

Validasi Data *Global Navigation Satellite System Radio Occultation* (GNSS RO) Misi Cosmic-2 di Indonesia

Muhammad Aditya Sasmita^{a,*}, Imma Redha Nugraheni^a, Yosafat Donni H^a, Dodo Gunawan^a

^aProgram Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jl. Meteorologi No. 5, Tanah Tinggi, Tangerang 15221, Indonesia

* Korespondensi Penulis: aditya.sasmita@bmk.go.id



Dikirim: 24 Juni 2026;

Diterima: 16 Oktober 2026;

Diterbitkan: 26 Oktober 2026.

Abstrak. Pemantauan profil vertikal atmosfer konvensional menggunakan radiosonde di Indonesia menghadapi tantangan tingginya biaya operasional dan terbatasnya cakupan spasial. Teknologi GNSS RO misi COSMIC-2 hadir sebagai solusi komplementer yang efisien dan tahan cuaca. Namun, kompleksitas atmosfer tropis dengan gradien kelembapan yang tajam memerlukan validasi akurasi instrumen yang komprehensif. Penelitian ini mengevaluasi akurasi data suhu dan kelembapan spesifik COSMIC-2 terhadap 24 stasiun radiosonde di Indonesia periode Juli 2020–Juni 2024. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan komparatif statistik dengan kriteria kolokasi spasial-temporal yang ketat pada 11 lapisan tekanan (925–50 hPa). Hasil penelitian menunjukkan bahwa COSMIC-2 memiliki kesesuaian yang memadai (*acceptable agreement*). Rata-rata perbedaan suhu nasional tercatat sangat kecil ($0,102^{\circ}\text{C}$) dengan standar deviasi $1,169^{\circ}\text{C}$, yang mengindikasikan variabilitas spasial akibat topografi lokal.

Pada parameter kelembapan spesifik, ditemukan kecenderungan bias underestimate ($-0,093 \text{ g/kg}$) di lapisan bawah akibat efek super-refraction, yang kemudian membaik dan konvergen akurat di lapisan atas. Temuan ini menegaskan bahwa GNSS RO COSMIC-2 merupakan sumber data andal untuk asimilasi pemodelan cuaca ekuator, dengan tetap mempertimbangkan karakteristik bias dekat permukaan.

Kata kunci: COSMIC-2; interpolasi logaritmik; kelembapan spesifik; radio occultation; suhu atmosfer.

Abstract. Conventional vertical atmospheric profile monitoring using radiosondes in Indonesia faces challenges of high operational costs and limited spatial coverage. The GNSS RO technology of the COSMIC-2 mission serves as an efficient and all-weather complementary solution. However, the complexity of the tropical atmosphere with sharp moisture gradients requires a comprehensive instrument accuracy validation. This study evaluates the accuracy of COSMIC-2 temperature and specific humidity data against 24 radiosonde stations in Indonesia from July 2020 to June 2024. The analysis employs a comparative statistical approach with strict spatial-temporal collocation criteria at 11 pressure levels (925–50 hPa). The results indicate that COSMIC-2 has *acceptable agreement*. The national average temperature difference is very small (0.102°C) with a standard deviation of 1.169°C , indicating spatial variability driven by local topography. For the specific humidity parameter, an underestimation bias (-0.093 g/kg) was found in the lower layers due to super-refraction effects, which later improves and accurately converges in the upper layers. These findings confirm that COSMIC-2 GNSS RO is a reliable data source for equatorial weather modeling assimilation, while still considering near-surface bias characteristics.

Keywords: atmospheric temperature; COSMIC-2; logarithmic interpolation; radio occultation; specific humidity.

I. PENDAHULUAN

Pemantauan profil vertikal atmosfer yang akurat merupakan kebutuhan mendasar dalam ilmu kebumihian, khususnya untuk pemahaman dinamika cuaca, prediksi iklim, dan analisis fenomena atmosfer seperti gelombang Rossby [1], [5], [10]. Informasi profil suhu dan

kelembapan secara vertikal secara langsung meningkatkan akurasi prakiraan cuaca, baik skala global maupun lokal [8]. Secara konvensional, pengamatan ini bergantung pada Radiosonde yang diluncurkan dari stasiun darat. Namun, di wilayah kepulauan tropis seperti Indonesia, jaringan pengamatan Radiosonde menghadapi

tantangan operasional yang signifikan, seperti jumlah stasiun yang terbatas, biaya tinggi, dan cakupan spasial serta temporal yang tidak merata [6], [15], [16].

Sebagai solusi komplementer yang menjanjikan, teknologi *Global Navigation Satellite System Radio Occultation* (GNSS RO) kini mulai banyak diterapkan. Teknik pasif ini memanfaatkan pembelokan sinyal satelit navigasi saat melalui atmosfer untuk menduga parameter atmosfer, dengan keunggulan cakupan global, ketahanan terhadap cuaca buruk, dan biaya operasional yang relatif rendah [12][14]. Misi *Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate-2* (COSMIC-2) yang diluncurkan pada 2019, merepresentasikan generasi terbaru dengan peningkatan signifikan dalam resolusi dan jumlah pengamatan harian di wilayah tropis [2].

Meskipun menjanjikan, performa GNSS RO tidak lepas dari keterbatasan. Akurasi pengukurannya, terutama untuk parameter suhu dan kelembapan di lapisan atmosfer bawah (troposfer), dapat terpengaruh oleh fenomena seperti super-refraction dan variasi kandungan uap air yang tinggi [11]. Penelitian validasi GNSS RO terhadap Radiosonde sendiri telah banyak dilakukan di berbagai zona iklim. Di wilayah subtropis, beberapa penelitian menunjukkan tingkat kesepakatan (*agreement*) yang sangat tinggi seperti penemuan Hala. E. A dkk. [4] di Mesir. Namun, temuan Li dkk. [9] mengindikasikan adanya bias yang lebih signifikan pada parameter kelembapan spesifik di ketinggian tertentu, menyarankan adanya variasi performa berdasarkan kondisi atmosfer setempat.

Sebagian besar studi-studi validasi global dan regional terdahulu tersebut kerap kali tidak memberikan analisis mendalam untuk karakteristik atmosfer tropis-basah yang unik, di mana gradien kelembapan sangat tajam dan dapat memengaruhi proses pembelokan sinyal GNSS RO [7][9]. Akibatnya, studi validasi sistematis yang memanfaatkan data generasi terbaru COSMIC-2 di wilayah tropis secara umum, dan Indonesia secara khusus, masih sangat terbatas. Padahal, pemahaman mengenai akurasi data COSMIC-2 di lingkungan atmosfer Indonesia yang khas merupakan prasyarat penting untuk memanfaatkannya secara optimal dalam aplikasi operasional, seperti asimilasi data pada model cuaca atau mitigasi bencana hidrometeorologi.

Berdasarkan konteks tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi akurasi data suhu dan kelembapan spesifik dari misi GNSS RO COSMIC-2 dengan membandingkannya secara kuantitatif terhadap data Radiosonde di wilayah Indonesia. Keunggulan penelitian ini terletak pada penggunaan data spasial generasi terbaru yang dievaluasi langsung pada karakteristik atmosfer tropis-basah kepulauan. Evaluasi ini akan memberikan gambaran yang jelas mengenai tingkat kesesuaian (*agreement*), pola bias, dan ketidakpastian (*uncertainty*) dari data COSMIC-2 dalam menangkap profil atmosfer

tropis. Temuan dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah bagi pengembangan metode pengamatan atmosfer dan masukan praktis bagi institusi seperti Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) dalam mengintegrasikan data satelit untuk meningkatkan kualitas layanan informasi cuaca dan iklim di Indonesia.

