi Bandung (ITB). Saat ini, aktif melakukan riset dalam bidang Sains Antariksa khususnya fenomena dan gangguan di lapisan ionosfer (fisika ionosfer). Minat utama penelitiannya saat ini adalah fenomena gangguan di ionosfer serta keterkaitannya dengan sumber penyebab gangguan tersebut, baik yang berasal dari Antariksa (Cuaca Antariksa dan gerhana Matahari) maupun lapisan atmosfer netral dan penyaluran gangguan dari permukaan Bumi. Hasil penelitiannya dapat diakses melalui tautan *google scholar*: <https://scholar.google.com/citations?user=LanJKfIAAAAJ&hl=en> dan penulis dapat dihubungi melalui surel: agri.faturahman@brin.go.id

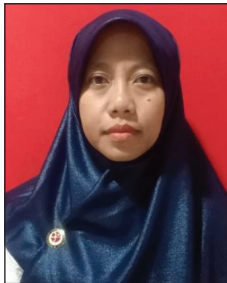
Sefria Anggarani



Sefria Anggarani menyelesaikan pendidikan S-1 pada program studi Fisika di Universitas Airlangga, Surabaya dan S-2 program studi Sains Kebumian di Institut Teknologi Bandung. Saat ini, Sefria tercatat sebagai peneliti di Pusat Riset Antariksa BRIN (Badan Riset dan Inovasi Nasional) dan aktif tergabung dalam kelompok riset Ionosfer dan Propagasi Gelombang Radio. Hasil penelitiannya dapat

diakses melalui tautan <https://scholar.google.co.id/citations?user=hBdz8IUAAAAJ&hl=en> dan penulis dapat dihubungi melalui surel: sefr002@brin.go.id

Annis Siradj Mardiani



Annis Siradj Mardiani merupakan seorang teknisi penelitian dan perekayasa di BRIN (Badan Riset dan Inovasi Nasional). Annis menyelesaikan pendidikan S-1 Teknik Elektro di Universitas Jendral Achmad Yani. Saat ini, Annis aktif dalam kelompok penelitian Ionosfer dan Propagasi Gelombang Radio di Pusat Riset Antariksa BRIN. Penulis dapat dihubungi melalui surel: anni001@brin.go.id

Jiyo



Jiyo merupakan Periset bidang Fisika Magnetosferik dan Ionosferik di Pusat Riset Antariksa BRIN (Badan Riset dan Inovasi Nasional). Menyelesaikan jenjang S-1 Matematika di Institut Teknologi Bandung serta jejang S-2 bidang Sains Atmosfer di perguruan tinggi yang sama. Menggeluti riset tentang ionosfer dan perambatan gelombang radio, serta pemafaatannya sejak tahun 1991. Sebagai seorang

periset, ia telah mempublikasikan puluhan karya tulis ilmiah yang sebagiannya tercatat pada laman <https://scholar.google.co.id/citations?user=9JEkAjEAAAAJ&hl=id>

Selain publikasi ilmiah, ia juga menghasilkan dua paten yang berkaitan dengan hasil riset ionosfer. Ia juga berperan sebagai salah satu inisiator kegiatan Pelatihan MFTKR (Manajemen Frekuensi dan Teknis Komunikasi Radio), sebagai media diseminasi dan pemanfaatan hasil riset ionosfer di berbagai Lembaga pengguna seperti TNI-AL, TNI-AD, TNI-AU, Pemerintahan Daerah, dan lembaga lainnya. Aktif menjadi narasumber pelatihan dan FGD untuk lembaga seperti SDPPI- Kemenkominfo, AirNav Indonesia, dan TNI-AL. Selain kegiatan riset, memiliki hobby dan aktif dalam pelestarian budaya tradisional, khususnya wayang kulit dan karawitan Jawa. Beberapa lakon wayang kulit telah dipentaskan pada berbagai kesempatan. Penulis dapat dihubungi melalui surel: jiyo@brin.go.id dan jiyolpnbdg@gmail.com

