

Penerapan Metode Kalman Filter Slow-Fast Differential Untuk Meningkatkan Kerapatan Dan Nilai Curah Hujan Dengan Menggunakan Signal To Noise Ratio Pada Hub VSat

Toto Andrianto ¹⁾, Agus Sofwan ²⁾, Kun Wardhana ³⁾, Masbah RT Siregar ⁴⁾, Boma Anjang P ⁵⁾

Mahasiswa Pascasarjana Teknik Elektro, Institut Sains dan Teknologi Nasional, Jakarta, Indonesia

Dosen Pascasarjana Teknik Elektro, Institut Sains dan Teknologi Nasional, Jakarta, Indonesia
Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jakarta, Indonesia

Email: toto.andrianto@bmet.go.id, asofwan@istn.ac.id, kunwardana@gmail.com,
mrtsiregar@istn.ac.id

Abstrak

Pengukuran curah hujan perlu dilakukan karena hujan sangat esensial bagi kehidupan manusia. Umumnya pengukuran dilakukan dengan instrumen, seperti ground measurement (rain gauge), radar cuaca, dan satelit cuaca. Penelitian ini membahas potensi pengukuran estimasi curah hujan dengan memanfaatkan down SNR gelombang Ku-Band pada Hub VSAT yang berfrekuensi 14 GHz dengan menggunakan metode slow-fast differential kalman filter. Metode ini menggunakan dua kalman filter, salah satu ST (Slow Tracker) yang bersifat lebih lambat dan FT (Fast Tracker) yang bersifat lebih cepat. Kombinasi kedua filter tersebut dapat mendeteksi hujan dan mengukur estimasi curah hujan yang terjadi. Hasil pengukuran curah hujan down SNR akan dibandingkan dengan curah hujan hasil pengukuran rain gauge bertipe tipping bucket. Lokasi Hub VSAT dan rain gauge berdekatan berada di Kemayoran, Jakarta Pusat. Daerah ini masih berada di dalam cakupan area rain gauge yang berada di antara 250 m² dan 3000 m². Penelitian ini berhasil mendeteksi hujan yang sedang terjadi dan hasil pengukuran estimasi curah hujan yang didapat memiliki koefisien korelasi sebesar 0.9648 dan root mean square error sebesar 4.418.

Kata kunci: curah hujan, Ku-band, signal to noise ratio, slow-fast differential kalman filter

Abstract

Rainfall measurement must be carried out, because rain is an essential phenomenon for human living. Generally, rainfall is measured using ground measurement (rain gauge), weather radar, and weather satellite. In this study, we exploit the potential of estimating rain fall by down SNR Ku-Band (14 GHz) wave on VSAT Hub using slow-fast differential kalman filter. This method using two kalman filters, ST (Slow Tracker) and FT (Fast Tracker). ST is slower, not more reactive than FT. Combination of those filters can detect and estimate rainfall. Rainfall estimation obtained from down SNR will be compared with rainfall measurement from ground measurement of rain gauge. Hub and rain gauge are close together and located in Kemayoran, Jakarta Pusat. This Area is still in coverage area of rain gauge between 250 m² and 3000 m². This research was successful in detecting ongoing rain. The rainfall estimation results obtained had a correlation coefficient of 0.9648 and a root mean square error of 4.418

Key words: Rain fall, Ku-band, signal to noise ratio, slow-fast differential kalman filter

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Hujan merupakan salah satu fenomena cuaca di atmosfer yang sangat berdampak

bagi kehidupan manusia. Dampak yang dirasakan manusia dapat berupa dampak yang ringan hingga dampak yang berat seperti bencana alam dan kekeringan jika

hujan tidak terjadi pada kurun waktu yang lama di suatu daerah. Dikarenakan dampaknya terhadap kehidupan manusia sangat besar, pengukuran curah hujan sangat diperlukan untuk mengantisipasi dampak yang terjadi.

Terdapat 3 instrumen penting untuk melakukan pengukuran curah hujan, yaitu rain gauge, radar cuaca, dan satelit cuaca. Penggunaan ketiga instrumen tersebut secara bersamaan dapat memberikan nilai pengukuran curah hujan yang memiliki presisi, temporal, dan resolusi spasial yang baik. Akan tetapi, pengoperasian ketiga jenis instrumen pengukuran hujan tersebut memerlukan sumber daya yang besar.

Sinyal gelombang VSAT (Very Small Aperture Terminal) dengan frekuensi tertentu (10 GHz ke atas) sangat terpengaruh oleh hujan di lintasan sinyalnya. Ketika hujan turun di lintasan sinyal satelit, nilai kekuatan sinyal yang diterima oleh receiver VSAT akan berkurang dikarenakan atenuasi yang disebabkan oleh air hujan kepada sinyal. Nilai kekuatan sinyal yang hilang karena hujan dapat digunakan untuk mencari nilai curah hujan di sepanjang lintasan sinyal.

Oleh karena itu, metode pengukuran curah hujan dengan memanfaatkan komunikasi satelit VSAT diharapkan dapat memberikan alternatif baru untuk melakukan pengukuran nilai curah hujan, sehingga dapat meningkatkan kerapatan pengukuran nilai curah hujan.