II. METODOLOGI

2.1 Area Studi

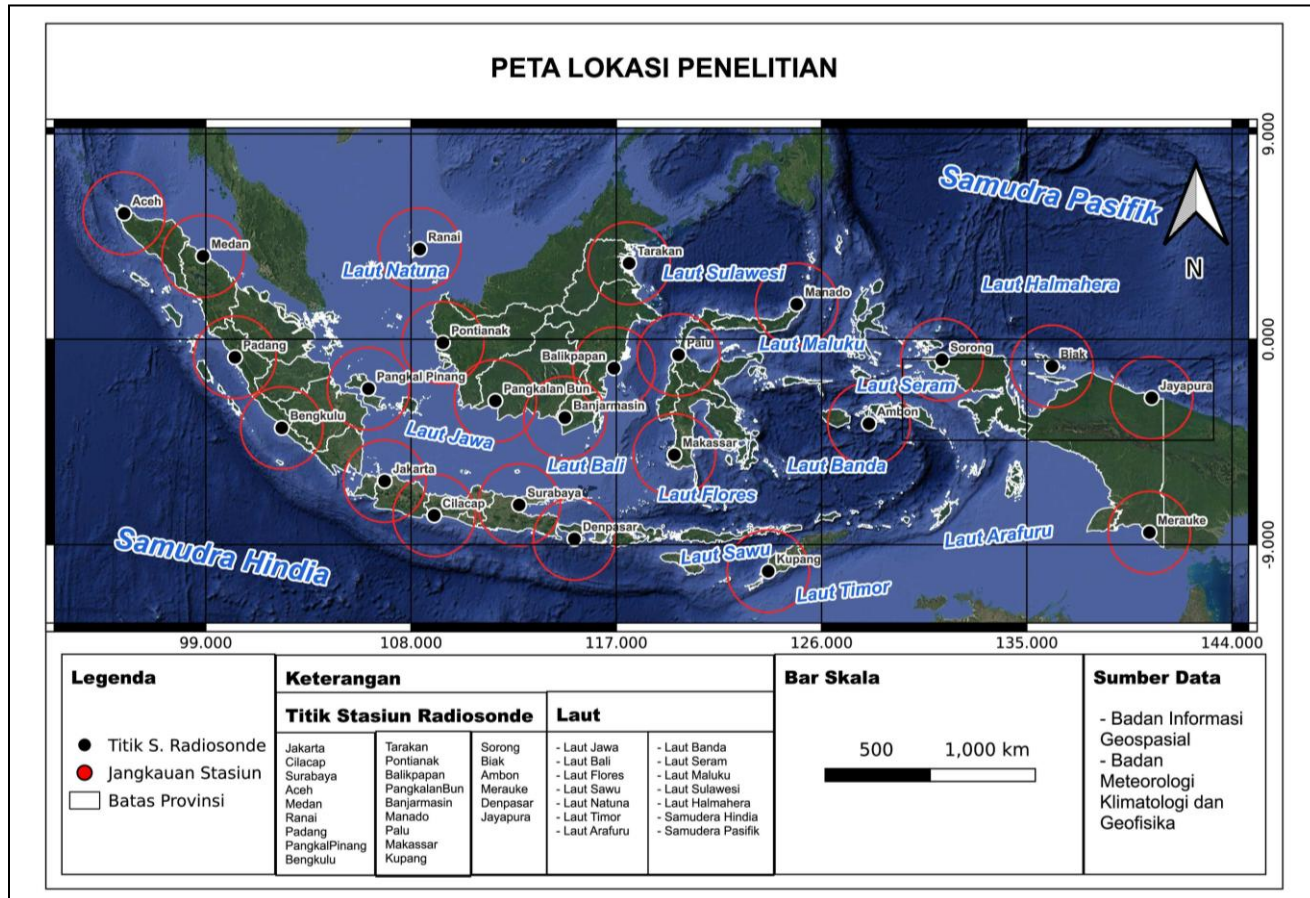
Penelitian ini mengkaji wilayah di sekitar 24 stasiun radiosonde yang tersebar di lokasi penelitian. Kriteria kolokasi spasial yang diterapkan adalah radius 200 km dari masing-masing stasiun radiosonde. Peta lokasi penelitian beserta distribusi spasial dari seluruh stasiun tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.

2.2 Alat dan Bahan

Data utama yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data *Global Navigation Satellite System Radio Occultation* (GNSS RO) misi *Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate-2* (COSMIC-2) dan data radiosonde. Data COSMIC-2 level 2 jenis *wetPrf* diunduh dari *University Corporation for Atmospheric Research* (UCAR) untuk periode Juli 2020 hingga Juni 2024. Resolusi data ini adalah sekitar 200 km secara horizontal (seperti yang ditunjukkan pada Gamb. 1) dan 0,5 km secara vertikal, yang dinilai memadai untuk mendapatkan profil atmosferik yang detail [15]. Untuk memastikan keandalan hasil, hanya profil data COSMIC-2 dengan *quality flag* yang valid (status profil berlabel baik/tidak mengalami kegagalan *retrieval*) yang digunakan dalam penelitian ini. Parameter utama yang diekstrak meliputi suhu (*Temp*), kelembapan spesifik (*sph*), dan tekanan (*Pres*). Sementara itu, data pembanding menggunakan observasi radiosonde dari situs *University of Wyoming* untuk periode temporal dan 24 stasiun yang sama.

2.3 Metode Penelitian

Pengolahan data diawali dengan metode penyaringan (*filtering*) kolokasi spasial dan temporal untuk memasangkan data COSMIC-2 dengan pengamatan radiosonde terdekat. Kriteria kolokasi ditetapkan pada radius jarak spasial maksimum 200 km dan rentang jendela waktu temporal +2 jam (hanya dua jam setelah waktu pelepasan balon) dari pengamatan radiosonde (00.00 dan 12.00 UTC). Pemilihan jendela waktu satu arah ini dilakukan dengan mempertimbangkan waktu tempuh balon radiosonde yang membutuhkan sekitar 1,5 hingga 2 jam untuk mengudara hingga lapisan atas, sehingga pengukuran satelit dipastikan terjadi saat balon sedang melayang di atmosfer." Pemilihan ambang batas ini merujuk pada penelitian Li et al. [9], yang bertujuan untuk meminimalkan *common noise* serta



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian (Sumber: Analisis penulis (2026), data stasiun BMKG dan peta dasar Badan Informasi Geospasial)

menyeimbangkan antara perolehan jumlah sampel data yang memadai dengan batasan toleransi perbedaan representasi spasial-temporal atmosfer.

Profil suhu dan kelembapan spesifik dari data yang memenuhi syarat kolokasi tersebut kemudian diekstrak pada 11 lapisan tekanan atmosfer standar (925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, dan 50 hPa) [9]. Keselarasan nilai vertikal dari profil data atmosfer yang kontinu menuju ke 11 lapisan tekanan standar dicapai menggunakan metode interpolasi log-linier terhadap tekanan (*log-linear interpolation*). Pendekatan ini dipilih karena tekanan atmosfer meluruh secara eksponensial terhadap ketinggian. Proses interpolasi untuk mengekstrak nilai suhu (T_{interp}) dan kelembapan spesifik (q_{interp}) pada titik tekanan standar (P) dihitung menggunakan Pers. (1) dan Pers. (2) berikut [14]:

$$T_{interp} = T_1 + (T_2 - T_1) \frac{\ln(P) - \ln(P_1)}{\ln(P_2) - \ln(P_1)} \quad (1)$$

$$q_{interp} = q_1 + (q_2 - q_1) \frac{\ln(P) - \ln(P_1)}{\ln(P_2) - \ln(P_1)} \quad (2)$$

dengan P_1 dan P_2 merupakan nilai tekanan dari data

observasi yang berada tepat di atas dan di bawah titik tekanan standar P yang dituju. T_1 dan T_2 adalah suhu udara, serta q_1 dan q_2 adalah kelembapan spesifik pada tekanan observasi P_1 dan P_2 .

