

Pemodelan Ekstrapolasi Profil Kelembapan dari Pengamatan GNSS-RO untuk Estimasi Total Kandungan Uap Air Atmosfer dalam Mendukung Sistem Prediksi Iklim untuk Ketahanan Pangan

Noersomadi

Dalam bab-bab sebelumnya telah dibahas bahwa cuaca dan iklim sangat berpengaruh pada produktivitas pertanian dan ketahanan pangan Indonesia. Efektivitas kebijakan dan strategi sektor pertanian untuk meningkatkan jumlah panen sangat ditentukan oleh akurasi prediksi cuaca dan iklim. Berbagai upaya telah dilakukan oleh Indonesia untuk membangun sistem prediksi iklim dan cuaca yang lebih baik, mulai dari pengkajian berbagai model iklim yang sesuai untuk wilayah tropis sampai pada operasionalisasi analisis dan prediksi musim di Indonesia. Tentunya, upaya-upaya tersebut tidak berhenti begitu saja. Berbagai riset terus dilakukan untuk meningkatkan akurasi dan resolusi, baik itu secara spasial maupun temporal.

Model-model iklim dan cuaca di dunia terus mengalami perkembangan. Hal tersebut sejalan dengan inovasi dalam sistem observasi

Noersomadi

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

© 2024 Editor & Penulis

Noersomadi. (2024). Pemodelan ekstrapolasi profil kelembapan dari pengamatan GNSS-RO untuk estimasi total kandungan uap air atmosfer dalam mendukung sistem prediksi iklim untuk ketahanan pangan. Dalam D. E. Nuryanto & I. Fathrio (Ed.), *Prediksi iklim untuk ketahanan pangan* (263–289). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1244.c1393. E-ISBN: 978-602-6303-49-3.

yang memberi kontribusi pada peningkatan akurasi pengukuran parameter iklim dan atmosfer secara vertikal dan horizontal. Hal ini penting dalam sistem parameterisasi model iklim dan cuaca. Bab ini menguraikan Pemodelan Ekstrapolasi Profil Kelembapan dari Pengamatan GNSS-RO untuk Estimasi Total Kandungan Uap Air Atmosfer untuk kasus di Indonesia, yang dimulai dari kompleksitas dinamika atmosfer di wilayah Benua Maritim Indonesia (BMI) yang menunjukkan pentingnya pengamatan profil kelembapan dalam memperbaiki kinerja model iklim dan atmosfer di Indonesia.

A. Dinamika Atmosfer Tropis

Kondisi atmosfer di wilayah Benua Maritim Indonesia (BMI) merupakan salah satu penggerak utama dinamika atmosfer regional ataupun global. Hal tersebut karena posisi geografis wilayah BMI di ekuator dan di antara Samudra Hindia di barat dan Samudra Pasifik di timur, serta di tengah antara daratan luas Asia di utara dan Australia di selatan. Adanya interaksi lautan, dataran dan atmosfer, menjadikan Indonesia memiliki dinamika atmosfer dan cuaca yang kompleks. Dinamika atmosfer tropis meliputi berbagai macam skala ditinjau dari dimensi ruang dan waktu (The COMET Program). Skala terpendek adalah fenomena turbulen dengan orde menit. Hujan badai memiliki orde jam-an, sedangkan klaster awan yang terorganisasi berskala harian. Gelombang planeter atmosfer ekuatorial merambat dengan orde harian sampai beberapa minggu (Andrew, 1987).

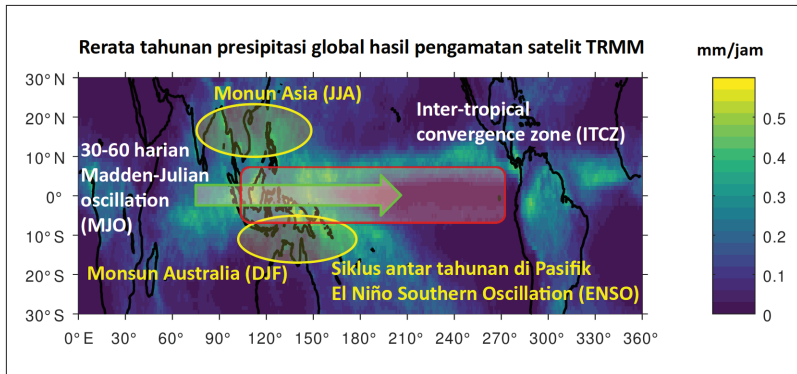
Siklus antarmusim yang dikenal sebagai Madden-Julian Oscillation (MJO) merambat dengan orde 30–60 harian (Gambar 9.1). Inisiasi MJO berawal dari Samudra Hindia bagian barat kemudian berpropagasi ke timur dan berasosiasi dengan pertumbuhan awan hujan melintasi BMI hingga sampai Samudra Pasifik (Zhang, 2005). Siklus dengan skala waktu tahunan adalah monsun. Monsun merupakan variabilitas musim dalam arah utara-selatan yang mendominasi iklim di BMI. Ada dua tipe monsun yang melintasi BMI. Monsun Asia aktif di bulan Juni-Juli-Agustus (JJA) ketika posisi semu matahari berada di utara. Belahan bumi utara menerima panas lebih yang menguapkan

air laut sebagai sumber untuk pembentukan awan dengan konsentrasi pertumbuhan awan dan presipitasi berada di sekitar daratan Asia dan sepanjang Pasifik bagian utara. Ketika matahari berpindah ke posisi semunya di selatan pada bulan Desember-Januari-Februari (DJF), Monsun Australia menjadi aktif. Sebaran pertumbuhan awan berada di wilayah BMI bagian selatan, daratan Australia serta Pasifik bagian selatan. Konvergensi uap air yang berkaitan dengan posisi semu matahari saat di utara (JJA) dan selatan (DJF) dan pertumbuhan awan disebut Inter Tropical Convergence Zone (ITCZ) (Holton, 2004).

Dinamika atmosfer tropis dengan periode antar tahunan disebut sebagai El Niño Southern Oscillation (ENSO). ENSO berkaitan dengan kenaikan suhu permukaan laut di Pasifik bagian barat dan perbedaan tekanan permukaan di Darwin (Australia) dan Tahiti. Fenomena ENSO dapat mengganggu variabilitas musiman (Lutgen et al., 2013).

Berbagai macam siklus dinamika atmosfer dari segi skala waktu dan fenomena yang mengganggu variabilitas musim dapat memengaruhi kondisi curah hujan yang berkaitan dengan pertanian. Dengan demikian, secara tidak langsung siklus dinamika atmosfer wilayah tropis BMI memiliki peranan penting dalam program pertanian untuk ketahanan pangan. Pengetahuan dan pemahaman dinamika atmosfer dapat memberi kontribusi pada peningkatan sistem prediksi iklim dan kinerja model.

Dinamika atmosfer di BMI berkaitan erat dengan variabilitas parameter utama cuaca dan iklim, yakni temperatur, kelembapan, tekanan udara, kecepatan dan arah angin. Temperatur adalah variabel utama karena merepresentasikan radiasi termal fluida atmosfer. Kelembapan merupakan variabel utama kedua karena berkaitan dengan kandungan uap air di atmosfer akibat proses penguapan air laut oleh matahari. Variabel kelembapan berkaitan dengan parameter curah hujan (Lutegen et al., 2013). Kelembapan atmosfer tinggi dapat memicu proses kondensasi untuk membentuk awan hujan. Pengetahuan tentang variabilitas kelembapan di atmosfer berdasarkan data observasi merupakan salah satu hal penting untuk memahami



Sumber: Dimodifikasi dari Tesis Noersomadi (2019)

Gambar 9.1 Rerata Tahunan Presipitasi Global Hasil Pengamatan Satelit Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)

karakteristik dinamika atmosfer. Data hasil pengukuran langsung parameter cuaca dan iklim (terutama temperatur dan kelembapan) adalah kunci untuk mengetahui proses fisis di atmosfer.

