

Komputasi Penghamburan dan Penyerapan Gelombang Elektromagnetik karena Titik Hujan dengan Metode Analitis pada Frekuensi diatas 10 GHz

M. Yahya Batubara, Eko Setijadi dan Gamantyo Hendrantoro
Jurusan Teknik Elektro-FTI, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
E-mail: ekosetijadi@yahoo.com

Abstrak— Pertumbuhan pesat yang terjadi pada dunia komunikasi mendesak para *engineer* untuk mengembangkan sistem komunikasi gelombang mikro yang bekerja pada frekuensi yang lebih tinggi. Dalam penggunaannya, frekuensi diatas 10 GHz rentan terhadap redaman yang disebabkan oleh partikel-partikel di atmosfer yang akan menurunkan keandalan dan kinerja dari hubungan komunikasi radar dan ruang terkait. Partikel-partikel tersebut meliputi oksigen, *ice crystals*, hujan, kabut, dan salju. Diantara partikel tersebut, redaman terbesar disebabkan oleh titik-titik hujan. Memprediksi kinerja sistem yang terganggu akibat endapan lapisan ini sangat penting dengan melakukan pengujian. Pengujian dilakukan dengan asumsi titik hujan tersebut berbentuk bola (*spherical*). Asumsi ini akan valid jika intensitas curah hujan adalah rendah. Untuk intensitas curah hujan yang tinggi, bentuk *oblate spheroidal*-lah yang lebih realistis. Pembangkitan dan pengalokasian titik hujan menggunakan lima distribusi, yaitu distribusi Eksponensial Marshall-Palmer, Eksponensial Le Wei Li, Eksponensial Lince, Weibull Sekine, dan Weibull Lince. Metode perhitungan redaman yang dilakukan adalah metode redaman hujan spesifik dan metode analitik. Pemodelan redaman hujan telah mempertimbangkan efek *multiple scattering*. Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil metode redaman hujan spesifik dengan metode redaman hujan analitik. Berdasarkan hasil analisis, besar redaman hujan berbanding lurus dengan besar curah hujan dan frekuensi kerjanya. Semakin tinggi curah hujan dan semakin besar frekuensi kerjanya, maka gelombang akan mengalami redaman yang makin besar pula. Redaman hujan mulai berpengaruh pada frekuensi 10 GHz dan mengalami nilai tertinggi pada frekuensi antara 100 hingga 120 GHz.

Kata kunci --- Redaman Hujan, *Multiple Scattering*, Distribusi Eksponensial, Distribusi Weibull, Metode Spesifik, Metode Analitik

I. PENDAHULUAN

Pertumbuhan pesat yang terjadi pada dunia komunikasi mendesak para *engineer* untuk mengembangkan sistem komunikasi gelombang mikro yang bekerja pada frekuensi yang lebih tinggi. Dalam penggunaannya, frekuensi diatas 10 GHz rentan terhadap redaman yang disebabkan oleh partikel-partikel di atmosfer yang dapat menurunkan keandalan dan kinerja dari hubungan komunikasi radar dan ruang bebas terkait. Partikel-partikel tersebut meliputi

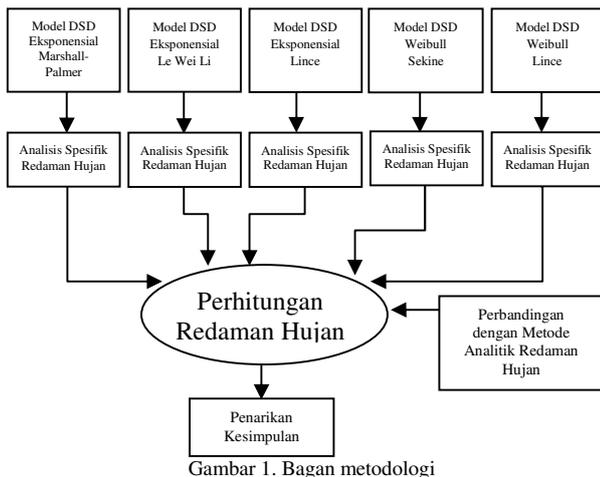
oksigen, *ice crystals*, hujan, kabut, dan salju. Memprediksi kinerja sistem yang terganggu akibat endapan lapisan ini sangat penting [1].