Proses penyesuaian yang identik juga diterapkan pada data radiosonde agar perbandingan dapat dilakukan secara langsung pada lapisan tekanan yang sama. Kelembapan spesifik (q) dari radiosonde dihitung menggunakan parameter *Mixing Ratio* atau rasio campuran massa uap air terhadap massa udara kering (w) berdasarkan Pers. (3) berikut [13]:

$$q = \frac{w}{(1+w)} \quad (3)$$

Selama proses komputasi, profil data yang tidak lengkap atau memiliki kekosongan nilai (*missing value*) pada lapisan tekanan yang ditinjau dieliminasi secara otomatis dari dataset. Adapun untuk meminimalkan anomali ekstrem (*outlier*), penelitian ini sepenuhnya bergantung pada penyaringan kualitas (*quality flag*) bawaan dari produk level-2 COSMIC-2, di mana profil yang terindikasi mengalami kegagalan *retrieval* tidak diikutsertakan sejak awal proses pengunduhan.

Evaluasi akurasi data COSMIC-2 dilakukan dengan menempatkan data radiosonde sebagai referensi kebenaran lapangan (*ground truth*). Tingkat kesalahan sistematis dihitung menggunakan metode statistik *Mean Bias Error* (MBE) untuk suhu (ΔT) dan kelembapan spesifik (Δq) pada setiap pasangan profil menggunakan Pers. (4) dan Pers. (5) [9][14]:

$$\Delta T = T_{RO} - T_{RS} \quad (4)$$

$$\Delta q = q_{RO} - q_{RS} \quad (5)$$

RO merepresentasikan nilai observasi dari GNSS RO COSMIC-2, sedangkan *RS* merepresentasikan nilai pengukuran dari radiosonde.

Perhitungan rata-rata bias secara fisis sangat krusial untuk mengidentifikasi apakah sensor satelit memiliki kecenderungan sistematis dalam menaksir parameter atmosfer, seperti menaksir terlalu tinggi (*overestimate*) atau terlalu rendah (*underestimate*) dibandingkan dengan kondisi termodinamika atmosfer sebenarnya. Selain itu, sebaran kesalahan diukur menggunakan Standar Deviasi (σ) yang berfungsi sebagai indikator presisi atau tingkat variabilitas dari *retrieval* satelit [3]. Evaluasi kualitas profil COSMIC-2 kemudian dikaji secara komprehensif berdasarkan tren vertikal dari nilai bias dan standar deviasi pada setiap lapisan tekanan, serta didukung oleh konfirmasi visual profil vertikal untuk menganalisis pola kesesuaian stabilitas atmosfer antara satelit dan radiosonde secara kualitatif.

Perlu dicatat bahwa perhitungan rata-rata dan standar deviasi pada skala nasional dihitung secara langsung dari seluruh populasi pasangan profil data individual yang valid ($n = 9.216$ pasang), bukan diturunkan dari nilai rata-rata per lokasi stasiun. Pendekatan ini diterapkan agar statistik nasional merepresentasikan sebaran varians seluruh dataset secara komprehensif. Sebagai konsekuensinya, stasiun dengan jumlah sampel pengamatan yang lebih banyak akan memberikan bobot kontribusi yang lebih besar terhadap nilai rata-rata dan variabilitas nasional dibandingkan stasiun dengan jumlah sampel yang terbatas.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Secara umum, hasil penelitian ini mengungkapkan adanya variasi spasial dan vertikal dalam bias suhu dan kelembapan spesifik. Hal ini mengindikasikan bahwa akurasi GNSS RO COSMIC-2 dipengaruhi oleh kondisi atmosfer lokal dan karakteristik masing-masing wilayah di Indonesia. Meskipun demikian, besaran bias yang ditemukan secara keseluruhan dapat dikategorikan kecil dan dapat diandalkan

3.1 Hasil Kolokasi Data

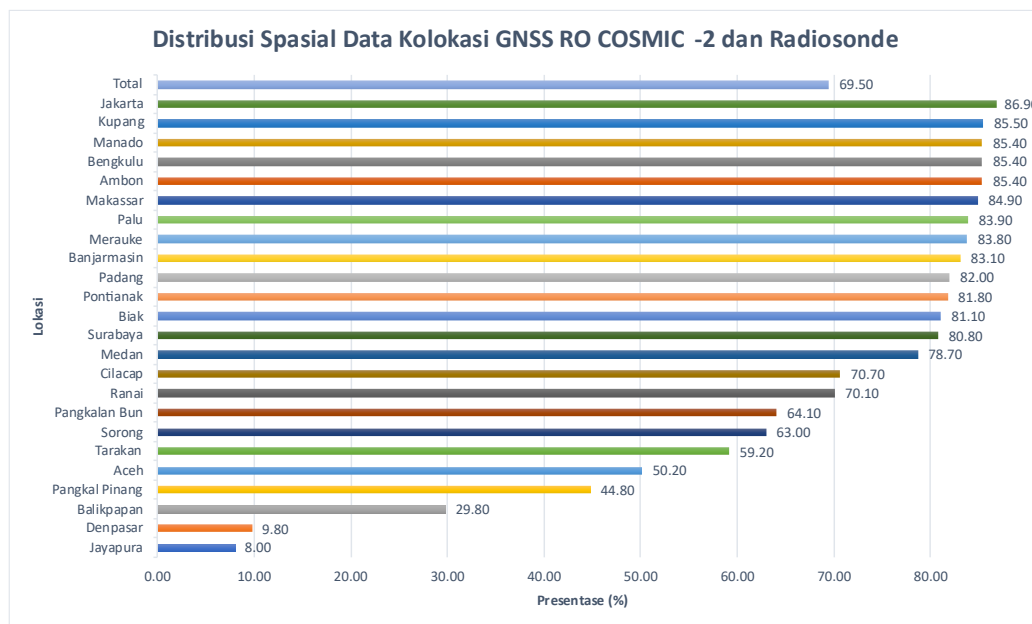
Proses kolokasi dalam penelitian ini menerapkan kriteria radius jarak spasial maksimum 200 km dan jendela waktu temporal +2 jam, yang mengacu pada parameter penelitian Li dkk. [9]. Penerapan batasan yang ketat ini memiliki signifikansi krusial untuk meminimalkan *common noise* serta memastikan sensor GNSS RO dan radiosonde mengukur karakteristik massa udara yang sama pada kondisi yang berdekatan. Pemilihan kriteria ini didukung oleh temuan Zhang dkk. [16], yang membuktikan bahwa kriteria kolokasi spasial dan temporal yang lebih longgar akan memperlebar perbedaan pengukuran antara satelit dan radiosonde. Selain dinamika spasial, dataset kolokasi juga menunjukkan dinamika temporal di mana pengamatan pagi hari (00.00 UTC) mendominasi dengan kontribusi 60%.

Dominasi ini tidak disebabkan oleh bias pada kualitas atau kemampuan satelit, melainkan murni akibat kebijakan operasional jaringan observasi di Indonesia seperti beberapa stasiun seperti Jayapura, Denpasar, dan Balikpapan yang hanya melakukan pelepasan balon radiosonde satu kali sehari pada pukul 00.00 UTC, sementara stasiun lainnya beroperasi dua kali sehari (00.00 dan 12.00 UTC).