Beberapa penelitian tentang pemanfaatan sinyal gelombang mikro untuk menghitung curah hujan telah dilakukan. Penelitian yang dilakukan Mugnai dkk, menjelaskan metode yang dapat digunakan untuk menghitung estimasi curah hujan dengan memanfaatkan DSL satelit Ka-band [9]. Hasil perhitungan estimasi curah hujan cukup konsisten dibandingkan dengan curah hujan yang diukur oleh beberapa rain gauge di sekitar antenna. Tahun 2018, Gharanjik, dkk. memberikan metode untuk mengestimasi nilai curah hujan

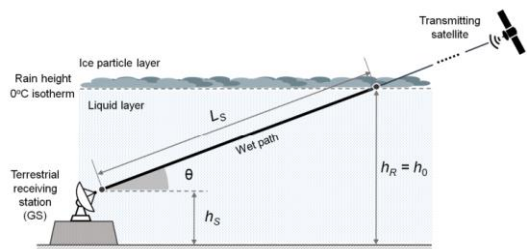
secara real-time dengan menggunakan C/N (Carrier-to-Noise power ratio) dari jaringan satelit komunikasi broadband [2]. Sinyal C/N diproses dengan machine learning untuk menentukan saat hujan terjadi yang selanjutnya akan ditentukan nilai atenuasi yang disebabkan oleh hujan yang kemudian nilai curah hujan dapat ditentukan. Hasil akhir dari penelitian ini menyebutkan bahwa metode yang digunakan pada penelitian ini berpotensi untuk mendukung pengamatan hari hujan dan estimasi curah hujan.

Tahun 2019 terdapat sebuah riset proyek bernama NEFOCAST yang didanai oleh pemerintah Tuscany (Italy) yang bertujuan untuk membangun sistem pemetaan curah hujan pada suatu regional tertentu dengan memanfaatkan sistem satelit [4]. Prinsip yang digunakan sama seperti penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, bahwa nilai sinyal atenuasi yang terjadi pada sinyal satelit yang disebabkan oleh hujan dapat digunakan untuk menghitung nilai estimasi curah hujan yang sedang terjadi. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah dengan memanfaatkan dua kalman filter FT (Fast Tracker) dan ST (Slow Tracker) untuk mengidentifikasi kondisi hujan atau tidak.

Kualitas sinyal yang diterima oleh receiver dari satelit sangat dipengaruhi dari seberapa besar atenuasi yang terjadi. Atenuasi dapat disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain efek dari ionosfer dan troposfer, kesalahan pointing antenna, sun transit, gas, awan, dan hujan di sepanjang lintasan sinyal [3]. Semakin tinggi nilai frekuensi yang digunakan, maka semakin mudah teratenuasi oleh hujan. Frekuensi 10 GHz ke atas sangat mudah teratenuasi oleh hujan [10]. Perhitungan nilai curah hujan yang terjadi di sepanjang lintasan sinyal satelit dapat dilakukan dengan menghitung nilai atenuasi yang disebabkan oleh hujan yang kemudian nilai atenuasi tersebut dihitung dengan menggunakan persamaan hubungan antara nilai atenuasi hujan dengan curah hujan.

1.2 Model Geometri Link Satelit Melalui Troposfer

Penggambaran model geometri pada arah downlink, dari satelit ke ground station dapat digambarkan seperti gambar di bawah ini.



Gambar 1. Model Geometri Link Satelit 2 Lapisan untuk Hujan Stratiform

Model 2 lapisan di atas terdiri dari Ice Particle Layer (IPL) dan Liquid Layer (LL) [3]. IPL merupakan lapisan yang terbuat dari banyak partikel kering berwujud es. Lapisan ini menyebabkan atenuasi (scattering cross sections) yang kecil untuk sinyal, sehingga dapat diabaikan. LL memiliki karakteristik banyak zat cair (hujan) yang disebabkan dari cairnya lapisan di atasnya. Sepanjang lintasan sinyal di lapisan LL, atau disebut dengan wet path, adalah arah tembakkan sinyal dari ground station ke satelit yang memiliki banyak kandungan zat cair, sehingga mengakibatkan atenuasi sinyal yang besar. h_r adalah ketinggian saat hujan pertama kali terbentuk atau perbatasan antara lapisan IPL dan LL. Nilai h_r diasumsikan sama dengan ketinggian 0°C isotherm (h_0). Jika satelit yang digunakan tipe GEO, sudut yang ada akan selalu bernilai tetap dan wet path juga memiliki arah yang sama. Panjang wet path berpengaruh dengan ketinggian GS (Ground Station) di atas permukaan laut h_s dan sudut θ (sudut elevasi). Oleh karena itu, pengukuran atenuasi hujan yang dialami sebanding dengan integral matrik hujan di sepanjang wet segment dengan asumsi luasan hujan di sepanjang wet path sama besar.

