

Analisis Karakteristik Propagasi Gelombang Radio Pada Transmisi Satelit Ku-Band

Bernad Siadari¹, Miftadi Sudjai², Rina Pudji Astuti³

^{1,2} Fakultas Teknik Elektro dan Komunikasi IT Telkom, Bandung

Bnard_obsesi@yahoo.co.id¹, miftadi@yahoo.com²

Abstraksi

Perkembangan teknologi yang pesat saat ini menuntut ketersediaan layanan disetiap tempat dimanapun kita berada. Namun, untuk penerapannya sangatlah sulit, mengingat sangat sulit untuk menjangkau daerah-daerah yang terpencil. Sistem komunikasi satelit merupakan salah satu solusi yang tepat guna untuk memenuhi layanan komunikasi sampai ke daerah pelosok. Penggunaan frekuensi Ku-band merupakan salah satu solusi, mengingat sudah cukup banyaknya sistem komunikasi satelit yang menggunakan frekuensi C-band. Namun yang menjadi kendala frekuensi Ku-band adalah masih rentan terhadap redaman hujan dan rugi-rugi yang terdapat di atmosfer.

Penggunaan frekuensi Ku-band rentan terhadap redaman hujan dan rugi-rugi atmosfer bumi. Penggunaan frekuensi diatas 10 GHz beresiko untuk daerah dengan curah hujan yang tinggi, mengingat Ku-band bekerja pada 12 – 18 GHz. Selain itu, komposisi gas O₂, kristal es, dan uap air yang terdapat di lapisan atmosfer bumi memberikan pengaruh terhadap transmisi sinyal berupa *scintilasi* dan depolarisasi. Hal ini menyebabkan sinyal yang ditransmisikan akan mengalami redaman sehingga penerimaan daya di stasiun bumi jadi lebih kecil. Karena itu akan dilakukan perancangan dan simulasi pengaruh redaman karena pengaruh hujan, *scintilasi*, dan depolarisasi.

Dari hasil perancangan dan simulasi akan dianalisis pengaruh hujan, *scintilasi*, dan depolarisasi terhadap propagasi frekuensi Ku-band sehingga dapat diketahui apakah frekuensi Ku-band tersebut efektif digunakan dalam transmisi satelit di berbagai daerah.

Kata Kunci : Ku-band, scintilasi, depolarisasi, redaman hujan.

Abstract

Rapid technological developments now require the availability of services in every place where we are. However, for its application is extremely difficult, considering it is very difficult to reach isolated areas. Satellite communications system is one of the appropriate solution to fulfill the communication services to rural areas. The use of Ku-band frequencies is one solution, considering sufficient number of satellite communication system that uses C-band frequencies. However that a constraint Ku-band is still vulnerable to rain attenuation and losses in the atmosphere.

The use of Ku-band frequencies are vulnerable to rain attenuation and losses in the Earth's atmosphere. The use of frequencies above 10 GHz at risk for areas with high rainfall, considering the Ku-band work on the 12-18 GHz. In addition, the composition of O₂ gas, ice crystals and water vapor contained in a layer of Earth's atmosphere influence on signal transmission in the form of *scintillation* and depolarization. This causes the transmitted signal will experience damping so that the receiving power at the earth station became smaller. Because of that it will do the designing and simulating the damping effect due to the influence of rain, *scintillation*, and depolarization.

From the design and simulation results will be analyzed the effect of rain, *scintillation*, and depolarization of the Ku-band propagation so as to know whether the Ku-band frequencies are effectively used in satellite transmission in various region.

Key word : Ku-band, scintillation, depolarization, rain effect's

1. Pendahuluan

Telekomunikasi adalah suatu bidang yang tidak bisa terlepas dari kehidupan manusia. Setiap manusia butuh untuk saling berkomunikasi satu sama lain walaupun dipisahkan oleh jarak yang sangat jauh. Untuk melakukan hal tersebut, maka penting sekali untuk dibangun suatu hubungan telekomunikasi yang dapat menghubungkan setiap orang. Namun karena manusia menginginkan hubungan koneksi yang bersifat *mobile* dan bersifat *real time*, maka sangat sulit jika dibangun koneksi yang menggunakan kabel. Untuk mengatasi hal tersebut, salah satu yang menjadi solusinya adalah dengan menggunakan satelit.