Perkembangan teknologi telekomunikasi berkembang dengan sangat cepat termasuk dalam komunikasi nirkabel (*wireless*). Hal ini ditandai dengan penggunaan frekuensi tinggi sampai dalam orde GHz. Gelombang ini dapat mengirimkan data informasi dengan kecepatan tinggi. Dengan tersedianya komunikasi kecepatan tinggi tersebut, layanan internet dengan kecepatan tinggi, *digital video*, *audio broadcasting*, dan *video conference* dengan kapasitas besar dan *bandwidth* yang lebar dapat bekerja dengan baik [2]. Contohnya, telekomunikasi dari pemancar ke penerima dengan menggunakan *Local to Multipoint Distribution System* (LMDS) atau *Broadband Wireless Access* (BWA) yang mampu menyediakan layanan tersebut beroperasi pada frekuensi 20-40 GHz. Pada komunikasi Ka-Band misalnya; dengan orde frekuensi mencapai 10^9 Hertz (Gigahertz); panjang gelombang menjadi semakin pendek dan hal itu membuat sistem komunikasi mudah terganggu dalam masalah perjalanannya. Termasuk pengaruh hujan yang menyebabkan masalah hujan menjadi masalah penting untuk diperhitungkan.

Akibat yang timbul dari fenomena ini adalah menurunnya kualitas komunikasi berbentuk melemahnya penerimaan sinyal, gangguan antar saluran pada sistem polarisasi ganda, dan gangguan dari sistem komunikasi lain yang menggunakan daerah spektrum yang sama. Diantara semua gangguan pada sistem komunikasi tersebut, redaman hujan adalah hal yang paling berpengaruh pada kualitas komunikasi terlebih pada penggunaan *micro wave* dan *millimeter wave*. Penggunaan frekuensi diatas 10 GHz akibat redaman hujan menjadi hal yang cukup signifikan untuk diperhitungkan [3]. Redaman hujan menimbulkan penghamburan dan penyerapan gelombang elektromagnetik terlebih Indonesia merupakan negara tropis yang memiliki tingkat curah hujan yang tinggi. Berbeda dengan negara nontropis lainnya, redaman ini akan menjadi permasalahan yang cukup penting dalam propagasi gelombang elektromagnetik mengingat pada daerah tropis mempunyai curah hujan yang tinggi.

Curah hujan yang tinggi mengindikasikan bahwa titik hujan besar dan jarak antar titik hujan lebih rapat, sehingga redaman yang ditimbulkan juga semakin besar. Distribusi ukuran titik hujan yang dikenal dengan *Drop Size Distribution* (DSD) didefinisikan sebagai jumlah titik hujan yang memiliki radius tertentu dalam satuan volume. Model DSD tersebut memainkan peran penting dalam memonitoring hujan dan dalam memprediksi redaman hujan. Nilai dari redaman hujan akan sangat bergantung pada model dan koefisien dari DSD ini. Dalam studi terkait redaman hujan, dikenal beberapa macam penghamburan, diantaranya adalah *single scattering* dan *multiple scattering*. Pada penelitian sebelumnya telah dirumuskan metode estimasi redaman hujan dengan mempertimbangkan efek *multiple scattering* [4] dan telah divalidasi dengan hasil pengukuran yang didapat dengan metode redaman hujan spesifik [5]. Namun, hasil tersebut belum dibandingkan dengan metode analitik redaman hujan [6]. Oleh karena itu, perlu dilakukan perbandingan antara metode spesifik dengan metode analitik redaman hujan agar dapat dijadikan rekomendasi model redaman hujan.

II. METODE PERHITUNGAN REDAMAN HUJAN



Gambar 1. Bagan metodologi

A. Membangkitkan Titik Hujan

Sebelum dilakukan pembangkitan radius titik hujan, perlu dicari terlebih dahulu nilai dari permitivitas air. Untuk mencari nilai dari permitivitas air, titik hujan diasumsikan sebagai bola dielektrik yang memiliki permitivitas air yang bergantung pada frekuensi dan suhu. Konstanta dielektrik titik hujan ditunjukkan sebagai permitivitas kompleks oleh :

$$\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$$

dimana ϵ' dan ϵ'' adalah bagian real dan bagian imajiner. Persamaan diatas bergantung dari besarnya frekuensi dan suhu sebagai akibat dari interaksi mekanis antara radiasi gelombang elektromagnetik dan molekul air.

Model dari permitivitas kompleks air diekspresikan dengan Double Debye Model oleh :

$$\epsilon_r(f) = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_1}{\left[1 + \left(\frac{f}{\gamma_1}\right)^2\right]} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\left[1 + \left(\frac{f}{\gamma_2}\right)^2\right]} + \epsilon_2 -$$

$$\left[\frac{(\epsilon_0 - \epsilon_1) \left(\frac{f}{\gamma_1}\right)}{\left[1 + \left(\frac{f}{\gamma_1}\right)^2\right]} + \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_2) \left(\frac{f}{\gamma_2}\right)}{\left[1 + \left(\frac{f}{\gamma_2}\right)^2\right]} \right] i$$

dimana $\epsilon_1 = 0.0671\epsilon_0$, $\gamma_1 = 20.20 + 146.4\theta + 316\theta^2$, $\epsilon_2 = 3.52 + 7.52\theta$, dan $\gamma_2 = 39.8\gamma_1$

