

Bab VII

Dinamika Ionosfer Regional Indonesia: Perkembangan Riset dalam Empat Dekade Terakhir

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

A. Pendahuluan

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

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

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

© 2025 Editor & Penulis

Faturahman, A., Anggarani, S., Mardiani, A. S., Jiyo & Pradipta, R. Dinamika Ionosfer Regional Indonesia: Perkembangan Riset dalam Empat Dekade Terakhir. Dalam T. Djamaruddin & F. Nuraeni (Ed.), *Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi* (223–250).

Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1425.c1490 E-ISBN: 978-602-6303-86-8

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

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

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

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

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

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

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

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

B. Sekilas tentang Lapisan Ionosfer

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

C. Perkembangan Penelitian Dinamika Ionusfer secara Global

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

D. Perkembangan Penelitian Dinamika Ionusfer Regional Indonesia

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

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

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

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

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

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

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

Sekitar tahun 1987, instrumen pengamatan ionosfer di wilayah Indonesia mulai digunakan untuk penelitian dan kolaborasi dengan kolega dari luar negeri. Proyek yang tercatat pernah menggunakan data pengamatan ionosfer Indonesia untuk program kolaborasi internasional adalah *SUNDIAL campaign* (Walker et al., 1991, Abdu et al., 1993). Proyek ini dilaksanakan dalam rentang pengamatan antara 29 Mei 1987 sampai dengan 7 Juni 1987. Selama periode *campaign* ini, terjadi dua kali badai geomagnetik pada tanggal 29–30 Mei dan 6–7 Juni. Salah satu hasil menarik yang ditemukan dalam *campaign* ini adalah adanya struktur periodik pada parameter-parameter di lapisan F ($foF2$, $hpF2$, $h'F2$) dan lapisan E (foE , $fbEs$, $h'Es$) ionosfer dan struktur gelombang tersebut merambat dalam arah meridional.

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

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

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

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

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

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

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

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

E. Pengembangan Studi Dinamika Ionosfer Regional Indonesia

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Daftar Pustaka

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

- Badan Riset dan Inovasi Nasional. (t.t.). Inisiatif JSTIMI Buka Peluang Kolaborasi dalam Pengamatan Ionomer di ASEAN. Diakses pada 6 Agustus, 2024, dari <https://brin.go.id/orpa/posts/kabar/inisiatif-jstimi-buka-peluang-kolaborasi-dalam-pengamatan-ionosfer-di-asean>
- Banks, P.M., Kockarts, G. (1973). Aeronomy (Parts A and B). Academic Press, New York.
- Bibl, K. (1998). Evolution of the ionosonde. *Annals of Geophysics*, 41, 5–6.
- Cahyadi, M. N., Muslim, B., Muafir, I. N., Gusman, A. R., Handoko, E. Y., Anjasmara, I. M., ... & Sri Sumantyo, J. T. (2024). 3D traveling ionospheric disturbances during the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption using GNSS TEC. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 129(3), e2023JA031806.
- Cahyadi, M. N., Arisa, D., Muafir, I. N., Muslim, B., Rahayu, R. W., Putra, M. E., ... & Arief, S. (2022a). Directivity of coseismic ionospheric disturbances propagation following the 2016 West Sumatra Earthquake using three-dimensional tomography GNSS-TEC. *Atmosphere*, 13(9), 1532.
- Cahyadi, M. N., Arisa, D., Muafir, I. N., Muslim, B., Rahayu, R. W., Putra, M. E., & Wulansari, M. (2022b). Three-Dimensional Tomography of Coseismic Ionospheric Disturbances Following the 2018 Palu Earthquake and Tsunami from GNSS Measurements. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 9, 890603.
- Cahyadi, M. N., Muslim, B., Pratomo, D. G., Anjasmara, I. M., Arisa, D., Rahayu, R. W., ... & Muafir, I. N. (2022c). Co-seismic ionospheric disturbances following the 2016 West Sumatra and 2018 Palu earthquakes from GPS and GLONASS measurements. *Remote Sensing*, 14(2), 401.
- Cahyadi, M. N., Rahayu, R. W., Heki, K., & Nakashima, Y. (2020). Harmonic ionospheric oscillation by the 2010 eruption of the Merapi volcano, Indonesia, and the relevance of its amplitude to the mass eruption rate. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 405, 107047.
- Cahyadi, M. N., & Heki, K. (2015). Coseismic ionospheric disturbance of the large strike-slip earthquakes in North Sumatra in 2012: M w dependence of the disturbance amplitudes. *Geophysical journal international*, 200(1), 116–129.
- Cahyadi, M. N., & Heki, K. (2013). Ionospheric disturbances of the 2007 Bengkulu and the 2005 Nias earthquakes, Sumatra, observed with a regional GPS network. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(4), 1777–1787.

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

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

- Koeswadi dan Sulaeman. (1986d). Prediksi frekuensi komunikasi HF Pulau Jawa tahun 1985. *Proceeding Program Penelitian Pusat Riset Dirgantara LAPAN 1983/1984 Buku II*: 6, 73–79. ISSN 0216-4663. <https://karya.brin.go.id/id/eprint/21276/>
- Kusano, K. (Ed.). (2023). Solar-terrestrial environmental prediction. Springer Nature.
- Lynn, K. J. W., Harris, T. J., & Sjarifudin, M. (2000). Stratification of the F₂ layer observed in Southeast Asia. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 105(A12), 27147–27156.
- Lynn, K. J. W., Sjarifudin, M., Harris, T. J., & Le Huy, M. (2004, September). Combined TOPEX/Poseidon TEC and ionosonde observations of negative low-latitude ionospheric storms. In *Annales Geophysicae*, 22(8), 2837–2847). Göttingen, Germany: Copernicus Publications.
- Lynn, K. J. W., Harris, T. J., & Sjarifudin, M. (2006, July). Relationships between electron density, height and sub-peak ionospheric thickness in the night equatorial ionosphere. In *Annales Geophysicae*, 24(5), 1343–1353. Göttingen, Germany: Copernicus Publications.
- Lynn, K. J. W., Gardiner-Garden, R., Sjarifudin, M., Terkildsen, M., Shi, J., & Harris, T. J. (2008). Large-scale travelling atmospheric disturbances in the night ionosphere during the solar-terrestrial event of 23 May 2002. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70(17), 2184–2195.
- Manurung, S.L. (2001). Model total electron content lintang rendah: persamaan TEC di Bandung dan sekitarnya. LAPAN. <https://karya.brin.go.id/id/eprint/16158/>
- Materassi, M., Forte, B., Coster, A. J., & Skone, S. (Eds.). (2019). The dynamical ionosphere: A systems approach to ionospheric irregularity. Elsevier.
- Maruyama, T., Kawamura, M., Saito, S., Nozaki, K., Kato, H., Hemmakorn, N., ... & Ha Duyen, C. (2007, July). Low latitude ionosphere-thermosphere dynamics studies with inosonde chain in Southeast Asia. In *Annales Geophysicae*, 25(7), 1569–1577). Göttingen, Germany: Copernicus Publications.
- Moldwin, M. (2022). An introduction to space weather. Cambridge University Press.
- Muafiry, I. N., Meilano, I., Heki, K., Wijaya, D. D., & Nugraha, K. A. (2022). Ionospheric disturbances after the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Eruption above Indonesia from GNSS-TEC observations. *Atmosphere*, 13(10), 1615.

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

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

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