Kelembapan atmosfer menunjukkan kondisi uap air yang ada di atmosfer. Uap air memainkan peran dominan dalam keseimbangan radiasi dan siklus hidrologi. Ini adalah elemen utama dalam termodinamika atmosfer, sebagai pengangkut panas laten, berkontribusi terhadap penyerapan dan emisi radiasi, dan mengembun menjadi awan yang memantulkan dan menyerap radiasi matahari. Dengan demikian, uap air secara langsung memengaruhi keseimbangan energi. Di atmosfer bagian bawah, konsentrasi uap air dapat bervariasi berdasarkan besarnya dari satu tempat ke tempat lain. Variabilitas ini menimbulkan masalah mendasar dalam pemodelan iklim karena tingginya resolusi temporal dan spasial yang diperlukan untuk menyelesaikan semua proses yang menciptakan gradien tajam yang terkait dengan variabilitas. Kontribusi uap air terhadap fenomena atmosfer pada skala waktu dan ruang yang berbeda untuk iklim saat ini dan masa depan sehingga pemantauan uap air menjadi penting. Hal ini merupakan prasyarat untuk validasi model dan membantu dalam memahami perilaku atmosfer. Profil uap air menjadi parameter

penting yang menentukan stabilitas atmosfer dalam proses pemodelan iklim.

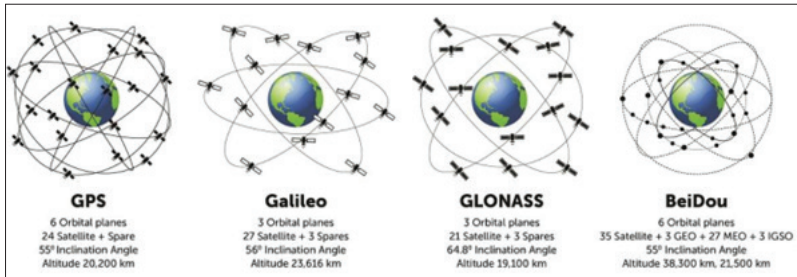
Pengukuran parameter iklim bermula di permukaan menggunakan sensor yang dipasang di ketinggian 2 m. Dalam beberapa kasus, sensor dipasang di ketinggian 10 m di atas permukaan tanah. Observasi atmosfer di permukaan tidak cukup untuk memahami dinamika atmosfer secara komprehensif karena hanya mengukur di satu lapisan (permukaan di atas bumi). Oleh karena itu, teknologi pengamatan atmosfer terus berkembang hingga dapat mengamati profil atmosfer secara vertikal. Balon radiosonde merupakan teknologi pengamatan vertikal atmosfer dari permukaan. Radiosonde mengukur temperatur, kelembapan, dan tekanan udara. Adapun data profil kecepatan dan arah angin diturunkan dari rekaman data lokasi sensor *global positioning system* (GPS) yang dibawa balon dengan asumsi bahwa balon bergerak acak terbawa oleh angin.

Di samping teknologi observasi atmosfer terestrial di permukaan dan menggunakan dengan balon radiosonde, terdapat pula teknologi pengamatan atmosfer berbasis satelit. Bab ini fokus membahas hasil pengukuran atmosfer dengan satelit yang menggunakan teknologi satelit navigasi, *global navigation satellite system* (GNSS), dan satelit orbit rendah. Teknik pengukuran vertikal atmosfer ini disebut *radio occultation* (RO). Penggunaan istilah umum GNSS dewasa ini adalah untuk mengganti istilah GPS sebagai satelit navigasi pertama yang mengukur waktu akurat dan posisi objek tertentu.

B. GNSS-RO

Global navigation satellite systems (GNSS) adalah sistem yang menggunakan satelit untuk memberikan informasi lokasi dan waktu kepada pengguna di seluruh dunia. Salah satu sistem GNSS yang paling terkenal adalah *global positioning system* (GPS), yang dioperasikan oleh pemerintah Amerika Serikat. Namun, ada sistem GNSS lain yang beroperasi, seperti sistem GLONASS Rusia dan sistem Galileo Uni Eropa (Gambar 9.2). GNSS menjadi makin penting untuk berbagai aplikasi, mulai dari navigasi GPS di ponsel pintar hingga pertanian

presisi dan mobil tanpa pengemudi. GNSS beredar di ketinggian Orbit Bumi Menengah (~20.000 km) dan memancarkan sinyal radio pada frekuensi 1.57542 GHz dan 1.2276 GHz dengan panjang gelombang sekitar 20 cm. Untuk keperluan navigasi, waktu yang dibutuhkan untuk menerima sinyal dari beberapa satelit, digunakan untuk menghitung posisi penerima.



Sumber: Lonitz (2023)

Gambar 9.2 Empat Konstelasi GNSS

Adapun *radio occultation* (RO) atau akultasi radio adalah teknik penginderaan jauh yang digunakan untuk mengukur sifat fisik atmosfer planet. Operator satelit yang ada di dalam okultasi Radio GNSS termasuk CHAMP (satelit), GRACE dan GRACE-FO, MetOp dan COSMIC-2 yang baru saja diluncurkan (Ding, et al., 2022).

Sejarah pengamatan bumi dengan GPS-RO, untuk selanjutnya ditulis GNSS-RO, yang pertama kali adalah misi GPS Meteorology/ GPS-Met pada tahun 1994 (Sokolovskiy et al., 2001). GPS-Met berhasil mengamati profil temperatur yang akurat dibandingkan pengamatan dari permukaan bumi menggunakan balon radiosonde. Setelah misi GPS-Met, pada tahun 2001 Geo Forcung Zentrum Germany meluncurkan satelit Challenging Mini-satellite Payload (CHAMP) (Wickert et al., 2001; Reightber et aal., 2003; Rother et al., 2019). CHAMP adalah mini satelit multifungsi milik Jerman di ketinggian rendah dengan presisi yang tinggi, yang dikendalikan GSOC dari stasiun bumi di Weilheim. CHAMP dapat digunakan untuk riset-riset

geosains dan atmosfer karena memiliki kelengkapan instrumen, seperti magnetosfer, akselerometer, sensor bintang, penerima GPS, reflektor retro laser, dan pengukur penyimpangan ion. Kombinasi dengan antena okultasi beresolusi tinggi, memungkinkan *atmospheric sounding* jauh hingga ke troposfer bawah (Wickert, et al., 2003), dan membantu melengkapi sistem pengukuran di permukaan untuk pemantauan dan pengembangan model-model iklim dan atmosfer. COSMIC telah menyediakan 1500–2000 suara per hari secara global, memberikan kontribusi signifikan terhadap prediksi cuaca numerik dan studi meteorologi (Anthes et al., 2008).

MetOp-A/B/C adalah tiga satelit meteorologi yang mengorbit kutub yang membentuk komponen segmen ruang angkasa dari keseluruhan Sistem Kutub EUMETSAT (EPS). MetOp-A diluncurkan pada tahun 2006 dan data RO-nya terbukti berkontribusi terhadap prakiraan cuaca hingga 10 hari ke depan. Misi ini diikuti oleh MetOp-B dan C. Sejak Maret 2019, ECMWF mulai mengasimilasi sudut tekuk dari MetOp-C, dengan kualitas yang serupa dengan pengukuran MetOp-A dan B. Saat ini, konstelasi MetOp dapat menghasilkan sekitar 2000 suara per hari. Sebagai langkah selanjutnya, grup EU-METSAT berencana meluncurkan enam satelit MetOp generasi kedua (MetOp-SG).

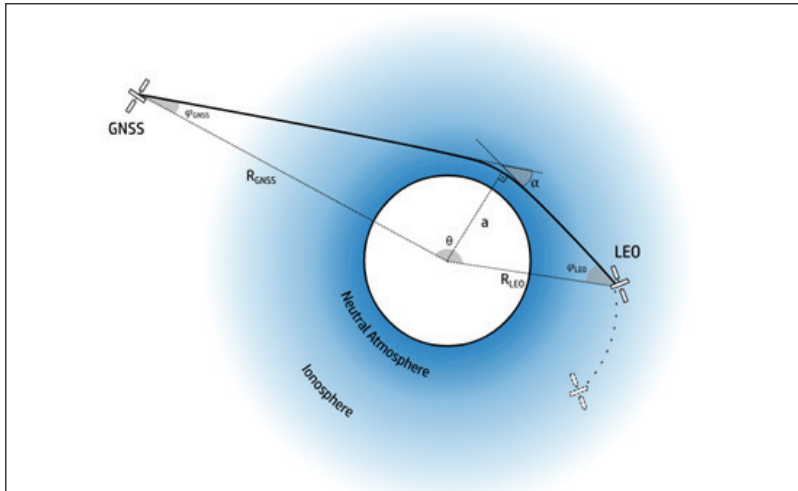
Pada April 2006, National Space Organization (NSPO) Taiwan bekerja sama dengan University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) USA berhasil merilis misi yang khusus didedikasikan untuk pengamatan atmosfer, yakni Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate (COSMIC) (Anthes, 2011). COSMIC bergabung dengan konstelasi satelit US-Taiwan dengan misi untuk menghasilkan data ‘pengukuran *near-real-time* okultasi radio’ (GPS-RO) yang dapat dimanfaatkan untuk prakiraan cuaca, pemantauan iklim, serta riset-riset atmosfer, ionosfer, dan geodetik. Data-data yang dihasilkan COSMIC juga telah berhasil diaplikasikan untuk memprediksi karakteristik badai serta pemantauan perubahan iklim dengan akurasi yang cukup baik (Anthes et al., 2008). Namun, COSMIC hanya dapat mencapai masa penggunaannya sampai 2011, yang kemudian dilanjutkan oleh COSMIC-2.

