

# Analisis Komputasi Penyerapan Gelombang Elektromagnetik Oleh Titik Hujan dengan Menggunakan *Methods Of Moment*

Dika Oktavian P, Eko Setijadi dan Gamantyo H,

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: ekoset@ee.its.ac.id

**Abstrak**—Redaman hujan menjadi permasalahan yang cukup penting dalam propagasi elektromagnetik. Hal ini dikarenakan perkembangan teknologi telekomunikasi berkembang dengan sangat cepat yang ditandai dengan penggunaan frekuensi tinggi sampai dalam orde GHz, akibatnya adalah panjang gelombang menjadi semakin pendek dan dalam perjalanannya akan mudah terganggu, termasuk oleh hujan yang akan menimbulkan penghamburan dan penyerapan gelombang elektromagnetik.

Pada penelitian ini dilakukan simulasi sebuah titik hujan berbentuk *spherical* dengan permitivitas imajiner yang didapat dari penelitian sebelumnya dengan menggunakan metode momen yang hasilnya akan dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya. Pada langkah awal penelitian akan dibentuk sebuah *cubic sphere* berbentuk *spherical* lalu menentukan koordinat pusat tiap cell dan menggunakan metode momen untuk menyelesaikannya.

Berdasarkan analisa hasil komputasi didapatkan hasil bahwa pada frekuensi 30 GHz, untuk titik hujan berukuran 1mm & 2mm dengan *cubic sphere* berukuran 0.25 mm, rata – rata daya yang terserap secara berurutan adalah 2.77 dBm dan 6.87 dBm. Pengukuran lain dilakukan dengan *cubic sphere* berukuran 0.5mm dan diperoleh rata – rata daya yang terserap secara berurutan adalah 3.40 dBm dan 6.13 dBm. Pada frekuensi 300GHz, titik hujan berukuran 1mm & 2mm dengan *cubic sphere* berukuran 0.25mm, rata – rata daya yang terserap secara berurutan adalah 2.38 dBm dan 0.68 dBm. Pengukuran lain dilakukan dengan *cubic sphere* berukuran 0.5mm dan diperoleh rata – rata daya yang terserap secara berurutan adalah 15.58 dBm dan 5.51 dBm.

**Kata Kunci**—Metode Momen, Redaman hujan, *Scattering* dan *absorption*, *Spherical*.

## I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi telekomunikasi berkembang dengan sangat cepat termasuk dalam komunikasi nirkabel (*wireless*). Dengan adanya penggunaan frekuensi tinggi sampai dalam orde GHz, maka pengiriman data informasi seperti layanan internet, digital video, audio broadcasting dan *video conference* bisa berlangsung dengan sangat baik karena gelombang ini dapat mengirimkan data informasi dengan bit rate tinggi [1].

Pada komunikasi Ka-Band misalnya, dengan orde frekuensi mencapai  $10^9$  hertz (Gigahertz) maka panjang gelombang menjadi semakin pendek dan hal itu membuat mudah terganggu oleh masalah dalam perjalanannya termasuk

hujan, sehingga masalah hujan menjadi masalah penting untuk diperhitungkan. Dampak yang timbul dari fenomena ini adalah menurunnya kualitas komunikasi yang dapat berbentuk melemahnya penerimaan sinyal, gangguan antar saluran pada sistem polarisasi ganda, atau gangguan dari sistem komunikasi lain yang menggunakan daerah spektrum yang sama. Diantara semua gangguan pada sistem komunikasi tersebut, redaman adalah hal yang paling berpengaruh pada kualitas komunikasi terlebih pada penggunaan *micro wave* dan *millimeter wave*. Pada penggunaan frekuensi diatas 10 GHz akibat dari redaman hujan menjadi hal yang cukup signifikan untuk diperhitungkan [2].

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.