Rezy Pradipta



Rezy Pradipta, merupakan *Senior Research Scientist* di *Institute for Scientific Research, Boston College, Amerika Serikat*. Rezy Pradipta menyelesaikan semua jenjang pendidikan tingginya (*Bachelor, Master, dan Doctoral*) di MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) Amerika Serikat. Sampai dengan saat ini aktif melakukan kegiatan

riset sains Antariksa dengan bidang penelitian utama terkait fenomena ionosfer dan plasma Antariksa menggunakan berbagai instrument landas Bumi (ground-based) dan satelit (space-based). Fenomena ionosfer yang sering dikaji meliputi traveling ionospheric disturbances (TID), acoustic-gravity wave (AGW), dan equatorial plasma bubble (EPB). Hasil penelitiannya dapat diakses melalui tautan https://scholar.google.com/citations?user=KbF_srcAAAAJ&hl=en

Setiadi



Saat ini bekerja di Pusat Riset Teknologi Roket sebagai Peneliti Madya di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Lahir di Jakarta pada November 1959, setelah Lulus S-1 Teknik Sipil Struktur Fakultas Teknik UI, sekitar pertengahan dekade 1980an bekerja di Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN). Kemudian atas biaya LAPAN melanjutkan studi S-2 di perguruan tinggi yang sama di FTUI,

selesai tahun 1994. Tahun 2021 LAPAN dilebur ke BRIN hingga saat ini, penulis masuk didalamnya. Penelitian dan publikasi hasil riset dan kajian fokus tentang mekanika kekuatan material struktur roket, khususnya pada motor roket berbahan bakar padat. Terakhir penelitian tentang pelapisan (coating) pada material struktur nosel,

sebagai bagian dari motor roket, baik tentang teknik pelapisannya maupun pada pengembangan material pembentuk lapisannya. Pria yang dikaruniai anak tiga dan cucu empat ini juga sudah agak lama menggeluti bidang pendidikan, memanfaatkan ilmu yang dimiliki dengan mengajar di perguruan tinggi swasta dan membimbing karya tulisnya, sekaligus sebagai aktivitas pensiun nanti.

M. Dito Saputra



M. Dito Saputra lahir di Nusa Tenggara Barat, Indonesia, pada tahun 1990. Ia meraih gelar Sarjana Teknik Dirgantara dari ITDA, Indonesia pada tahun 2013. Ia kemudian melanjutkan studi untuk meraih gelar Magister Teknik Dirgantara dengan fokus pada Struktur Ringan di KTH Royal Institute of Technology, Swedia, dan menyelesaikan studinya pada tahun 2023.

Dia memiliki pengalaman bekerja di bidang perawatan pesawat dan pengembangan roket. Saat ini, ia bekerja sebagai Peneliti di Badan Riset dan Inovasi Nasional Indonesia, di mana ia memanfaatkan keahliannya dalam pemodelan CAD, analisis FEM, dan analisis struktur komposit.

Ahmad Novi Muslimin



Ahmad Novi Muslimin salah seorang pemuda kelahiran tahun 1993 yang berasal dari Sumatera Selatan. Dia telah menyelesaikan pendidikan sebagai Sarjana Sains di Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta pada tahun 2016 dengan mengambil program studi Fisika konsentrasi Material. Kemudian selang beberapa tahun kemudian ia memperoleh

beasiswa dan mendapatkan gelar sebagai Magister Ilmu Pertahanan (M.Han) khususnya pada program studi Teknologi Persenjataan di

Universitas Pertahanan Indonesia pada tahun 2023. Selang waktu antara pendidikan sarjana dan magister yang ditempuh, Ia mencoba untuk mencari pengalaman sebagai operator alat karakterisasi material yang mana menjadi salah satu profesi yang masih ditekuninya hingga saat ini. Selain sebagai operator alat, ia juga turut serta dalam kegiatan penelitian khususnya pada bidang pelapisan material, biomaterial dan analisis FEM struktur material. Sebagai praktisi di bidang ilmu material hingga saat ini dia terus mengembangkan kemampuannya dan mencoba untuk menekuni bidang baru yaitu pengolahan dan analisis data dengan menggunakan Cryo-EM.

Zaid Nasrullah



Zaid Nasrullah, lahir di Bandung pada 11 Desember 1988. Pada tahun 2018, penulis menamatkan kuliah di Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Gunung Djati Bandung..

