

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

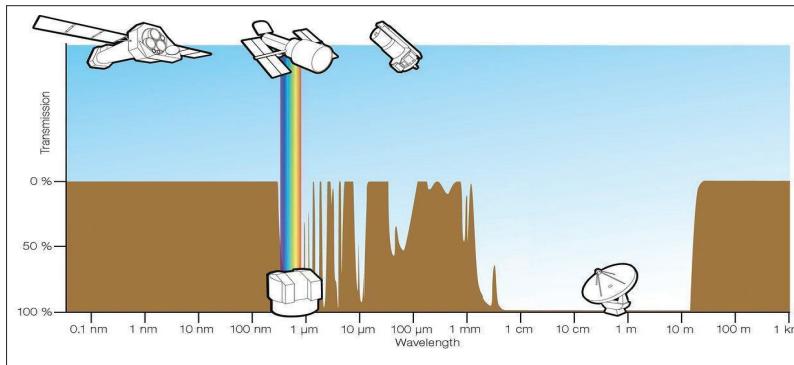
© 2025 Editor & Penulis

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. Djamaruddin & 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

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. Se mentara 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),

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

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

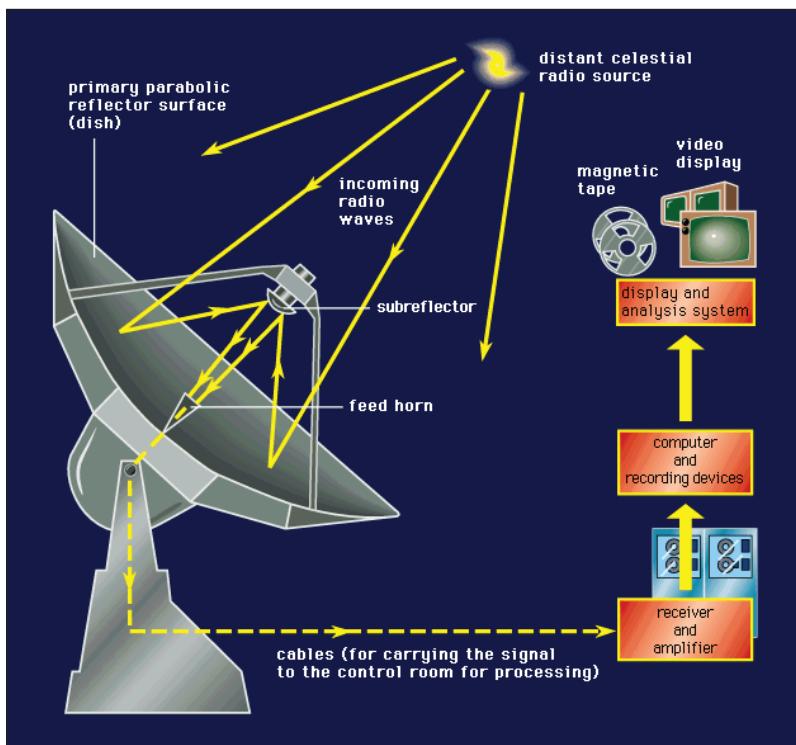
Terdapat beberapa bentuk umum teleskop radio, di antaranya teleskop dengan antena tunggal atau *single-dish*, interferometer, dan *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI).

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

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 antena tinggal.
 Sumber: Rempel, B (2023)

Gambar 3.2 Skema teleskop radio

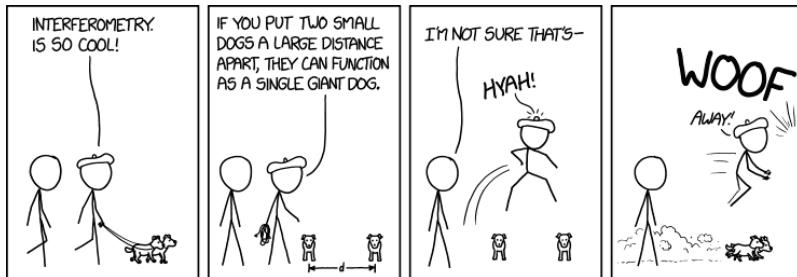
Kualitas pengamatan teleskop radio ditentukan oleh berbagai faktor, antara lain: kualitas bentuk permukaan *dish*, stabilitas pencatat waktu yang digunakan, deformasi termal pada teleskop, dan deformasi posisi teleskop yang disebabkan oleh variasi gaya pasang surut Bumi. Selain itu, besar piringan sangat 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 ber-gantung 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