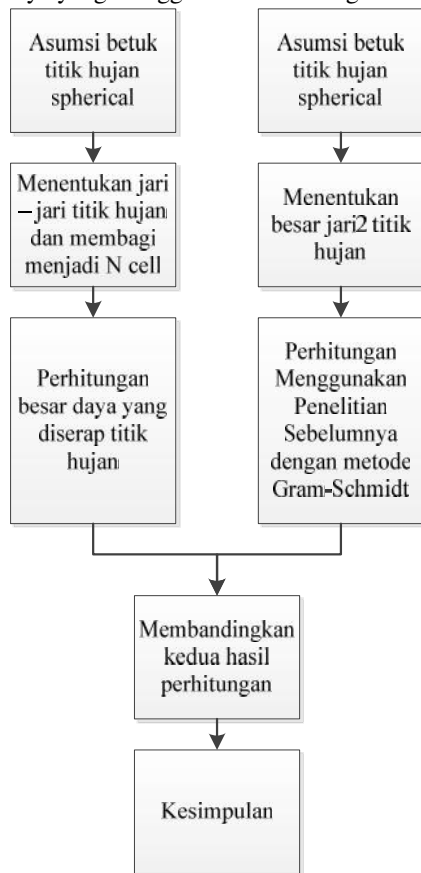
Selanjutnya, untuk mengetahui seberapa besar redaman yang dihasilkan oleh titik hujan yang terjadi digunakan sebuah metode yang sudah sering digunakan dalam menyelesaikan permasalahan di bidang elektromagnetik, yaitu *Methods of Moment* (MOM). Selanjutnya, besar redaman yang diperoleh dengan metode ini akan dibandingkan dengan penelitian sebelumnya dimana dengan penggunaan metode ini dapat mempermudah perhitungan dalam mengetahui besar redaman yang diakibatkan oleh air hujan.

## II. METODE PENELITIAN

### A. Metodologi Penelitian

Tahap metodologi pada penelitian ini pada tahap pertama dilakukan asumsi bahwa bentuk titik hujan yang akan diteliti berbentuk *spherical*. Kemudian titik hujan yang berbentuk bola tersebut dibagi menjadi beberapa *cell* dengan menggunakan *cubic sphere*. Kemudian, digunakan metode momen untuk menentukan besar daya yang diserap oleh titik hujan tersebut. Hasil pengukuran menggunakan metode tadi akan dibandingkan hasilnya dengan hasil penelitian

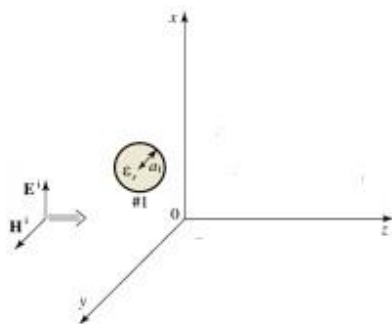
sebelumnya yang menggunakan metode gram-schmidt.



Gambar 1 Metodologi penelitian

**B. Analisa menggunakan Metode Momen**

Kita misalkan terdapat sebuah materi yang bentuknya tidak beraturan dengan parameter pokok  $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$  yang dilewati oleh sebuah gelombang electromagnetik (*incident field*). Pada penelitian ini materi yang dimaksud adalah titik hujan berbentuk *spherical* dimana jari jari semimayor dan semiminor memiliki besar yang sama [3].



Gambar 2 Bentuk titik hujan bola spherical [3]

Gambar 2 merupakan sebuah ilustrasi dari sebuah gelombang datang yang berpolarisasi di sumbu x dengan arah rambat pada sumbu z. Arus yang diinduksi di dalam materi menimbulkan  $E^s$  (*Scattered field*), yang dapat diperhitungkan

dengan mengganti material dengan kepadatan yang setara dengan kepadatan ruang bebas saat ini [3].  $J_{eq}$  yang dituliskan sebagai persamaan :

$$J_{eq}(\mathbf{r}) = (\sigma(\mathbf{r}) + j\omega[\epsilon(\mathbf{r}) - \epsilon_0])\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \tau(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (1)$$

Dari persamaan  $J_{eq}$  kita bisa mendapatkan *scattered field*  $E^s$  dan  $H^s$  dengan menyelesaikan persamaan Maxwell berikut :

$$\nabla \times \mathbf{E}^s = -\mathbf{J}_{eq} - j\omega\mathbf{H}^s \quad (2a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}^s = j\omega\mathbf{E}^s \quad (2b)$$

Dan diperoleh hasil :

$$\mathbf{E}^s = -j\omega \left[ 1 - \frac{1}{k_0^2} \nabla \nabla \cdot \right] \mathbf{A} \quad (3a)$$

$$\mathbf{H}^s = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A} \quad (3b)$$

Dimana nilai

$$\mathbf{A} = \mu_0 \int_v G_o(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}_{eq}(\mathbf{r}') dv' \quad (4)$$

dan

$$G_o(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{e^{-jk_0|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \quad (5)$$

Jika  $G_{ox}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$  adalah medan listrik yang dihasilkan *elementary source* maka solusinya adalah sebagai berikut :

$$G_{ox}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = -j\omega\mu_0 \left( 1 + \frac{1}{k^2} \nabla \nabla \cdot \right) G_o(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \quad (6)$$

