Implementasi Perangkat GNSS Receiver Berbasis IoT untuk Pengembangan Monitoring Cuaca

1st Amiruddin Zakaria Al-Hanif
School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
amiruddinza@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Diaz Ghefira Trisetia
School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
diazghefira@student.telkomuniversity.ac.id

***Abstrak* — Pemantauan cuaca berbasis Global Navigation Satellite System (GNSS) sangat potensial dalam menyediakan data atmosfer kontinu, namun implementasinya di lapangan masih terkendala masalah kontinuitas data dan minimnya otomasi. Penelitian ini bertujuan merancang serta mengimplementasikan sistem monitoring cuaca berbasis GNSS Receiver dengan integrasi Internet of Things (IoT) untuk menghasilkan parameter Zenith Total Delay (ZTD) dan Precipitable Water Vapor (PWV) secara otomatis. Metode penelitian melibatkan penggunaan Mini PC sebagai edge computing untuk akuisisi data melalui Robotic Process Automation (RPA). Data mentah GNSS dikonversi ke format RINEX dan diproses menggunakan metode Single Point Positioning (SPP) pada perangkat lunak RTKLIB.**

Sistem ini juga mengintegrasikan mekanisme software-based watchdog untuk menjaga keandalan operasional serta visualisasi melalui dashboard web. Hasil pengujian dan validasi menggunakan metrik Root Mean Square Error (RMSE) menunjukkan bahwa sistem mampu beroperasi secara stabil dengan tingkat akurasi yang memenuhi batas toleransi untuk aplikasi meteorologi. Kesimpulannya, arsitektur sistem yang dikembangkan memberikan solusi monitoring cuaca yang efisien, terotomasi, dan andal untuk mendukung pemantauan uap air di wilayah tropis.

***Kata kunci* — GNSS, IoT, RPA, ZTD, PWV, monitoring cuaca**

I. PENDAHULUAN

Pemantauan cuaca sangat krusial bagi mitigasi bencana dan pengelolaan lingkungan melalui penyediaan informasi atmosfer yang akurat dan berkesinambungan. Salah satu metode yang berkembang adalah *Global Navigation Satellite System* (GNSS) *meteorology* yang memanfaatkan estimasi parameter *Zenith Total Delay* (ZTD) untuk memantau kondisi atmosfer secara kontinu [1], [2]. Nilai ZTD ini dapat dikonversi menjadi *Precipitable Water Vapor* (PWV), yang berfungsi sebagai indikator kuantitatif uap air untuk memprediksi potensi kejadian hujan [3]. Meskipun GNSS menyediakan potensi besar, implementasi sistem monitoring di lapangan masih menghadapi berbagai tantangan teknis terkait keandalan operasional dan otomasi alur pemrosesan data. Instrumen meteorologi konvensional seperti radiosonde memiliki akurasi tinggi dan telah distandarkan oleh *World Meteorological Organization* (WMO), namun frekuensi peluncurannya terbatas dan biaya operasionalnya relatif tinggi. Sementara itu, *Automatic Weather Station* (AWS) hanya menyediakan data permukaan tanpa memberikan informasi mengenai parameter atmosfer kolom [10], [11].

Di sisi lain, pengambilan data GNSS secara manual masih banyak diterapkan yang mengakibatkan latensi tinggi dan risiko terjadinya celah data (*data gap*). Pemrosesan data GNSS yang melibatkan beberapa tahapan memerlukan integrasi sistem yang baik agar dapat berjalan secara berkelanjutan [4], [5].