Penulis juga ikut bergabung di komunitas AstroFun Club 107°37' yang diasuh oleh Pak Hendro Setyanto (sekarang Imam Noong) dan Pak Judhistira Aria Utama (sekarang dosen di UPI) pada tahun 2008. Bergabung juga di ormas Pemuda Persatuan Islam Cabang Cimahi Selatan pada tahun 2011 hingga saat ini. Pada tahun 2012 bergabung ke Mathla atas ajakan ustadz Utsman (Abu Sabda) dan akhirnya bersilaturahmi kepada ustadz Amin Muchtar (sekarang di Dewan Hisbah PP PERSIS). Selain itu, salah satu anggota Badan Hisab Rukyat Daerah Kota Cimahi sejak 2022 sampai sekarang. Sejak lulus Mu'allimin tahun 2009, mulai mengabdikan di Pesantren Persatuan Islam 1 Bandung hingga sekarang masih diberi amanah untuk berbagi kepada anak-anak Mu'allimin mengampu ilmu falak dan fisika. Begitu pula di Madrasah Aliyah Nurul Iman, Pesantren Persatuan Islam 105 Kota Cimahi diberikan kesempatan untuk berbagi sejak 2015 sampai sekarang. Saat ini,

bergabung bersama dosen pembimbing mahasiswa – Mada Sanjaya W.S., Ph.D. dalam mendukung masyarakat perihal teknologi yang dicapai oleh para *‘ulamā* yang saintis zaman keemasan (*golden age*) Islam dari abad ke-8 hingga akhir abad ke-15. Memiliki ketertarikan untuk mendalami ilmu falak atau astronomi. Selain itu, mendesain perangkat astronomi non optik yang dikenal dengan astrolabe hingga membuat astrolabe jenis baru bernama Astrolabe Nashrullāh. kadang suka berbagi kisah sunnatullāh melalui website atau blog serta media sosial lainnya. Penulis dapat dihubungi melalui surel: zaidnasrullah5@gmail.com

Aditya Abdilah Yusuf



Aditya Abdilah Yusuf, asal Jombang, Jawa Timur, adalah lulusan S-1 Astronomi dari Institut Teknologi Bandung (ITB). Sejak tahun 2019, ia bekerja di ITERA, di Pusat Observatorium Astronomi Itera Lampung sebagai pranata laboratorium pendidikan. Pekerjaannya meliputi merawat instrumen, melakukan inovasi instrumen, menjalankan program kerja OAIL seperti Eduwisata Astronomi, Ngabril, OAIL Goes

to School, pelayanan mahasiswa praktikum dan tugas akhir, serta pengamatan fenomena-fenomena astronomi termasuk hilal. Selain itu, Aditya juga terlibat dalam pengembangan alat di OAIL dan melakukan penelitian bersama tim peneliti OAIL. Penelitiannya mencakup pengembangan instrumentasi astronomi, pengamatan fenomena seperti gerhana Matahari maupun Bulan, serta astrowisata. Beberapa alat/instrumen astronomi yang pernah atau sedang dikembangkannya antara lain Mounting Swakriya UTO-PIA, Teleskop Radio Itera (TERI), Itera Robotic Telescope (IRT), dan All-sky Camera Itera. Penulis dapat dihubungi melalui surel: aditya.yusuf@staff.itera.ac.id atau aditya.abdilah.yusuf@gmail.com

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Judhistira Aria Utama



Judhistira Aria Utama, merupakan dosen Lektor Kepala di Program Studi Fisika, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia. Saat ini, penulis memimpin Kelompok Bidang Kajian (KBK) Fisika Antariksa dan Energi Tinggi di Program Studi Fisika, serta menjabat sebagai Kepala Laboratorium Bumi & Antariksa, selain Kepala Pusat Unggulan

Universitas (PUU) Sains Data Astronomi & Polusi Cahaya.

Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana, Magister, dan Doktor dalam bidang Astronomi di Institut Teknologi Bandung (ITB). Fokus penelitian beliau mencakup astronomi dan astrofisika, meliputi fotometri visibilitas hilal, polusi cahaya, dan dinamika Tata Surya. Tahun 2023, ia memperoleh penghargaan sebagai Dosen Terbaik 2 Bidang Sains dan Teknologi Tingkat Universitas Pendidikan Indonesia.