COSMIC-2 yang berhasil diluncurkan atas kerja sama National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) dan UCAR pada Juni 2019. COSMIC-2 adalah misi RO yang fokus untuk pengamatan wilayah ekuator (Schreiner et al., 2020). COSMIC-2 banyak berkontribusi pada sistem konstelasi yang ada yang terdiri dari 12 satelit. Misi payload COSMIC-2 menjadi penerima sinyal TriG GNSS-RO yang menerima lebih banyak data dengan menambahkan sistem GALILEO Eropa dan kemampuan pelacakan *global navigation satellite system* (GLONAS). COSMIC-2 telah menghasilkan sekitar 5000 *sounding* (pancaran) per hari di wilayah tropis, 35°LU – 35°LS , terutama untuk prakiraan siklon tropis (Ho et al., 2020). Sistem ini dapat memberikan densitas data yang jauh lebih tinggi, baik secara spasial maupun temporal. Implikasinya adalah dukungan untuk riset-riset dan pemantauan menjadi lebih baik.

Baik CHAMP maupun COSMIC, didasari oleh teknik oportunistik yang melekat pada GNSS-RO, dengan ide utamanya adalah menerima sinyal GNSS di orbit rendah Bumi (LEO) setelah merambat melalui atmosfer Bumi. Dari sudut pandang satelit GNSS, peristiwa okultasi dapat digambarkan saat penerima naik atau turun dari Bumi. Meskipun penerima tidak sepenuhnya dibayangi, atmosfer akan bertindak sebagai lensa sinyal. Saat sinar melewati bagian atmosfer, kecepatan sinyal GNSS diubah karena indeks biasnya tidak satu, dan jalurnya bengkok karena gradien indeks bias.

Aspek fundamental dari teknik ini bergantung pada asumsi optik geometris, yaitu mempertimbangkan sinyal (gelombang elektromagnetik) sebagai kumpulan sinar, dan asumsi atmosfer simetris bola di mana sinar tersebut membelok (Wu et al., 2022). Gambar 9.3 menggambarkan geometri suatu okultasi, yang diamati dari samping. Pandangan ini biasa disebut dengan bidang okultasi. Sudut belokan (*bending angle*) dan parameter tumbukan (*impact parameter*) masing-masing dinotasikan sebagai α dan a . Panjang vektor yang menggambarkan posisi satelit GNSS dan LEO masing-masing adalah R_{GNSS} dan R_{LEO} , dan sudut antara keduanya disebut sebagai sudut pisah, θ . Sudut antara sinar sinyal dan vektor GNSS dan LEO masing-masing

dinotasikan sebagai ϕ_{GNSS} dan ϕ_{LEO} . Dengan demikian, sinyal yang diterima digunakan untuk mengukur *bending angle* berkas sinyal, yang pada gilirannya dapat dibalik secara analitis menjadi informasi yang menggambarkan sifat bias dari penampang vertikal atmosfer.

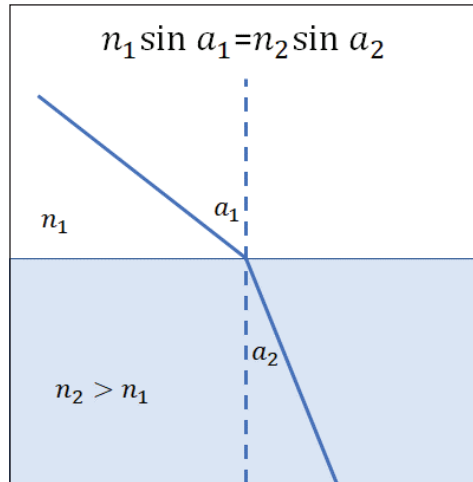


Sumber: Sievert (2019)

Gambar 9.3 Skema Geometri pada RO

GNSS-RO memanfaatkan jeda waktu tiba gelombang radio yang melintasi lapisan atmosfer. Jeda waktu tiba gelombang radio di satelit penerima *low earth orbit* (LEO) adalah data input untuk menghitung sudut belokan a (*bending angle*). Sudut a di setiap lapisan atmosfer antara 0,1–1 km diturunkan dengan asumsi bahwa atmosfer menyerupai irisan bawang yang berlapis-lapis. Sudut a memiliki hubungan dengan nilai indeks bias lapisan ke- n di atmosfer menurut hukum Snellius, $n_1 \sin a_1 = n_2 \sin a_2$ (Gambar 8.4). Selanjutnya, profil tekanan udara p , temperatur T , dan kelembapan q diperoleh dengan mengetahui bahwa indeks bias merupakan fungsi ketiga variabel tersebut.

Indeks bias (n) itu sendiri merupakan perbandingan kecepatan gelombang elektromagnetik dalam ruang hampa (c) dengan kecepatan melalui medium (v), yaitu $n = c/v$.



Sumber: Noersomadi (2024)

Gambar 9.4 Dasar Fisis GNSS-RO Berdasarkan Hukum Snellius

Pembiasan merupakan fungsi dari kerapatan elektron di ionosfer, suhu, tekanan, dan uap air di atmosfer. Sudut belok sinyal dianggap sebagai parameter utama dalam sistem asimilasi yang digunakan untuk penelitian operasional atmosfer. Pemrosesan lebih lanjut dari indeks bias memberikan informasi berharga mengenai profil suhu, uap air dan tekanan di atmosfer netral, serta kerapatan elektron di ionosfer. Oleh karena itu, teknik GNSS RO memberikan informasi berguna tentang struktur ionosfer, stratosfer, dan troposfer (Steiner et al., 2004) dan dapat mengatasi banyak keterbatasan sistem yang ada. Teknik ini memiliki sejumlah keunggulan antara lain potensi cakupan global, resolusi vertikal tinggi, akurasi tinggi, kemampuan segala cuaca dan bebas kalibrasi. Karena keunggulan unik ini, teknologi ini telah membuka peluang baru untuk berbagai aplikasi terkait meteorologi dan iklim serta untuk pemahaman yang lebih baik tentang atmosfer bumi. Misalnya, data GNSS RO dapat digunakan untuk (Anthes et al., 2000; Kirchengast 1999):

- 1) meningkatkan akurasi ramalan cuaca numerik dan studi sistem iklim;
- 2) memberikan ketinggian geopotensial yang akurat;
- 3) mengungkap tinggi dan bentuk tropopause dalam skala global (sebuah tujuan penting dalam penelitian atmosfer dan iklim);
- 4) menentukan distribusi global energi gelombang gravitasi dari troposfer atas hingga stratosfer;
- 5) menyelidiki peristiwa El Niño;
- 6) menyelidiki distribusi uap air global dan memetakan aliran uap air di atmosfer;
- 7) meningkatkan bidang tekanan permukaan global;
- 8) mempelajari ketidakaturan kerapatan elektron di ionosfer; dan
- 9) *GNSS-RO bending* di atmosfer lembap.

Bab ini fokus mendiskusikan profil q (kelembapan) dengan satuan gram per kilogram (g/kg) hasil pengamatan GNSS-RO COSMIC-2. Profil q merupakan data input untuk menghitung total kandungan uap air di atmosfer. Data kandungan uap air di atmosfer sangat penting untuk mendukung pengembangan model prediksi numerik dan analisis distribusi awan hujan. Akan tetapi, permasalahan muncul dalam hal ketidakmampuan teknik GNSS-RO untuk mengamati atmosfer dekat permukaan. Penetrasi kejadian okultasi di dekat permukaan gagal mengukur sudut belokan secara akurat sehingga meninggalkan data kosong pada setiap profil q , terutama di bawah ketinggian atmosfer (z) 2 km.