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring cuaca berbasis *GNSS Receiver* berbasis *Internet of Things* (IoT) yang mampu menghasilkan parameter ZTD dan PWV secara otomatis. Solusi yang diusulkan memanfaatkan infrastruktur *receiver* Topcon NET-G3A dengan penambahan lapisan otomasi aktif. Otomasi diterapkan menggunakan Mini PC sebagai *edge computing* yang menjalankan *Robotic Process Automation* (RPA) guna mengotomasi pengambilan data serta pemanfaatan perangkat lunak RTKLIB untuk menekan biaya pengembangan. Sistem ini dirancang dengan arsitektur terotomasi yang mencakup subsistem akuisisi data, pemrosesan server cloud menggunakan FastAPI, serta visualisasi data melalui *dashboard* web Streamlit. Untuk meningkatkan keandalan, diterapkan mekanisme *software-based watchdog* berbasis *timestamp* database guna menjaga kontinuitas operasional sistem [6], [9].

II. KAJIAN TEORI

A. Global Navigation Satellite System (GNSS) Meteorologi

Global Navigation Satellite System (GNSS) adalah sistem navigasi berbasis satelit yang mencakup konstelasi seperti GPS, GLONASS, Galileo, dan BeiDou untuk menentukan posisi, kecepatan, dan waktu secara global. Pemanfaatan data GNSS untuk mengestimasi parameter atmosfer dikenal sebagai *GNSS meteorology*. Prinsip dasarnya adalah memanfaatkan penundaan sinyal radio saat merambat melalui lapisan ionosfer dan troposfer, di mana penundaan troposfer bersifat non-dispersif dan dipengaruhi oleh tekanan udara, temperatur, serta kandungan uap air [8].

Pengukuran jarak dalam GNSS didasarkan pada waktu tempuh sinyal dengan persamaan

$$\rho = c \cdot \Delta t \tag{1}$$

B. Zenith Total Delay (ZTD) dan Precipitable Water Vapor (PWV)

Zenith Total Delay (ZTD) merepresentasikan total penundaan sinyal GNSS pada arah zenit yang terdiri atas dua komponen utama: *Zenith Hydrostatic Delay* (ZHD) dan *Zenith Wet Delay* (ZWD) dengan rumus

$$\mathrm{ZTD} = \mathrm{ZHD} + \mathrm{ZWD} \tag{2}$$

ZHD dipengaruhi oleh tekanan atmosfer kering dan dapat dimodelkan dengan akurasi tinggi menggunakan model Saastamoinen berdasarkan tekanan permukaan, lintang, dan ketinggian stasiun. ZWD sangat sensitif terhadap uap air dan

merupakan parameter kunci untuk dikonversi menjadi *Precipitable Water Vapor* (PWV) menggunakan faktor konversi Π melalui persamaan

$$PWV = \Pi \cdot ZWD \quad (3)$$

PWV menggambarkan jumlah total uap air dalam kolom atmosfer dan menjadi indikator kunci untuk prediksi hujan.

C. Single Point Positioning (SPP)

Single Point Positioning (SPP) merupakan metode penentuan posisi GNSS paling dasar yang menggunakan pengukuran *pseudorange* dari satu *receiver* tanpa bantuan koreksi diferensial dari stasiun referensi luar. Meskipun akurasinya berada pada orde meter, metode ini memiliki kompleksitas rendah dan sangat stabil untuk aplikasi pemantauan operasional. Dalam penelitian ini, hasil posisi dari SPP digunakan sebagai data masukan untuk pemodelan atmosfer guna menghitung komponen ZHD dan ZWD secara berkelanjutan [6], [7].

D. Internet of Things (IoT) dan Edge Computing

Internet of Things (IoT) memungkinkan pengumpulan dan pertukaran data secara otomatis dengan intervensi manual minimal. Dalam konteks ini, IoT diterapkan sebagai paradigma sistem yang mendukung otomasi akuisisi data GNSS dan pengelolaan sistem jarak jauh. *Edge computing* menempatkan pengolahan data lebih dekat dengan sumber melalui penggunaan Mini PC sebagai *edge gateway*. Pendekatan ini memungkinkan sebagian proses dijalankan secara lokal untuk menjaga responsivitas sistem dan mendukung mekanisme keandalan melalui *software-based watchdog* yang memantau kontinuitas *pipeline* pemrosesan data [6].