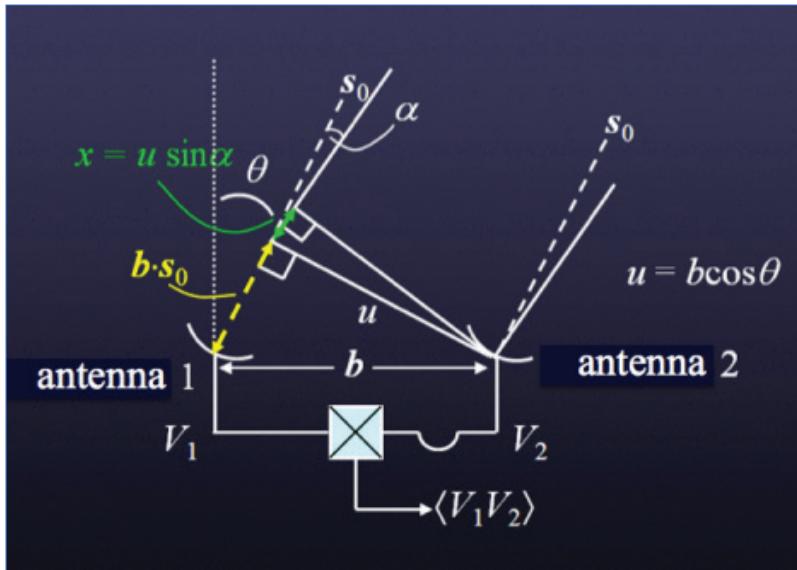
Keterangan: Analogi cara kerja teleskop radio interferometri yang digambarkan dengan anjing sebagai satu antena teleskop radio, sehingga akan lebih *powerful* ketika jumlahnya lebih dari 1.

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*.



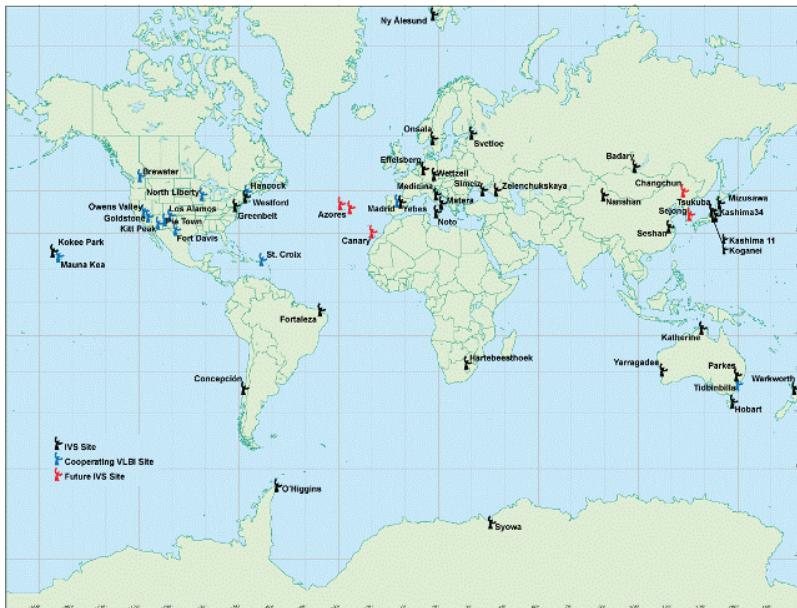
Keterangan: Konfigurasi interferometer dua elemen antena 1-D dengan jarak pisah b .

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.



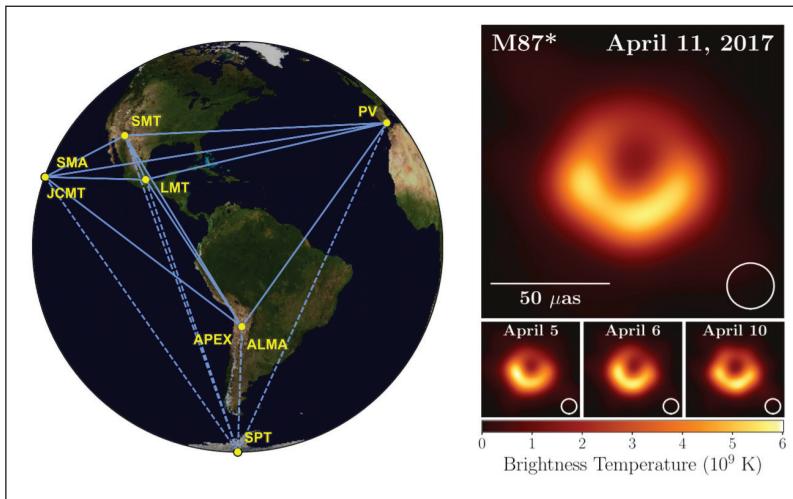
Keterangan: Sebaran teleskop radio yang tergabung dalam geodetik VLBI di dunia.