Berkaitan dengan nilai  $J_{eq}$  yang sangat kecil sekali diperoleh persamaan akhir yaitu :

$$\mathbf{E}^s(\mathbf{r}) = PV \int_v \mathbf{J}_{eq}(\mathbf{r}') \cdot \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dv' - \frac{\mathbf{J}_{eq}(\mathbf{r})}{j3\omega\epsilon_0} \quad (7)$$

Total medan listrik dalam material adalah penjumlahan  $E^i$  dan  $E^s$  yaitu

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}^i(\mathbf{r}) + \mathbf{E}^s(\mathbf{r}) \quad (8)$$

Dan menghasilkan persamaan integral tensor (TIE) untuk

$$\mathbf{E}(\mathbf{r})$$

$$\left[ 1 + \frac{\tau(\mathbf{r})}{3j\omega\epsilon_0} \right] \mathbf{E}(\mathbf{r}) - PV \int_v \tau(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') \cdot \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dv' = \mathbf{E}^i(\mathbf{r}) \quad (9)$$

Dimana  $\tau(\mathbf{r}) = \sigma(\mathbf{r}) + j\omega[\epsilon(\mathbf{r}) - \epsilon_0]$  dan kita sudah mengetahui nilai dari  $E^i$ . Total medan listrik  $E$  dalam materi tidak diketahui dan harus ditentukan dengan MOM. Untuk mencari nilai  $E$  digunakan persamaan :

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \begin{bmatrix} G_{xx}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') & G_{xy}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') & G_{xz}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \\ G_{yx}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') & G_{yy}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') & G_{yz}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \\ G_{zx}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') & G_{zy}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') & G_{zz}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x(\mathbf{r}') \\ E_y(\mathbf{r}') \\ E_z(\mathbf{r}') \end{bmatrix} \quad (10)$$

Jika kita misalkan  $x_1 = x$ ,  $x_2 = y$ ,  $x_3 = z$ , maka dapat kita tulis :

$$G_{x_p x_q}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = -j\omega\mu_0 \left[ \delta_{pq} + \frac{1}{k_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_q \partial x_p} \right] G_o(\mathbf{r}, \mathbf{r}'), \quad p, q = 1, 2, 3 \quad (11)$$

Kita membagi materi (dalam hal ini titik hujan) menjadi  $N$  subvolume atau cell, yang dinotasikan sebagai  $v_m$  ( $m = 1, 2, \dots, N$ ) dan mengasumsikan  $\mathbf{E}(\mathbf{r})$  dan  $\tau(\mathbf{r})$  konstan didalam setiap cell. Jika  $\mathbf{r}_m$  adalah pusat dari cell ke- $m$ , maka setiap komponen skalar pada bisa diselesaikan pada titik  $\mathbf{r}_m$  dan menghasilkan [4] :

$$\left[ 1 + \frac{\tau(\mathbf{r})}{3j\omega\epsilon_0} \right] E_{x_p}(\mathbf{r}_m) - \sum_{q=1}^3 \left[ \sum_{q=1}^3 \tau(\mathbf{r}_n) PV \int_{v_m} G_{x_p x_q}(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}') dv' \right] E_{x_q}(\mathbf{r}_n) \quad (12)$$

yang pada akhirnya menghasilkan :

$$[G][E] = -[E'] \quad (13)$$

Dimana [G] adalah matriks  $3N \times 3N$ , [E] dan [E'] adalah matriks kolom  $3N$ .

Meskipun matiks [E'] diketahui disaat nilai matiks [E] akan ditentukan, namun elemen dari matriks [G] masih belum diperhitungkan. Untuk elemen  $[G_{x_p x_q}]$  yang bukan diagonal utama dari matriks,  $\mathbf{r}_m$  tidak ada pada cell ke- $n$  ( $\mathbf{r}_m$  tidak ada di  $v_n$ ) sehingga  $[G_{x_p x_q}](\mathbf{r}_m, \mathbf{r}')$  kontinyu di  $v_n$  dan nilai PV bisa dibuang.

$$G_{x_p x_q}^{mn} = \tau(\mathbf{r}_n) \int_{v_n} G_{x_p x_q}(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}') dv', \quad m \neq n \quad (14)$$

Sebagai perkiraan pertama,

$$G_{x_p x_q}^{mn} = \tau(\mathbf{r}_n) G_{x_p x_q}(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}') \Delta v_n, \quad m \neq n \quad (15)$$