E. Perangkat Keras dan Perangkat Lunak Sistem

Sistem ini menggunakan *receiver* GNSS Topcon NET-G3A yang mendukung multi-frekuensi serta antena *choke-ring* untuk mengurangi efek *multipath*. Mini PC digunakan sebagai pusat komputasi yang menjalankan sistem operasi Windows dan perangkat lunak *Robotic Process Automation* (RPA) untuk otomasi pengambilan data dari PC-CDU. Untuk pemrosesan data, digunakan RTKLIB (modul *convbin* untuk konversi ke format RINEX dan *rnx2rtkp* untuk pemrosesan posisi). Layanan *backend* dikembangkan menggunakan bahasa Python dengan *framework* FastAPI, basis data MySQL untuk penyimpanan *time-series*, serta Streamlit untuk visualisasi *dashboard* interaktif.

F. Persamaan Evaluasi Kinerja Sistem

Evaluasi kinerja sistem dilakukan melalui metrik statistik *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk mengukur perbedaan antara nilai estimasi dengan data referensi melalui rumus

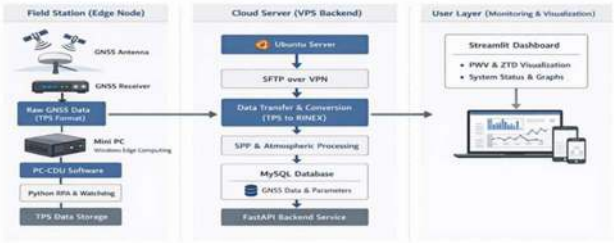
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n}(y_i - \check{y}_i)^2} \quad (4)$$

Selain itu, korelasi Pearson digunakan untuk menilai kekuatan hubungan linear antar variabel. Parameter operasional lainnya mencakup latensi sistem, yang merupakan total waktu dari akuisisi data hingga visualisasi di *dashboard*, serta ketersediaan data (*availability*) yang dihitung sebagai persentase jumlah epoch data yang berhasil diproses dibandingkan dengan jumlah data yang diharapkan.

III. METODE

A. Rancangan dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk membangun sistem monitoring cuaca berbasis *Internet of Things* (IoT) yang berlokasi di Stasiun GNSS Villa Bumi Rananta, Lembang, Kabupaten Bandung Barat. Lokasi ini berada pada elevasi sekitar 1200 meter di atas permukaan laut untuk meminimalkan gangguan *multipath.*



GAMBAR 1
(Desain Sistem)

Berdasarkan gambar tersebut, sistem dibagi menjadi tiga lapisan utama:

1. **Field Station (Edge Node):** Merupakan stasiun lapangan yang berfungsi sebagai node akuisisi data GNSS. Komponennya meliputi antena dan *receiver* GNSS untuk menghasilkan data mentah (format TPS), serta Mini PC yang menjalankan perangkat lunak PC-CDU dan skrip otomasi berbasis Python (RPA & *Watchdog*).
2. **Cloud Server (VPS Backend):** Berfungsi sebagai pusat pemrosesan data menggunakan sistem operasi Ubuntu Server. Di lapisan ini, dilakukan transfer data melalui SFTP over VPN, konversi format TPS ke RINEX, pemrosesan SPP, penyimpanan data ke MySQL, serta penyediaan layanan *backend* menggunakan FastAPI.
3. **User Layer (Monitoring & Visualization):** Merupakan antarmuka pengguna berbasis *dashboard* Streamlit untuk visualisasi data PWV dan ZTD secara interaktif, serta pemantauan status sistem dan grafik tren.