Tingkat keberhasilan kolokasi bervariasi antar stasiun, berkisar dari minimum 8% di Jayapura hingga maksimum 86,9% di Jakarta, dengan rata-rata nasional sebesar 69,5%. Berdasarkan Gambar 2, distribusi spasial data yang terkolokasi tidak seragam. Tiga stasiun yakni Bengkulu, Jakarta, dan Ambon, masing-masing menyumbang lebih dari 6% dari total data valid nasional. Sebaliknya, stasiun seperti Jayapura dan Denpasar berkontribusi kurang dari 0,5% dari total. Secara temporal, pengamatan pagi hari (00.00 UTC) mendominasi dataset, membentuk 60% dari total data valid, sementara pengamatan sore hari (12.00 UTC) menyumbang 40% sisanya.

3.2 Validasi dan Analisis Suhu Atmosfer

Pada variabel suhu, validasi menunjukkan variasi vertikal yang jelas seperti pada Gambar 3 Rata-rata perbedaan suhu secara umum berada dalam kisaran $\pm 0,5^\circ\text{C}$ di seluruh lapisan troposfer. Di lapisan bawah (925–700 hPa), sebagian besar wilayah menunjukkan perbedaan rata-rata bernilai negatif (*underestimate*), dengan tingkat kesesuaian tertinggi teramati di sekitar lapisan 700 hPa. Perbedaan ini meningkat kembali pada lapisan 500–400 hPa, mengecil pada lapisan 300–200 hPa, dan menunjukkan sedikit peningkatan di atas 150 hPa. Secara spasial, stasiun Ranai menunjukkan pola yang paling konsisten.



Gambar 2. Distribusi Spasial Kolokasi Data (Sumber: Analisis penulis (2026), data COSMIC-2 dari CDAAC dan radiosonde dari University of Wyoming)

Di sisi lain, beberapa wilayah menunjukkan pola unik; misalnya Cilacap menunjukkan *overestimate* di lapisan bawah yang berubah menjadi *underestimate* di lapisan atas, Medan bertransisi dari *underestimate* di lapisan bawah ke *overestimate* di lapisan atas, dan Pangkalan Bun menunjukkan *underestimate* yang konsisten hampir di semua lapisan tekanan.

Untuk memvalidasi klaim tingkat kesesuaian antara kedua instrumen secara statistik komprehensif, analisis regresi linier dilakukan pada keseluruhan dataset suhu. Hasil *scatter plot* (Gambar 4) menunjukkan sebaran data observasi yang sangat rapat dan mengikuti garis ideal 1:1. Nilai koefisien determinasi (R^2) tercatat sebesar 0,999. Hal ini mengindikasikan bahwa 99,88% varians suhu pengamatan GNSS RO COSMIC-2 sejalan dengan data radiosonde. Tingginya nilai korelasi ini menegaskan bahwa meskipun terdapat variabilitas standar deviasi di beberapa lokasi, secara agregat instrumen COSMIC-2 memiliki akurasi pengukuran suhu yang sangat presisi dan tidak memiliki deviasi sistematis yang signifikan di wilayah Indonesia.

Secara kuantitatif yang dirangkum pada Tabel 2 dan 3, rata-rata bias suhu nasional adalah $+0,102^{\circ}\text{C}$ dengan standar deviasi sebesar $1,169^{\circ}\text{C}$. Lapisan 925 hPa mencatat bias negatif terbesar ($-0,246^{\circ}\text{C}$), sedangkan akurasi tertinggi terdapat pada lapisan 700 hPa dengan bias mendekati nol. Berdasarkan lokasi, Medan mencatat *overestimate* tertinggi ($+0,595^{\circ}\text{C}$ pada 100 hPa) dengan rata-rata bias lokasi tertinggi ($+0,214^{\circ}\text{C}$). Pangkalan Bun merupakan satu-satunya wilayah dengan bias rata-rata

keseluruhan negatif ($-0,058^{\circ}\text{C}$), dan Ranai memiliki akurasi rata-rata tertinggi ($+0,008^{\circ}\text{C}$).

Studi kasus profil vertikal di Jakarta terlihat pada Gambar 5 menunjukkan kesesuaian yang sangat baik antara kedua profil data, dengan penyimpangan kecil hanya terjadi di sekitar 50 hPa dan di bawah 700 hPa. Pola vertikal suhu yang teramati yakni *underestimate* terbesar di lapisan batas bawah (925 hPa), kesesuaian tertinggi di sekitar 700 hPa, pergeseran ke *overestimate* kecil di troposfer tengah, dan stabilisasi di lapisan atas memiliki kemiripan dengan pola global yang dilaporkan oleh Wang dkk. [14]. Bias suhu rata-rata nasional sebesar $+0,102^{\circ}\text{C}$ dengan standar deviasi (SD) $1,169^{\circ}\text{C}$ menunjukkan kinerja data COSMIC-2 yang cukup baik dan konsisten di Indonesia.

Secara kuantitatif, performa data COSMIC-2 di Indonesia menunjukkan hasil yang sangat kompetitif bila disandingkan dengan studi-studi terdahulu. Besaran nilai selisih atau bias suhu dalam skala Kelvin (K) pada literatur pembandingan bernilai mutlak setara dengan selisih pada skala derajat Celsius ($^{\circ}\text{C}$), sehingga perbandingan dapat dilakukan secara langsung. Jika dibandingkan dengan rata-rata global dari Wang dkk. [14] yang mencatat bias $-0,09^{\circ}\text{C}$ dan standar deviasi (SD) $1,72^{\circ}\text{C}$, bias suhu di Indonesia ($+0,102^{\circ}\text{C}$) memang sedikit lebih positif, namun memiliki presisi yang lebih baik berkat sebaran data yang lebih sempit (SD $1,169^{\circ}\text{C}$).

Tabel 1. Nilai validasi perbedaan suhu vertikal

Lokasi	Rata-rata Perbedaan Suhu (°C)										
	925	850	700	500	400	300	250	200	150	100	50
Jakarta	-0,535	-0,096	0,009	0,239	0,182	0,010	0,009	0,078	0,203	0,148	0,359
Cilacap	0,519	0,559	0,294	0,278	0,168	0,140	0,070	-0,007	-0,128	-0,234	0,241
Surabaya	-0,678	-0,184	-0,064	0,135	0,169	0,069	0,106	0,063	0,116	0,152	0,169
Aceh	-0,447	0,321	-0,041	0,136	0,310	0,197	0,168	0,136	0,013	-0,051	-0,035
Medan	-0,485	-0,208	-0,160	0,225	0,401	0,271	0,209	0,224	0,300	0,595	0,375
Ranai	0,021	0,183	0,177	0,163	0,081	0,040	0,054	-0,010	-0,128	-0,290	-0,397
Padang	-0,267	0,295	0,019	0,155	0,240	0,222	0,230	0,171	0,276	0,215	0,323
Pangkal Pinang	-0,278	-0,231	0,167	0,230	0,226	0,203	0,168	0,105	0,185	0,359	0,084
Bengkulu	-0,298	0,140	-0,081	0,159	0,142	0,063	0,125	0,207	0,215	0,215	0,332
Tarakan	0,044	0,090	0,080	0,297	0,343	0,236	0,082	0,124	0,088	-0,031	-0,283
Pontianak	-0,334	-0,026	0,025	0,079	-0,003	-0,017	0,075	0,168	0,166	0,187	0,347
Balikpapan	0,048	0,120	0,211	0,164	0,052	-0,047	0,072	0,132	0,216	0,131	-0,055
Pangkalan Bun	-0,002	0,158	0,036	-0,172	-0,076	-0,116	-0,068	-0,035	-0,164	-0,300	0,149
Banjarmasin	-0,279	-0,008	0,150	0,142	0,125	0,062	0,143	0,201	0,053	0,186	0,090
Manado	-0,247	-0,065	-0,041	0,333	0,336	0,260	0,263	0,154	0,158	0,129	0,155
Palu	-0,390	0,016	-0,031	0,265	0,365	0,348	0,270	0,206	0,212	0,277	0,167
Makassar	-0,451	-0,137	-0,122	0,295	0,513	0,307	0,240	0,190	0,216	0,271	0,135
Kupang	-0,184	-0,149	-0,055	0,275	0,314	0,176	0,110	0,053	0,204	0,164	0,093
Sorong	0,121	0,135	-0,069	0,177	0,173	0,194	0,146	0,107	-0,053	-0,149	-0,216
Biak	-0,460	-0,136	-0,115	0,230	0,248	0,061	0,040	0,035	0,096	-0,017	0,126
Ambon	-0,149	0,051	-0,038	0,374	0,534	0,260	0,175	0,174	0,185	0,208	0,142
Merauke	-0,359	-0,142	-0,155	0,266	0,489	0,156	0,081	0,116	0,100	-0,007	0,092
Denpasar	0,340	0,230	0,030	0,050	0,155	0,064	-0,017	-0,003	0,139	0,134	0,009
Jayapura	-0,389	-0,001	0,008	0,021	-0,172	0,017	0,248	0,372	0,264	0,010	0,269

