



Research Articles

Analisis Lintas Lapisan Energi Transmisi Pada Domain Radio Frekuensi Terhadap Pengaruh Hujan

Cross-Layer Analysis Of Transmission Energy In The Radio Frequency Domain On The Influence Of Rain

Made Sutha Yadnya*, I Ketut Perdana Putra

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Mataram, Mataram, Indonesia

**corresponding author, email : msyadnya@unram.ac.id*

Manuscript received: 15-01-2026. Accepted: 26-03-2026

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis pengaruh curah hujan terhadap transmisi energi pada domain radio frekuensi di Kota Mataram, khususnya pada sistem komunikasi nirkabel berbasis 2,4 GHz hingga 30 GHz dan skenario 5G mmWave. Metode penelitian menggunakan pendekatan analisis link budget yang mengintegrasikan model redaman hujan ITU-R P.838 dan simulasi performa kanal berdasarkan parameter RSSI, SINR, serta energi transmisi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa curah hujan di wilayah studi didominasi kategori ringan dengan karakteristik stratiform, namun tetap memberikan kontribusi terhadap penurunan kualitas sinyal. Peningkatan intensitas hujan menyebabkan penurunan RSSI dan SINR serta menurunkan efisiensi energi transmisi secara signifikan. Dampak redaman semakin besar pada frekuensi tinggi, di mana sistem pada 2,4 GHz relatif stabil, sedangkan frekuensi di atas 10 GHz mengalami degradasi performa yang lebih tinggi, dan mmWave menunjukkan risiko outage paling signifikan. Temuan ini menegaskan bahwa kondisi hujan di wilayah tropis memiliki pengaruh langsung terhadap performa sistem komunikasi radio frekuensi. Oleh karena itu, diperlukan strategi mitigasi berbasis desain sistem adaptif untuk menjaga keandalan jaringan, khususnya pada implementasi teknologi 5G.

Kata kunci: adio frekuensi, redaman hujan, RSSI, SINR, 5G mmWave, ITU-R P.838

ABSTRACT

This study analyzes the effect of rainfall on transmission energy in the radio frequency domain in Mataram City, focusing on wireless communication systems operating at 2.4 GHz to 30 GHz and 5G mmWave scenarios. The research employs a link budget-based analytical approach integrating the ITU-R P.838 rain attenuation model and channel performance simulation using RSSI, SINR, and transmission energy parameters. The results indicate that rainfall in the study area is predominantly light with stratiform characteristics; however, it still contributes to a measurable degradation in signal quality. Increasing rainfall intensity leads to a reduction in RSSI and SINR values and decreases transmission energy efficiency. The impact becomes more significant at higher frequencies, where 2.4 GHz systems remain relatively stable, while frequencies above 10 GHz exhibit notable performance degradation, and mmWave systems show the highest risk of outage. These findings confirm that tropical rainfall conditions directly affect radio frequency communication performance. Therefore, adaptive system design and mitigation strategies are required to maintain network reliability, particularly for 5G implementations.

Keywords: radio frequency, rain attenuation, RSSI, SINR, 5G mmWave, ITU-R P.838

PENDAHULUAN

Cuaca merupakan pengamatan pada kondisi udara dalam waktu singkat dan pada wilayah yang terbatas (Luthfiarta et al., 2020). Menurut *World Climate Conference* cuaca merupakan keadaan atmosfer yang dikur meliputi perubahan, perkembangan atau hilangnya fenomena udara. Parameter cuaca sendiri terdiri dari suhu, kelembapan, tekanan udara, angin, curah hujan, *visibility*, penyinaran matahari, dan awan (Azhari et al., 2016). Curah hujan disebut juga jatuhnya hujan *hydrometeor* berupa partikel-partikel air dengan diameter lebih dari 0,5 mm dan sampai ke permukaan bumi. Hujan terbentuk akibat proses kondensasi pada awan, saat telah mencapai titik jenuhnya, partikel air akan jatuh ke permukaan bumi. Jumlah curah hujan dinyatakan dalam satuan milimeter (mm) yang diukur dalam kurun waktu satu jam, sehingga menjadi mm/h, korelasi antara hujan dengan intensitas curah hujan dapat dilihat dalam Table 1. Hujan dalam kondisi rata-rata per hari yang tidak hujan secara kontinyu distandarisasi yang digunakan untuk BMKG alat ukur digunakan menggunakan manual gelas ukur ataupun yang otomatis seperti rain gauge. Untuk pembagian jenis curah hujan dapat dibagi dua secara garis besar yaitu curah hujan di bawah 20 mm/h digolongkan stratiform dan di atas 20 mm/h digolongkan dengan convektif (Capsoni et al., 2006).