1.3 Perhitungan Sinyal Atenuasi

Sinyal yang diterima oleh receiver telah mengalami peningkatan (gain), atenuasi dari beberapa faktor, dan sinyal derau

(noise) [10]. Daya sinyal yang diterima dapat dirumuskan

$$P_r = P_t(t) G \eta_A \eta_F \eta_R + P_n(t) \dots (1)$$

P_t adalah daya yang ditransmisikan oleh satelit, P_r merupakan daya yang diterima receiver, G merupakan nilai antenna gain, P_n adalah besar daya derau dari sinyal, η_A merupakan nilai koefisien atenuasi non-rainy di atmosfer. η_f dan η_R mewakili nilai koefisien atenuasi pada ruang hampa dan rainfall regions.

SNR (Signal to Noise Ratio) merupakan perbandingan antara kekuatan sinyal yang diterima dengan kekuatan sinyal derau. Persamaan SNR dalam dB (decibels) adalah

$$\text{SNR}(t) = 10 \log \frac{P_t(t) G \eta_A \eta_F \eta_R}{P_n(t)} \dots (2)$$

Beberapa receiver memiliki kemampuan untuk menghitung nilai SNR secara otomatis [3]. Atenuasi yang disebabkan oleh hujan dapat dideskripsikan sebagai

$$A_R(t) = -10 \log(\eta_R) \dots (3)$$

Atenuasi di dalam ruang hampa (free space) memiliki persamaan

$$A_F(t) = -10 \log(\eta_F) \dots (4)$$

Nilai SNR yang baru dengan mensubstitusi persamaan (3) dan (4) ke dalam persamaan (2) menjadi

$$\text{SNR}(t) = 10 \log \frac{P_t(t) G \eta_A}{P_n(t)} - A_R(t) - A_F(t) \dots (5)$$

Ketika hujan tidak terjadi atau dalam keadaan kering, maka nilai SNR menjadi

$$\text{SNR}(t) = 10 \log \frac{P_t(t) G \eta_A}{P_n(t)} - A_F(t) \dots (6)$$

Persamaan (6) dapat dijelaskan lebih lanjut. Noise power $P_n(t)$ berasal dari pengaruh di dalam sistem dan dari langit (sky noise). Persamaan $P_n(t)$ adalah

$$P_n(t) = k_B \cdot B \cdot T_{\text{sys}}(t) \cdot \frac{(T_{\text{sys}}(t) + T_{\text{sky}}(t))}{T_{\text{sys}}(t)} \dots (7)$$

Dimana nilai $P_0(t)$, $F_n(t)$, $V(t)$ dapat didefinisikan sebagai

DOI:

$$P_0(t) = k_B \cdot B \cdot T_{sys}(t), \dots\dots\dots$$

$$F_n(t) = 10 \log \frac{(T_{sys}(t) + T_{sky}(t))}{T_{sys}(t)}, \dots\dots\dots(8)$$

$$V(t) = 10 \log \frac{P_t(t) G \eta_A}{P_0(t)}, \dots\dots\dots$$

Kemudian nilai SNR pada persamaan (5) dengan mensubstitusi 3 persamaan pada persamaan (8) dapat ditulis menjadi

$$SNR(t) = V(t) - F_n(t) - A_R(t) - A_F(t) \dots\dots\dots(9)$$

nilai $A_R(t)$ pada persamaan (9) yang merupakan nilai atenuasi yang disebabkan oleh hujan merupakan parameter yang dibutuhkan untuk menghitung nilai curah hujan. $A_R(t)$ ini dapat dicari dengan menggunakan persamaan

$$A_R(t) = SNR_{refer} - SNR \dots\dots\dots(10)$$

Nilai SNR_{refer} merupakan nilai SNR yang tidak terpengaruh oleh atenuasi hujan. SNR_{refer} dapat menjadi baseline (nilai acuan), sehingga nilai $A_R(t)$ dapat diketahui dengan melakukan pengurangan antara nilai SNR saat hujan dengan SNR_{refer} atau baseline. Diperlukan metode yang tepat untuk menentukan nilai SNR_{refer} agar perhitungan nilai $A_R(t)$ dapat menghasilkan nilai atenuasi yang benar.

NEFOCAST project menggunakan nilai SNR terakhir sebelum hujan untuk menjadi nilai SNR_{refer} [4]. Nilai SNR sebelum hujan merupakan nilai yang paling mencerminkan nilai SNR atau baseline yang dapat digunakan saat hujan sedang terjadi.

1.4 Perhitungan Estimasi Curah Hujan

Dalam beberapa penelitian sebelumnya milik Zhao, Liu, Xian, & Gao [10]; Giro, Luini, & Riva [5]; dan Barthes & Mallet [1], persamaan power law ITU-R P.618 [7] digunakan untuk menemukan nilai intensitas curah hujan dari nilai atenuasi hujan. Persamaannya adalah

$$k = \alpha R^\beta \text{ (dB/km)} \dots\dots\dots(11)$$

Nilai k adalah faktor atenuasi, α dan β

merupakan koefisien yang bergantung pada frekuensi, polarisasi sinyal, dan parameter lainnya. ITU-R P.838-3 [6] memberikan petunjuk untuk nilai koefisien yang digunakan. Selanjutnya jika A_R telah diketahui, nilai k dapat ditentukan dengan persamaan

$$k = \frac{A_R}{L_s} \dots\dots\dots(12)$$

Nilai L_s merupakan panjang lintasan basah (wet path) atau LL. Nilai L_s dapat dicari dengan persamaan

$$L_s = \frac{(h_R - h_S)}{\sin \theta} \text{ km} \quad \text{Untuk } \theta \geq 5^\circ \dots\dots\dots(13)$$