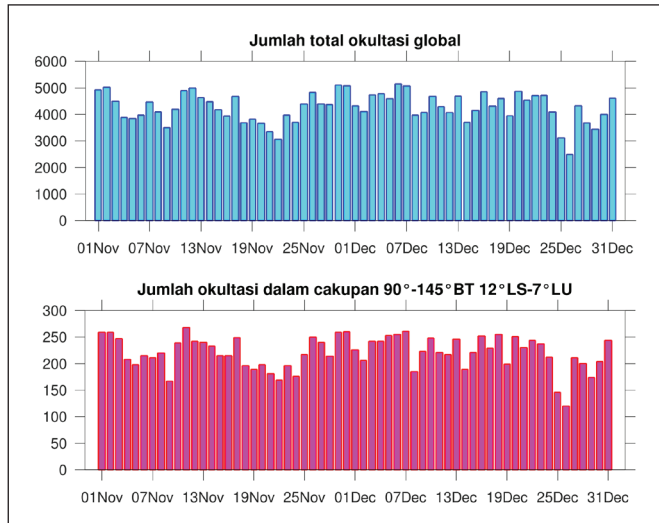
Bahasan dalam bab ini lebih menekankan pada contoh bagaimana mengembangkan model ekstrapolasi untuk estimasi data profil q hingga permukaan bumi ($z = 0$ km). Hasil model ekstrapolasi dijadikan sebagai ekstensi profil q untuk mengisi data kosong sehingga diperoleh profil q sampai permukaan. Profil q yang sudah lengkap digunakan untuk menghitung total kandungan uap air. Definisi total kandungan uap air adalah hasil integrasi profil q terhadap perubahan tekanan udara dibagi dengan percepatan gravitasi. Penjelasan rinci mengenai total kandungan uap air akan diuraikan di bagian akhir bab ini.

C. COSMIC-2

Satelit COSMIC-2 mengorbit pada sudut inklinasi 28° . Orbit inklinasi rendah dekat ekuator menghasilkan okultasi lebih banyak di sekitar tropis. Schreiner et al. (2020) melaporkan bahwa jumlah okultasi dari 6 satelit LEO misi COSMIC-2 mencapai ~ 4.000 profil atmosfer dalam satu hari. Gambar 9.5 (atas) menunjukkan jumlah okultasi global dari 1 November–31 Desember 2020. Secara rata-rata jumlah profil atmosfer hasil COSMIC-2 mencapai ~ 4.000 sepanjang batasan waktu kajian dalam bab ini. Kemudian penulis membatasi wilayah kajian yang berfokus pada Benua Maritim Indonesia (BMI) $90^\circ\text{--}145^\circ\text{BT}$ dan $12^\circ\text{LS--}7^\circ\text{LU}$. Terlihat bahwa jumlah data atmosfer hasil rekaman COSMIC-2 di BMI kurang lebih 200 profil (Gambar 9.5 [bawah]). Ketersediaan data profil atmosfer hasil pengamatan COSMIC-2 membuka peluang untuk riset variabilitas atmosfer 4-dimensi, di mana tiap variabel merupakan fungsi ruang bujur, lintang, serta ketinggian dan fungsi waktu.

Untuk lebih memperjelas sebaran data okultasi COSMIC-2, penulis mengambil sampel hasil pengamatan pada tanggal 11 November 2020 (Gambar 9.6). Pada waktu tersebut terdapat kejadian okultasi mencapai 250 profil atmosfer tersebar merata di BMI (lingkaran ungu). Kotak kuning pada Gambar 9.6 adalah lokasi pengamatan radiosonde yang secara rutin 2 kali peluncuran dalam 1 hari pada jam 00 dan 12 UTC. Lokasi radiosonde di BMI, yakni di Medan, Padang, Bengkulu, Jakarta, Cilacap, Surabaya, Pontianak, Pangkalan Bun, dan Makassar dikelola oleh Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Indonesia. Selain itu, terdapat lokasi rutin di Changi Airport, Singapura, dan Kuching, Malaysia (NOAA, NCEI¹). Dari Gambar 9.6 ini kita dapat melihat bahwa lokasi pengamatan vertikal atmosfer dari permukaan terbatas di wilayah Indonesia daratan bagian barat dan beberapa di wilayah tengah di antara $95^\circ\text{--}120^\circ\text{BT}$. Tidak ada data pengamatan vertikal di wilayah BMI bagian lautan ataupun bagian timur dari peluncuran radiosonde. Oleh karena itu, data GNSS-RO

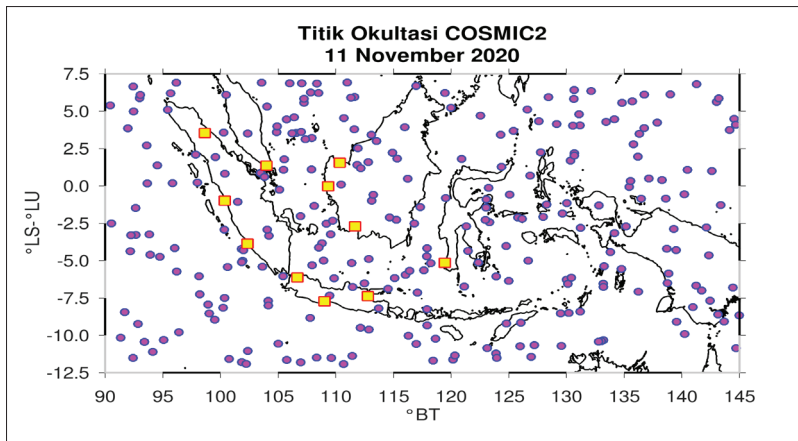
¹ National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) dan National Centers for Environmental Information (NCEI) - Amerika Serikat.



Sumber: Noersomadi (2024)

Gambar 9.5 Jumlah total okultasi global (atas) dan dalam cakupan wilayah Benua Maritim Indonesia (bawah) dari pengamatan satelit COSMIC-2.

terutama hasil pengamatan COSMIC-2 ini sangat bermanfaat untuk melengkapi kekosongan pengamatan vertikal di area yang tidak terdapat peluncuran radiosonde.

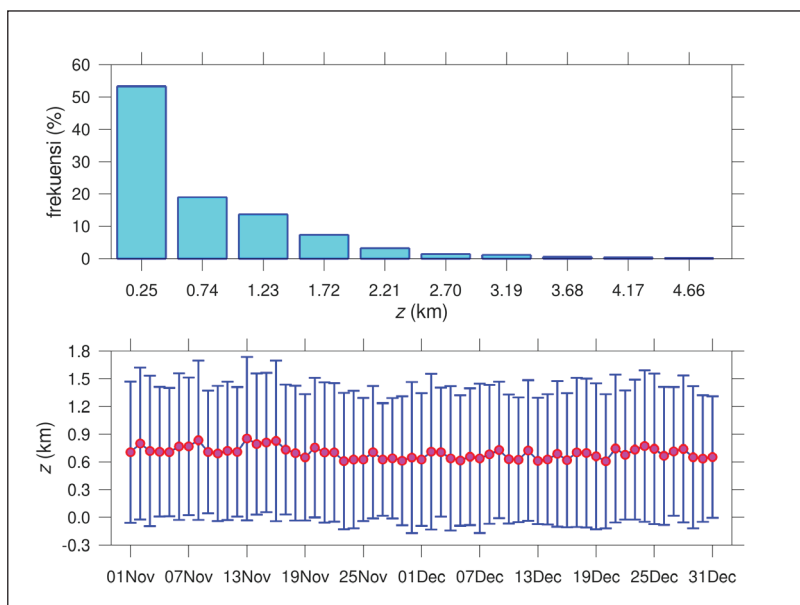


Keterangan: detail ada di dalam teks

Sumber: Noersomadi (2024)

Gambar 9.6 Lokasi Kejadian Okultasi (Lingkaran Ungu) dan Titik Peluncuran Radiosonde (Kotak Kuning)

Sekarang kita fokus pada statistik penetrasi kejadian okultasi GNSS-RO COSMIC-2 sebelum masuk pada penjelasan model ekstrapolasi. Gambar 9.7 (atas) menunjukkan diagram batang capaian penetrasi dari tiap kejadian okultasi. Lebih dari ~53% okultasi COSMIC-2 mencapai 0,3 km di atas permukaan bumi. Sebanyak 18%, 15%, dan 8% berurut-urut okultasi mencapai 0,8 km; 1,3 km; dan 1,8 km yang berarti bahwa total lebih dari 40% profil atmosfer hasil pengamatan GNSS-RO tidak lengkap mencapai permukaan bumi. Secara rata-rata capaian okultasi mencapai 0,8 km di atas permukaan bumi. Grafik pada Gambar 9.7 (bawah) memperlihatkan bahwa dalam beberapa kasus waktu pengamatan terdapat standar deviasi lebih besar dari reratanya. Hasil statistik yang menunjukkan standar deviasi lebih besar dari reratanya memberi arti bahwa capaian penetrasi kejadian okultasi sangat beragam. Secara keseluruhan, Gambar 9.7 menginformasikan bahwa terdapat kekosongan data di dekat permukaan untuk tiap profil atmosfer, dalam riset ini variabel q . Untuk melengkapi (mengisi data kosong) profil q hingga mencapai permukaan, riset ini mengembangkan model ekstrapolasi linier kuadratik.