Tabel 1. Interpretasi Curah Hujan.

Kriteria hujan	Intensitas	Referensi
Hujan ringan	1,0-5,0 mm/jam atau 5-20 mm/hari.	(BMKG, 2020)
Hujan sedang	5,0-10 mm/jam atau 20-50 mm/hari.	
Hujan lebat	10-20 mm/jam atau 50-100 mm/hari.	
Hujan sangat lebat	>20 mm/jam atau >100 mm/hari.	

Hubungan dengan hujan dapat dikorelasi langsung dengan redaman hujan secara spesifik dapat dilihat dari Tabel 2 dengan kualitas jaringan telekomunikasi bergerak, dengan hubungan terbalik, apabila curah hujan drmaksin tinggi maka kualitas semakin menurun.

Tabel 2 Standar Kualitas Layanan Pada Kondisi Hujan

Parameter RF	Kondisi Tanpa Hujan	Hujan Ringan (R < 5 mm/jam)	Hujan Sedang (5–25 mm/jam)	Hujan Lebat (> 25 mm/jam)	Dampak Utama
Path Loss (dB)	Rendah	Sedikit meningkat	Meningkat signifikan	Sangat tinggi	Pelemahan sinyal
Rain Attenuation (dB/km)	≈ 0	0.1 – 1	1 – 5	> 5	Redaman tambahan
RSSI (dBm)	Stabil/tinggi	Sedikit turun	Turun signifikan	Sangat rendah	Sinyal melemah
SINR (dB)	Tinggi	Sedikit menurun	Menurun tajam	Sangat rendah	Kualitas link menurun
BER (Bit Error Rate)	Sangat kecil	Sedikit naik	Meningkat	Sangat tinggi	Error meningkat
Throughput (Mbps)	Maksimum	Sedikit turun	Turun signifikan	Sangat rendah	Kapasitas turun
Frekuensi < 10 GHz	Hampir tidak terpengaruh	Dampak kecil	Dampak sedang	Mulai terasa	Lebih tahan hujan

Parameter RF	Kondisi Tanpa Hujan	Hujan Ringan (R < 5 mm/jam)	Hujan Sedang (5–25 mm/jam)	Hujan Lebat (> 25 mm/jam)	Dampak Utama
Frekuensi 10–30 GHz	Normal	Mulai terpengaruh	Signifikan	Sangat signifikan	Sensitif hujan
Frekuensi > 30 GHz (mmWave)	Stabil (clear sky)	Terpengaruh nyata	Degradasi berat	Link bisa putus	Sangat rentan
Link Availability (%)	> 99%	Sedikit turun	Menurun	Bisa < 95%	Keandalan turun

Penelitian yang memfokuskan untuk memnahas tentang curah hujan konversi redaman hujan untuk di Universitas Mataaram sudah dilaksanakan dalam 10 tahun terakhir yang sudah dipublikasikan dengan fokus yang berbeda. Untuk membahas pemodelan stokastik curah hujan untuk kanal komunikasi wireless dengan pendekatan distribusi lognormal dan autokorelasi hujan. Penelitian ini relevan untuk analisis redaman hujan pada komunikasi radio (Yadnya et al, 2014). Fokus pada model matematis kanal komunikasi yang dipengaruhi hujan pada komunikasi gelombang milimeter. Penelitian menggunakan data rain gauge untuk memodelkan fading dan perubahan polarisasi akibat hujan serta membahas pembangkitan fading hujan untuk sistem komunikasi LMDS pada frekuensi 30 GHz dengan model distribusi lognormal model redaman hujan berbasis distribusi ukuran tetes hujan untuk kanal komunikasi gelombang milimeter (Yadnya et al, 2017). Kemudian untuk membahas performa femtocell 4G outdoor pada kondisi hujan di Mataram (Yadnya et al, 2018). Pada pemilihan kanal kondisi hujan dengan perbandingan kuat dinyal penerima pada jaringan 5G Frekuensi 2.3 GHz (Yadnya et al. 2023). Untuk trasnmisi Wi-Fi yang harus dijaga dalam menentukan redaman hujan dengan kontrol penurunan daya sinyal akinat peningkatan attenuation, penurunan SINR serta meningkatnya packet loss. (Gita et al, 2026)