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

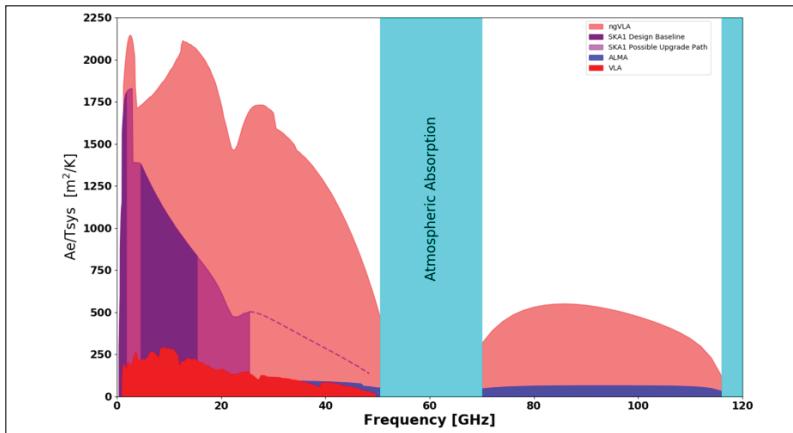
Astronomi adalah bidang yang sangat mendukung kolaborasi internasional, karena astronomi membutuhkan teleskop di berbagai daerah di seantero dunia untuk mengamati keseluruhan langit. Kolaborasi internasional dalam astronomi bahkan sudah dimulai sejak 1887 ketika para astronom dari seluruh dunia mengumpulkan 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.

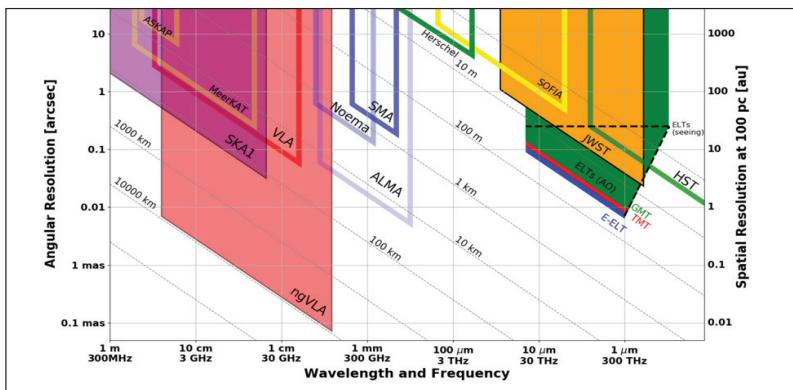
Gambar 3.7 dan 3.8 mendeskripsikan kemajuan beberapa instrumen radio yang paling *powerful* saat ini. Sumbu x merupakan ranah frekuensi dari masing-masing instrumen, sedangkan sumbu y menjelaskan parameter yang berbeda.



Keterangan: Grafik menunjukkan perbandingan sensitivitas (Ae/Tsys) 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 tercanggih 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, JVLA, 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 beroperasional 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)

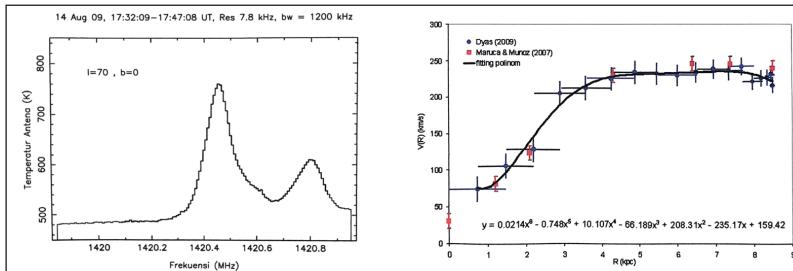
Foto: Ibnu Nurul Huda (2023)

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).



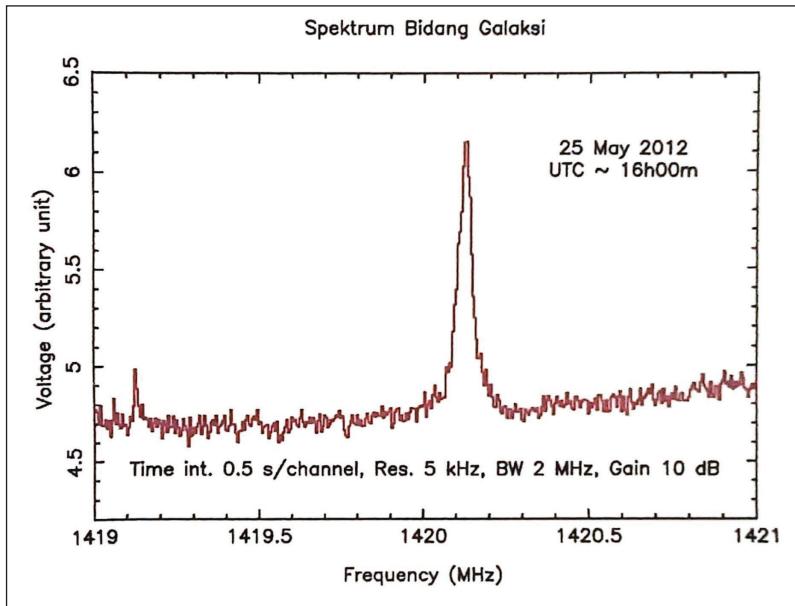
Keterangan: Profil spektrum HI dan kurva rotasi galaksi yang diperoleh dari pengamatan HI dengan menggunakan TRB (titik biru)