Konstanta dielektrik statik ϵ_0 dari air tergantung dari besar temperatur. Pada temperatur air antara $-20^\circ\text{C} \leq T \leq 60^\circ\text{C}$, konstanta dielektrik statik air direpresentasikan oleh :

$$\epsilon_0(T) = 77.66 - 103.3\theta$$

dengan nilai θ merupakan fungsi yang bergantung pada temperatur dari titik hujan. Nilai θ dapat dinyatakan oleh :

$$\theta = 1 - 300/[273.15 + T(^{\circ}\text{C})]$$

Pada pembangkitannya, titik hujan dibangkitkan secara random di ruang bebas berbasis koordinat bola yang mempunyai radius a_f [mm]. Tujuan menggunakan pembangkitan berbasis koordinat bola adalah supaya memiliki ekspresi gelombang elektromagnetik yang lebih konvergen dengan pengaruh *scattering* yang terjadi di dalamnya. Volume kolektif dari sekumpulan titik hujan yang berjumlah Q dapat ditentukan melalui :

$$V = \frac{Q}{N(\infty)} = \frac{4}{3} \pi a_f^3$$

Berdasarkan persamaan diatas, radius kolektif dari sekumpulan titik hujan dapat dicari dengan menggunakan :

$$a_f = \left[\frac{3Q}{4\pi N(\infty)} \right]^{1/3} \times 10^3 \text{ [mm]}$$

Titik pusat dari titik hujan yang ke- q adalah (r_q, θ_q, ϕ_q) dalam sistem koordinat bola. Untuk menggambarkan posisi masing-masing titik hujan secara random di ruang bebas, digunakan persamaan dibawah ini yang memakai bilangan ρ yang berkisar antara 0 sampai 7 [4] :

$$\rho_1 = \frac{\int_0^{r_q} r^2 dr}{\int_0^{a_f} r^2 dr}, \rho_2 = \frac{\int_0^{\theta_q} \sin \theta d\theta}{\int_0^{\pi} \sin \theta d\theta}, \rho_3 = \frac{\int_{-\pi}^{\phi_q} d\phi}{\int_{-\pi}^{\pi} d\phi}$$

yang dapat ditulis kembali dengan persamaan yang lebih sederhana :

$$r_q = a_f(\rho_1)^{1/3}, \theta_q = \arccos(1 - 2\rho_2), \phi_q = 2(\rho_3 - 1)\pi$$

Pada pembangkitan radius titik hujan, digunakan model distribusi yang sudah ada. Jumlah titik hujan yang dibangkitkan mengikuti persamaan berikut [4] :

$$\frac{N(a_q)}{N(\infty)} = \frac{q - 1/2}{Q} \quad (q = 1, 2, \dots, Q)$$

B. Distribusi Ukuran Titik Hujan

Distribusi titik hujan menyatakan banyaknya jumlah titik hujan yang memiliki radius tertentu pada suatu volume tertentu pula. Model distribusi titik hujan atau *Drop Size Distribution* (DSD) bermacam-macam, diantaranya adalah model DSD Eksponensial dan DSD Weibull. Model ini digunakan dalam perhitungan nilai redaman hujan dengan metode spesifik dan analitik.

Distribusi ukuran titik hujan untuk bentuk eksponensial dinyatakan sebagai fungsi curah hujan R (dalam mm/jam). Model distribusi Eksponensial dari ukuran titik hujan dicari dengan menggunakan persamaan berikut [8] :

$$N(a) = N_0 e^{-\Lambda a}$$

Untuk membangkitkan titik hujan yang memiliki radius a_q dari distribusi eksponensial, digunakan persamaan [4]:

$$a_q = -\frac{1}{\Lambda} \ln\left(1 - \frac{q-1}{Q}\right) \quad (q = 1, 2, \dots, Q)$$

Untuk DSD Eksponensial Marshallier, $N(a)$ (dalam mm^{-3}) merupakan jumlah titik hujan yang memiliki radius a dalam satuan volume, q sebesar 16000, a merupakan radius dari titik hujan (mm), $\Lambda = 8.2qQ$ adalah intensitas cur hujan (dalam mm^{-1}) [9]. Untuk DSD Eksponensial(2) Wei Li, N_p sebesar 6359.3 dan $\Lambda = 5.63$ [10]. Data untuk DSD Eksponensial Lince, N_p sebesar $108 \text{ m}^3 \text{ mm}^{-1}$ dan $\Lambda = 4.83R^{0.44}$.