BAHAN DAN METODE

Kondisi lokasi ini dipilih karena karakteristik geografisnya yang dari perhitungan rata-rata posisi hujan yang kurang dari 5 mm/h, dengan Tempat Pengambilan Data daerah Kota Mataram. Penggunaan desain dan variabel penelitian pada sistem komunikasi RF, sinyal informasi dimodulasi ke dalam gelombang pembawa (carrier) dengan frekuensi tertentu agar dapat ditransmisikan secara efisien melalui antena. Proses ini melibatkan beberapa komponen utama, yaitu pemancar (transmitter), saluran propagasi (channel), dan penerima (receiver).

Karakteristik utama dalam domain RF sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, seperti jarak, hambatan fisik, serta fenomena atmosfer. Salah satu faktor penting yang memengaruhi performa sistem RF adalah redaman (attenuation), termasuk redaman akibat hujan (rain attenuation), terutama pada frekuensi tinggi seperti gelombang mikro dan milimeter

RF menjadi dasar penting dalam analisis dan perancangan sistem komunikasi nirkabel, terutama dalam memahami bagaimana sinyal dipengaruhi oleh kondisi kanal dan lingkungan propagasi. Domain Radio Frequency (RF) merupakan bagian dari sistem komunikasi nirkabel yang berhubungan dengan propagasi gelombang elektromagnetik pada rentang frekuensi radio, yaitu sekitar 3 kHz hingga 300 GHz. Dalam konteks komunikasi radio, domain RF mencakup

proses pemancaran, perambatan, dan penerimaan sinyal melalui media udara. Parameter kualitas sinyal dalam domain RF umumnya diukur menggunakan parameter seperti (Brost et al, 2017) :

Received Signal Strength Indicator (RSSI)

Untuk persamaan mendapatkan perhitungan RSSI dengan menggunakan kondisi cerah (clear sky dengan pada komdisi hujan :

$$RSSI_{clear} = Pt + Gt + Gr - Lp_{clear};$$

$$RSSI_{rain} = RSSI_{clear} - A_{rain};$$

Tabel 3. Kualitas Daya Terima RSSI

RSSI (dBm)	Kualitas Sinyal
-30	Sangat kuat
-50	Sangat baik
-60	Baik
-70	Cukup
-80	Lemah
-90	Sangat lemah
< -100	Hampir tidak ada sinyal

Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR)

Tabel 4. Kualitas Daya Terima RSSI

Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR)	Kualitas Sinyal	Keterangan
> 20 dB	Sangat Baik	Ideal untuk throughput tinggi
13 – 20 dB	Baik	Koneksi stabil
0 – 13 dB	Cukup	Mulai terjadi penurunan performa
< 0 dB	Buruk	Koneksi tidak stabil / drop

Untuk menentukan layanan atau pengukuran QoS perlu diperhitungan Reference Signal Received Power (RSRP) dan Reference Signal Received Quality (RSRQ). Parameter-parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi performa jaringan komunikasi, khususnya pada sistem seluler modern seperti 4G dan 5G. Dengan demikian, teori domain RF menjadi dasar penting dalam analisis dan perancangan sistem komunikasi nirkabel.

Model Dasar ITU-R P.838 :

Redaman hujan mengikuti model empiris seperti:

$$\gamma_R = k \cdot R^\alpha$$

di mana:

- γ_R = redaman spesifik (dB/km)
- R = intensitas hujan (mm/jam)
- k, α = konstanta bergantung frekuensi & polarisasi.