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 antena 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 antena, *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 antena 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

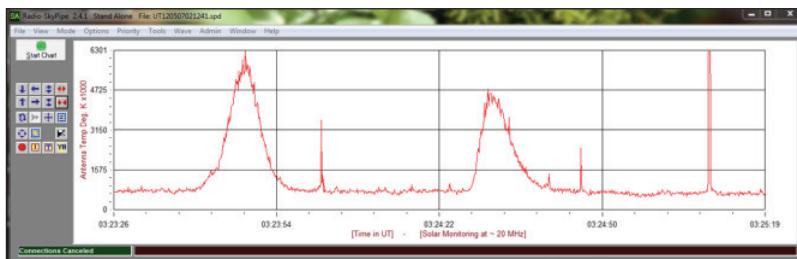
TRH pernah digunakan untuk melakukan uji pengamatan spektral dan kontinum terhadap beberapa objek yang sedang transit di meridian Observatorium Bosscha, seperti pulsar dan bidang galaksi (Mumtahana et al., 2012; Mumtahana, 2012). Dengan menggunakan *receiver* Hidrogen (1420 MHz), spektrum Hidrogen pada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



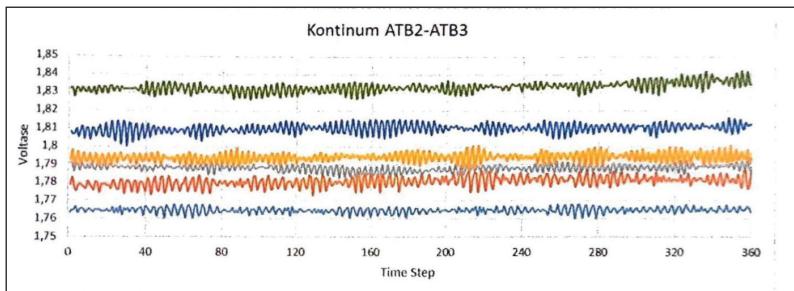
Keterangan: Semburan radio Matahari yang terdeteksi oleh teleskop radio JOVE.

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 antena, 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

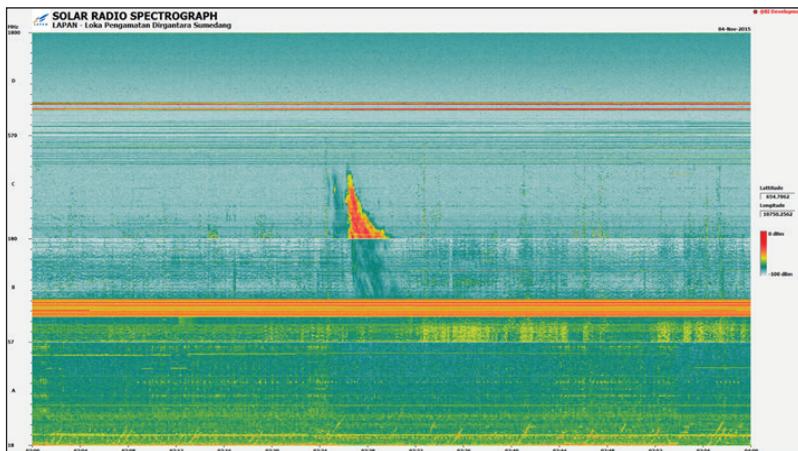
Di LAPAN, instrumentasi radio tertua dibangun di Sumedang, yaitu Spektrograf Radio Matahari bernama SN 4000. Spektrograf untuk mengamati semburan radio Matahari tersebut bekerja pada 4 band pengamatan dan cukup berkontribusi menghasilkan beberapa tipe *burst* yang cukup penting sebagai *early warning* cuaca antariksa. Adapun untuk spektrograf radio matahari terdiri dari tiga antena, 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 antena Callisto (kiri-kanan)

Foto: Karina Dwi Wardhani (2014)

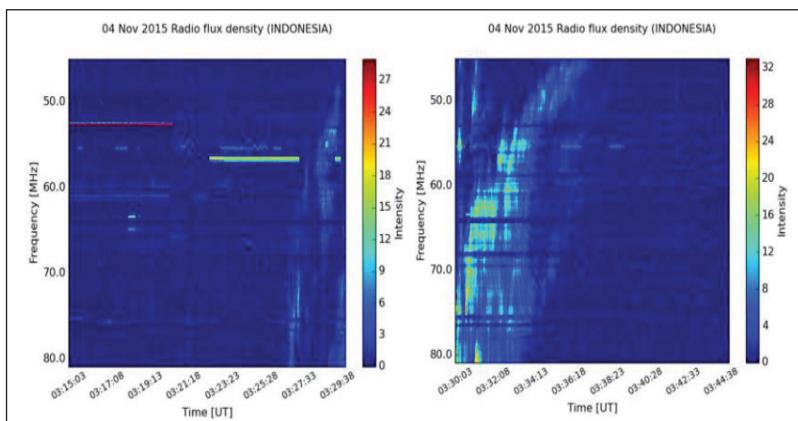
Gambar 3.14 Beberapa teleskop radio di BPAA Sumedang LAPAN



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 antarkepakan 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, pendekripsi dan mitigasi RFI, dan sebagainya.
 - c) *Experiences*: Membangun kolaborasi riset dan instrumentasi dengan fasilitas skala global, dan sebagainya.
 - d) Teknologi: Mempelajari dan mengembangkan teknik kriogenik, 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 penelitian 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 (xpol, ypol), nutasi (xnut, ynut), dan UT1-UTC (dUT1). 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.