Distribusi titik hujan menggunakan distribusi Weibull dinyatakan oleh $N(a)$ dalam persamaan (2) sebagai berikut:

$$N(a) = a^{-\eta} \exp\left(-\left(\frac{a}{\Lambda}\right)^\xi\right)$$

Let proses pemisahan titik hujan memiliki radius R^{-1} dari distribusi Weibull, digunakan persamaan [4]:

$$H'_r = \Lambda \left\{ -\ln\left(\frac{N_p}{N_p - 1}\right) \right\}^{\frac{1}{\xi}}$$

Untuk DSD Weibull hujan $\Lambda = 1000$, $\xi = 5R^{-1}$ dan $\eta = 0.13R^{0.44}$. Sedangkan DSD Lince, $N_p = 281.62$, $\eta = 1.21R^{0.44}$ dan $\Lambda = 0.36R^{0.77}$.

C. Perhitungan Redaman Hujan Spesifik

Untuk mengetahui pemodelan redaman hujan, metode analisis numerik digunakan dengan persamaan yang telah dirumuskan pada penelitian sebelumnya [4]. Persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai redaman hujan spesifik ditunjukkan oleh:

$$\epsilon_{da} = \frac{4343 \sigma^e}{V} \quad [\text{dB/km}]$$

Nilai dari σ^e dapat dicari dengan menggunakan pendekatan pada persamaan berikut [4]:

$$\sigma^e \approx -\frac{2\pi}{k_0^2} \text{Re} \sum_{q=1}^Q \sum_{n=1}^{N_q} (2n+1) (\bar{A}_{qn} + \bar{B}_{qn})$$

Nilai \bar{A}_{qn} adalah persamaan untuk mencari koefisien dari *extinction cross section*. Nilai dari \bar{A}_{1e} dan \bar{A}_{1n} pada persamaan diatas diperoleh dengan cara substitusi persamaan *Mie's Coefficient*:

$$\bar{A}_{pv} = -\frac{J_{pv} \bar{J}'_{pv} - \sqrt{\epsilon_r} J'_{pv} \bar{J}_{pv}}{\Delta_{pv}^{(1)}}$$

$$\bar{B}_{pn} = \frac{J'_{pn} \bar{J}_{pn} - \sqrt{\epsilon_r} J_{pn} \bar{J}'_{pn}}{\Delta_{pn}^{(1)}}$$

Kedua persamaan tersebut merupakan persamaan Weibull yang sama. Untuk mencari nilai \bar{A}_{qn} dan \bar{B}_{qn} digunakan persamaan berikut:

$$\bar{A}_{qn} = -\frac{J_{qn} \bar{J}'_{qn} - \sqrt{\epsilon_r} J'_{qn} \bar{J}_{qn}}{\Delta_{qn}^{(1)}}$$

$$\bar{B}_{qn} = \frac{J'_{qn} \bar{J}_{qn} - \sqrt{\epsilon_r} J_{qn} \bar{J}'_{qn}}{\Delta_{qn}^{(1)}}$$

Redaman tiap panjangnya adalah:

kr. Nilai H'_r merupakan *derivative of the first kind spherical Bessel function* dan J_{pv} merupakan *spherical Hankel function* order l .

Nilai H'_r dan J_{pv} dapat diperoleh dari:

dimana $k_0 = 8.85 \times 10^6 a_p$, $\epsilon_r = 1.25 \times 10^4$ dan $\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ merupakan nilai permittivitas kompleks yang berasal dari Double Debye Model.

Ukuran titik hujan bervariasi mulai dari ukuran paling besar dengan diameter mencapai 6 mm. Gelombang radio dengan panjang gelombang tertentu akan mempunyai karakteristik yang berbeda jika berinteraksi dengan titik hujan dengan diameter yang berbeda pula. Untuk kasus titik hujan *spherical*, jika diameter titik hujan relatif kecil dibandingkan dengan panjang gelombang, dapat digunakan rumusan oleh Rayleigh dengan asumsi diameter titik hujan $d_p \ll \lambda$.

Pada distribusi dari curah hujan, diketahui kepadatan dari titik hujan tidak sepadat salju. Oleh karena itu, dalam pemodelannya cukup untuk memperhitungkan efek *double diffraction* sebagai tujuan untuk merundingkan penyimpangan dari dasar dengan *Mie's Coefficients*. Dalam menghitung nilai dari *extinction cross section*, dibutuhkan *truncation number* N_c . Nilai dari *truncation number* ini merupakan bilangan bulat yang digunakan dalam menyatakan proses hamburan dan absorpsi dari suatu titik hujan dengan nilai *error* hamburan dan absorpsi terkecil. Semakin besar N_c , nilai dari *truncation number* akan lebih besar. Nilai *truncation number* dapat menggunakan persamaan berikut [4]:

$$N_c \approx 1 + \sqrt{1.8(\epsilon_0 - 1)}$$

D. Perhitungan Redaman Hujan dengan Metode Analitik

Amplitudo gelombang yang melewati media perantara (dengan partikel-partikel berbentuk bola/*spherical*) pada jarak l diberikan oleh $\sqrt{\epsilon_r} e^{-\alpha l}$ adalah koefisien redaman [12]:

$$= k_0 \sqrt{\epsilon_r} J_v(k_0 a_p)$$

Redaman tiap panjangnya adalah:

$$A = 4.343 \frac{\lambda^2 N}{\pi} ReS(0)$$

Sehingga total redaman (dalam dB/km) menjadi :

$$A = 0.4343 \frac{\lambda^2}{\pi} \cdot 10^6 \sum pN(D)ReS(0)$$

dimana λ adalah panjang gelombang dalam cm dan $N(D)$ adalah *truncation number* titik-titik hujan dengan *equivolumic diameter* D tiap cm^3 . Untuk keterhubungan redaman dengan intensitas ukuran hujan pada curah R (mm/jam), penting adanya suatu hubungan antara N dan R . Hubungan yang didapatkan oleh Setzer [13] :

$$N(D) = \frac{R}{6\pi u D^3} 10^{-5}$$

Dengan substitusi persamaan diatas ke nilai redaman, diperoleh nilai total redaman :

$$A = 4.343 \frac{\lambda^2}{\pi^2} R \sum \frac{p}{6uD^3} ReS(0)$$

dimana $N(D)$ tiap cm^3 , D dan λ dalam cm, u dalam m/s, p dalam persen, dan $S(0)$ merupakan *the complex forward-scattering amplitude*, yang diberikan oleh :

$$S(0) = S_1(0^\circ) = S_2(0^\circ) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(a_n + b_n)$$

Salah satu manfaatnya pada komunikasi radar adalah *radar cross section* atau *back-scattering cross section* σ_b dari hambatan penghamburan. Ini berupa gumpalan ukuran dari efisiensi hambatan dalam hamburan pancaran yang kembali ke sumbernya ($\theta = 180^\circ$). Kondisi ini didefinisikan dalam kaitannya dengan bidang terhambur jauh sebagai :

$$\sigma_b = \frac{\pi}{k^2} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (2n+1)(a_n - b_n) \right|^2$$

Ketika $\alpha = ka$, *the normalized back scattering cross section*, menjadi :

$$\frac{\sigma_b}{\pi a^2} = \frac{1}{\alpha^2} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (2n+1)(a_n - b_n) \right|^2$$

Dengan cara yang sama, kita bisa dapatkan *forward-cross scattering cross section* ($\theta = 0^\circ$) sebagai berikut :

$$\sigma_f = \frac{\pi}{k^2} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(a_n + b_n) \right|^2$$

Untuk perhitungan total redaman pada beberapa frekuensi dengan intensitas curah hujan tertentu, nilai a_n, b_n, c_n, d_n digunakan dalam fungsi *Spherical Bessel of first and second kind* berikut ini :

$$x^2 y'' + 2xy' + [x^2 - n(n+1)]y = 0$$

dimana $j_n(x)$ = *Spherical Bessel function of first kind*, dan $y_n(x)$ = *Spherical Bessel function of second kind*. Nilai a_n, b_n, c_n, d_n didapatkan dari persamaan berikut :

$$a_n = \frac{j_n(m\alpha)[\alpha j_n(\alpha)]' - j_n(\alpha)[m\alpha j_n(m\alpha)]'}{j_n(m\alpha)[\alpha h_n^{(2)}(\alpha)]' - h_n^{(2)}(\alpha)[m\alpha j_n(m\alpha)]'}$$

$$b_n = \frac{j_n(\alpha)[m\alpha j_n(m\alpha)]' - m^2 j_n(m\alpha)[\alpha j_n(\alpha)]'}{h_n^{(2)}(\alpha)[m\alpha j_n(m\alpha)]' - m^2 j_n(m\alpha)[\alpha h_n^{(2)}(\alpha)]'}$$

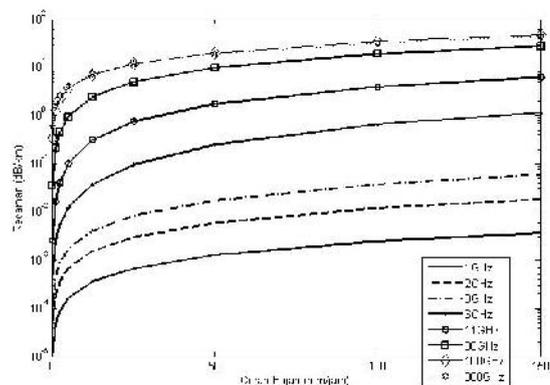
$$c_n = \frac{j_n(m\alpha)[\alpha h_n^{(2)}(\alpha)]' - h_n^{(2)}(\alpha)[m\alpha j_n(m\alpha)]'}{j/\alpha}$$

$$d_n = \frac{j_n(\alpha)[m\alpha j_n(m\alpha)]' - j_n(m\alpha)[\alpha h_n^{(2)}(\alpha)]'}{j/\alpha}$$

$$d_n = \frac{j/\alpha}{h_n^{(2)}(\alpha)[m\alpha j_n(m\alpha)]' - m^2 j_n(m\alpha)[\alpha h_n^{(2)}(\alpha)]'}$$