Koefisien k dan α

Nilai k dan α diperoleh dari tabel atau fitting empiris ITU-R berdasarkan:

- Frekuensi (GHz)
- Polarisasi (horizontal / vertikal)
- Sudut elevasi

Contoh pendekatan umum:

$$k = a \cdot f^b, \alpha = c \cdot f^d$$

Tabel 5. Standar Kualitas Layanan Berdampak Kondisi Hujan

Sistem	Dampak
<10 GHz	Hampir aman
10–30 GHz	Perlu fade margin
>30 GHz	Risiko outage tinggi
5G mmWave	Sangat sensitif
Satelit Ka-band	Rain fade dominan

Total Rain Attenuation

Untuk panjang lintasan d (km):

$$A_R = \gamma_R \cdot d_{\text{eff}}$$

dengan:

- A_R : total redaman (dB)
- d_{eff} : panjang lintasan efektif (km)

Model Integrasi Effective Path Length (P.530 Integration)

Berdasarkan model sistem (dikaitkan dengan P.530):

$$d_{\text{eff}} = d \cdot r$$

r = rain reduction factor (fungsi jarak & intensitas hujan)

Dampak ke Sinyal RF

Model lengkap dalam link budget:

$$P_r = P_t - (PL + A_R)$$

- P_r : daya terima (dBm)
- P_t : daya pancar (dBm)
- PL : path loss (dB)
- A_R : redaman hujan (dB)

$$SINR = \frac{P_r}{N + I}$$

- $SINR$: rasio sinyal terhadap noise + interferensi
- P_r : daya sinyal terima (linear, bukan dBm!)
- N : noise power
- I : interference power

Persamaan SINR (Konversi dari dBm ke Linear)

$$SINR = \frac{10^{P_r/10}}{10^{N/10} + 10^{I/10}}$$

Frekuensi tinggi (misalnya Ka-band, mmWave 5G) paling terdampak karena ukuran tetesan hujan sebanding dengan panjang gelombang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengukuran

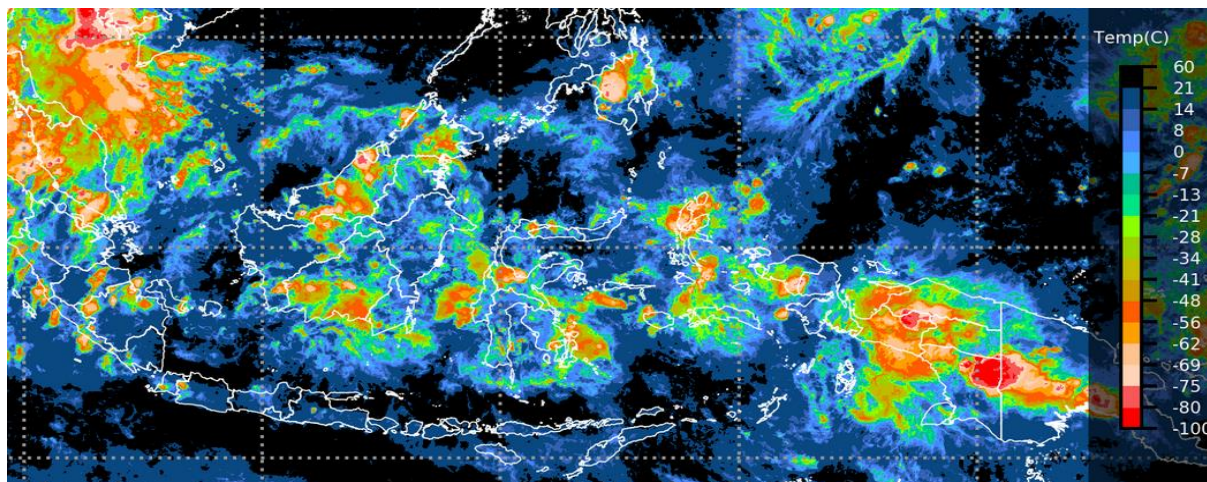
Mayoritas hasil pengukuran berada dalam kategori hujan ringan (< 2,5 mm/hari). Periode dengan curah hujan ringan mencerminkan kondisi atmosfer hal ini jaringan telekomunikasi

yang relatif stabil, hujan ringan umumnya tidak berdampak signifikan terhadap redaman hujan. Hasil pengukuran curah hujan kategori lebat muncul secara terbatas dan tidak menunjukkan dominasi pada keseluruhan periode pengukuran. Berdasarkan klasikasi curah hujan harian BMKG, mayoritas nilai pengukuran berada di bawah 20 mm/hari, didominasi hujan ringan.

Tabel 6. Perhitungan statistik curah hujan dalam setahun.