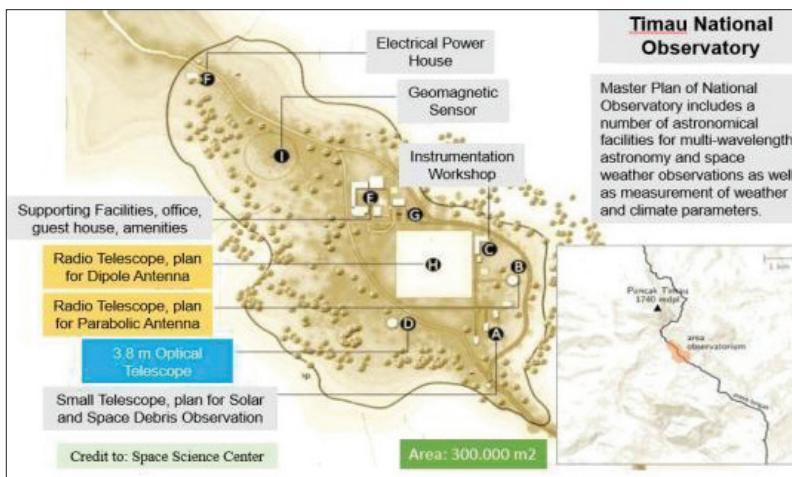
1. Kajian Pembangunan di Observatorium Nasional

Pembangunan observatorium nasional merupakan perwujudan pembangunan fasilitas observasi ruas 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.

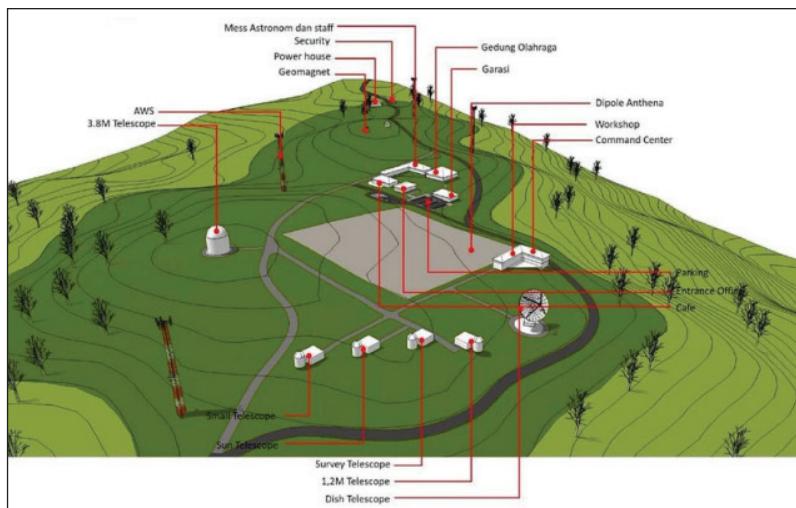
Perencanaan pembangunan observatorium nasional telah diawali dengan beberapa kajian dan survei (Hidayat et al., 2012). Saat ini tengah diselesaikan pembangunan teleskop optik 3,8 m yang akan menjadi salah satu fasilitas utama di Observatorium Nasional Timau (Mumpuni et al., 2017). Pengamatan pada gelombang 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).

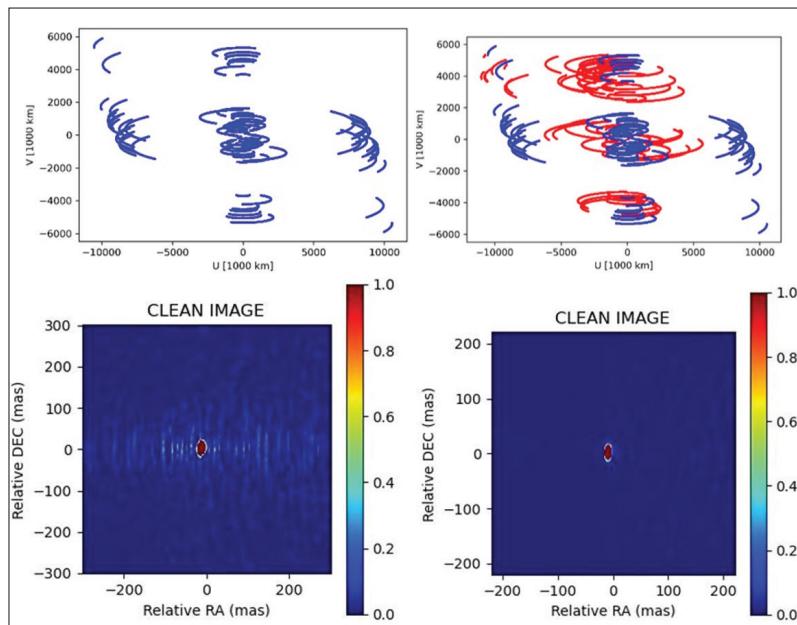
Gambar 3.17 *Master Plan* pembangunan Observatorium Nasional Timau.