Dimana  $\Delta v_n$  adalah volume dari cell  $v_n$ . Sehingga didapatkan

$$G_{x_p x_q}^{mn} = \frac{-j\omega\mu k_0 \Delta v_n \tau(\mathbf{r}_n) \exp(-j\alpha_{mn})}{4\pi\alpha_{mn}^3} \left[ (\alpha_{mn} - 1 - j\alpha_{mn}) \delta_{pq} + \cos\theta_{x_p}^{mn} \cos\theta_{x_q}^{mn} (3 - \alpha_{mn}^2 + 3j\alpha_{mn}) \right], \quad m \neq n \quad (16)$$

Dimana,

$$\alpha_{mn} = k_0 R_{mn}, \quad R_{mn} = |\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n|,$$

$$\cos\theta_{x_p}^{mn} = \frac{x_p^m - x_p^n}{R_{mn}}, \quad \cos\theta_{x_q}^{mn} = \frac{x_q^m - x_q^n}{R_{mn}},$$

$$\mathbf{r}_m = (x_1^m, x_2^m, x_3^m), \quad \mathbf{r}_n = (x_1^n, x_2^n, x_3^n)$$

Untuk bagian diagonal ( $m = n$ ) persamaan menjadi

$$G_{x_p x_q}^{nn} = \tau(\mathbf{r}_n) PV \int_{v_n} G_{x_p x_q}(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}') dv' - \delta_{pq} \left[ 1 + \frac{\tau(\mathbf{r})}{3j\omega\epsilon_0} \right] \quad (17)$$

Untuk menghitung persamaan integral diatas, kita perkiraan cell  $v_n$  sebagai bola berjari – jari  $a_n$  berpusat di  $\mathbf{r}_n$ , sehingga

$$a_n = \left( \frac{3\Delta v}{4\pi} \right)^{1/3} \quad (18)$$

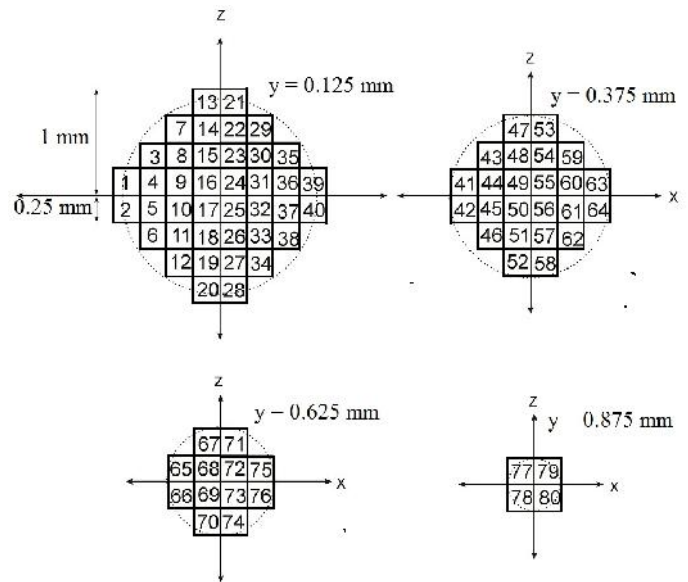
setelah perhitungan yang panjang kita mendapat

$$G_{x_p x_q}^{nn} = \delta_{pq} \left[ \frac{-2j\omega\mu k_0 \tau(\mathbf{r}_n)}{3k_0^3} (\exp(-jk_0 a_n) (1 + jk_0 a_n) - 1) - \left( 1 + \frac{\tau(\mathbf{r}_n)}{3j\omega\epsilon_0} \right) \right], \quad m = n \quad (19)$$

### III. HASIL SIMULASI DAN ANALISA

#### A. Hasil Komputasi titik hujan berbentuk Spherical

Kegiatan awal yang akan dilakukan adalah melakukan komputasi dengan menggunakan titik hujan berbentuk spherical yang memiliki jari – jari mulai dari 1mm, dan 2mm. Titik hujan berbentuk spherical ini nantinya akan dibuat modelnya dengan cubic sphere yang ukuran sisinya bervariasi yaitu 0.25mm dan 0.5mm. Komputasi ini nantinya akan menggunakan frekuensi sebesar 30 GHz dan 300 GHz karena sudah dijelaskan di bab sebelumnya bahwa redaman oleh titik hujan akan menjadi hal yang cukup signifikan dan diperhitungkan pada frekuensi diatas 10 GHz.