Parameter	Mean	Median	Modus	Nilai maksimum	Nilai minimum	Standar deviasi
Curah hujan	6,38	0,31	0	138,4	0	13,8011217

Pengambilan data dari curah hujan dengan menggunakan data secara langsung dari BMKG per hari yang disandingkan dengan data satelit Himawari diambil dari situs BMKG (Citra Himawari-9 IR Enhanced – Indonesia) sesuai dengan Gambar 1.

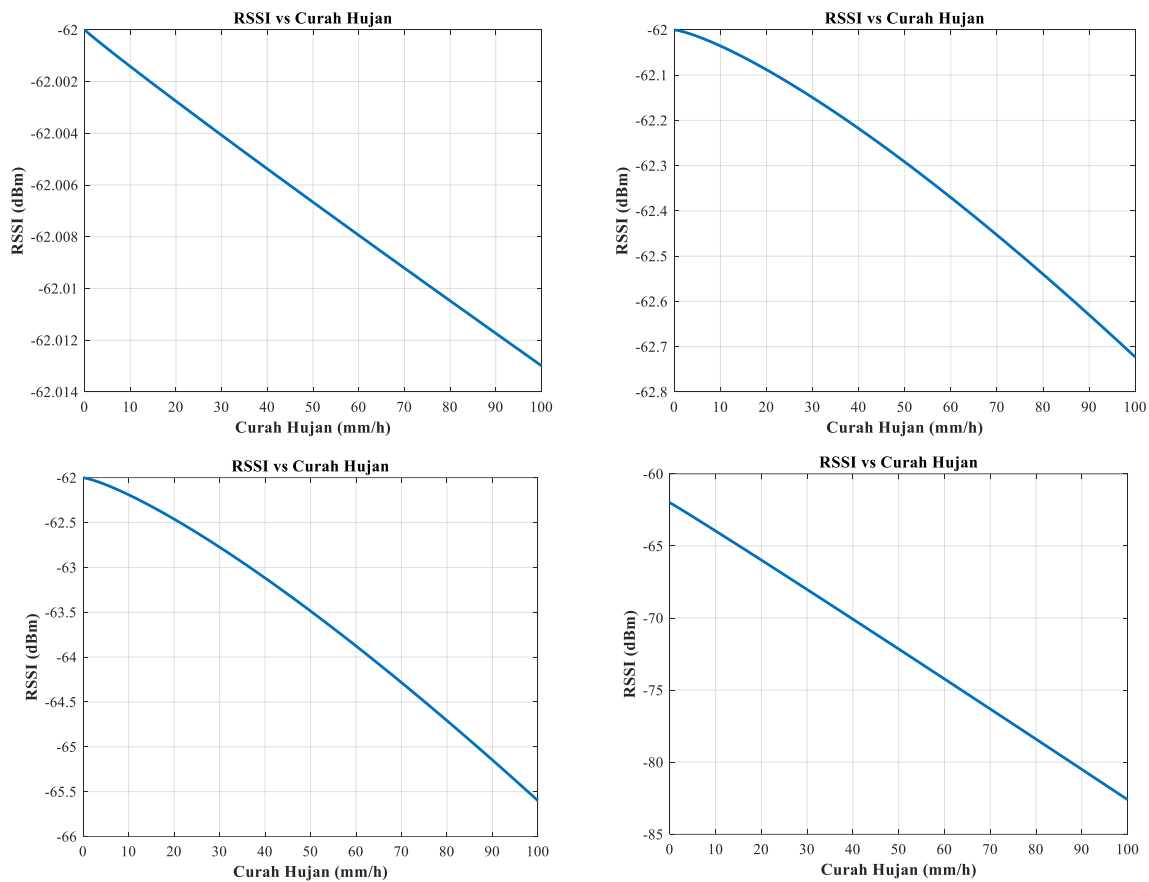


Gambar 1. Citra Himawari-9 IR Enhanced – Indonesia

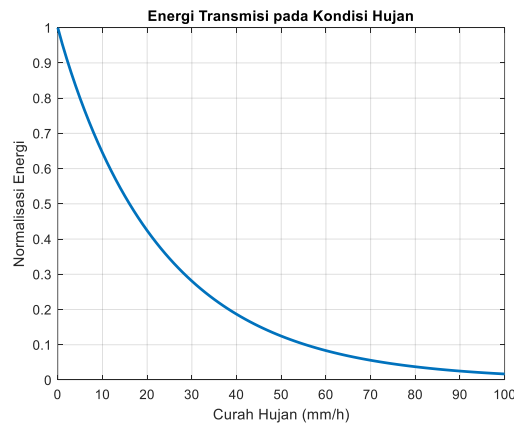
Table 7. Koefisien Frekuensi dipengaruhi oleh hujan serta pengaruhnya