Keterangan: Rerata dan standar deviasi capaian ketinggian okultasi dari semua profil di BMI

Sumber: Noersomadi (2024)

Gambar 9.7 Diagram Batang Distribusi Capaian Penetrasi Kejadian Okultasi di pada Tiap Interval Ketinggian di Atas Permukaan Bumi (Atas)

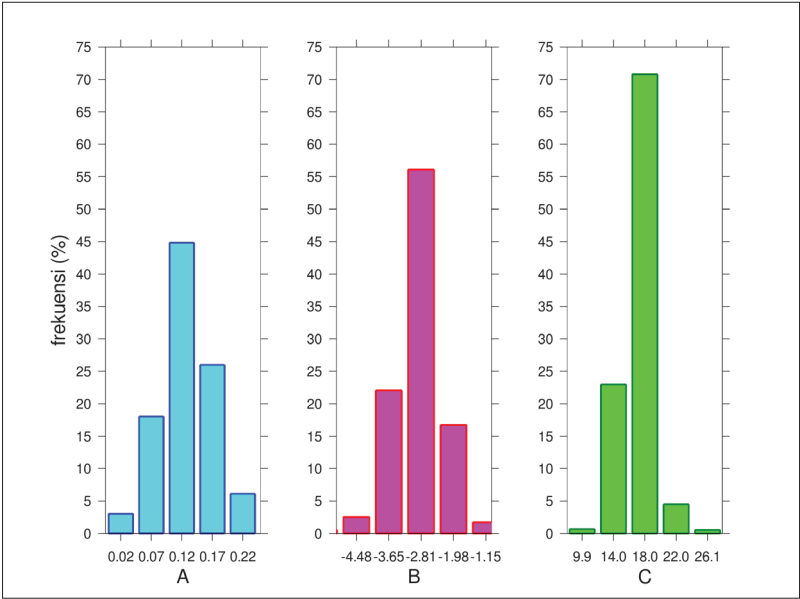
D. Model Ekstrapolasi Linier Kuadratik

Riset ini mengembangkan model ekstrapolasi linier kuadratik (Wilks, 2005). Persamaan 9.1 adalah model kuadratik sederhana yang mengandung koefisien A dan B masing-masing untuk variabel kuadrat dan linier, serta konstanta C yang belum diketahui.

$$Q_{mod}(z) = Az^2 + Bz + C \quad (9.1)$$

Penulis menerapkan pendekatan penapisan polinom orde-2 untuk mencari A, B, dan C dari setiap data profil q_{mod} sebagai fungsi ketinggian z . Penambahan subskrip *mod* pada variabel q bertujuan untuk mendefinisikan variabel kelembapan hasil model. Gambar

9.8 adalah distribusi frekuensi tiap koefisien. Dengan menggunakan semua sampel profil q sepanjang batas waktu pengamatan (1 November–31 Desember 2020), nilai rerata dan standar deviasi dari tiap koefisien berurut-urut adalah $0,13 \pm 0,05$, $-2,90 \pm 0,66$, dan $17,12 \pm 2,25$. Frekuensi rerata koefisien A mencapai 45%, rerata koefisien B hingga 55%, dan koefisien C menunjukkan 70%. Berdasarkan hasil pada Gambar 9.8 ini maka model persamaan linier kuadratik dipilih dengan mengambil nilai rerata tiap koefisien. Ini berarti bahwa q_{mod} pada $z = 0$ km bernilai $17,12$ g/kg.

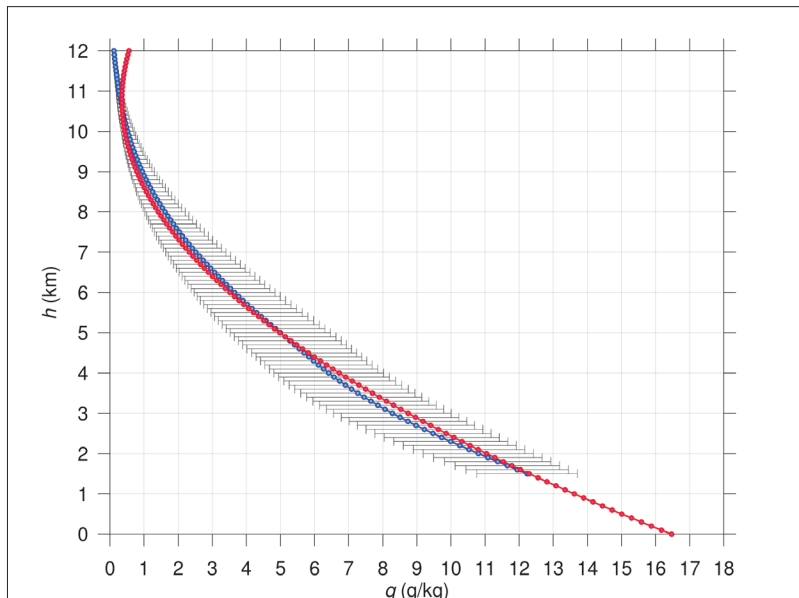


Sumber: Noersomadi (2024)

Gambar 9.8 Distribusi Frekuensi Koefisien A, B, dan C untuk Model Ekstrapolasi Linier Kuadratik

Gambar 9.9 menunjukkan rerata dan standar deviasi profil q_{obs} dari seluruh sampel data COSMIC-2 di wilayah BMI hingga 1,5 km di atas permukaan. Pembatasan data yang ditampilkan hingga 1,5 km adalah karena jumlah sampel di bawah 1,5 km lebih sedikit

dibandingkan jumlah sampel di atasnya. Dengan demikian, data hasil pengamatan yang ditampilkan di Gambar 9.9 dapat dipercaya secara statistik. Nilai rerata observasi profil q_{obs} bernilai kurang dari 1 g/kg di ketinggian 10 km dan makin mendekati 0 g/kg di ketinggian 12 km. Standar deviasi di antara 10–12 km sangat kecil yang berarti bahwa variasi q_{obs} di interval ketinggian ini sangat rendah atau kondisi udara sangat kering. Standar deviasi berangsur meningkat di bawah 10 km seiring mendekati permukaan bumi. Lapisan atmosfer di wilayah BMI memiliki kelembapan tinggi sebesar 5 g/kg pada ketinggian 5 km. Pada ketinggian rerata lapisan batas atmosfer antara atmosfer bebas dan lapisan permukaan ($z = 12$ km) tercatat rerata q_{obs} sebesar 11 g/kg. Secara garis besar, kurva rerata data profil q_{obs} memiliki pola, seperti kurva fungsi kuadratik.

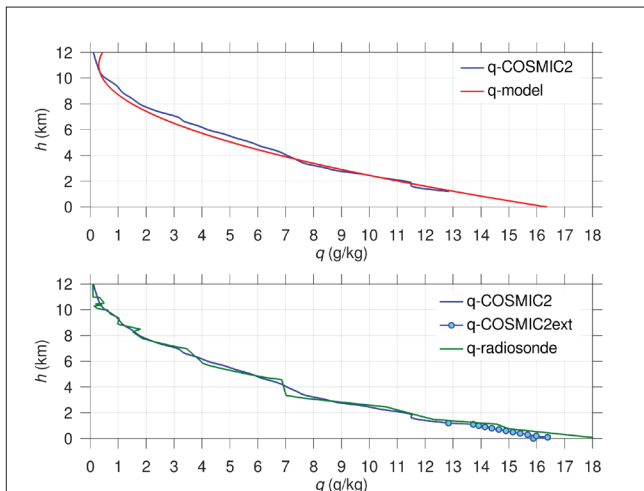


Keterangan: Model q dengan menerapkan nilai rerata koefisien A, B, dan C pada persamaan 9.1 (garis dan lingkaran merah).