III. HASIL PERHITUNGAN BESAR REDAMAN HUJAN

Perhitungan redaman hujan (dB/km) dengan metode analitik dilakukan pada beberapa frekuensi tinggi yang terdiri dari 1.0, 2.0, 3.0, 6.0, 11.0, 30.0, 100.0, dan 300.0 GHz untuk beberapa intensitas curah hujan yang terdiri dari 0.25, 1.25, 2.5, 5.0, 12.5, 50.0, 100.0, dan 150.0 mm/jam. Melalui contoh model distribusi ukuran titik hujan yang telah ditemukan oleh Laws dan Parson, didapatkan besar redaman hujan yang diakibatkan oleh partikel hujan pada frekuensi tinggi tersebut seperti pada Gambar 2.



Gambar 2 Besar redaman hujan pada beberapa frekuensi dan intensitas curah hujan

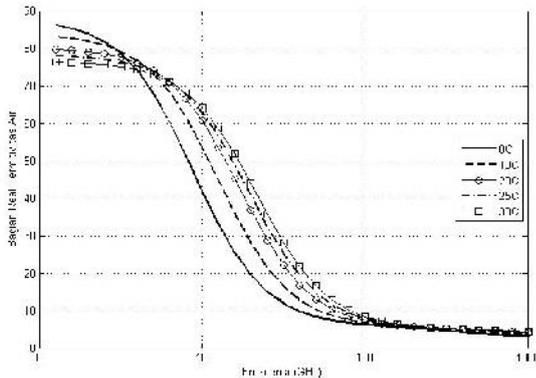
Gambar 2 tersebut menunjukkan bahwa gelombang elektromagnetik pada frekuensi antara $1 \leq F \leq 300$ GHz akan mengalami redaman yang besarnya ≤ 50 dB pada curah hujan antara $0 \leq R \leq 150$ mm/jam. Besar redaman hujan pada beberapa frekuensi dengan berbagai curah hujan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1
Nilai redaman pada berbagai curah hujan

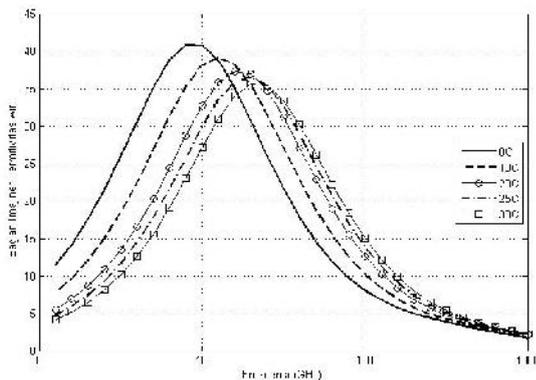
Curah Hujan (mm/jam)	1 GHz	2 GHz	3 GHz
	Redaman (dB/km)	Redaman (dB/km)	Redaman (dB/km)
0.2500	1.2129e-005	4.7948e-005	1.1100e-004
1.2500	4.7924e-005	1.9356e-004	4.6362e-004
2.5000	8.7415e-005	3.5817e-004	8.7755e-004
5	1.6054e-004	6.7021e-004	0.0017
12.5000	3.6084e-004	0.0016	0.0041
25	6.7587e-004	0.0030	0.0083
50	0.0013	0.0059	0.0174
100	0.0025	0.0120	0.0373
150	0.0037	0.0182	0.0590
Curah Hujan (mm/jam)	6 GHz	11 GHz	30 GHz
	Redaman (dB/km)	Redaman (dB/km)	Redaman (dB/km)
0.2500	5.2388e-004	0.0026	0.0352
1.2500	0.0026	0.0170	0.2113
2.5000	0.0055	0.0407	0.4502