Frekuensi	Nilai K	Nikai Alpha	Keterangan
1	0.0000387	0.912	Hampir tidak terpengaruh
2	0.000154	0.963	Dampak sangat kecil
4	0.00065	1.121	Mulai meningkat
6	0.00175	1.308	Microwave rendah
10	0.0101	1.276	Mulai signifikan
15	0.0367	1.217	Sensitif hujan
20	0.0751	1.099	Satelit Ku-band
25	0.124	1.061	Transisi tinggi
30	0.187	1.021	Ka-band
40	0.35	0.95	Sangat sensitif
50	0.66	0.81	mmWave awal
60	0.86	0.77	5G mmWave
70	1.03	0.73	Redaman tinggi
80	1.17	0.71	E-band
90	1.28	0.69	Sangat ekstrem
100	1.37	0.68	Sangat sensitif

Pembahasan



Gambar 2. Hasil simulasi RSSI pada hujan rata-rata di Kota Mataram dengan frekueansi transmisi pada 2,4 GHz, 5,3 GHz, 10 GHz dan 30 GHz.



Gambar 3. Hasil simulasi pada hujan rata-rata di Kota Mataram dengan frekueansi transmisi untuk layanan 5G pada kondisi hujan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa curah hujan di Kota Mataram didominasi oleh kategori hujan ringan dengan intensitas rata-rata berada pada kisaran < 2,5 mm/hari. Kondisi ini mengindikasikan bahwa secara klimatologis wilayah penelitian berada pada zona dengan aktivitas hujan stratiform yang relatif stabil. Namun demikian, meskipun intensitas hujan tergolong rendah, hasil analisis menunjukkan adanya pengaruh signifikan terhadap performa sistem komunikasi radio frekuensi, terutama pada frekuensi menengah hingga tinggi.

Berdasarkan hasil simulasi RSSI, terlihat adanya penurunan nilai daya terima sinyal seiring meningkatnya intensitas curah hujan. Penurunan ini konsisten pada seluruh skenario frekuensi yang diuji (2,4 GHz, 5,3 GHz, 10 GHz, dan 30 GHz), dengan degradasi paling besar terjadi pada frekuensi tinggi. Fenomena ini selaras dengan teori ITU-R P.838 dan P.530 yang menyatakan bahwa redaman hujan meningkat secara eksponensial terhadap frekuensi operasi, terutama pada rentang microwave hingga millimeter-wave.

Hasil simulasi energi transmisi juga memperlihatkan pola penurunan eksponensial terhadap peningkatan curah hujan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem komunikasi membutuhkan energi tambahan (power compensation) untuk mempertahankan kualitas layanan pada kondisi hujan. Dengan demikian, kondisi atmosfer tidak hanya memengaruhi kualitas sinyal (RSSI dan SINR), tetapi juga efisiensi energi sistem transmisi.

Selain faktor curah hujan, karakteristik kanal juga dipengaruhi oleh parameter lingkungan seperti multipath, scattering, dan absorpsi atmosfer. Namun dalam konteks penelitian ini, redaman hujan menjadi faktor dominan yang secara langsung menurunkan kualitas link komunikasi. Hal ini diperkuat oleh hasil koefisien frekuensi yang menunjukkan bahwa pada frekuensi di atas 30 GHz (Ka-band dan mmWave 5G), sistem menjadi sangat sensitif terhadap perubahan intensitas hujan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menegaskan bahwa peningkatan frekuensi operasi sistem komunikasi modern seperti 5G berimplikasi pada meningkatnya kerentanan terhadap fenomena cuaca, khususnya hujan tropis. Oleh karena itu, diperlukan strategi mitigasi seperti link adaptation, adaptive modulation coding, serta peningkatan fade margin untuk menjaga kualitas layanan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa curah hujan memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja sistem komunikasi radio frekuensi di wilayah tropis seperti Kota Mataram. Peningkatan intensitas hujan menyebabkan penurunan nilai RSSI, SINR, serta efisiensi energi transmisi pada seluruh frekuensi yang diuji. Dampak degradasi semakin besar pada frekuensi tinggi, khususnya pada rentang 10 GHz hingga 30 GHz dan mmWave 5G, yang menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap redaman hujan.