Tabel 2. Statistik validasi profil vertikal suhu udara nasional

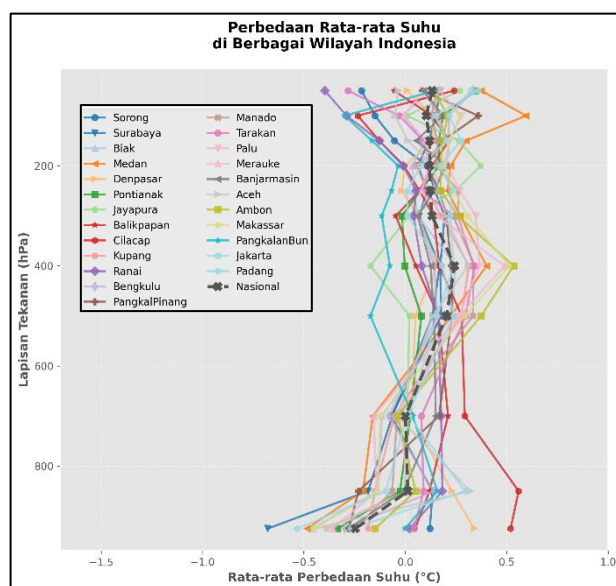
	Rata-rata Perbedaan Suhu (°C)										
	925	850	700	500	400	300	250	200	150	100	50
Rata-rata Perbedaan Nasional	-0,246	0,013	0,000	0,203	0,243	0,132	0,122	0,120	0,121	0,103	0,132
Perbedaan Perlapisan (°C)											
Standar Deviasi Nasional	1,291	1,128	1,083	1,047	1,177	0,924	0,805	0,816	0,943	1,694	1,684
Perbedaan Perlapisan (°C)											

Tabel 3. Statistik validasi suhu udara keseluruhan berdasarkan lokasi

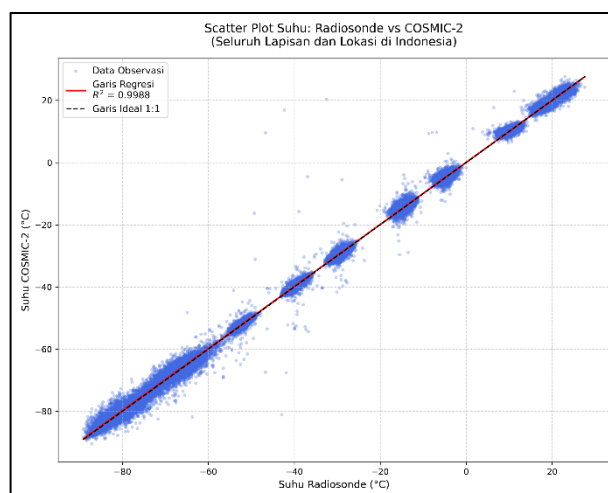
Lokasi	Rata-rata Perbedaan Per Lokasi (°C)	Standar Deviasi Per Lokasi (°C)	Rata-rata Perbedaan Nasional (°C)	Standar Deviasi Nasional (°C)
Jakarta	0,081	0,991		
Cilacap	0,144	1,500		
Surabaya	0,046	1,027		
Aceh	0,083	1,027		
Medan	0,214	1,208		
Ranai	0,008	1,282		
Padang	0,195	1,107		
Pangkal Pinang	0,117	1,259		
Bengkulu	0,128	1,127		
Tarakan	0,104	1,281		
Pontianak	0,072	1,111		
Balikpapan	0,098	1,132	0,102	1,169
Pangkalan Bun	-0,058	1,085		
Banjarmasin	0,091	1,664		
Manado	0,148	1,045		
Palu	0,201	1,109		
Makassar	0,174	1,119		
Kupang	0,108	0,977		
Sorong	0,053	0,970		
Biak	0,030	1,158		
Ambon	0,192	1,070		
Merauke	0,069	1,050		
Denpasar	0,086	0,941		
Jayapura	0,086	1,159		

Lebih lanjut, jika disandingkan dengan penelitian Hala dkk. [4] di wilayah subtropis kering Mesir yang bias suhu rata-rata sebesar 0,22°C dengan SD 1,83°C, akurasi pengukuran COSMIC-2 di atmosfer tropis Indonesia terbukti lebih unggul. Bahkan, bila dibandingkan dengan studi komparatif Li dkk. [9] di tiga zona iklim yang melaporkan bias suhu di wilayah tropis bisa mencapai -1,0°C dengan SD hingga 3°C pada lapisan atmosfer bawah, standar deviasi di Indonesia secara konsisten jauh lebih rendah. Komparasi angka-angka ini secara empiris menegaskan bahwa instrumen COSMIC-2 memiliki konsistensi dan keandalan yang sangat baik, bahkan

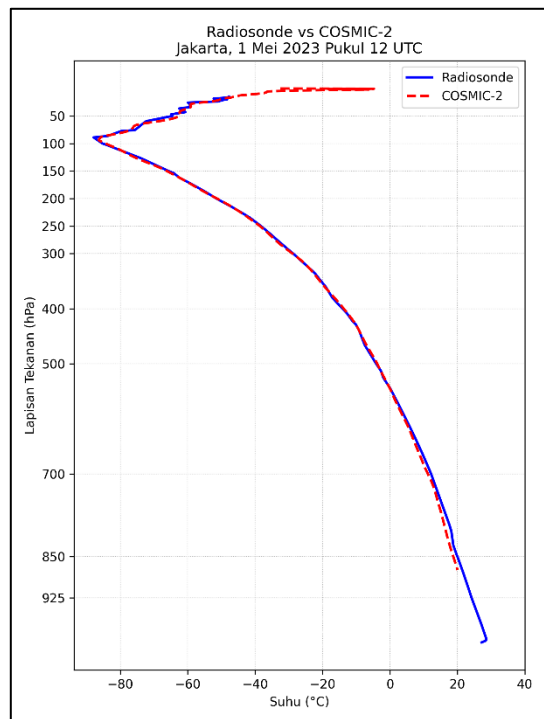
ketika dihadapkan pada dinamika atmosfer maritim Indonesia yang kompleks. Adapun penyimpangan spesifik pada lokasi tertentu, seperti bias rata-rata tertinggi di Medan, pola *overestimate* di Cilacap, serta *underestimate* persisten di Pangkalan Bun, diduga kuat berkaitan dengan karakteristik topografi dan tutupan lahan lokal. Berdasarkan Kursinski dkk. [17], gradien horizontal dalam struktur atmosfer dapat menyebabkan penyimpangan dari asumsi simetri sferis (*spherical symmetry*) yang digunakan dalam inversi transformasi Abel, sehingga memunculkan *error* sistematis pada profil yang dihasilkan.