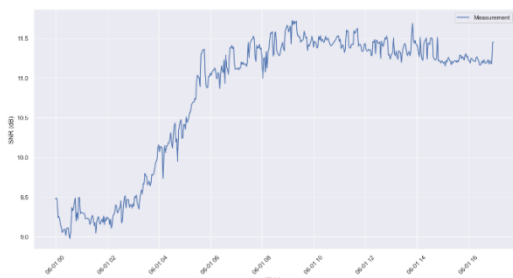
$$L_s = \frac{2(h_R - h_S)}{\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_S)}{R_e} + \sin \theta} \quad \text{Untuk } \theta < 5^\circ \text{ km} \dots\dots\dots(14)$$

R_e merupakan nilai radius bumi sebesar 8500 km, θ , h_R , dan h_S merupakan variabel yang sama seperti gambar 1. model geometri link satelit 2 lapisan. Substitusi persamaan (12) ke (11), kemudian persamaan (13) disubstitusi ke persamaan tersebut sehingga nilai intensitas hujan dapat ditentukan dengan persamaan

$$R = \left[\frac{A_R \sin \theta}{(h_S + 0.36)\alpha} \right]^{\beta^{-1}} \dots\dots\dots(15)$$

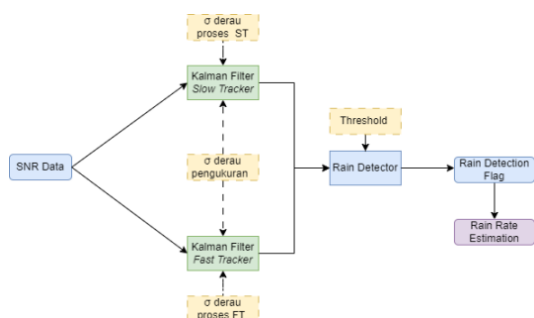
1.5 Deteksi Keadaan Hujan Dengan SNR

Tanggal 1 Juni 2023 adalah hari tanpa hujan, tetapi nilai amplitudo SNR mengalami fluktuasi yang disebabkan oleh gangguan dari lingkungannya. Fluktuasi amplitudo SNR menyebabkan penentuan apakah hujan sedang terjadi atau tidak serta penentuan nilai SNR refer mengalami kesulitan. Beberapa faktor utama yang menyebabkan gangguan tersebut, antara lain scintillation fading, orbit perturbations, long-term signal fluctuations, sun transit, dan perubahan nilai gain pada transponder [7].



Gambar 2. Grafik SNR Tanggal 1 Juni 2023

Pada Gambar 2 menampilkan grafik satu perbedaan signifikan antara fluktuasi amplitudo SNR yang disebabkan oleh hujan dengan yang bukan disebabkan oleh hujan, yaitu perubahan nilai SNR yang disebabkan oleh hujan bersifat jauh lebih cepat jika dibandingkan dengan gangguan yang lain. Karakteristik tersebut dapat dimanfaatkan untuk deteksi hujan. Gianneti, Moretti, & Reggiannini pada proyek NEFOCAST membuat sebuah metode dengan menggunakan dua KF (Kalman Filter) yang masing-masing akan berfungsi sebagai ST (Slow Tracker) dan FT (Fast Tracker). Kedua filter tersebut akan berjalan secara paralel dengan nilai SNR. ST akan bersifat lambat dalam merespon nilai perubahan SNR (insensitif). FT bersifat cepat dalam merespon nilai perubahan SNR, sehingga FT dapat secara akurat mengikuti pergerakan nilai SNR saat hujan terjadi dan dapat menghapus gangguan yang disebabkan oleh scintillation.



Gambar 3. Cara Kerja Perhitungan Estimasi Curah Hujan dengan Menggunakan Dua Kalman Filter

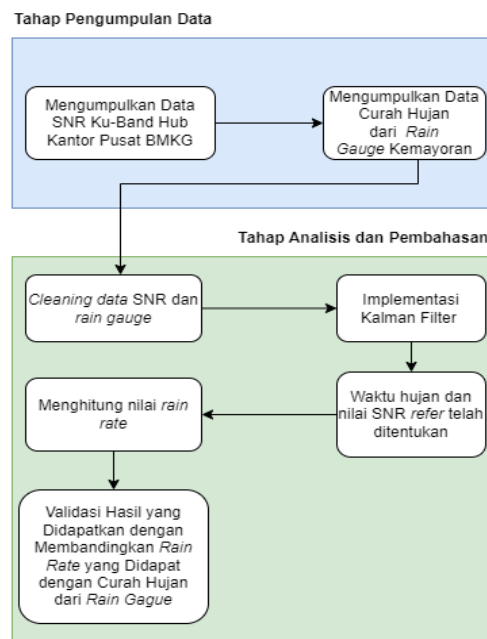
Data SNR yang didapat dari VSAT akan menjadi inputan bagi dua filter, ST dan FT. ST dan FT memiliki dua parameter, standar deviasi pengukuran dan standar