Hingga saat ini, satelit digunakan tidak hanya digunakan untuk keperluan militer, meteorologi, dan penelitian, tetapi juga dilakukan untuk sebagai sarana untuk melakukan komunikasi untuk kepentingan komersial. Dalam masalah telekomunikasi, secara umum

satelit digunakan sebagai *repeater* gelombang yang dipancarkan oleh suatu stasiun bumi untuk diteruskan ke stasiun bumi lain. Untuk komunikasi tersebut, frekuensi yang digunakan adalah frekuensi dengan orde Giga Hertz supaya jangkauannya dapat lebih jauh.

Dalam perkembangannya hingga saat ini, khususnya di Indonesia, frekuensi yang digunakan untuk komunikasi satelit adalah frekuensi C-band dengan rentang 4 – 8 GHz. Yang menjadi kekhawatiran saat ini adalah akan habisnya *slot bandwidth* yang tersedia di rentang tersebut. Untuk mengatasinya, digunakan *slot* frekuensi lain yang juga mampu digunakan dalam komunikasi satelit yaitu frekuensi Ku-band dengan rentang 12 – 18 GHz (*IEEE Standard 521-2002*).

Tapi dalam penggunaan frekuensi ini, terdapat klemahannya yaitu rentan terhadap redaman hujan, *scintilasi*, dan depolarisasi yang sangat berpengaruh diatas penggunaan frekuensi 10 GHz. Jika terjadi hujan dalam

koneksi satelit Ku-band ini, maka kualitas koneksi antara stasiun bumi dan satelit akan menjadi buruk. Karena itu diperlukan cara untuk mengatasi redaman tersebut dalam kondisi cuaca terburuk.

Pada Tugas Akhir kali ini dianalisis dan dilakukan simulasi terhadap penggunaan frekuensi Ku-band pada sistem komunikasi satelit di beberapa kota di Indonesia dalam berbagai kondisi cuaca dimana bagian yang akan dianalisis yaitu redaman, *scintilasi*, dan depolarisasi. Sehingga pada akhirnya dapat ditentukan bagaimana cara mengatasi redaman yang terjadi untuk tetap mempertahankan kualitas komunikasi tetap baik.

2. Dasar Teori

2.1 Frekuensi Ku-Band

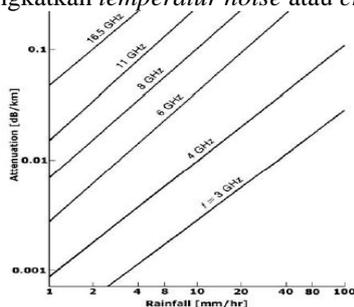
Frekuensi Ku-Band merupakan frekuensi kelas pertama dari frekuensi K-Band. Ku-band adalah bagian dari spektrum elektromagnetik dengan jarak frekuensi dalam gelombang mikro mencapai 11,7 hingga 12,7 GHz (frekuensi *downlink*) dan 14 hingga 14,5 GHz (frekuensi *uplink*). Simbol ini mengacu pada *K-under* yang dalam bahasa Jerman, *Kurz-unten* yang berarti frekuensinya berada dibawah pita frekuensi *K-band*.

Pita frekuensi Ku-band ini biasa digunakan untuk sistem komunikasi satelit. Ku-band juga digunakan untuk sinyal telepon dan layanan komunikasi bisnis. Pita frekuensi ini dibagi menjadi beberapa segmen yang berbeda-beda menurut wilayah geografis oleh *International Telecommunication Union (ITU)*.

