

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 dilanjutkan

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