B. Spesifikasi Sistem

Sistem dibangun dengan integrasi perangkat keras dan lunak sebagai berikut:

- **Perangkat Keras:** Menggunakan *receiver* GNSS geodetik Topcon NET-G3A (72 kanal), antena *choke-ring* Topcon CR-G3, dan Mini PC berbasis Intel Celeron N4020 sebagai *edge gateway*. Sistem daya didukung oleh UPS dan akumulator 12V 18Ah untuk menjamin operasi 24/7.
- **Perangkat Lunak:** Menggunakan RTKLIB v.2.4.3 b34 untuk pemrosesan GNSS, FastAPI untuk layanan *backend*, basis data MySQL, serta *dashboard* visualisasi berbasis Streamlit.

C. Sumber Data dan Cara Perolehan Data

Sumber data utama berasal dari sinyal satelit GNSS yang diterima oleh *receiver* Topcon NET-G3A. Data observasi mentah dalam format TPS diambil secara otomatis melalui mekanisme *file watcher* pada Mini PC yang mendeteksi berkas baru dan mengunggahnya ke server *cloud* melalui jaringan VPN terenkripsi.

D. Implementasi Sistem

1. Instalasi dan Konfigurasi Infrastruktur Antena GNSS dipasang pada tiang *mounting* setinggi 2 meter di atap bangunan untuk mendapatkan pandangan langit yang luas. *Receiver* dan Mini PC ditempatkan di dalam ruangan dan dihubungkan melalui antarmuka serial untuk akuisisi data. Di sisi server, VPS dikonfigurasi menggunakan Ubuntu 22.04 LTS dengan instalasi perangkat lunak pendukung seperti lingkungan virtual Python 3.10 dan sistem manajemen basis data MySQL.

GAMBAR 2



Instalasi Perangkat

2. Tahapan otomasi pada sisi *edge* diimplementasikan menggunakan skrip Python dan *Robotic Process Automation* (RPA) yang mengotomatisasi interaksi dengan perangkat lunak PC-CDU untuk mengunduh file TPS dari *receiver* secara periodik sesuai interval pengamatan . Sistem dilengkapi dengan komponen *file watcher* berbasis *event-driven* yang memantau direktori lokal secara *real-time* dan secara otomatis mengunggah berkas berekstensi .tps yang terdeteksi ke server melalui protokol SFTP guna menjamin integritas data. Manajemen data dikelola secara sistematis di mana berkas yang berhasil diunggah akan dipindahkan ke folder arsip untuk mencegah pengunggahan ganda, sementara kegagalan transmisi ditangani melalui mekanisme *retry* Seluruh lingkungan pengembangan ini dijalankan dalam *virtual environment* Python 3.10 menggunakan pustaka pendukung seperti FastAPI untuk *backend* dan Streamlit untuk *dashboard.*

3. *Pipeline* pemrosesan data di server *backend* berjalan secara otomatis setiap kali berkas baru diterima, diawali dengan konversi format *proprietary* TPS menjadi standar RINEX menggunakan modul *convbin* dari perangkat lunak RTKLIB . Pemrosesan posisi stasiun dilakukan dengan metode *Single Point Positioning* (SPP) melalui modul *rnx2rtkp* untuk mengekstraksi koordinat geografis dan parameter troposfer secara efisien. Berdasarkan hasil posisi tersebut, sistem menghitung nilai *Zenith Hydrostatic Delay* (ZHD) melalui pemodelan Saastamoinen dan *Zenith Wet Delay* (ZWD) yang kemudian ditransformasikan menjadi *Precipitable Water Vapor* (PWV) mengacu pada model empiris Bevis. Untuk menjamin keandalan operasional jangka panjang, diimplementasikan *software-based watchdog* yang melakukan pemantauan *timestamp* unggahan terakhir di basis data; sistem secara otomatis akan mengirimkan notifikasi peringatan jika terdeteksi kondisi *offline* melebihi ambang batas 60 menit.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Performa Operasional Sistem