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 antena, baik *dish* maupun *dipol array*. Adapun studi desain antena teleskop radio *single-dish* dijelaskan pada Sitompul et al. (2024). Diameter antena 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 jaringan 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 antena EAVN + Indonesia dengan garis merah (kanan).

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

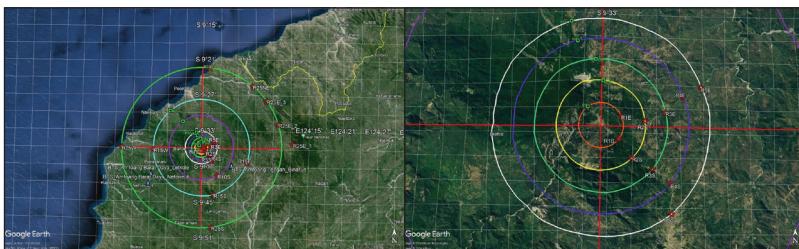
Sumber: Mumtahana et al. (2023)

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 pengamatan. 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 teramat 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).

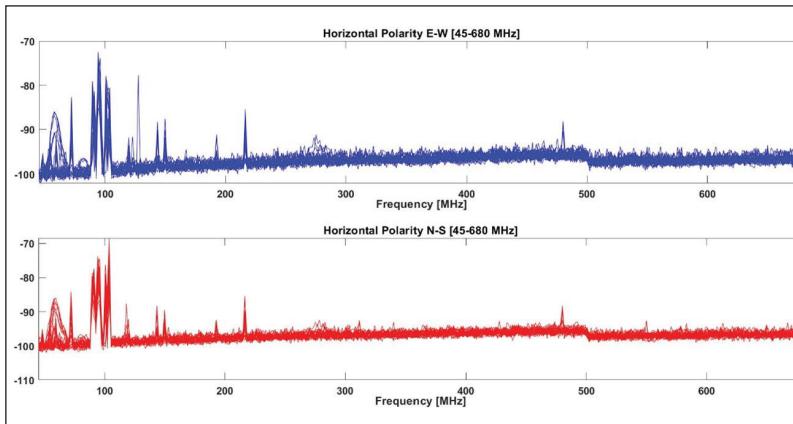
Tabel 3.1 Kode pengamatan gelombang radio berdasarkan rentang frekuensi.

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.

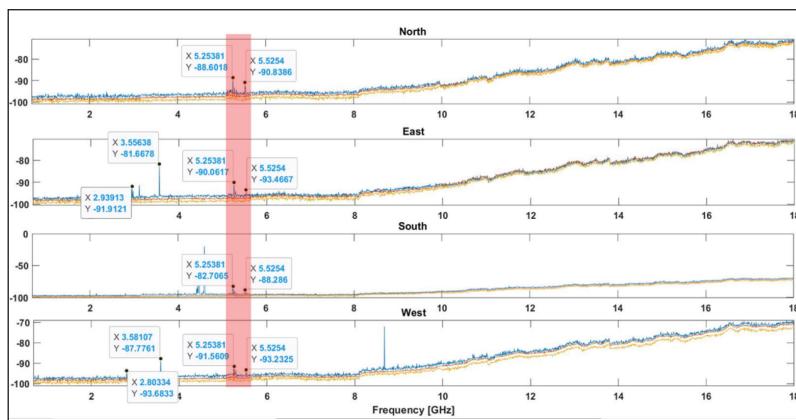
Profil spektrum pengukuran pada rentang frekuensi 0.068–0.680 GHz pada Gambar 3.21 menunjukkan spektrum yang sangat aktif pada rentang frekuensi sekitar 45–120 MHz. Sebaliknya, hasil pengukuran di rentang frekuensi tinggi (panel bawah Gambar 3.21), khususnya di frekuensi 350–680 MHz, terlihat sedikit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



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% (orange).