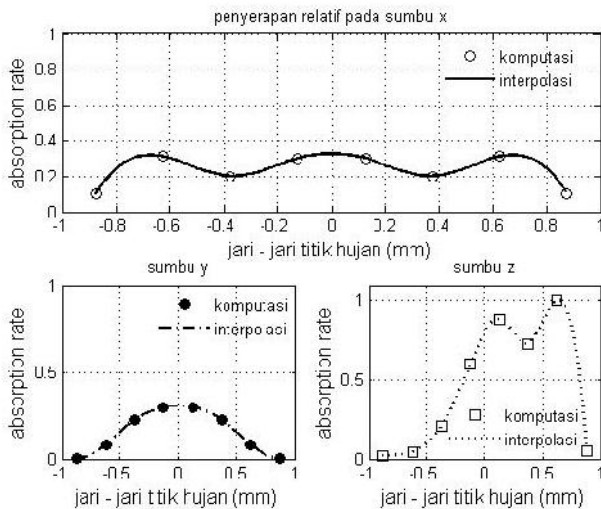
Gambar 3 Geometri dan dimensi dari model spherical titik hujan berjari – jari 1mm yang terbuat dari 80 cell

Gambar 3 merupakan geometri dan dimensi dari sebuah titik hujan yang dibentuk menggunakan 80 cell atau cubic sphere yang berukuran 0.25mm. Selain untuk mengetahui pusat dari setiap cell gambar tersebut juga berfungsi sebagai penomoran cell yang nantinya akan digunakan di dalam program matlab 7.6.

Semua grafik yang akan ditampilkan berikut ini merupakan hasil dari simulasi menggunakan matlab 7.6. Berikut penjelasan mengenai grafik yang akan ditampilkan:

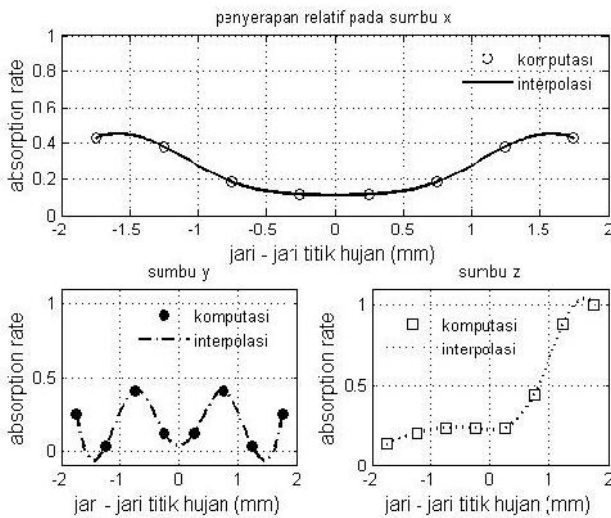
- Absorption rate adalah redaman yang terjadi pada titik pengamatan tertentu dibandingkan dengan redaman maksimum yang terjadi pada titik hujan

- Jari – jari titik hujan yang digunakan berukuran 1 mm dan 2 mm



Gambar 4 Grafik hasil simulasi bentuk *spherical*. Ukuran *cubic sphere* adalah 0.25 mm dengan titik hujan berukuran  $r = 1$  mm.

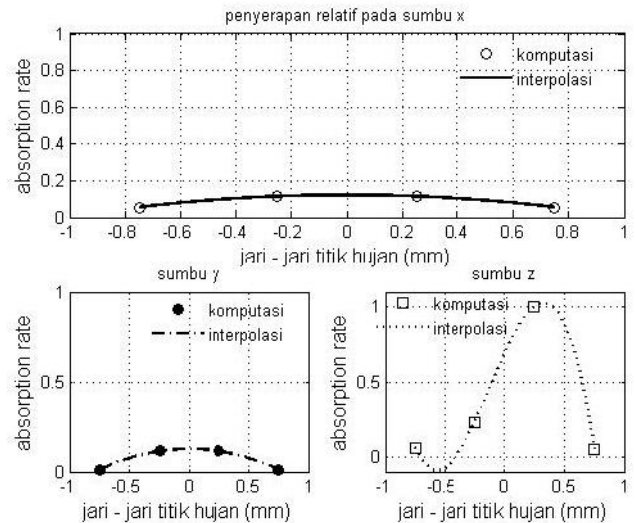
Pada Gambar 4, didapatkan bahwa pada frekuensi 30 GHz dengan jari – jari titik hujan 1 mm dan ukuran *cubic sphere* adalah 0.25 mm rata – rata daya yang terserap adalah sebesar  $0.1265 \text{ mW/mm}^3$  atau sebesar 2.77 dBm dengan perbandingan rata – rata redaman yang diperoleh pada penelitian sebelumnya adalah sebesar 2.99 dBm. Dari ini didapat kesimpulan bahwa besar redaman yang terjadi sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya. Waktu komputasi yang dibutuhkan adalah 1.3 detik