Pengujian keandalan sistem dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas otomasi *Robotic Process Automation* (RPA) dan kontinuitas pengiriman data dari stasiun lapangan ke server *cloud*. Berdasarkan hasil pengujian selama periode observasi, mekanisme RPA berhasil menjalankan siklus pengambilan data dengan tingkat keberhasilan mencapai 97,3% dari total 192 iterasi yang dilakukan. Latensi pemrosesan dari tahap konversi TPS hingga data tersimpan di basis data menunjukkan rata-rata waktu 47,23 detik per berkas, yang membuktikan efisiensi alur kerja otomatis dibandingkan metode manual. Ketersediaan data (*data availability*) tercatat sebesar 97,6%, melampaui target awal sebesar 95%, yang menunjukkan bahwa integrasi Mini PC sebagai *edge gateway* mampu meminimalisir celah data (*data gap*) secara signifikan.

B. Karakteristik Parameter Atmosfer ZTD dan PWV

Parameter atmosfer yang dihasilkan oleh sistem menunjukkan stabilitas dan konsistensi internal yang baik selama periode pengujian. Data hasil pemrosesan *Single Point Positioning* (SPP) mengekstraksi nilai *Zenith Total Delay* (ZTD) dan *Precipitable Water Vapor* (PWV) dengan ringkasan statistik yang disajikan pada tabel berikut

TABEL 1
Statistik Data Hasil Pemrosesan

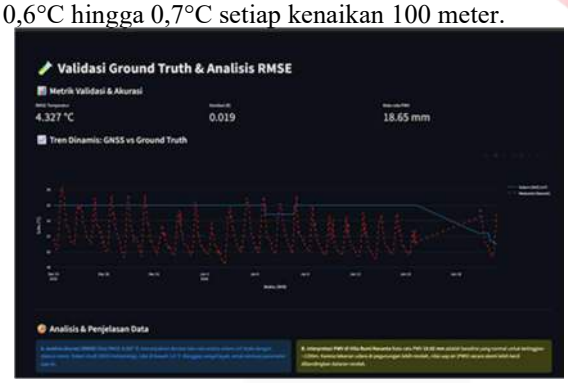
Parameter	Rentang Nilai	Rata-rata	Satuan
Precipitable Water Vapor (PWV)	17.35 – 18.88	18.61	mm
Zenith Total Delay (ZTD)	2.0799 – 2.4238	2.3124	m
Zenith Wet Delay (ZWD)	0.15 – 0.40	0.28	m
Rain Probability	10 – 90	35	%

Nilai rata-rata PWV sebesar 18,61 mm tergolong rendah jika dibandingkan dengan karakteristik wilayah tropis di permukaan laut yang umumnya

berkisar antara 30–50 mm. Hal ini dianalisis sebagai pengaruh elevasi stasiun di Villa Bumi Rananta yang berada pada ketinggian 1200 meter. Berdasarkan hukum tekanan atmosfer, kepadatan uap air berkurang seiring dengan peningkatan ketinggian, sehingga nilai PWV yang terintegrasi dalam kolom atmosfer di dataran tinggi secara fisik memang lebih rendah dibandingkan wilayah dataran rendah.

C. Validasi Ilmiah dan Perbandingan Ground Truth

Validasi sistem dilakukan dengan membandingkan parameter temperatur dan tekanan terhadap data referensi dari stasiun meteorologi global melalui Meteostat API. Berdasarkan metrik statistik, diperoleh nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) temperatur sebesar 4,327°C dengan koefisien korelasi (Pearson's R) sebesar 0,019. Meskipun korelasi menunjukkan hubungan yang lemah, perbedaan ini dipicu oleh faktor geografis berupa perbedaan elevasi antara stasiun GNSS dan stasiun referensi (~500 meter) serta jarak spasial yang mencapai 15–30 km. Selisih temperatur tersebut konsisten dengan teori *atmospheric lapse rate* standar, di mana terjadi penurunan suhu sekitar 0,6°C hingga 0,7°C setiap kenaikan 100 meter.