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

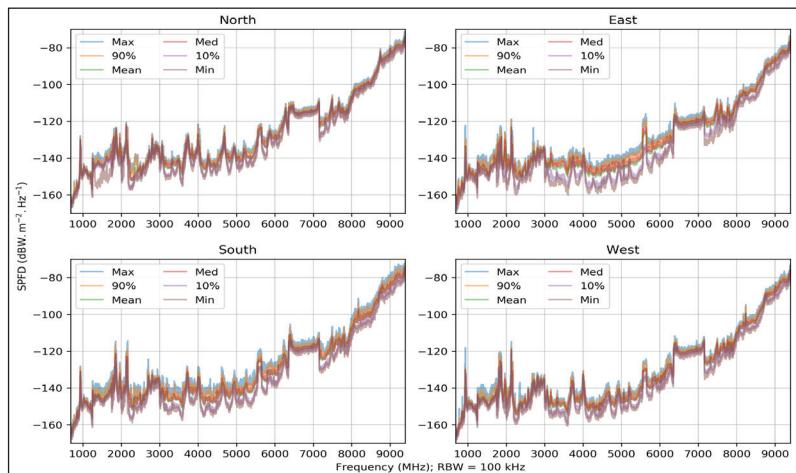
ITB juga bekerja sama dengan Indosat untuk mengembangkan antena *decommissioned dish* berdiameter 32 meter yang berada di Stasiun Bumi Indosat Jatiluhur, Purwakarta, Jawa Barat, untuk nantinya dikonversi menjadi teleskop radio (Gambar 3.23). Selanjutnya, antena dengan penamaan JAH-2A ini direncanakan 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

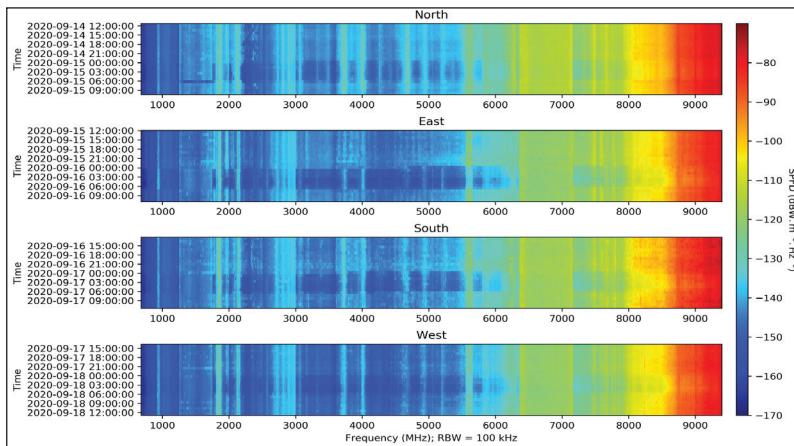
Sebagaimana yang telah dilakukan di lokasi Observatorium Nasional Timau, pengukuran RFI di Stasiun Bumi Indosat Jatiluhur juga dilakukan untuk mengetahui kondisi lingkungan radio di sekitar antena JAH-2A. Gambar 3.24 dan 3.25 menunjukkan spektrum RFI pada seluruh rentang frekuensi kerja alat, yaitu 680–9.400 MHz, dengan kecenderungan terus meningkat terutama dari frekuensi 6.000 MHz. Namun, jika kita berfokus pada frekuensi antena 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 antena 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)

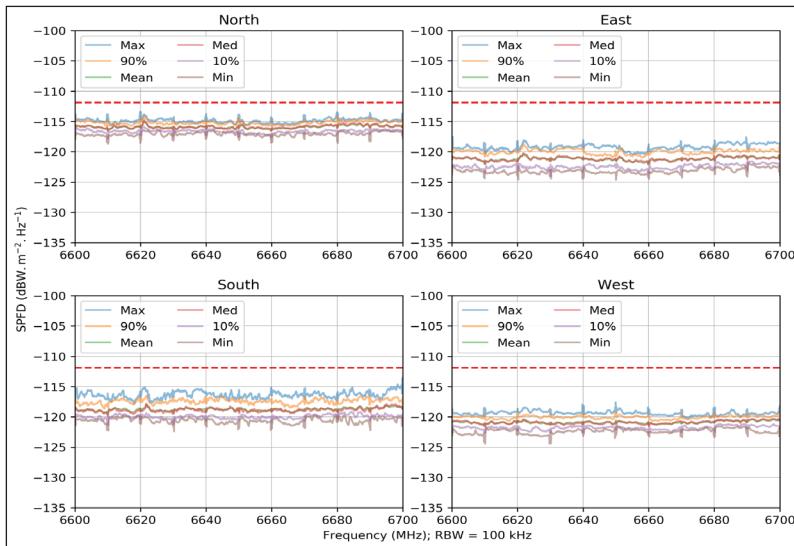
Gambar 3.24 Spektrum RFI seluruh frekuensi dalam polarisasi horizontal