Gambar 5 Grafik hasil simulasi bentuk *spherical*. Ukuran *cubic sphere* adalah 0.25 mm dengan titik hujan berukuran  $r = 2$  mm

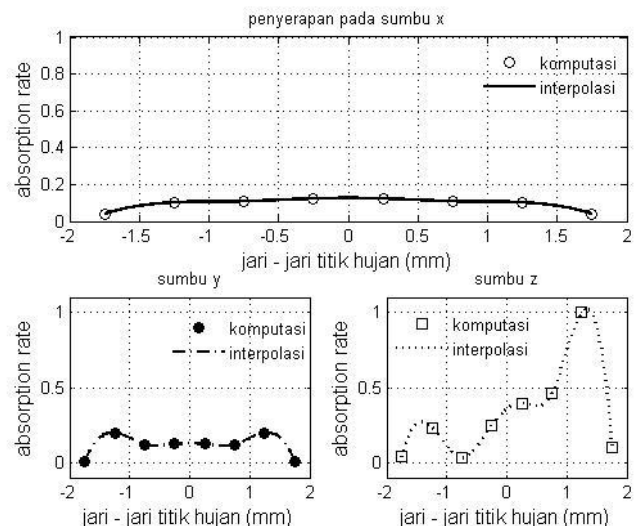
Pada simulasi yang kedua dengan menggunakan jari – jari titik hujan berukuran 2 mm dan ukuran *cubic sphere* dan frekuensi yang sama, rata – rata dapat menyerap daya sebesar  $0.1453 \text{ mW/mm}^3$  atau sebesar 6.87 dBm. Jika kita bandingkan dengan penelitian sebelumnya redaman yang diperoleh adalah sebesar 12.56 dBm. Terdapat perbedaan yang sangat signifikan sehingga dapat disimpulkan hasil komputasi tidak

sesuai dengan penelitian sebelumnya. Waktu komputasi yang dibutuhkan adalah 22.3 detik.



Gambar 6. Grafik hasil simulasi bentuk *spherical*. Ukuran *cubic sphere* adalah 0.5 mm dengan titik hujan berukuran  $r = 1$  mm

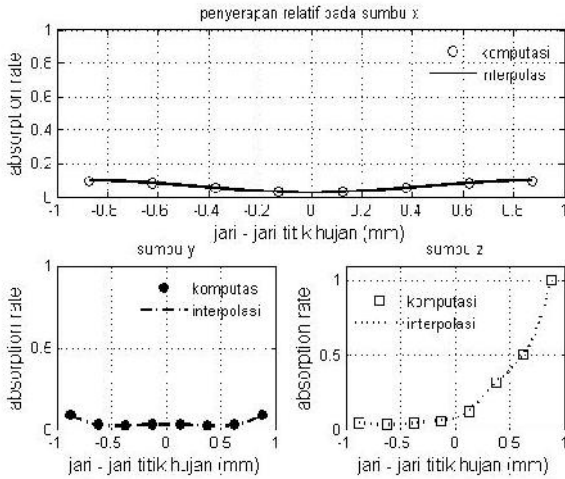
Pada Gambar 6, didapatkan bahwa pada frekuensi 30 GHz dengan jari – jari titik hujan 1 mm dan ukuran *cubic sphere* adalah 0.5 mm diperoleh hasil penyerapan daya rata – rata oleh titik hujan sebesar  $0.0845 \text{ mW/mm}^3$  atau sebesar 3.40 dBm, sedangkan pada penelitian sebelumnya diperoleh redaman sebesar 2.99 dBm. Terlihat bahwa hasil yang diperoleh mendekati hasil penelitian sebelumnya namun tingkat akurasinya lebih baik saat menggunakan *cubic sphere* yang lebih kecil. Waktu komputasi yang dibutuhkan adalah 0.7 detik.