5	0.0123	0.0988	0.9428
12.5000	0.0376	0.3155	2.4654
25	0.0956	0.7513	4.9683
50	0.2477	1.7404	9.8134
100	0.6545	3.9469	18.9028
150	1.1422	6.1899	27.4366
Curah Hujan (mm/jam)	100 GHz	300 GHz	
	Redaman (dB/km)	Redaman (dB/km)	
0.2500	0.3412	0.5723	
1.2500	1.2950	1.6532	
2.5000	2.2021	2.6179	
5	3.7174	4.1296	
12.5000	7.1695	7.4479	
25	11.8612	11.8120	
50	19.8221	19.0901	
100	34.1639	32.1795	
150	47.3853	44.4676	

A. Hasil Pembangkitan Titik Hujan



Gambar 3 Bagian real permitivitas air pada frekuensi 1 GHz hingga 1 THz dan suhu 0, 10, 20, 25, dan 30°C



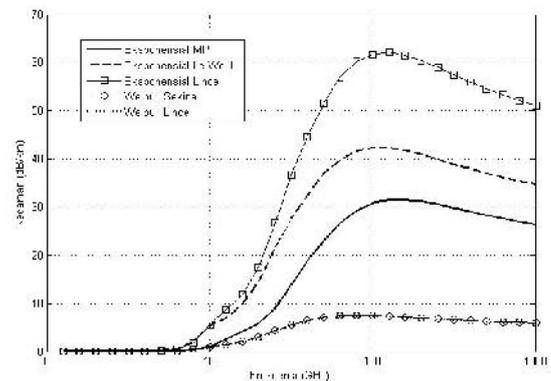
Gambar 4 Bagian imajiner permitivitas air pada frekuensi 1 GHz hingga 1 THz dan suhu 0, 10, 20, 25, dan 30°C

Bagian real pada Gambar 3 menunjukkan permitivitas air semakin menurun seiring dengan semakin meningkatnya frekuensi. Frekuensi 1 hingga 8 GHz dan frekuensi diatas 100 GHz dari bagian real tersebut menunjukkan nilai redaman yang cukup konstan. Sedangkan permitivitas air mengalami penurunan nilai redaman yang sangat drastis pada frekuensi 8 hingga 100 GHz.

Berbeda dengan bagian real, bagian imajiner dari permitivitas air kompleks pada Gambar 4 menunjukkan nilai yang semakin meningkat mulai dari frekuensi 1 GHz hingga frekuensi sekitar 20 GHz. Permitivitas air kompleks kemudian mengalami penurunan yang cukup drastis dari frekuensi sekitar 20 GHz sampai 1 THz. Pada frekuensi sekitar 20 GHz, permitivitas air bagian imajiner menunjukkan nilai paling besar pada semua suhu antara 0 – 30°C seperti hasil yang disimulasikan.

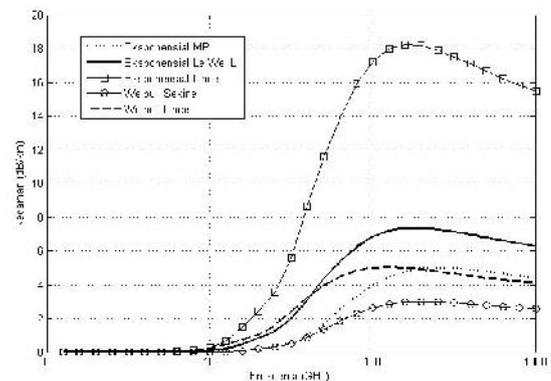
B. Besar Redaman Hujan Menggunakan Metode Spesifik

1) Pada curah hujan tinggi



Gambar 5 Redaman hujan dengan metode spesifik pada DSD untuk curah hujan 75 mm/jam, T=25°C, dan Q=32

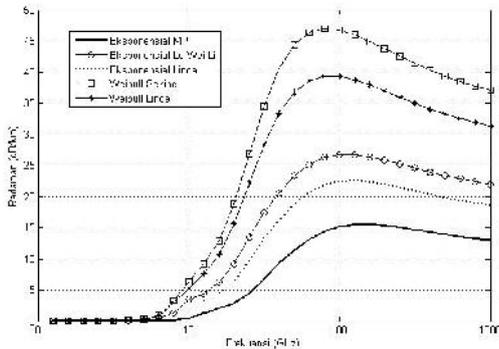
2) Pada curah hujan rendah



Gambar 6 Redaman hujan dengan metode spesifik pada DSD untuk curah hujan 4 mm/jam, T=25°C, dan Q=32

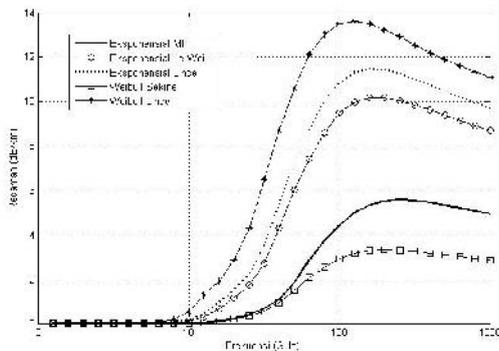
C. Besar Redaman Hujan Menggunakan Metode Analitik