2.2 Kekurangan Frekuensi Ku-Band

2.2.1. Redaman Hujan

Redaman akibat hujan merupakan redaman yang paling berpengaruh terhadap atenuasi atmosfer karena gelombang radio akan mengalami penyerapan dan *scattering* (penghamburan). Besarnya curah hujan tersebar tidak merata baik di berbagai tempat maupun waktu, dan redaman hujan ini dapat merusak *link* komunikasi satelit jika menggunakan frekuensi diatas 10 GHz serta meningkatkan *temperatur noise* atau *cross-polarisasi*.



Gambar 2.1 hubungan redaman hujan terhadap atenuasi pada berbagai frekuensi

Persentase jumlah curah hujan biasanya diakumulasikan dalam satu tahun. Secara umum, waktu dipresentasikan dengan p dan curah hujan disimbolkan dengan R_p . Maka atenuasi spesifik (α) dapat dituliskan :

$$\alpha = a R_p^b \text{ dB/km} \quad (2.1)$$

dimana a dan b bergantung pada frekuensi dan jenis polarisasi. Untuk nilai a dan b dapat dilihat dari tabel berikut :

Tabel 2.1 Koefisien redaman spesifik

Frequency, GHz	a_h	a_v	b_h	b_v
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.88
2	0.000154	0.000138	0.963	0.923
4	0.00065	0.000591	1.121	1.075
6	0.00175	0.00155	1.308	1.265
7	0.00301	0.00265	1.332	1.312
8	0.00454	0.00395	1.327	1.31
10	0.0101	0.00887	1.276	1.264
12	0.0188	0.0168	1.217	1.2
15	0.0367	0.0335	1.154	1.128
20	0.0751	0.0691	1.099	1.065
25	0.124	0.113	1.061	1.03
30	0.187	0.167	1.021	1

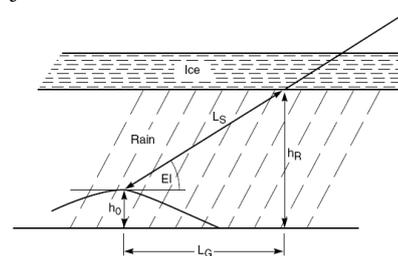
SOURCE: Ippolito, 1986, p. 46.

h dan v mengacu pada penggunaan polarisasi horizontal dan vertikal antenna.

Saat atenuasi spesifik telah ditentukan, maka atenuasi atau redaman hujan dapat ditentukan dengan :

$$A = \alpha L \text{ dB} \quad (2.2)$$

Dimana L adalah panjang lintasan efektif gelombang dalam hujan.



Gambar 2.2 Panjang lintasan melewati hujan

$$L_s = \frac{h_R - h_0}{\sin \theta} \quad (2.3)$$

Maka panjang lintasan efektif yang dipengaruhi oleh lintasan miring dapat dituliskan:

$$L = L_s r_p \quad (2.4)$$

Dimana r_p adalah faktor pengurangan yang merupakan fungsi dari persentase waku p dan L_G , proyeksi L_s terhadap sumbu horisontal. Maka hubungan antara L_s dan L_G :

$$L_G = L_s \cos \theta \quad (2.5)$$

Sedangkan untuk faktor pengurangan p dapat diperoleh dari tabel :

Tabel 2.2 Faktor pengurangan

For $p = 0.001\%$	$r_{0.001} = \frac{10}{10 + L_G}$
For $p = 0.01\%$	$r_{0.01} = \frac{90}{90 + 4L_G}$
For $p = 0.1\%$	$r_{0.1} = \frac{180}{180 + L_G}$
For $p = 1\%$	$r_1 = 1$

SOURCE: Ippolito, 1986.