Gambar 7 Grafik hasil simulasi bentuk *spherical*. Ukuran *cubic sphere* adalah 0.5 mm dengan titik hujan berukuran  $r = 2$  mm

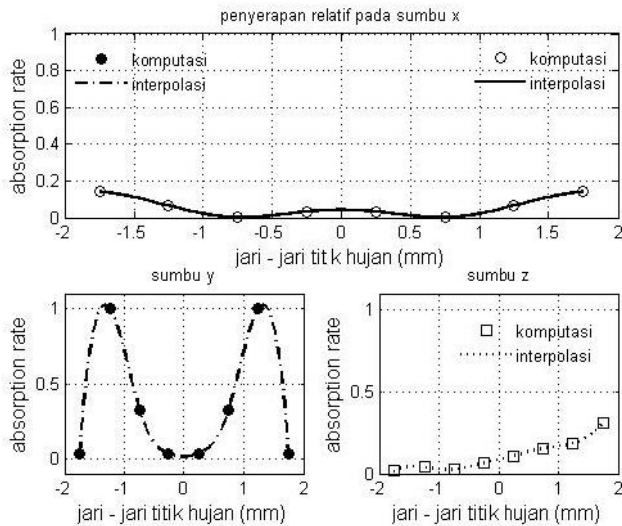
Pada simulasi yang ditunjukkan pada gambar 7 dengan menggunakan frekuensi 30GHz, rata – rata dapat menyerap daya sebesar sebesar  $0.1226 \text{ mW/mm}^3$  atau sebesar 6.13 dBm sedang besar redaman yang diperoleh pada penelitian sebelumnya adalah sebesar 12.56 dBm. . Jika kita bandingkan dengan penelitian sebelumnya redaman yang diperoleh adalah

sebesar 12.56 dBm. Terdapat perbedaan yang signifikan sehingga dapat disimpulkan hasil komputasi tidak sesuai dengan penelitian sebelumnya. Waktu komputasi yang dibutuhkan adalah 1.4 detik.



Gambar 8 Grafik hasil simulasi bentuk *spherical*. Ukuran cubic sphere adalah 0.25 mm dengan titik hujan berukuran  $r = 1$  mm. Frekuensi 300 GHz

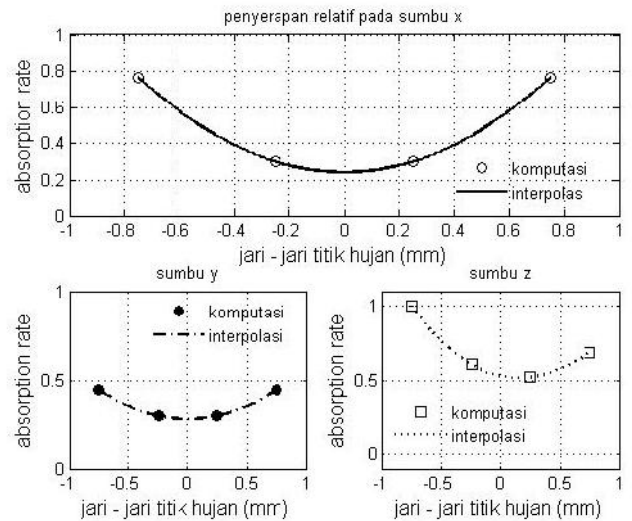
Dari simulasi yang diperlihatkan gambar 8 didapat bahwa rata – rata daya yang terserap adalah sebesar  $0.0516 \text{ mW/mm}^3$  atau sebesar 2.38 dBm. Jika kita bandingkan dengan penelitian sebelumnya redaman yang diperoleh adalah sebesar 3.48 dBm. Dari ini didapat kesimpulan bahwa besar redaman yang terjadi sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya. Waktu komputasi yang dibutuhkan adalah 1.5 detik.



Gambar 9 Grafik hasil simulasi bentuk *spherical*. Ukuran cubic sphere adalah 0.25 mm dengan titik hujan berukuran  $r = 2$  mm. Frekuensi 300 GHz

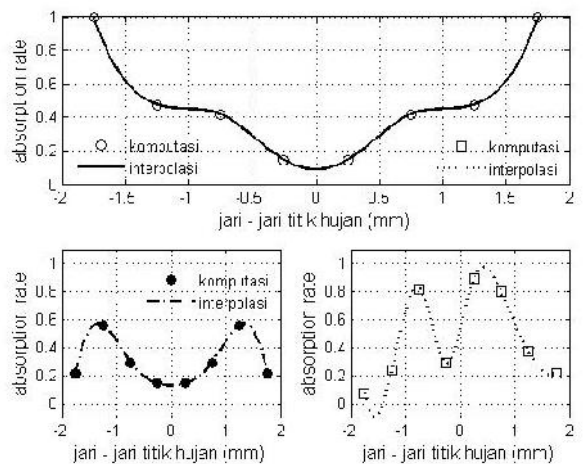
Pada gambar 9 hasil simulasi menunjukkan titik hujan rata – rata menyerap daya yang dipancarkan oleh gelombang elektromagnetik sebesar  $0.0350 \text{ mW/mm}^3$  atau sebesar 0.68 dBm. Jika kita bandingkan dengan penelitian sebelumnya redaman yang diperoleh sebesar 10.28 dBm. Dapat disimpulkan terdapat perbedaan yang signifikan sehingga