Sumber: Noersomadi (2024)

Gambar 9.9 Rerata (Garis dan Lingkaran Biru) dan Standar Deviasi (Garis Horizontal Abu-abu) Data Observasi Profil q

Garis merah pada Gambar 9.9 menunjukkan grafik hasil model ekstrapolasi linier kuadratik. Fungsi persamaan kuadrat memiliki titik balik atau puncak kurva sebagai nilai minimum atau maksimum. Model fungsi $q_{mod}(z)$ tidak memiliki titik potong terhadap sumbu- z karena nilai rerata koefisien A, B, dan C memberikan nilai diskriminan negatif ($-0,53$). Nilai minimum model fungsi $q_{mod}(z)$ adalah sebesar $0,35 \text{ g/kg}$ di ketinggian $z = 10,8 \text{ km}$. Hasil model $>11 \text{ km}$ menunjukkan bias terhadap rerata data observasi. Kita dapat mengabaikan bias tersebut karena fokus riset ini adalah memperoleh model penapisan yang akurat terutama di ketinggian dekat permukaan. Model fungsi $q_{mod}(z)$ terlihat berhimpit terhadap profil rerata q_{obs} dengan sedikit lebih kecil pada rentang $5\text{--}10 \text{ km}$ dan lebih besar pada $3\text{--}5 \text{ km}$. Secara keseluruhan, model fungsi $q_{mod}(z)$ menunjukkan kesesuaian dengan pola rerata data COSMIC-2. Hasil rerata data observasi dan model menampilkan tren linier di dekat permukaan ($<2 \text{ km}$). Oleh karena itu, nilai model fungsi kuadratik ini dapat bermanfaat untuk mengisi kekosongan data profil q_{obs} hingga $z = 0 \text{ km}$.



Keterangan: Profil radiosonde, COSMIC-2, dan model yang ditambahkan dengan standar deviasi data pengamatan radiosonde.

Sumber: Noersomadi (2024)

Gambar 9.10 Profil COSMIC-2 pada Tanggal 13 Desember 2020 dan Model (Atas)

Langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian model ekstrapolasi linier kuadratik untuk meminimalisasi bias antara hasil model dengan data q nyata, yaitu data q_{rs} di dekat permukaan hasil pengamatan radiosonde (subskrip rs berarti q hasil radiosonde). Pengamatan dengan balon radiosonde mengukur profil atmosfer dari permukaan bumi. Data q hasil radiosonde dapat dianggap sebagai acuan untuk pengujian dan perbandingan dengan hasil model, terutama di ketinggian <2 km. Perhitungan yang disampaikan dalam bab ini menggunakan data pengamatan radiosonde di Singapura pada interval 1 November–31 Desember 2020. Nilai standar deviasi q_{rs} ($\sigma_{q_{rs}}$) dihitung berdasarkan seluruh sampel pengamatan radiosonde. Nilai $\sigma_{q_{rs}}$ akan dijadikan input untuk menambahkan fluktuasi pada profil q_{mod} hasil penapisan tiap q_{obs} .

Penjelasan singkat penerapan model linier ekstrapolasi untuk mengisi data kosong pada profil q_{obs} di dekat permukaan adalah sebagai berikut. Gambar 9.10 (atas) memperlihatkan contoh kasus profil individu data q_{obs} (q -COSMIC-2) beserta model penapisan q_{mod} . Penetrasi COSMIC-2 hanya mencapai 1,5 km di atas permukaan bumi yang berarti bahwa terdapat data kosong q_{obs} di bawah 1,5 km. Profil $q_{mod}(z)$ terlihat berhimpit dengan profil q_{obs} . Jika pada rentang ketinggian di mana profil q_{obs} tidak ada data (di bawah 1,5 km), hanya diisi dengan $q_{mod}(z)$ maka tidak ada fluktuasi profil q yang mendekati nilai nyata. Oleh karena itu, perlu dilakukan penambahan data $\sigma_{q_{rs}}$ terhadap profil q_{mod} . Gambar 9.10 (bawah) mendeskripsikan perbandingan data observasi COSMIC-2 (q -COSMIC-2) dan data radiosonde pada tanggal 13 Desember 2020. Profil q -COSMIC-2ext adalah ekstensi data observasi berdasarkan hasil model ekstrapolasi linier kuadratik q_{mod} setelah ditambahkan $\sigma_{q_{rs}}$. Profil q -COSMIC-2ext terlihat sesuai dengan profil q_{rs} . Dengan demikian, data lengkap profil q_{obs} siap digunakan untuk estimasi total kandungan uap air.

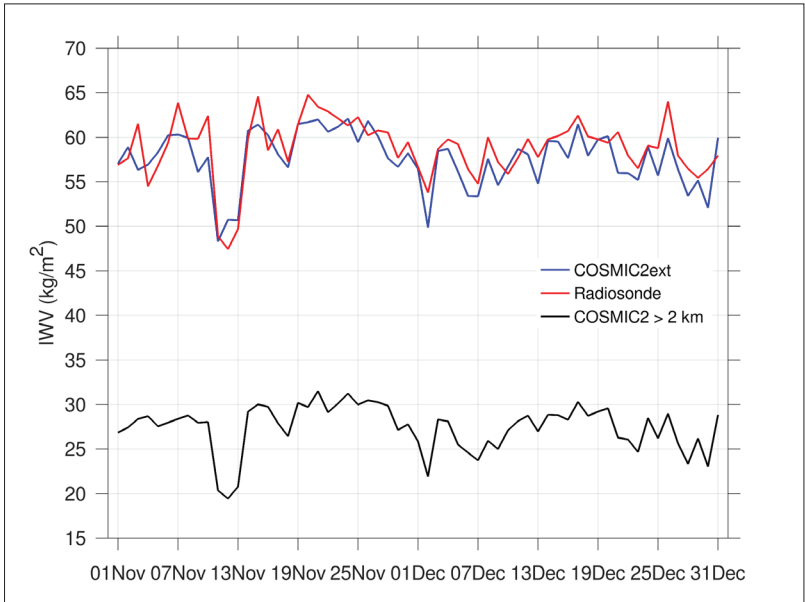
E. Estimasi Total Kandungan Uap Air

Total kandungan uap air (*integrated water vapor*; IWV) merupakan hasil integrasi kelembapan $q(z)$ terhadap perubahan tekanan udara

$p(z)$ dibagi dengan percepatan gravitasi g ($9,8 \text{ m/S}^{-2}$). Persamaan 9.2 menggambarkan formulasi IWV yang bergantung pada nilai q .

$$IWV = \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} q dp \tag{9.2}$$

Variabel $q(z)$ adalah besaran nondimensional dengan satuan g/kg atau kg/kg, adapun satuan profil $p(z)$ dalam hekto-Pascal (hPa). Berbeda dengan kelembapan, variasi tekanan udara terhadap waktu di atmosfer relatif kecil. Data kosong profil $p(z)$ di bawah $\sim 1,5 \text{ km}$ hasil observasi COSMIC-2 dapat diisi dengan data tekanan hasil dari persamaan hidrostatik $p(z) = -\rho g z$, dengan ρ adalah densitas udara di permukaan sebesar $1,22 \text{ kg/m}^3$. Persamaan hidrostatik tersebut menggunakan nilai tekanan udara standar di permukaan $p(z=0)$ sebesar 1013 hPa (Holton, 2004).



Sumber: Noersomadi (2024)

Gambar 9.11 Deret waktu IWV radiosonde, IWV COSMIC-2 > 2km dan total IWV COSMIC-2ext.

Analisis dimensi variabel menunjukkan bahwa satuan I WV dalam kilogram per meter kuadrat (kg/m^2). Nilai 1 kg/m^2 artinya setara dengan 1 kg uap air berada di atas luas permukaan 1 m^2 . Satuan kg/m^2 bersesuaian dengan 1 mm dalam meteorologi. Definisi 1 mm adalah air seberat 1 kg di atas permukaan 1 m^2 akan mencapai ketinggian 1 mm . Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa satuan 1 kg/m^2 setara dengan densitas air dalam volume 10^{-3} m^3 .