deviasi proses. ST dan FT akan bergerak bersama-sama secara paralel dengan data SNR. Perubahan nilai SNR yang besar secara tiba-tiba akan menyebabkan pertambahan selisih antara nilai ST dan FT. Ketika selisih nilai ST dan FT melebihi threshold yang telah ditentukan, rain detector akan memberikan tanda atau flag bahwa hujan terjadi. Saat terdapat flag, perhitungan rain rate akan terjadi secara otomatis selama flag masih ada. Saat nilai FT telah mendekati nilai ST dan selisih antara kedua nilai tersebut dibawah threshold yang telah ditentukan sebelumnya, maka flag akan dicabut, sehingga hal tersebut menandakan hujan telah berhenti.

2. Metodologi

2.1 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian memberikan penjelasan tahapan-tahapan yang akan dilakukan selama penelitian berlangsung.



Gambar 4. Tahapan Penelitian

Tahap pengumpulan data adalah tahapan awal yang dilakukan dalam penelitian ini. Tahapan ini berlangsung menjadi dua tahapan kecil, antara lain tahapan untuk mengumpulkan data SNR Ku-Band Hub kantor pusat BMKG dan data curah hujan rain gauge di Kemayoran (dekat dengan Hub kantor

DOI:

pusat BMKG). Tahap analisis dan pembahasan adalah tahapan pengolahan data sinyal SNR dengan menggunakan dua kalman filter yang berfungsi sebagai ST dan FT untuk mendeteksi hujan. Setelah hujan terdeteksi nilai SNR refer dapat ditentukan yang kemudian menghitung estimasi nilai rain rate. Hasil perhitungan estimasi rain rate divalidasi dengan nilai rain gauge Kemayoran.



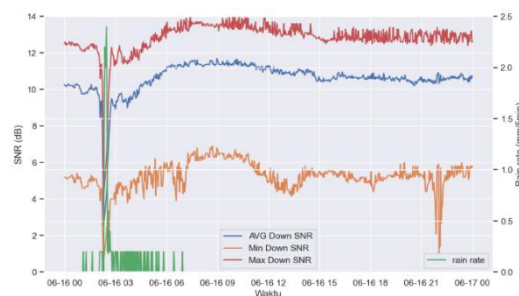
Gambar 5. Lokasi Hub Ku-Band dan ARG

SNR yang digunakan pada pelatihan ini adalah nilai rata-rata down SNR dari sebuah VSAT Ku-Band yang berlokasi di Kota Jakarta Pusat dengan koordinat 6.156 LS, 106.841 BT. Elevasi VSAT tersebut sebesar 80 derajat. Di dekat lokasi VSAT tersebut terdapat sebuah ARG (Automatic Rain Gauge) bertipe tipping bucket dengan koordinat 6.155 LS, 106.842 LS. ARG tersebut berfungsi untuk memvalidasi nilai perhitungan estimasi rain rate yang didapat dari SNR. ARG tersebut juga dapat dipilih karena luas area yang dapat dicakup oleh sebuah rain gauge adalah antara 250 m2 sampai dengan 3000 m2 [8].

Data SNR dan data intensitas curah hujan ARG yang digunakan adalah data dari 1 Juli 2023 hingga 31 Juli 2023. Pada selang waktu tersebut terjadi beberapa hari yang mengalami hujan. Data yang telah diperoleh akan di-cleaning untuk memastikan semua data yang didapat memiliki konsistensi yang baik untuk mempermudah pengolahan data selanjutnya.

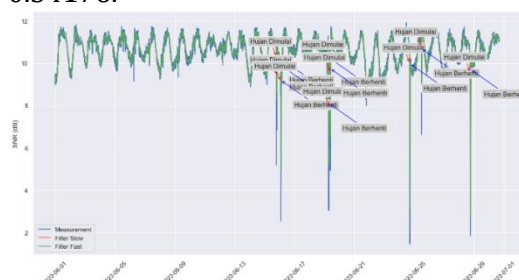
2.2 Implementasi ST dan FT Kalman Filter

ST dan FT merupakan Kalman filter berjenis one dimensional, hanya menggunakan satu variabel, yaitu variabel SNR.



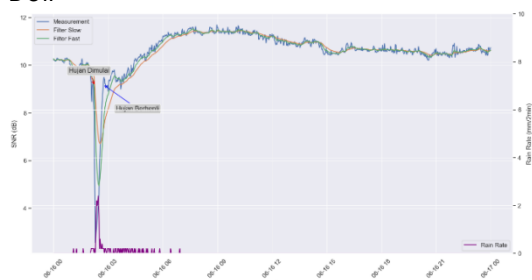
Gambar 6. Grafik Nilai SNR dan Rain Rate 19 Juli 2023

Grafik di atas menggambarkan hubungan antara nilai SNR dengan rain rate. Saat nilai rain rate tinggi, nilai SNR mengalami penurunan yang signifikan. Pada dua grafik di atas, saat nilai rain rate tinggi, ketiga nilai SNR, nilai rata-rata SNR (biru), nilai minimum SNR (jingga), dan nilai maksimal SNR (merah) menjadi jatuh. Nilai koefisien korelasi yang didapat antara nilai SNR dengan nilai rain rate pada tanggal 19 Juli 2023 adalah -0.54176.