Gambar 3. Bias rata-rata vertikal suhu (Sumber: Analisis penulis (2026), data COSMIC-2 dari CDAAC dan radiosonde dari University of Wyoming)



Gambar 4. Scatter Plot Suhu: Radiosonde vs COSMIC-2 (Sumber: Analisis penulis (2026), data COSMIC-2 dari CDAAC dan radiosonde dari University of Wyoming)



Gambar 4. Diagram profil vertikal suhu radiosonde dan COSMIC-2 (Sumber: Analisis penulis (2026), data COSMIC-2 dari CDAAC dan radiosonde dari University of Wyoming)

Medan yang berbatasan dengan Pegunungan Bukit Barisan dan Selat Malaka, serta Pangkalan Bun yang didominasi tutupan lahan gambut basah, memiliki dinamika evapotranspirasi yang berpotensi menciptakan gradien kelembapan horizontal yang sangat tajam di lapisan atmosfer bawah. Sesuai dengan temuan Kursinski dkk. [17], peningkatan gradien kelembapan horizontal inilah yang berkontribusi secara mekanis terhadap pembatasan akurasi *retrieval* dan memunculkan bias lokal di wilayah-wilayah tersebut.

3.3 Validasi dan Analisis Kelembapan Spesifik

Validasi kelembapan spesifik pada Gambar 6 menunjukkan pola umum di mana bias terbesar terjadi di lapisan bawah atmosfer dan mengecil secara bertahap hingga mendekati nol di lapisan 200 hPa. Hampir semua wilayah menunjukkan bias negatif (*underestimate*) di lapisan bawah. Pola anomali teramati di Sorong di mana *overestimate* berlanjut hingga 300 hPa, serta di Balikpapan yang menunjukkan peningkatan kembali bias negatif pada lapisan 700 hPa.

Secara kuantitatif (Tabel 5 dan Tabel 6), rata-rata bias kelembapan nasional adalah $-0,093 \text{ g/kg}$ dengan standar deviasi $0,880 \text{ g/kg}$. Bias terbesar tercatat pada lapisan terendah 925 hPa ($-0,666 \text{ g/kg}$), sementara bias di lapisan atas 250 hPa hampir bernilai nol ($0,001 \text{ g/kg}$). Antar wilayah, Pangkalan Bun memiliki bias rata-rata terbesar ($-0,541 \text{ g/kg}$) dan Cilacap memiliki variabilitas (standar deviasi) tertinggi ($1,249 \text{ g/kg}$). Sebaliknya, Jayapura mencatat kinerja terbaik dengan bias terkecil ($0,004 \text{ g/kg}$) dan standar deviasi terendah ($0,564 \text{ g/kg}$). Studi kasus di Jakarta terlihat pada Gambar 8 kembali mengkonfirmasi pola umum ini yakni COSMIC-2 cenderung *underestimate* di bawah 800 hPa, menunjukkan kedekatan nilai hingga potensi *overestimate* lokal antara 800-600 hPa, dan mencapai konvergensi sempurna dengan radiosonde di lapisan atas ($>300 \text{ hPa}$) yang sangat kering.

Pola vertikal *underestimate* di lapisan bawah yang membaik secara bertahap hingga mencapai akurasi sangat tinggi di lapisan atas sangat konsisten dengan kelemahan mekanika *retrieval* GNSS RO. Secara mekanis, hal ini berkaitan erat dengan fenomena *super-refraction* seperti yang dijelaskan oleh Rieckh dkk. [11]. Di wilayah tropis basah seperti Indonesia, lapisan atmosfer bawah (terutama 925 hPa) mengandung konsentrasi uap air dan partikel air yang sangat tinggi. Kondisi ini menyebabkan gradien refraktivitas yang sangat tajam, sehingga sinyal gelombang radio dari satelit mengalami pembelokan berlebih (*super-refraction*).

Akibatnya, sistem seringkali meremehkan (*underestimate*) nilai kelembapan sebenarnya dari kondisi aslinya di dekat permukaan [11]. Sebaliknya, pada lapisan atas (di atas 300 hPa), kandungan uap air mendekati nol sehingga bias refraksi mengecil dan akurasi COSMIC-2 menjadi sangat tinggi, sebuah temuan yang sejalan dengan studi global oleh Wang dkk. [14].

Tabel 4. Nilai validasi perbedaan kelembapan spesifik vertikal

Lokasi	Rata-rata Perbedaan Kelembapan Spesifik (g/kg)										
	925	850	700	500	400	300	250	200	150	100	50
Jakarta	-0,727	-0,692	-0,118	-0,092	-0,004	-0,026	0,001	0,008	0,002	0,002	-0,001
Cilacap	-1,054	-0,896	-0,569	-0,241	-0,149	-0,068	-0,037	-0,005	0,002	0,002	-0,001
Surabaya	-0,181	-0,451	-0,072	-0,008	0,011	0,006	0,010	0,007	0,003	0,002	0,000
Aceh	-0,570	-0,899	-0,546	-0,430	-0,301	-0,108	-0,053	-0,008	0,000	0,001	-0,003
Medan	-0,864	-0,520	0,060	0,101	0,041	0,007	0,025	0,012	0,003	0,002	-0,005
Ranai	-1,527	-1,114	-0,839	-0,445	-0,287	-0,111	-0,047	-0,008	0,001	0,001	-0,002
Padang	-0,505	-0,444	-0,064	0,079	0,009	0,003	0,010	0,009	0,002	0,002	-0,003
Pangkal Pinang	-0,715	0,003	0,132	0,067	0,043	-0,006	0,014	0,010	0,003	0,002	-0,003
Bengkulu	-0,391	-0,551	-0,108	-0,096	-0,034	-0,024	0,002	0,008	0,002	0,002	-0,005
Tarakan	-1,585	-1,061	-0,484	-0,214	-0,126	-0,021	0,005	0,009	0,004	0,002	-0,001
Pontianak	-0,682	-0,291	0,002	-0,065	-0,056	-0,035	-0,005	0,010	0,003	0,002	-0,004
Balikpapan	-0,631	-0,178	-0,392	-0,100	-0,167	-0,071	-0,008	0,009	0,003	0,002	-0,009
Pangkalan Bun	-2,314	-1,836	-1,129	-0,565	-0,396	-0,182	-0,067	-0,009	0,001	0,001	-0,002
Banjarmasin	-0,319	-0,246	0,083	-0,033	-0,038	-0,031	-0,006	0,009	0,003	0,002	-0,004
Manado	-0,260	-0,042	0,070	0,131	0,072	0,039	0,030	0,015	0,004	0,002	-0,002
Palu	0,042	-0,158	0,030	0,131	0,060	0,006	0,020	0,014	0,004	0,002	-0,001
Makassar	-0,188	-0,268	0,157	0,028	-0,017	0,003	0,016	0,012	0,003	0,002	-0,004
Kupang	-0,531	-0,232	0,014	-0,037	0,030	0,016	0,011	0,010	0,003	0,002	0,001
Sorong	-0,054	0,393	0,372	0,326	0,162	0,043	0,033	0,020	0,006	0,002	0,000
Biak	-0,390	0,046	0,179	0,066	0,053	0,004	0,010	0,008	0,002	0,002	-0,007
Ambon	-0,491	-0,238	-0,039	0,011	0,002	0,021	0,023	0,015	0,003	0,002	-0,005
Merauke	-0,218	-0,030	0,144	0,189	0,063	0,030	0,019	0,009	0,003	0,002	-0,001
Denpasar	-1,384	-1,057	-0,593	0,085	-0,070	0,020	0,030	0,012	0,003	0,002	0,000
Jayapura	-0,368	-0,162	0,034	0,251	0,040	-0,037	-0,018	0,010	0,003	0,002	-0,005