Hasil analisis juga menunjukkan bahwa meskipun curah hujan didominasi kategori ringan, efek akumulatif terhadap performa link tetap terukur dan tidak dapat diabaikan dalam desain sistem komunikasi nirkabel. Dengan demikian, redaman hujan merupakan faktor penting dalam perancangan link budget, terutama pada sistem komunikasi modern berbasis frekuensi tinggi.

Penelitian ini merekomendasikan penerapan strategi mitigasi seperti peningkatan fade margin, pemilihan frekuensi adaptif, serta optimasi parameter transmisi untuk menjaga kualitas layanan komunikasi pada kondisi cuaca tropis.

DAFTAR PUSTAKA

- Azhari, F., Sukoco, N. B., & Fatoni, K. I. (2016). Studi Karakteristik Parameter Meteorologi dan Gelombang untuk Operasi Amfibi di Perairan Singkawang Kalimantan Barat. *Jurnal Chart Datum*, 6(1), 1–9. <https://doi.org/10.37875/chartdatum.v6i1.169>.
- Brost G, Magde K. (2017) “Considerations of rain cell size and statistics for attenuation prediction models”, 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), 2017.
- Capsoni C, Luini L, Paraboni A, Riva C. (2006) “Stratiform and Convective Rain Discrimination Deduced From Local P(R)”, *IEEE Transactions on Antennas and*

- Propagation, vol. 54, no.11. 2006. Gita I.M, Yadnya M.S, (2026) " Analisis Quality Of Service (QOS) Wi-Fi Tipe UAP IW HD Internet Di Hotel Ayana Resort" JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan), Vol. 14 No. 2, pISSN: 2303-0577 eISSN: 2830-7062, pp 1006-1013.
- ITU-R, Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems P Series Radiowave propagation, ITU-R Rec. P.530-18, 2021.
- ITU-R P.838-3 "The specific attenuation γ_R (dB/km) is obtained from the rain rate R (mm/h) using the power-law relationship" ITU-R Rec. P.838-3, 2013.
<https://www.bmkg.go.id/cuaca/satelit/himawari-ir-enhanced>
- Luthfiarta, A., Febriyanto, A., Lestiawan, H., & Wicaksono, W. (2020). Analisa Prakiraan Cuaca dengan Parameter Suhu, Kelembaban, Tekanan Udara, dan Kecepatan Angin Menggunakan Regresi Linear Berganda. JOINS (Journal of Information System), 5(1), 10–17. <https://doi.org/10.33633/joins.v5i1.2760>
- Yadnya M.S, Sudiarta I.W., (2014) " Cell Movement of Rain Impact in Satellite and Mobile Communication Based on Tropical Maritime" The Advanced Science Letters, 2014 , Volume 20, Number 2, February 2014, pp. 514-517. 2014.
- Yadnya MS, Sudiarta IW. Simulation of broadcast level signal mobile station 3G network rain condition in Mataram, Asia Pacific Conference on Multimedia and Broadcasting (APMediaCast), Bali, Indonesia, pp. 24-28, doi: 10.1109/APMediaCast.2016.7878166. 2016
- Yadnya MS, Sudiarta IW.(2017) "Attenuation model from drop size distribution of rain for millimeter wave communication channel", 11th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA), Lombok, Indonesia, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/TSSA.2017.8272936 2017.
- Yadnya M.S, Sudiarta I.W., (2018) " Synthesis of 4G outdoor femtocells under rain conditions in Mataram" The Advanced Science Letters, 2018 , AIP Conference Proceedings 2043, 020017 (2018); doi: 10.1063/1.5080036.
- Yadnya M.S, Ariessaputra S, Astuti N. D, (2023)" Simulasi Pemilihan Kanal Kondisi Hujan dengan Perbandingan Kuat Sinyal Penerima pada Jaringan 5G Frekuensi 2.3 GHz" Jurnal Dielektrika–Department of Electrical Engineering University of Mataram, Vol 10 no 2 pp 189-194