Gambar 7. Grafik Nilai SNR 1 Disertai dengan ST dan FT 1 Juli 2023 – 31 Juli 2023

Grafik di atas adalah grafik rata-rata down SNR selama satu bulan (1 Juli 2023 – 30 Juli 2023) dengan dua kalman filter, FT (Fast Tracker) dan ST (Slow Tracker). Metode yang digunakan untuk mendeteksi hujan berhasil mendeteksi hujan yang terjadi di tanggal 15, 16, 19, 24, dan 28 Juni 2023, seperti yang ditunjukkan pada gambar. Nilai selisih threshold antara FT dan ST yang digunakan adalah 0.55. Pemilihan nilai threshold sangat memengaruhi kualitas deteksi hujan, jika threshold terlalu kecil dapat menyebabkan false detection dan jika terlalu besar hujan yang terjadi tidak terdeteksi.



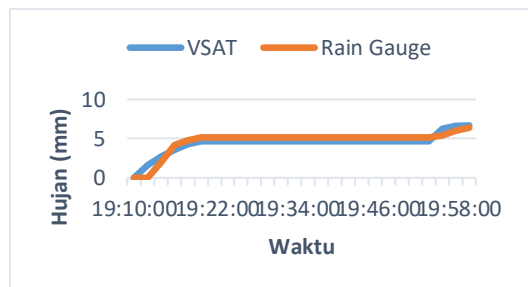
Gambar 8. Grafik SNR, ST, FT, dan RR 16 Juni 2023

Grafik di atas adalah grafik SNR, ST, FT, dan rain rate ARG pada tanggal 16 Juni 2023. Nilai SNR terlihat jatuh ketika nilai rain rate melebihi 0.2 mm/2 menit atau 15mm/jam. Saat nilai SNR jatuh, kalman filter dapat mendeteksi hujan tersebut dikarenakan selisih antara ST dan FT lebih besar dari pada nilai threshold yang ditetapkan, sehingga sistem mendeteksi bahwa hujan telah terjadi. Sistem kemudian akan menandai bahwa hujan telah dimulai. Selama sistem menandai bahwa kondisi sedang hujan, sistem akan menghitung estimasi rain rate yang terjadi saat itu. Tanda hujan akan diakhiri jika nilai SNR telah kembali ke nilai ST saat hujan baru dimulai dan perhitungan estimasi rain rate juga berakhir.

2.3 Analisis Hasil Perhitungan *Rain Rate*

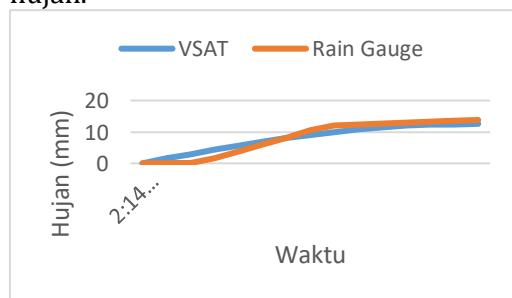
Pengujian hasil pengukuran estimasi rain rate dilakukan dengan membandingkan nilai akumulasi hujan ketika VSAT mendeteksi hujan terjadi dengan nilai pada ARG. Data yang digunakan untuk perbandingan adalah data tanggal 15, 16, 19, 24, dan 28 Juni 2023. Pemilihan waktu tersebut dipilih karena nilai akumulasi hujan pada hari tersebut di atas 2,5 mm seperti yang terlihat pada Gambar 8.

Sinyal SNR yang digunakan adalah sinyal average down dengan polarisasi horizontal yang memiliki periode perekaman 2 menit sekali. Sinyal SNR tersebut dipancarkan dengan frekuensi 14 GHz, sudut elevasi sebesar 80 derajat, dan ketinggian awan isothermis setinggi 2.1 km. Nilai alfa dan beta pada persamaan 15 dicari dengan mengikuti petunjuk pada ITU-R P.838-3 ($\alpha=0.03738$, $\beta=1.1396$).