Banyak publikasi ilmiah internasional maupun nasional yang telah dihasilkan dan saat ini dipercaya sebagai Team Leader Koordinator Nasional Pendidikan Astronomi untuk Indonesia di bawah naungan International Astronomical Union. Di luar kegiatan akademik, penulis juga aktif membina siswa dan guru dalam Olimpiade Sains Nasional bidang Astronomi, serta terlibat dalam berbagai inisiatif edukasi publik yang mendorong peningkatan apresiasi terhadap sains antariksa.

Kendra Hartaya



Lahir di Bantul 5 Mei 1965, menamatkan pendidikan S-1 di Jurusan Kimia FMIPA Universitas Gajah Mada Yogyakarta pada tahun 1991, kemudian melanjutkan S-2 di Jurusan Material Sains Universitas Indonesia, Salemba Jakarta atas biaya dinas dari Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) lulus tahun 1997, kemudian menempuh Pendidikan S-3 di Universitas Negeri Jakarta, Jakarta lulus tahun 2006 atas biaya mandiri dengan jurusan Teknologi Pendidikan. Sejak lulus S-1, diangkat menjadi Pegawai Negeri Sipil (PNS) bulan Maret tahun 1992 sampai sekarang, bukan ikatan dinas, sebagai fungsional peneliti di Bidang Propulsi maju Pusat Propulsi dan Energetik, PPE (sekarang pusat Teknologi Roket). Sebelum bergabung menjadi PNS di PPE, sempat bekerja sebagai Dosen di Institut Sains dan Teknologi AKPRIND Yogyakarta 1991–1992. Bidang Propulsi Maju bergerak dalam penelitian dan pengembangan bahan baku propelan yang meliputi material Amonium perklorat (AP), Binder HTPB (Hydroxyl Terminated Polybutadiene). Sejak tahun 1994, melanjutkan S-2 sembari masuk sebagai fungsional perekayasa pertama. Setelah lulus S-2, dirasakan fungsional perekayasa tidak ada perkembangan, maka segera pindah ke peneliti pada jenjang peneliti pertama 1997 (saat itu Namanya asisten peneliti muda bidang propulsi maju).

Setelah lulus S-3, sempat menjadi dosen tidak tetap di pascasarjana universitas Ibn Khaldun Bogor pada jurusan Magister Teknologi Pendidikan pada 2010–2019 dengan mengampu mata kuliah Metode Statistik dan mata kuliah Evaluasi pembelajaran, sejak 2020 sampai sekarang menjadi pengajar non-aktif. Selama bekerja di LAPAN, tahun sejak tahun 2016 diangkat sebagai Paneliti Ahli Utama pada bidang propelan dan material penahan panas. Aktifitas selama bekerja meliputi keterlibatan dalam kepanitiaan seminar diantaranya seminar berkala (kegiatan kepusatan), seminar nasional siptekgan di bogor,

ISAST di serpong, Bali, Lombok, Medan, Jakarta, juga terlibat dalam penerbitan makalah seperti Jurnas Nasional Janas, Jurnal Teknologi Dirgantara (JTD), International Journal of Aerospace, Majalah sains dan Teknologi Dirgantara (MSTD), media dirgantara, pembuatan buku bunga rampai.

Selain itu, seminar nasional yang pernah diikuti sebagai pemakalah meliputi prosiding JNK (jurnal Nusantara Kimia) yogyakarta, Jasakiai (jaringan Kerjasama kimia Indonesia) Yogyakarta, seminar balai besar keramik Bandung. Sampai sekarang terdapat makalah tidak kurang dari 120 buah, Haki (paten regular dan sederhana) 25 buah. Paten terkait dengan standarisasi proses dan pengujian propelan padat komposit. Riset yang pernah dipimpin atas biaya dari luar meliputi RUKK 2009 tentang pembuatan dimetil karbamat, dan Insinas 2012 tentang peningkatan Impuls spesifik propelan. Terakhir terlibat dalam riset Propelan dengan Isp 240 detik 2022 yang dipimpin Prof. Heri Budi Wibowo.