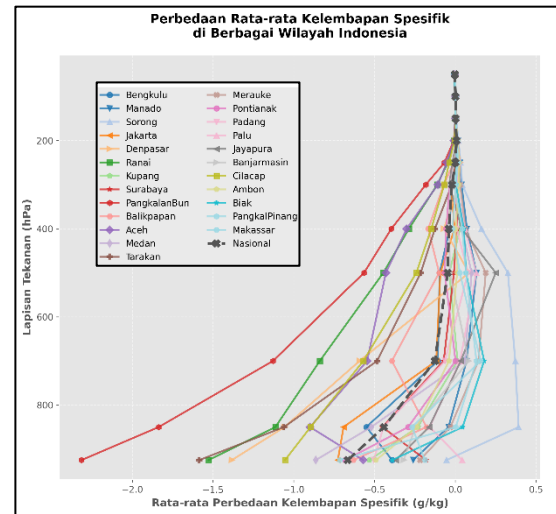
Tabel 5. Statistik validasi profil kelembapan spesifik nasional

	Rata-rata Perbedaan Kelembapan Spesifik (g/kg)										
	925	850	700	500	400	300	250	200	150	100	50
Rata-rata Perbedaan Nasional	-0,666	-0,441	-0,126	-0,047	-0,040	-0,020	0,001	0,008	0,003	0,002	-0,003
Perlapisan (g/kg)											
Standar Deviasi Nasional	1,751	1,709	1,501	0,892	0,563	0,227	0,105	0,030	0,005	0,002	0,016
Perlapisan (g/kg)											

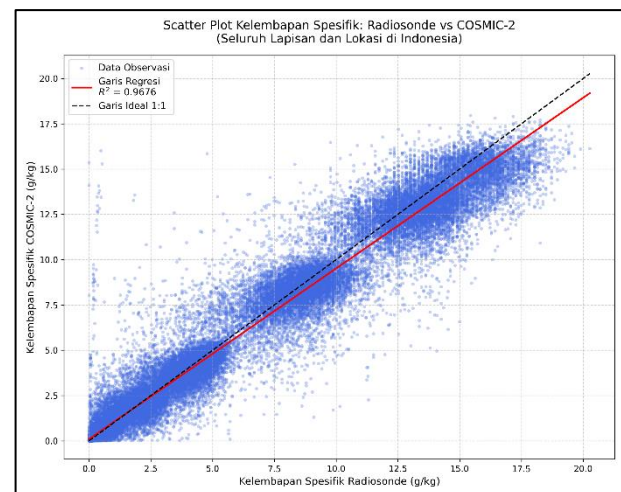
Tabel 6. Statistik validasi kelembapan spesifik keseluruhan berdasarkan lokasi

Lokasi	Rata-rata Perbedaan Per Lokasi (g/kg)	Standar Deviasi Per Lokasi (g/kg)	Rata-rata Perbedaan Nasional (g/kg)	Standar Deviasi Nasional (g/kg)
Jakarta	-0,116	0,892		
Cilacap	-0,217	1,249		
Surabaya	-0,045	0,834		
Aceh	-0,245	0,985		
Medan	-0,035	0,744		
Ranai	-0,394	0,966		
Padang	-0,040	0,724		
Pangkal Pinang	-0,029	0,829		
Bengkulu	-0,081	0,777		
Tarakan	-0,233	0,941		
Pontianak	-0,079	0,752		
Balikpapan	-0,120	0,748	-0,093	0,880
Pangkalan Bun	-0,541	1,076		
Banjarmasin	-0,043	0,948		
Manado	0,017	0,707		
Palu	0,020	0,691		
Makassar	-0,007	0,823		
Kupang	-0,040	0,971		
Sorong	0,125	0,862		
Biak	0,014	0,753		
Ambon	-0,043	0,778		
Merauke	0,026	0,931		
Denpasar	-0,184	0,884		
Jayapura	0,004	0,564		

Sama halnya dengan parameter suhu, analisis regresi linier juga diterapkan pada keseluruhan dataset kelembapan spesifik untuk mengukur tingkat akurasi secara statistik. Berdasarkan *scatter plot* (Gambar 7), nilai koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh adalah 0,968. Angka ini menunjukkan korelasi positif yang sangat kuat, di mana 96,76% varians data kelembapan spesifik COSMIC-2 konsisten dengan pengukuran radiosonde. Menariknya, *scatter plot* ini juga memberikan konfirmasi visual terhadap anomali bias di lapisan bawah.

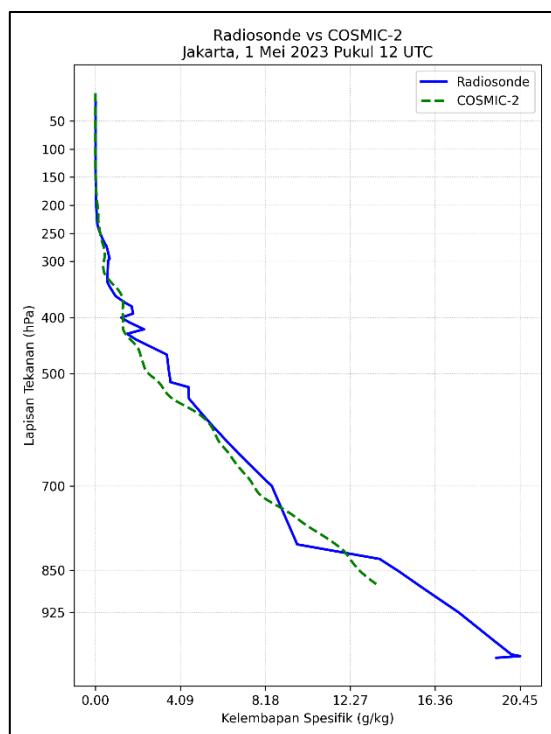


Gambar 5. Bias rata-rata vertikal kelembapan spesifik (Sumber: Analisis penulis (2026), data COSMIC-2 dari CDAAC dan radiosonde dari University of Wyoming)



Gambar 6. Scatter Plot Kelembapan Spesifik: Radiosonde vs COSMIC-2 (Sumber: Analisis penulis (2026), data COSMIC-2 dari CDAAC dan radiosonde dari University of Wyoming)

Terlihat bahwa seiring meningkatnya nilai kelembapan spesifik (terutama pada nilai > 10 g/kg yang merepresentasikan lapisan atmosfer bawah), garis regresi linier mengalami deviasi ke arah bawah dan berada di bawah garis ideal 1:1. Penurunan garis regresi ini merupakan bukti statistik yang memperkuat temuan sebelumnya, yakni adanya kecenderungan sistematis dari instrumen COSMIC-2 untuk menghasilkan estimasi yang lebih rendah (*underestimate*) pada kondisi atmosfer yang sangat basah akibat fenomena *super-refraction*.



Gambar 7. Diagram profil vertikal kelembapan spesifik radiosonde dan COSMIC-2 (Sumber: Analisis penulis (2026), data COSMIC-2 dari CDAAC dan radiosonde dari University of Wyoming)

Jika ditinjau dari perspektif perbandingan kuantitatif dengan literatur, rata-rata bias kelembapan ($-0,093$ g/kg) dan standar deviasi ($0,880$ g/kg) di Indonesia memang sedikit lebih besar daripada rata-rata global yang dilaporkan oleh Wang dkk. [14] (bias $-0,012$ g/kg, SD $0,666$ g/kg).