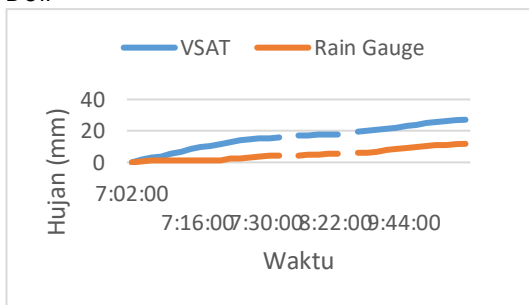
Gambar 9. Grafik Akumulasi Curah Hujan 15 Juni 2023

Gambar 9 menampilkan grafik perbandingan akumulasi curah hujan di tanggal 15 Juni 2023 pukul 19.10 UTC – 20:00 UTC. Perbandingan tersebut merupakan perbandingan antara perhitungan estimasi curah hujan dari SNR VSAT dengan pengukuran dari rain gauge. Grafik biru merupakan perhitungan estimasi curah hujan dari SNR VSAT dan garis oranye merupakan perhitungan dari rain gauge. Kedua grafik mengalami penambahan volume dari pukul 19:10 UTC hingga 19:20 UTC, lalu tidak mengalami penambahan untuk kedua grafik hingga pukul 19:54 UTC. 19:54 UTC sampai 20:00 UTC kedua grafik mengalami kenaikan volume air hujan.



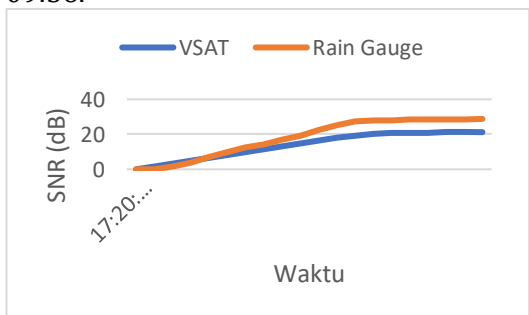
Gambar 10. Grafik Akumulasi Curah Hujan 16 Juni 2023

Gambar 10 merupakan grafik perbandingan akumulasi curah hujan antara hasil perhitungan SNR VSAT dengan pengukuran dari rain gauge. Pukul 2:14 UTC, SNR VSAT menghitung penambahan volume air hujan, sedangkan rain gauge baru mengalami penambahan volume air hujan di pukul 02:18 UTC. Untuk selanjutnya kedua grafik sama-sama mengalami kenaikan volume.



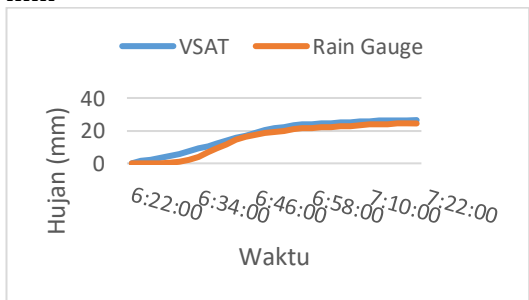
Gambar 11. Grafik Akumulasi Curah Hujan 19 Juni 2023

Pada Gambar 11 grafik biru dan jingga mengalami kenaikan akumulasi volume air hujan. Terdapat dua celah putus di kedua grafik. Celah putus tersebut merupakan waktu ketika hujan tidak terjadi. Hal ini diperlukan untuk memperkecil grafik yang ada. Hujan terjadi antara pukul 07:02 hingga 07:32 lalu 08:14 sampai 08:22 dan 09:34 hingga 09:56.



Gambar 12. Grafik Akumulasi Curah Hujan 24 Juni 2023

Pada Gambar 12 Hub mendeteksi bahwa hujan mulai terjadi di pukul 17:20 hingga 17:58 sedangkan rain gauge mengalami kenaikan volume hujan. Volume akumulasi hujan pada VSAT di akhir hujan 21.2 mm dan rain gauge 28.8 mm



Gambar 13. Grafik Akumulasi Curah Hujan 28 Juni 2023

Gambar 13 terlihat bahwa grafik SNR

VSAT mengalami penambahan jumlah volume terlebih dahulu dibandingkan rain gauge. Akumulasi volume air hujan rain gauge baru bertambah di pukul 06:32 UTC. Selanjutnya sepanjang waktu grafik tersebut, kedua grafik mulai mengalami kenaikan volume.

Tabel 1. Tabel Perhitungan Koefisien Korelasi dan RMSE Tiap Grafik

Tanggal	Koefisien Korelasi	RMSE (mm)
15 Juni 2023 (Gambar 10)	0.894	0.623
16 Juni 2023 (Gambar 11)	0.989	1.603
19 Juni 2023 (Gambar 12)	0.947	11.391
24 Juni 2023 (Gambar 13)	0.999	5.684
28 Juni 2023 (Gambar 14)	0.995	2.789
Rata-rata	0.9648	4.418

Koefisien korelasi pada Tabel 1 adalah hasil perhitungan koefisien korelasi akumulasi volume hujan hasil estimasi curah hujan SNR dan pengukuran dari rain gauge. RMSE pada tabel di atas memperhitungkan nilai RMSE dari selisih nilai estimasi curah hujan SNR dengan pengukuran dari rain gauge. Nilai rata-rata koefisien korelasi semua kejadian sebesar 0.969 dan nilai rata-rata RMSE-nya adalah 3.682 mm. Nilai koefisien korelasi terbaik terjadi pada kejadian hujan 24 Juni 2023, yang memiliki nilai 0.999 yang berarti memiliki korelasi yang positif. Nilai RMSE tertinggi terjadi pada hujan di tanggal 19 Juni 2023 yang bernilai 11.391 mm.