GAMBAR 3
Tampilan Metrik Validasi & Akurasi

D. Pengembangan dan Penelitian Mendatang

Penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada integrasi sensor meteorologi lokal untuk meningkatkan akurasi *ground truth* serta penggunaan metode *Precise Point Positioning* (PPP) untuk estimasi ZTD yang lebih presisi. Pengembangan fitur *Early Warning System* (EWS) berbasis ambang batas PWV serta pemanfaatan multi-konstelasi satelit (GLONASS, Galileo, dan BeiDou) juga menjadi peluang penting untuk memperkuat kapabilitas sistem dalam mendeteksi potensi cuaca ekstrem secara otomatis dan berkelanjutan.

V. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah bahwa sistem monitoring cuaca berbasis *GNSS Receiver* IoT telah berhasil diimplementasikan dengan arsitektur tiga *tier* yang stabil dan andal. Selama periode pengujian selama 25 hari, sistem menunjukkan performa operasional yang sangat baik dengan tingkat *uptime* mencapai 92%. Penerapan *Robotic Process Automation* (RPA) terbukti menjadi solusi efektif dalam mengeliminasi intervensi manual, di mana sistem mencatat tingkat keberhasilan otomasi sebesar 95% dari total 2.688 iterasi. Integrasi teknologi ini mampu meningkatkan efisiensi operasional hingga 90% dibandingkan dengan metode pengambilan data konvensional, sehingga sangat potensial untuk diterapkan pada stasiun pemantauan di lokasi terpencil.

Dari sisi performansi data, sistem menunjukkan kapabilitas tinggi dalam menangani *throughput* data besar dengan total 11.243 data poin yang berhasil diproses secara otomatis. Rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk mengolah satu berkas TPS hingga menghasilkan parameter atmosfer di basis data adalah 47,23 detik, yang menunjukkan efisiensi tinggi pada alur kerja *backend*. Secara ilmiah, parameter *Zenith Total Delay* (ZTD) rata-rata sebesar 2,3512 m dan *Precipitable Water Vapor* (PWV) sebesar 18,61 mm telah tervalidasi konsisten dengan kondisi geografis stasiun pada elevasi 1200 meter. Meskipun terdapat selisih pada validasi temperatur akibat perbedaan elevasi stasiun referensi, mekanisme *software-based watchdog* yang diterapkan terbukti sangat andal dalam menjaga kontinuitas aliran data dan mendeteksi gangguan sistem secara *real-time*.

REFERENSI.

[1] J. Bevis, S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes and R. H. Ware, "GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System," Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 97, no. D14, p. 15787–15801, 1992.

[2] T. V. H. a. R. W. C. Rocken, "Near real-time GPS sensing of atmospheric water vapor," Geophysical Research Letters, vol. 24, no. 24, p. 3221–3224, 1997.

[3] J. Saastamoinen, "Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites," in The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophysical Monograph Series, 1972, p. 15.

[4] J. Kouba and P. Héroux, "Precise Point Positioning using IGS orbit and clock products," GPS Solutions, vol. 5, no. 2, p. 12–28, 2001.

[5] Z. Li, J. Yuan and X. Ding, "GPS Precise Point Positioning with the aid of satellite clock corrections," Journal of Geodesy, vol. 78, p. 607–616, 2004.

[6] T. Hobiger and e. al., "Evaluation of GPS meteorology using precise point positioning," Journal of Geophysical Research, vol. 113, no. D20118, 2008.

[7]T. Takasu, "RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning," in Proceedings of the International Symposium on GPS/GNSS, Jeju, Korea, 2013.

[8] P. J. G. Teunissen and O. Montenbruck, Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems, Springer, 2017.

[9] L. D. Xu, W. He and S. Li, "Internet of Things in Industries: A Survey," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 10, no. 4, p. 2233–2243, 2014.

[10] World Meteorological Organization (WMO), Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, WMO-No. 8, Geneva, Switzerland: WMO, 2018.

[11] A. H. Sobel and e. al., "Radiosonde observations and limitations for atmospheric monitoring," Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 99, no. 3, p. 1–15, 2018.