Luthfia Hajar Abdillah



Penulis lahir di Surabaya pada 3 Januari 1986. Ia menyelesaikan studi Sarjana dan Magister di jurusan Teknik Kimia ITS Surabaya pada tahun 2008 dan 2017. Penulis merupakan peneliti di LAPAN sejak 2009. Setelah LAPAN melebur menjadi BRIN, tetap aktif menjadi peneliti di bidang Propelan di Kepusatan Riset Teknologi Roket, Organisasi Riset Penerbangan dan Antariksa. Penulis juga masih aktif dalam mengikuti kegiatan

seminar ilmiah dan membuat beberapa artikel ilmiah terbitan nasional maupun internasional, serta beberapa Kekayaan Intelektual (KI) yang disusun bersama dengan tim. Topik riset yang dilakukan saat ini adalah terkait dengan proses, komposisi, sifat dan karakteristik propelan padat komposit.

Retno Ardianingsih



Penulis merupakan peneliti kelahiran Semarang yang menempuh pendidikan Sarjana dan Magister pada bidang Teknik Kimia di Universitas Diponegoro. Ia mulai berkarier sebagai peneliti sejak 2009 di Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN), yang kini bertransformasi menjadi Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Dengan latar belakang akademik

yang relevan, ia terus mengembangkan keahliannya dalam penelitian propelan dan material berenergi tinggi. Kegiatan riset yang ia jalankan meliputi pengembangan komposisi, formulasi, karakterisasi, serta sintesis bahan baku propelan.

Selain aktif di laboratorium, ia juga berpartisipasi dalam berbagai seminar ilmiah dan mempublikasikan hasil penelitiannya di forum nasional maupun internasional. Bersama tim kelompok riset, ia turut berkontribusi dalam penyusunan beberapa Kekayaan Intelektual (KI) yang berkaitan dengan inovasi teknologi propelan. Komitmennya terhadap pengembangan teknologi propelan menjadikannya salah satu peneliti yang terus berperan dalam memajukan riset kedirgantaraan Indonesia.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Penguasaan sains dan teknologi keantariksaan bukan lagi sekadar eksplorasi ilmiah semata, melainkan kebutuhan strategis yang berimplikasi langsung pada kedaulatan, keamanan, dan kemajuan peradaban suatu negara. Secara global, keantariksaan sudah merambah aspek ekonomi, masyarakat, aksesibilitas, sampai diplomasi keantariksaan. Dalam konteks Indonesia, isu keantariksaan juga terus berkembang. Mulai dari sains antariksa untuk masyarakat, pengembangan teknologi roket, satelit, dan aeronautika, pemanfaatan teknologi antariksa untuk penginderaan jauh dan telekomunikasi, serta pengkajian kebijakan keantariksaan terkait.

Buku berjudul *Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi* ini menyajikan pembahasan keantariksaan dalam spektrum sains dan teknologinya. Di antaranya meliputi perkembangan sains antariksa seperti pengamatan aktivitas matahari (sunspot), dinamika ionosfer regional, dan medan geomagnet, serta mitigasi bencana antariksa yang mencakup analisis sampah antariksa dan potensi tumbukan asteroid.

Di ranah teknologi, buku ini mengupas upaya kemandirian teknologi roket nasional, termasuk teknik pelapisan nosel dan pengembangan propelan padat, serta kemajuan infrastruktur pengamatan melalui pengembangan teleskop radio dan pembangunan Observatorium Nasional Timau. Selain itu, buku ini juga menjembatani sains dengan kebutuhan sosiokeagamaan masyarakat Indonesia melalui kajian ilmiah terkait batasan jendela pengamatan hلال.

Buku ini hadir sebagai referensi esensial bagi akademisi, peneliti, pengambil kebijakan, dan masyarakat umum untuk memahami urgensi serta kontribusi nyata sektor keantariksaan dalam mendukung pembangunan berkelanjutan dan kemajuan bangsa Indonesia.

Selamat membaca!

BRIN Publishing
The Legacy of Knowledge

Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Gedung B.J. Habibie Lt. 8,
Jln. M.H. Thamrin No. 8,
Kota Jakarta Pusat 10340
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DOI: 10.55981/brin.1425



ISBN 978-602-6303-86-8



: 17860261303868

Buku ini tidak diperjualbelikan.