Jika semua persamaan diatas digabungkan ke dalam sebuah persamaan, maka persamaan redaman hujan (dB) dapat ditentukan :

$$A_p = a R_p^b L_s r_p \text{ (dB)} \quad (2.6)$$

2.2.2. Pengaruh Lapisan Atmosfer

Penyerapan gelombang radio hasil dari perubahan tingkat energi rotasi molekul kuantum, dan terjadi pada frekuensi resonansi tertentu atau pita frekuensi sempit. Resonansi frekuensi interaksi tergantung pada tingkat energi energi rotasi awal dan akhir molekul. Komponen

utama dari atmosfer, dan persentase perkiraan volumenya adalah :

- Oksigen : 21 %
- Nitrogen : 78 %
- Argon : 0.9 %
- Karbondioksida : 0.1 %
- Uap air

Hanya oksigen dan uap air yang menyerap resonansi frekuensi pada pita frekuensi sampai pada 100 GHz untuk ruang komunikasi. Oksigen memiliki rangkaian garis serapan dekat frekuensi 60 GHz dan garis penyerapan terisolasi di 118.74 GHz. Uap air memiliki rangkaian garis pada 22.3 GHz, 183.3 GHz, dan 323.8 GHz.

2.2.3. Pengaruh Lapisan Ionosfer

Elektron bebas yang terdapat di lapisan ionosfer tidak terdistribusi secara *uniform* tetapi terdistribusi berdasarkan lapisan atmosfer. Selanjutnya, awan elektron (atau yang lebih dikenal dengan gangguan pergerakan ion) yang melewati lapisan ionosfer akan menaikkan fluktuasi sinyal. Efek yang ditimbulkan dapat berupa *scintillation*, penyerapan, variasi dalam arah kedatangan sinyal, *delay* propagasi, dispersi, perubahan frekuensi dan rotasi polarisasi. Semua efek yang terjadi semakin menurun seiring dengan mengecilnya ukuran frekuensi.

Tabel 2.4 Pengaruh propagasi dalam sistem komunikasi satelit

Propagation impairment	Physical cause	Prime importance
Attenuation and sky noise increases	Atmospheric gases, cloud, rain	Frequencies above about 10 GHz
Signal depolarization	Rain, ice crystals	Dual-polarization systems at C and Ku bands (depends on system configuration)
Refraction, atmospheric multipath	Atmospheric gases	Communication and tracking at low elevation angles
Signal scintillations	Tropospheric and ionospheric refractivity fluctuations	Tropospheric at frequencies above 10 GHz and low elevation angles; ionospheric at frequencies below 10 GHz
Reflection multipath, blockage	Earth's surface, objects on surface	Mobile satellite services
Propagation delays, variations	Troposphere, ionosphere	Precise timing and location systems; time-division multiple access (TDMA) systems
Intersystem interference	Ducting, scatter, diffraction	Mainly C band at present; rain scatter may be significant at higher frequencies

SOURCE: Brussard and Rogers, 1990.

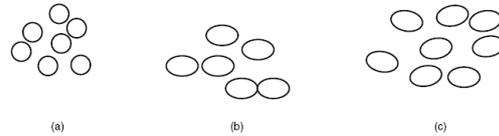
2.2.4. Depolarisasi

Sinyal yang dikirim dari satelit ke stasiun bumi atau sebaliknya akan melewati lapisan ionosfer, dan sangat memungkinkan untuk melewati lapisan es yang terdapat di bagian atas atmosfer dan hujan, sehingga dapat mengubah polarisasi dari gelombang yang dikirimkan. Komponen orthogonal yang dihasilkan oleh polarisasi gelombang yang ditransmisikan, dapat dikatakan sebagai depolarisasi. Depolarisasi ini dapat mengakibatkan interferensi dimana polarisasi dimaksudkan untuk memberikan isolasi sinyal, dalam hal berpengaruh terhadap *frequency reuse*.

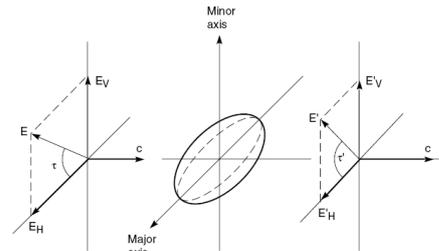
Depolarisasi terjadi dalam beberapa kejadian :

1. Depolarisasi hujan

Bentuk ideal dari partikel tetes hujan adalah bulat, karena ini meminimalkan energi (tegangan permukaan) yang dibutuhkan untuk menahan tetesan hujan untuk tetap bersama-sama..