Perhitungan yang disajikan dalam bab ini lebih mengarah pada cara menghitung integrasi uap air dalam dua tahap untuk menguji tingkat signifikan penerapan model ekstrapolasi linier kuadrat pada profil q . Tahap kesatu adalah menghitung integral dari p_1 pada $z = 2 \text{ km}$ hingga p_2 ($z = 20 \text{ km}$). Tahap kedua dengan menghitung total I WV dengan batas integral dari p_1 ($z=0 \text{ km}$) hingga p_2 ($z = 20 \text{ km}$). Hasil integrasi sampel individu q -COSMIC-2 pada Gambar 9.9 menunjukkan nilai I WV $> 2 \text{ km}$ sebesar $26,97 \text{ kg/m}^2$. Total I WV data profil q_{rs} dan q -COSMIC-2ext berurut-urut sebesar $57,78 \text{ kg/m}^2$ dan $54,79 \text{ kg/m}^2$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penerapan model ekstrapolasi memberikan dampak pada estimasi total I WV yang mendekati pengamatan radiosonde. Pada contoh kasus individu ini, terlihat bahwa I WV $> 2 \text{ km}$ hanya berkisar $\sim 0,5$ dari total I WV.

Analisis selanjutnya adalah melakukan perbandingan I WV hasil GNSSRO terhadap observasi radiosonde sepanjang studi kasus 1 November–31 Desember 2020. Profil COSMIC-2 dipilih dengan kriteria jarak okultasi $\leq 3^\circ$ dan waktu kejadian $\leq 3 \text{ jam}$ dari lokasi dan waktu peluncuran balon. Apabila terdapat profil lebih dari satu dalam radius $\leq 3^\circ$ atau waktu okultasi $\leq 3 \text{ jam}$ maka dipilih yang paling dekat dan paling pendek beda waktu pengamatannya. Langkah yang sama dilakukan mulai dari penerapan model ekstrapolasi untuk mengisi data kosong pada tiap profil q_{obs} sampai dengan integrasi 2 tahap (integrasi dari ketinggian 2 km dan integrasi total).

Gambar 9.11 menunjukkan hasil total I WV hasil pengamatan radiosonde dan estimasi I WV dari GNSSRO dengan 2 proses integrasi. Label I WV COSMIC-2 $> 2 \text{ km}$ adalah untuk integrasi profil q_{obs} dari ketinggian 2 km . I WV COSMIC-2ext merepresentasikan hasil integral

total untuk q_{obs} yang telah diekstrapolasi. Statistik rerata \pm standar deviasi data I WV COSMIC-2 > 2 km, I WV COSMIC-2ext dan I WV radiosonde berurut-urut adalah 27.41 ± 2.63 kg/m², 57.60 ± 3.15 kg/m², 58.82 ± 3.41 kg/m². Korelasi linier deret waktu I WV COSMIC-2 > 2 km terhadap I WV radiosonde dan I WV COSMIC-2ext terhadap I WV radiosonde sama-sama menunjukkan nilai 0,8. Akan tetapi, nilai rerata rasio I WV COSMIC-2 > 2 km terhadap I WV radiosonde hanya bernilai 0,46, sedangkan rerata rasio I WV COSMIC-2ext terhadap I WV radiosonde sebesar $0.98 \approx 1$. Hasil ini mengindikasikan bahwa penerapan model ekstrapolasi terhadap profil kelembapan untuk estimasi total I WV berhasil mendekati akurasi data hasil pengukuran radiosonde.

1. Kemajuan Penerapan RO pada Prediksi Cuaca Numerik

Keunggulan observasi atmosfer menggunakan teknologi GNSS RO adalah mampu merekam data di wilayah yang sulit terjangkau untuk pengamatan dengan balon radiosonde. Wilayah yang dimaksud adalah seperti lautan dan samudra, wilayah pegunungan tinggi, serta wilayah kutub utara dan kutub selatan. Pengamatan profil atmosfer dengan balon radiosonde di wilayah laut dan samudra memerlukan upaya menuju ke titik tertentu di tengah laut menggunakan kapal riset. Sangat sulit untuk mendapatkan data secara kontinyu karena tentu akan memakan biaya sangat tinggi. Demikian pula upaya pengamatan radiosonde di daerah pegunungan dan kutub. Di wilayah kutub, keterbatasan waktu pengamatan disebabkan salah satunya karena gaya Coriolis mencapai maksimum sehingga kecepatan angin menjadi sangat tinggi yang dapat membahayakan saat pengisian balon dengan udara hidrogen atau halogen.

Dewasa ini, teknologi GNSS RO mampu mengukur profil atmosfer di seluruh wilayah global. Apalagi dengan adanya satelit konstelasi baru COSMIC-2, kebutuhan pengamatan untuk memperoleh data di wilayah yang sulit dijangkau oleh tenaga manusia, seperti samudra dan pegunungan dapat teratasi. Profil RO juga memberi keuntungan

dalam hal resolusi ketinggian dan cakupan ketinggian. Secara umum, pengamatan balon radiosonde mencapai ketinggian rata-rata 30 km. Hal itu pun apabila pengamatan radiosonde menggunakan balon berukuran besar. Apabila sensor radiosonde dibawa dengan balon berukuran kecil 300–600 g maka capaian ketinggian yang bisa diukur oleh sensor radiosonde hanya sekitar 24–27 km. Adapun pengamatan satelit aktif non-RO, dapat mengamati profil, tetapi dengan resolusi rendah setiap ~ 3 km. Keunggulan pengamatan teknik RO menyediakan profil dengan resolusi mencapai 0,1 km di wilayah troposfer bawah, serta 1 km di wilayah stratosfer dengan cakupan ketinggian mencapai 50 km. Dengan demikian, selain resolusi vertikal tinggi, ketersediaan data hingga di ketinggian mencapai 50 km (1 hPa) hanya mampu diukur dengan teknologi RO.

Mengingat keuntungan yang dijelaskan dalam bagian sebelumnya, pengukuran RO dapat diterapkan pada operasional *numerical weather prediction* (NWP) dan pemantauan iklim. Awalnya, data RO secara operasional diasimilasikan ke dalam sistem Prediksi Cuaca Numerik di ECMWF, NCEP, dan Met Office. Hasil beberapa penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa pengukuran RO mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap NWP. Pada 12 Desember 2006, ECMWF mulai mengasimilasi data RO yang diperoleh dari COSMIC secara operasional dan berhasil memberi penurunan signifikan dalam bias rata-rata untuk perkiraan dan analisis jangka pendek di belahan bumi selatan (Luntama, 2008). Menurut Luntama (2008), setelah NCEP memasukkan data COSMIC RO ke dalam sistem asimilasinya, skor korelasi anomali pada 500 hPa untuk belahan bumi selatan meningkat sebesar 4,5 jam dalam periode prediksi tujuh hari. Hasil serupa diperoleh pada ketika Met Office mengasimilasi refraksi CHAMP dan GRACE ke dalam sistem perkiraan operasional mereka. Prakiraan tersebut meningkat secara signifikan untuk wilayah troposfer atas dan stratosfer bawah (UTLS) di belahan bumi selatan.

Model ekstrapolasi untuk mengestimasi profil kelembapan spesifik telah menunjukkan kontribusi untuk melengkapi kekosongan data di dekat permukaan. Oleh karena itu, total kandungan uap air

terintegrasi dapat dihitung secara menyeluruh. Nilai kandungan uap air terintegrasi ini dapat dijadikan input untuk pengembangan model, baik model numerik dinamik atau pun model statistik. Dalam hal pengembangan model numerik, input data total kandungan uap air terintegrasi akan memberikan kontribusi analisis ketersediaan udara lembap di atmosfer yang berkaitan dengan pertumbuhan awan kumululus, sedangkan dalam kaitannya dengan pengembangan model statistik, input total kandungan uap air terintegrasi dapat dimanfaatkan untuk menganalisis perambatan gelombang atmosfer yang bersesuaian dengan pertumbuhan awan dengan jangka skala waktu tertentu.

Pengembangan model prediksi cuaca numerik mengasimilasikan input data total kandungan uap air terintegrasi. Seperti telah diketahui bahwa kondisi anomali cuaca dan iklim wilayah Indonesia dipengaruhi oleh fenomena atmosfer multi skala waktu. Terutama fenomena atmosfer yang terbentang di sepanjang sabuk ekuator. Dengan adanya ketersediaan data GNSSRO yang mencakup seluruh wilayah global, terutama daerah sepanjang tropis yang mencakup Benua Afrika, Samudra Hindia, wilayah Kepulauan Maritim Indonesia, Samudra Pasifik, daratan Amerika Selatan, hingga Samudra Atlantik maka kondisi dinamika atmosfer tropis yang memengaruhi kondisi cuaca wilayah Indonesia dapat diketahui dan diprediksi. Pengembangan model prediksi cuaca numerik ini dapat menjadi salah satu upaya untuk mengantisipasi anomali cuaca dan iklim yang dapat memengaruhi kondisi pertanian di Indonesia sehingga berdampak pada ketahanan pangan.