dapat disimpulkan hasil komputasi tidak sesuai dengan penelitian sebelumnya. Waktu komputasi yang dibutuhkan adalah 25.4 detik.



Gambar 10 Grafik hasil simulasi bentuk *spherical*. Ukuran cubic sphere adalah 0.5 mm dengan titik hujan berukuran  $r = 1$  mm. Frekuensi 300 GHz

Hasil yang diperoleh adalah penyerapan daya rata – rata sebesar  $0.0036 \text{ mW/mm}^3$  atau 15.58 dBm. Jika kita bandingkan dengan penelitian sebelumnya redaman yang diperoleh adalah sebesar 3.48 dBm. Dapat disimpulkan terdapat perbedaan yang signifikan sehingga dapat disimpulkan hasil komputasi tidak sesuai dengan penelitian sebelumnya. Waktu komputasi yang dibutuhkan adalah 0.8 detik.



Gambar 11 Grafik hasil simulasi bentuk *spherical*. Ukuran cubic sphere adalah 0.5 mm dengan titik hujan berukuran  $r = 2$  mm. Frekuensi 300 GHz.

Dari simulasi tersebut tercatat dan besar rata – rata penyerapan daya yang terjadi adalah sebesar  $0.0084 \text{ mW/mm}^3$  atau sebesar 5.51 dBm. Jika kita bandingkan dengan penelitian sebelumnya redaman yang diperoleh adalah sebesar 10.28 dBm. Dapat disimpulkan terdapat perbedaan yang signifikan sehingga dapat disimpulkan hasil komputasi tidak sesuai

dengan penelitian sebelumnya. Waktu komputasi yang dibutuhkan adalah 1.6 detik.

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan pada penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa simulasi yang dilakukan dengan menggunakan titik hujan berjari – jari 1 mm dan frekuensi 30 GHz memiliki hasil yang sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan metode gram-schmidt. Namun, pada titik hujan berjari – jari 2 mm dalam frekuensi yang sama hasil yang diperoleh berbeda. Selanjutnya, komputasi dengan menggunakan frekuensi 300GHz dibutuhkan penelitian yang lebih lanjut karena hasil yang diperoleh sama sekali tidak menunjukkan kesesuaian dengan penelitian sebelumnya. Semakin besar jari – jari yang digunakan pada frekuensi 30 GHz besar daya yang diserap akan semakin meningkat. Namun, untuk titik hujan pada frekuensi yang lebih tinggi yaitu 300 GHz semakin besar jari – jari titik hujan daya yang diserap akan semakin kecil. Semakin kecil ukuran *cubic sphere* maka hasil komputasi akan semakin akurat. Namun, komputasi akan memerlukan waktu yang lebih lama dan memori komputer yang diperlukan akan semakin tinggi. Untuk titik hujan berukuran 2 mm hasil dari simulasi tidak sesuai dengan hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, namun untuk titik hujan berukuran 1 mm hasil simulasi menunjukkan kesesuaian dengan penelitian sebelumnya.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Markis, Lince, “Karakteristik Distribusi Ukuran Titik Hujan dan Penggunaannya dalam Prediksi Redaman Hujan pada Sistem Komunikasi Gelombang Milimeter.” Tesis Jurusan Teknik Elektro ITS, (2007).
- [2] Kanellopoulos J.D, Koukolas S.G., “Outage Performance Analysis of Route Diversity Systems of Cellular Structure, *Radio science Vol.26, Number 4*, (1991), 891-899.
- [3] 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.” *PIER99*, (2009) 339-354.
- [4] Sadiku, Matthew N.O ,Ph.D, “*Numerical Technique in Electromagnetics third edition*”, CRC Press, (2009).
- [5] Simon, R., Saunders. “*Antenna and Propagation for Wireless Communication.*” John Wiley & Sons. Ltd, (2007).