Gambar 2.4 Tetes air hujan : (a) bulat kecil, (b) perataan akibat tahanan udara, (c) sudut kemiringan yang acak akibat pengaruh aerodinamika.



Gambar 2.5 Vektor polarisasi relatif terhadap sumbu utama dan kecil tetes hujan

Dari gambar 2.4 diketahui bahwa sudut polarisasi gelombang datang dari tetes hujan diubah relatif terhadap gelombang yang masuk ke tetes hujan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa depolarisasi yang diakibatkan oleh *differential phase shift* (pergeseran fase diferensial) lebih signifikan dibandingkan yang diakibatkan oleh *differential attenuation*.

Untuk polarisasi sirkular maka nilai dari $\tau = 45^\circ$. Seperti ditunjukkan sebelumnya, untuk transmisi satelit, sudut antara bidang referensi yang berisi arah propagasi dan lokal vertikal adalah fungsi yang rumit terhadap posisi, tetapi bagian umum berikut dapat diamati. Ketika medan listrik sejajar dengan tanah (horizontal), $\tau = 0$, istilah kedua tangan di sisi kanan dari persamaan untuk U_{dB} memberikan kontribusi sebesar 15 dB ke XPD , sedangkan dengan polarisasi melingkar kontribusi hanya sekitar 0,13 dB. Dengan vektor medan listrik yang berisi arah propagasi dan lokal vertikal, $\tau = 90^\circ - \theta$ (semua sudut dalam derajat), dan bentuk 4τ menjadi 40.

2. Depolarisasi es

Kristal es cenderung berbentuk seperti jarum dan pipih seperti piring dan secara acak memberikan efek yang kecil, namun depolarisasi terjadi ketika selaras. Peningkatan nilai XPD yang tiba-tiba bertepatan dengan kilatan petir yang dianggap sebagai hasil dari penyetaraan kilatan petir. Komite Konsultasi Radio Internasional (CCIR) merekomendasikan untuk memasukkan besar depolarisasi es dalam menentukan nilai yang pasti terhadap XPD yang dihitung untuk hujan. Untuk wilayah Amerika Utara direkomendasikan nilainya sebesar 2 dB, sedangkan untuk daerah kepulauan atau maritim direkomendasikan 4 – 5 dB, dan depolarisasi es dapat diabaikan untuk persen waktu kurang dari 0.1 persen (Ippolito, 1986).

2.2.5. Sintilasi

Scintillation atau sintilasi menggambarkan fluktuasi yang cepat dari parameter gelombang radio yang diakibatkan oleh ketidakteraturan dalam transmisi sinyal. Parameter sinyal dipengaruhi oleh :

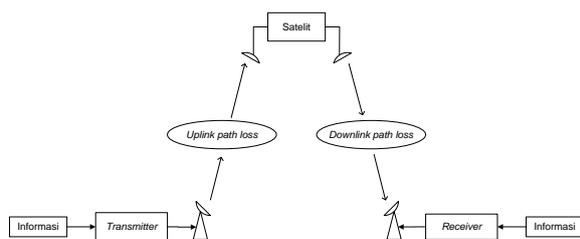
- Amplitudo
- Fasa
- Sudut datang
- Polarisasi

Efek sintilasi dapat terjadi pada lapisan ionosfer dan lapisan troposfer. Ketidakteraturan kerapatan elektron yang terjadi pada lapisan ionosfer dapat mempengaruhi frekuensi diatas 6 GHz, dan indeks bias yang tidak teratur terjadi pada lapisan troposfer menyebabkan sintilasi mempengaruhi frekuensi dibawah 3 GHz. Sintilasi karena lapisan troposfer dihasilkan oleh fluktuasi indeks bias pada beberapa kilometer dikarenakan gradien kelembaban dan suhu kalak lapisan.

Sifat umum indeks bias sudah sangat dikenal. Indeks bias radio atmosfer, atau indeks bias, n , pada *radio frequency* merupakan fungsi dari suhu, tekanan, dan uap air.