Pada tanggal 19 Juni 2023 hujan yang terjadi berdurasi cukup panjang dan terjadi beberapa kali. Hal ini menyebabkan nilai RMSE pada hari itu relatif lebih besar dibandingkan dengan hari yang lain yaitu sebesar 11.39053. Nilai RMSE yang besar ini disebabkan oleh durasi hujan yang panjang dan hujan yang terjadi beberapa kali dalam waktu yang relatif berdekatan serta hujan kecil (0.2mm/2menit) yang tidak terdeteksi.

3. Penutup

3.1 Kesimpulan

Metode perhitungan estimasi rain rate dengan menggunakan SNR dan dua kalman filter (ST dan FT) dalam penelitian memiliki beberapa kesimpulan, antara lain:

1. Metode dua kalman filter (ST dan FT) memiliki kemampuan yang baik untuk mendeteksi hujan dengan rain rate yang harus lebih besar dari 0.2 mm / 2 menit. Jika hujan yang terjadi di bawah 0.2 mm / 2 menit, filter tidak dapat mendeteksi hujan tersebut karena nilai daya SNR tidak terdampak secara signifikan.
2. Nilai RMSE terbesar pada table 1 terjadi pada tanggal 19 Juni 2023 disebabkan salah satu faktor adalah durasi hujan yang lebih lama dibandingkan dengan hari yang lain, semakin lama durasi hujan semakin besar juga nilai RMSE.
3. Selama Bulan Juni 2023 terdapat 5 hari hujan yang terjadi yaitu pada tanggal 15,16,19,24 dan 28 perhitungan estimasi hujan dengan menggunakan metode penelitian ini memiliki rata-rata koefisien korelasi sebesar 0.9648 dan RMSE sebesar 4,418 mm.

3.2 Referensi

Barthes, L., & Mallet, C. (2013). Rainfall measurement from the opportunistic. Atmospheric Measurements Techniques, 2181-2193.

Gharanjik, A., M. R., B. S., Zimmer, F., & Ottersen, B. (2018). Centralized Rainfall Estimation Using Carrier-to-Noise of Satellite Communication Links. IEEE Journal on Selected Areas in Communications.

Gianetti, F., & Reggiannini, R. (2021). Opportunistic Rain Rate Estimation from Measurements of Satellite Downlink Attenuation: A Survey.

Giannetti, F., Moretti, M., & Reggiannini, R. (2019). The NEFOCAST System for Detection and Estimation. IEEE

A&E SYSTEMS MAGAZINE, 16-27.

Giro, R., Luini, L., & Riva, C. (2020). Rainfall Estimation from Tropospheric Attenuation Affecting Satellite Links. Information.

ITU-R. (2005). Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods. RECOMMENDATION ITU-R P.838-3.

ITU-R. (2017). Recommendation ITU-R P.618-13 Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Earth-Space Telecommunication Systems. Geneva: Electronic Publication.

Kidd, C., Becker, A., Huffman, G., Muller, C., Joe, P., Skofronick-Jackson, G., & Kirschbaum, D. (2017). So, how much of the Earth's surface is covered by rain gauges? . Bull Am Meteorol Soc.

Mugnai, C., Cuccoli, F., & Sermi, F. (2014). Rainfall Estimation with a Commercial Tool for Satellite Internet in Ka Band: Concept and Preliminary Data Analysis. SPIE - The International Society for Optical Engineering.

Zhao, Y., Liu, X., Xian, M., & Gao, T. (2021). Statistical Study of Rainfall Inversion Using the Earth-Space Link at the Ku Band: Optimization and Validation for 1 Year of Data. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 9486-949

Kidd, C., Becker, A., Huffman, G., Muller, C., Joe, P., Skofronick-Jackson, G., & Kirschbaum, D. (2017). So, how much of the Earth's surface is covered by rain gauges? . Bull Am Meteorol Soc.

Song, K., Liu, X., & Gao, T. (2021). Real-

DOI:

Time Rainfall Estimation Using Microwave Links: A Case Study in East China during Plum Rain Season in 2021. *Sensors* 2021, 21.

Zhao, Y., Liu, X., Pu, K., & Ye. (2022). Research on the Method of Rainfall Field Retrieval Based on the Combination of Earth-Space Links and Horizontal Microwave Links. *Remote Sens.*

Arslan, C., Aydin, K., Urbina, J., & Dyrud, L. (2014). Rainfall measurements using satellite downlink attenuation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 4111–4114.

Dennis, R. (1996). *Satellite Communications*. USA: Mc.Graw Hill Company Inc.

Ghozali, I. (2018). *Aplikasi Analisis Multivariate dengan Program IBM SPSS*. Semarang: adan Penerbit Universitas Diponegoro.

James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An introduction to statistical learning: with applications in R*. New York: Springer

Khodarahmi, M., & Maihami, V. (2023). A Review on Kalman Filter Models. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 727-747.

Maral, G. (2003). *VSAT Networks*. Jhon Wiley & Sons Ltd.

Wasserman, L. (2005). *All of Statistics: a concise course in statistical inference*. In Springer, Springer Texts in Statistics.