Hal ini sangat wajar mengingat kompleksitas dan tingginya kandungan uap air di lingkungan atmosfer tropis basah. Namun demikian, performa COSMIC-2 terbukti jauh lebih superior apabila dibandingkan dengan kinerja misi sebelumnya dalam menghadapi kondisi ekuatorial. Sebagai perbandingan, Li dkk. [9] mencatat bahwa data generasi pertama (COSMIC-1) di wilayah tropis rentan mengalami *error* ekstrem, dengan bias mencapai $30,92$ g/kg dan SD $50,29$ g/kg pada lapisan 200 hPa. Sebaliknya, pada penelitian ini, COSMIC-2 mampu menekan angka tersebut secara drastis, dengan hanya mencatat bias sebesar $0,008$ g/kg dan SD $0,030$ g/kg pada lapisan yang sama. Kontras kuantitatif yang sangat tajam ini membuktikan adanya lompatan kemajuan teknologi yang signifikan, menjadikan COSMIC-2 sebagai sumber data beresolusi tinggi yang andal dan esensial untuk pemodelan cuaca di Indonesia.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis validasi data GNSS-RO dari misi COSMIC-2 di wilayah Indonesia, hasil penelitian menunjukkan bahwa instrumen ini memiliki akurasi yang dapat diterima dengan rentang bias yang rendah, meskipun memiliki tingkat variabilitas yang cukup tinggi di beberapa wilayah. Secara nasional, perbedaan rata-rata suhu tercatat sebesar $0,102^{\circ}\text{C}$ dengan standar deviasi $1,169^{\circ}\text{C}$, sementara kelembapan spesifik menunjukkan kecenderungan underestimate di lapisan bawah atmosfer dan konvergensi nilai menuju nol pada lapisan yang lebih tinggi, dengan perbedaan rata-rata nasional sebesar $-0,093$ g/kg dan standar deviasi $0,880$ g/kg. Selain itu, adanya variasi regional cukup mencolok, di mana pada variabel suhu, wilayah Medan menunjukkan perbedaan rata-rata tertinggi sebesar $0,214^{\circ}\text{C}$, sedangkan Ranai mencatat tingkat kesesuaian yang sangat baik dengan nilai perbedaan rata-rata sebesar $0,008^{\circ}\text{C}$. Terkait dengan kelembapan spesifik, wilayah Pangkalan Bun mengalami perbedaan rata-rata terbesar sebesar $-0,541$ g/kg, sementara Jayapura menunjukkan ketelitian yang tinggi dengan nilai perbedaan rata-rata terkecil sebesar $0,004$ g/kg. Secara keseluruhan, meskipun terdapat bias sistematis pada beberapa lapisan atmosfer, akurasi GNSS RO COSMIC-2 tetap berada pada tingkat yang baik, sehingga data GNSS RO COSMIC-2 dapat dimanfaatkan sebagai sumber informasi atmosfer yang cukup andal di wilayah Indonesia, dengan mempertimbangkan karakteristik vertikal dan spasial di masing-masing lokasi pengamatan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pimpinan BMKG dan STMKG atas dukungan fasilitas, serta kepada keluarga atas dukungan moral selama penyusunan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. P. Cahyarini, L. Mareta, W. Retno Palutfi, D. Nada Almasah, and R. Afrilia Putri Haryandi, "Identifikasi gelombang mixed Rossby gravity pada fluktuasi vertikal atmosfer di wilayah Padang, Jakarta, dan Pontianak menggunakan data radiosonde dan GNSS-RO," *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, vol. 24, no. 2, pp. 77–84, 2023.
- [2] COSMIC Data Analysis and Archive Center (CDAAC). "COSMIC-2 | Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate." Accessed: Dec. 9, 2024. [Online]. Available: <https://www.cosmic.ucar.edu/global-navigation-satellite-system-gnss-background/cosmic-2>

- [3] B. Craig, G. McCabe, and D. Moore, *Introduction to the Practice of Statistics*. New York: W.H. Freeman and Company, 2014.
- [4] E. A. Hala, A. Mousa, M. Yousef, and A. Mahrous, "Statistical validation of GNSS radio occultation data over Egypt," *Advances in Basic and Applied Sciences*, vol. 2, no. 1, pp. 29–45, 2024, doi: 10.21608/abas.2024.223245.1024.
- [5] B. Hotz, L. Papritz, and M. Röthlisberger, "Understanding the vertical temperature structure of recent record-shattering heatwaves," *Weather and Climate Dynamics*, vol. 5, no. 1, pp. 323–343, 2024, doi: 10.5194/wcd-5-323-2024.
- [6] H. C. Ko, H. Y. Chun, R. Wilson, and M. A. Geller, "Characteristics of atmospheric turbulence retrieved from high vertical-resolution radiosonde data in the United States," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 124, no. 14, pp. 7553–7579, 2019, doi: 10.1029/2019JD030287.
- [7] M. Kottke, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, and F. Rubel, "World map of the Köppen-Geiger climate classification updated," *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 15, no. 3, pp. 259–263, 2006, doi: 10.1127/0941-2948/2006/0130.
- [8] S. Laroche and R. Sarrazin, "Impact of radiosonde balloon drift on numerical weather prediction and verification," *Weather and Forecasting*, vol. 28, no. 3, pp. 772–782, 2013, doi: 10.1175/WAF-D-12-00114.1.
- [9] Y. Li, Y. Yuan, and X. Wang, "Assessments of the retrieval of atmospheric profiles from GNSS radio occultation data in moist tropospheric conditions using radiosonde data," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 17, p. 2717, 2020, doi: 10.3390/rs12172717.
- [10] J. C. Carvalho, F. M. Ramos, N. J. Ferreira, and H. F. Campos Velho, "Retrieval of vertical temperature profiles in the atmosphere," in *Proceedings of 3rd Int. Conference on Inverse Problems on Engineering (3ICIPE)*, Port Ludlow, WA, USA, Jun. 13–18, 1999.
- [11] T. Rieckh, R. Anthes, W. Randel, S. P. Ho, and U. Foelsche, "Evaluating tropospheric humidity from GPS radio occultation, radiosonde, and AIRS from high-resolution time series," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 11, no. 5, pp. 3091–3109, 2018, doi: 10.5194/amt-11-3091-2018.
- [12] University Corporation for Atmospheric Research (UCAR). "GNSS Radio Occultation | Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate." Accessed: Dec. 9, 2024. [Online]. Available: <https://www.cosmic.ucar.edu/what-we-do/gnss-radio-occultation>
- [13] J. M. Wallace and P. V. Hobbs, *Atmospheric Science Second Edition*. Oxford: Elsevier's Science & Technology Rights Department, 2006.
- [14] B. R. Wang, X. Y. Liu, and J. K. Wang, "Assessment of COSMIC radio occultation retrieval product using global radiosonde data," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 6, no. 4, pp. 1073–1083, 2013, doi: 10.5194/amt-6-1073-2013.
- [15] WMO. "Details for Instrument: TGRS (COSMIC-2)." Accessed: Jan. 14, 2025. [Online]. Available: https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/tgrs_cosmic_2
- [16] K. Zhang, E. Fu, D. Silcock, Y. Wang, and Y. Kuleshov, "An investigation of atmospheric temperature profiles in the Australian region using collocated GPS radio occultation and radiosonde data," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 4, no. 10, pp. 2087–2092, 2011, doi: 10.5194/amt-4-2087-2011.
- [17] E. R. Kursinski, G. A. Hajj, J. T. Schofield, R. P. Linfield, and K. R. Hardy, "Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 102, no. D19, pp. 23429–23465, 1997, doi: 10.1029/97JD01569.



Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)