1) Pada curah hujan tinggi



Gambar 7 Redaman hujan dengan metode analitik pada DSD untuk curah hujan 75 mm/jam, T=25°C, dan Q=32

2) Pada curah hujan rendah



Gambar 8 Redaman hujan dengan metode analitik pada DSD untuk curah hujan 4 mm/jam, T=25°C, dan Q=32

IV KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan pada penelitian ini, diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Nilai redaman yang terjadi pada gelombang elektromagnetik bergantung pada tinggi rendahnya curah hujan dan frekuensi kerja gelombang tersebut. Semakin tinggi curah hujan dan frekuensi, maka semakin besar nilai redamannya.
2. Redaman terbesar yang dialami gelombang pada curah hujan antara 0.25 hingga 150 mm/jam terjadi pada frekuensi 100 hingga 200 GHz. Redaman akan semakin kecil diatas batas frekuensi tersebut.
3. Pada curah hujan rendah, titik hujan yang memiliki radius besar jumlahnya lebih sedikit daripada pada curah hujan tinggi. Sebaliknya, pada curah hujan tinggi titik hujan yang memiliki radius besar jumlahnya lebih banyak daripada pada curah hujan rendah.
4. Redaman yang disebabkan oleh hujan mulai berpengaruh pada frekuensi 10 GHz dan mengalami nilai tertinggi pada frekuensi antara 100 hingga 200 GHz. Misalnya pada model DSD Eksponensial Lince

pada curah hujan 75 mm/jam dan pada suhu 25°C, besar redamannya adalah 63.6 dB/km.

5. Metode yang paling valid dalam perhitungan besar redaman hujan pada curah hujan tinggi dengan metode analitik adalah metode DSD Weibull Sekine.
6. Model perhitungan yang paling sesuai dengan hasil perhitungan menggunakan metode analitik adalah model DSD Eksponensial Marshall-Palmer. Grafik kedua metode tersebut dapat dilihat pada grafik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Morrison and M.J. Cross, "Scattering of a plane electromagnetic wave by axisymetrics raindrops," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 53, no. 6, July-Aug. 1974, pp.955-1019.
- [2] Markis, Lince, "Karakteristik Distribusi Ukuran Titik Hujan dan Penggunaannya dalam Prediksi Redaman Hujan pada Sistem Komunikasi Gelombang Milimeter." Tesis Jurusan Teknik Elektro ITS, 2007.
- [3] Kanellopoulos J.D, Koukolas S.G., "Outage Performance Analysis of Route Diversity Systems of Cellular Structure, *Radio science Vol.26, Number 4*, 1991, hal.891-899.
- [4] Setijadi, E., Matsushima, A., Tanaka, N., Hendrantoro, G., "Effect of Temperature and Multiple Scattering on Rain Attenuation of Electromagnetic Waves by a Simple Spherical Model." *PIER 99*, 339-354, 2009.
- [5] Amrullah, Fikih F., "Validasi Model Redaman Hujan pada Daerah Tropis dengan Efek *Multiple Scattering* menggunakan Ukuran Titik Hujan Berdistribusi Eksponensial dan Weibull", 2010.
- [6] M.N.O. Sadiku, *3rd edition Numerical Techniques in Electromagnetics with MATLAB*, Texas, U.S.A: Prairie View A&M University, 2009.
- [7] Liebe, H. J., G. A. Hufford, and T. Manabe, "A Model for The Complex Permittivity of Water at Frequencies Below 1THz," *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, Vol. 12, No. 7, 659-675, 1991.
- [8] Marshall, J. S. and Palmer, W. M., "The distribution of raindrops with size," *J. Meteorology*, Vol. 5, 165-166, 1948.
- [9] Seybold. John S. *Introduction to RF Propagation*. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc; 2005. Hal.218.
- [10] Yeo, Tat Soon., Pang-Shyan Kooi, Mook-Seng Leong, Le-Wei Li, " Tropical Raindrop Size Distribution for the Prediction of Rain Attenuation of Microwaves in the 10-40 GHz Band." *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*. VOL. 49. NO. 1 Januari 2001.
- [11] Tsolakis, A. I. dan W. L. Stutzman, "Multiple Scattering of Electromagnetic Waves by Rain," *Radio Science*, Vol. 17, No. 6, 1495-1502, 1982.
- [12] H.C. Van de Hulst, *Light Scattering of Small Particles*. New York: John Wiley, 1957, pp. 28-37, 114-136, 284.
- [13] D.E. Setzer, "Computed transmission through rain at microwave and visible frequencies," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 49, no. 8, Oct. 1970, pp. 1873-1892.