F. Penutup

Observasi vertikal atmosfer berbasis teknologi GNSSRO memiliki keterbatasan dalam hal capaian perekaman data di dekat permukaan. Secara statistik, penetrasi okultasi rata-rata hanya mencapai ketinggian 0,8 km dengan rentang luar hingga 1,5 km. Akibatnya, terdapat kekosongan data pada profil hasil pengamatan GNSSRO di bawah ketinggian capaian penetrasi okultasi. Kekosongan data pada

variabel kelembapan menjadi pertanyaan riset terkait bagaimana cara melengkapi profil sehingga dapat dimanfaatkan untuk estimasi total kandungan uap air di atmosfer.

Riset ini mengembangkan model ekstrapolasi linier kuadrat pada setiap profil kelembapan atmosfer $q(z)$. Persamaan kuadrat mengandung dua koefisien masing-masing untuk variabel kuadrat dan linier, serta konstanta yang dicari dengan model penapisan. Penerapan model penapisan pada tiap profil kelembapan menghasilkan rerata koefisien untuk variabel kuadrat dan variabel linier berurut-urut sebesar 0,13 dan -2,90. Konstanta persamaan kuadrat bernilai 17,12 yang berarti bahwa pada $z = 0$ km $q_{mod}(0)$ sama dengan 17,12 g/kg.

Data standar deviasi q_{rs} hasil pengamatan radiosonde digunakan untuk menambahkan fluktuasi pada q_{mod} . Rasio hasil integrasi q_{obs} di atas ketinggian 2 km terhadap total IWV dari permukaan bernilai ~0,5. Integrasi profil gabungan antara q_{obs} dan q_{mod} menunjukkan nilai total IWV yang mendekati IWV hasil pengamatan radiosonde dengan rasio 0,98. Penerapan model ekstrapolasi berhasil menunjukkan data estimasi total kandungan uap air secara akurat. Oleh karena itu, hasil pengembangan model ini dapat diterapkan untuk studi lebih lanjut terkait variabilitas total kandungan uap air berdasarkan pengamatan GNSSRO.

Referensi

- Andrews, D. G., Leovy, C. B., & Holton, J. R. (2016). *Middle atmosphere dynamics* (Vol. 40). Academic Press.
- Anthes, R. A. (2011). Exploring Earth's atmosphere with radio occultation: contributions to weather, climate and space weather. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(6), 1077–1103.
- Anthes, R. A., Bernhardt, P. A., Chen, Y., Cucurull, L., Dymond, K. F., Ector, D., Healy, S. B., Ho, S., Hunt, D. C., Kuo, Y., Liu, H., Manning, K., McCormick, C., Meehan, T. K., Randel, W. J., Rocken, C., Schreiner, W. S., Sokolovskiy, S. V., Syndergaard, S., . . . Zeng, Z. (2008). The COSMIC/FORMOSAT-3 Mission: Early results. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(3), 313–334. <https://doi.org/10.1175/bams-89-3-313>

- Anthes, R. A., Rocken, C., & Ying-Hwa, K. (2000). Applications of COSMIC to meteorology and climate. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 11(1), 115–156.
- Ding, T., Awange, J. L., Scherllin-Pirscher, B., Kuhn, M., Khandu, N., Anyah, R., Zerihun, A., & Bui, L. K. (2022). GNSS radio occultation infilling of the African Radiosonde data gaps reveals drivers of tropopause climate variability. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 127(17). <https://doi.org/10.1029/2022jd036648>
- Ho, S., Anthes, R. A., Ao, C. O., Healy, S., Horanyi, A., Hunt, D., Mannucci, A. J., Pedatella, N., Randel, W. J., Simmons, A., Steiner, A., Xie, F., Yue, X., & Zeng, Z. (2020). The COSMIC/FORMOSAT-3 radio occultation mission after 12 years: Accomplishments, remaining challenges, and potential impacts of COSMIC-2. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(7), E1107–E1136. <https://doi.org/10.1175/bams-d-18-0290.1>
- Holton, J. R. (2004). *An introduction to dynamic meteorology* (4th ed.). Elsevier Academic Press.
- Kirchengast, G. (1999). *A simple analytical atmospheric model for radio occultation applications*. Institute of Meteorology and Geophysics, University of Graz.
- Lonitz, K. (2023). *GNSS radio occultation (GNSS-RO): Principles and NWP use*. ECMWF. https://events.ecmwf.int/event/334/contributions/3890/attachments/2235/3952/01_gpsro_lecture_KL_2023.pdf
- Luntama, J., Kirchengast, G., Borsche, M., Foelsche, U., Steiner, A., Healy, S., Von Engel, A., O’Clerigh, E., & Marquardt, C. (2008). Prospects of the EPS GRAS Mission for operational atmospheric applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(12), 1863–1876. <https://doi.org/10.1175/2008bamS-2399.1>
- Lutgens, F. K., Tarbuck, E. J., & Tasa, D. G. (2013). *The atmosphere: An introduction to meteorology* (12th ed.). Pearson.
- NCEI-NOAA. (2018, 8 Februari). *Integrated global radiosonde archive*. Diakses 1 Juni, 2021, dari <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-balloon/integrated-global-radiosonde-archive>.
- Noersomadi. (2019). *Characteristics of tropical tropopause and stratospheric gravity waves analyzed using high resolution temperature profiles from GNSS radio occultation* [Disertasi tidak diterbitkan]. Kyoto University.

- Reigber, C., Lühr, H., & Schwintzer, P. (Ed.). (2012). *First CHAMP mission results for gravity, magnetic and atmospheric studies*. Springer Science & Business Media.
- Rother, M., & Michaelis, I. (2019). *CH-ME-3-MAG-CHAMP 1 Hz combined magnetic field time series (level 3)*. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/GFZ.2.3.2019.004>
- Schreiner, W. S., Weiss, J. P., Anthes, R. A., Braun, J., Chu, V., Fong, J., Hunt, D., Kuo, Y.-H., Meehan, T., Serafino, W., Sjöberg, J., Sokolovskiy, S., Talaat, E., Wee, T. K., & Zeng, Z. (2020). COSMIC-2 radio occultation constellation: First results. *Geophysical Research Letters*, 47(4), e2019GL086841.
- Sievert, T. (2019). *GNSS radio occultation inversion methods and reflection observations in the lower troposphere* [Doctoral dissertation]. Blekinge Tekniska Hogskola. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1277418/FULLTEXT02.pdf>
- Sokolovskiy, S. V. (2001). Tracking tropospheric radio occultation signals from low Earth orbit. *Radio Science*, 36(3), 483–498.
- Steiner, A., Gobiet, A., Foelsche, U., & Kirchengast, G. (2004). *Radio occultation data processing advancements for optimizing climate utility*. Institute for Geophysics, Astrophysics, and Meteorology, University of Graz.
- Wickert, J., Beyerle, G., Schmidt, T., Marquardt, C., König, R., Grunwaldt, L., & Reigber, C. (2003). GPS radio occultation with CHAMP. Dalam C. Reigber, H. Lühr, & P. Schwintzer (Ed.), *First CHAMP mission results for gravity, magnetic and atmospheric studies* (371–383). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-38366-6_53
- Wickert, J., Reigber, C., Beyerle, G., König, R., Marquardt, C., Schmidt, T., Grunwaldt, L., Galas, R., Meehan, T. K., Melbourne, W. G., & Hocke, K. (2001). Atmosphere sounding by GPS radio occultation: First results from CHAMP. *Geophysical Research Letters*, 28(17), 3263–3266.
- Wilks, D. S. (2005). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (2nd ed., Vol. 100 of International Geophysics). Elsevier Science.
- Wu, D. L., Gong, J., & Ganeshan, M. (2022). GNSS-RO deep refraction signals from moist marine atmospheric boundary layer (MABL). *Atmosphere*, 13(6), 953. <https://doi.org/10.3390/atmoS-13060953>
- Zhang, C. (2005). Madden-Julian oscillation. *Reviews of Geophysics*, 43(2). <https://doi.org/10.1029/2004rg000158>