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

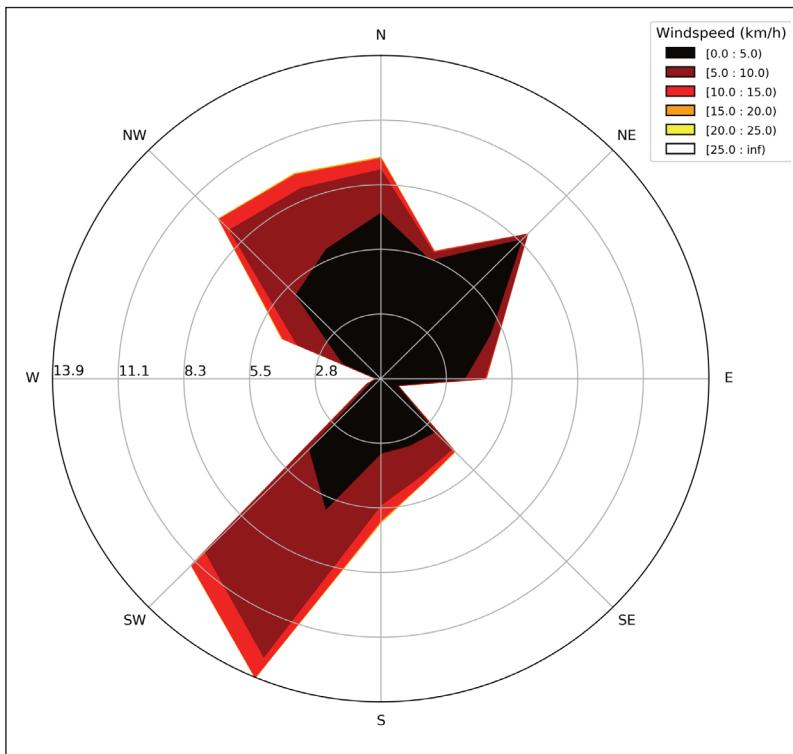


Keterangan: Spektrum RFI pada pita CH_3OH (metanol) di Jatiluhur. Garis merah putus-putus adalah *threshold* yang menandakan nilai 6 dB di atas median.

Sumber: Ramadhan (2021)

Gambar 3.26 Spektrum RFI pada pita CH_3OH di Jatiluhur

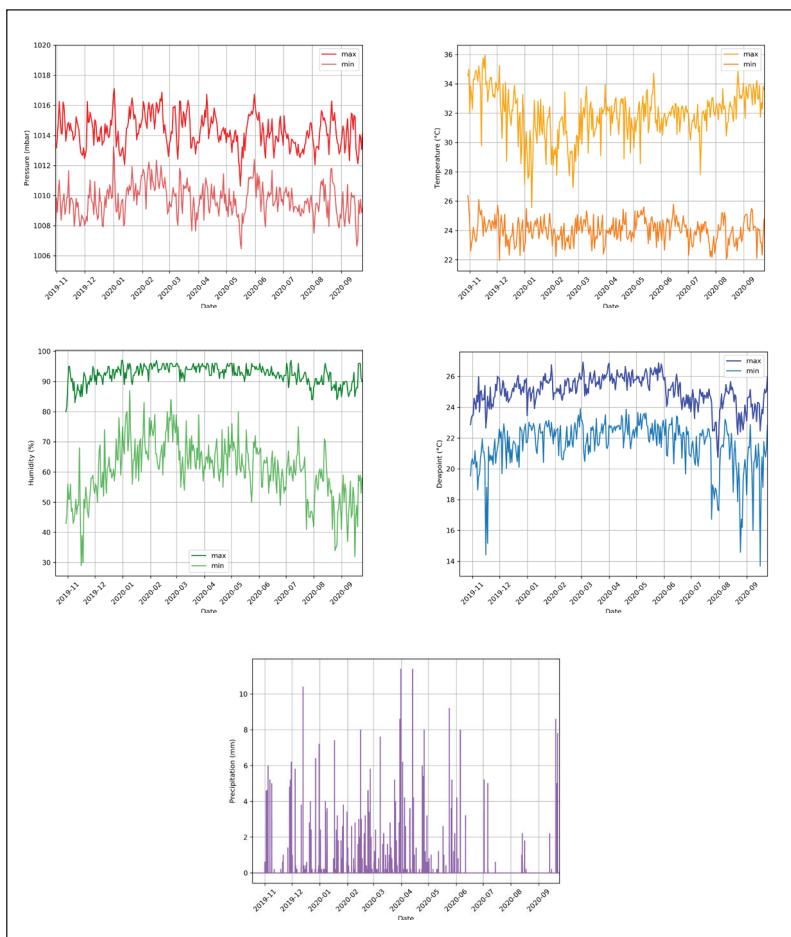
Selain pengukuran RFI, pengukuran cuaca juga dilakukan dengan menggunakan stasiun cuaca otomatis (AWS: *Automated Weather Station*). Terdapat beberapa parameter dasar kondisi cuaca seperti temperatur, tekanan udara, kelembapan, kecepatan angin, dan sebagainya (Gambar 3.27 dan 3.28). Karena daerah Jatiluhur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

	Antena VLBI Konvensional	Antena VGOS	Keuntungan VGOS
Ukuran antena	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 antena 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 antena 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 kancang 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 perealisasian 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., Kamenko, 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 Development 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, E.; 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 Sainsa 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.electicalelibrary.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.