3. Pemodelan dan Simulasi

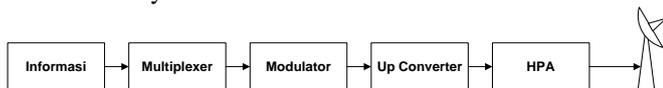
3.1. Pemodelan Sistem



Gambar 3.1 Sistem komunikasi satelit

Dalam Tugas Akhir ini, ada tiga bagian utama dalam pengamatan dan analisis. Adapun ketiga bagian itu adalah bagian stasiun bumi, *link* komunikasi, dan satelit.

Skema stasiun bumi yang digunakan dalam Tugas Akhir ini yaitu :



Gambar 3.3 Skema stasiun bumi pengirim (*transmitter*)

Adapun penjelasan setiap blok diagram ini adalah :

a. Informasi

Inputan data yang masuk pada sisi transmitter merupakan data digital biner '0' dan '1' secara acak sebanyak jumlah bit tertentu dimana probabilitas jumlah kemunculan bit '0' dan '1' sama besar. Pada pemrograman MATLAB, data biner dibangkitkan secara acak dengan menggunakan fungsi *randint*.

b. *Multiplexer*

Multiplexer atau disingkat MUX adalah alat atau komponen elektronika yang bisa memilih input (masukan) yang akan diteruskan ke bagian output (keluaran). Pemilihan input mana yang dipilih akan ditentukan oleh signal yang ada di bagian kontrol (kendali) Select.

c. Modulator

Modulator merupakan suatu blok yang berfungsi untuk memodulasikan sinyal inputan. Untuk didalam simulasi ini, akan menggunakan mapper BPSK (*Binnary Phase Shift Keying*).

d. *Up Converter*

Blok *up converter* ini digunakan untuk mengkonversikan penggunaan pita frekuensi dari frekuensi yang rendah (*intermediate frequency*) menjadi frekuensi tinggi (*radio frequency*).

e. HPA (*High Power Amplifier*)

High power amplifier merupakan bagian yang digunakan untuk memperkuat sinyal RF yang akan ditransmisikan.

3.2. Link Komunikasi

Dalam proses perjalanan sinyal dari pengirim ke satelit dan satelit ke penerima terjadi proses fluktuasi sinyal dikarenakan adanya redaman dari berbagai kondisi di atmosfer yakni redaman gas-gas, debu, es, redaman hujan, depolarisasi, dan sintilasi (*scintillation*). Dalam Tugas Akhir ini disimulasikan hanya tentang redaman hujan, depolarisasi, dan sintilasi. Namun dalam transmisi sinyal umumnya, selalu terdapat redaman *free space loss* dan AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) yang selain ketiga parameter yang dianalisis.

3.2.1 Free Space Loss

Free space loss merupakan redaman yang terjadi yang merupakan fungsi dari frekuensi dan jarak. Adapun rumus yang digunakan yaitu[3]:

$$L_{FSL} = 92,45 + 20 \log f_{(GHz)} + 20 \log d_{(km)} \quad (3.1)$$

Sehingga dapat diperoleh besarnya redaman :

a. *Uplink*

$F = 14$ GHz dan $d = 35786$ km sehingga dapat diperoleh $L_{FSL \text{ uplink}} = 206,68621204$ dB

b. *Downlink*

$F = 12$ GHz dan $d = 35786$ km sehingga dapat diperoleh $L_{FSL \text{ downlink}} = 205,34727625$

3.2.2 Redaman Hujan

Pemodelan redaman hujan ITU-R merupakan pemodelan yang diterima secara umum dalam memprediksi pengaruh hujan dalam sistem komunikasi. Parameter input yang dibutuhkan dalam pemodelannya :

- f : frekuensi kerja (GHz)
- θ : sudut elevasi terhadap satelit (derajat)
- φ : derajat lintang dari stasiun bumi, (derajat)
- τ : kemiringan sudut polarisasi terhadap sumbu horisontal (derajat)
- h_s : ketinggian stasiun bumi dari diatas permukaan laut (km)
- $R_{0,01}$: curah hujan daerah pengukuran sebesar 0.01% rata-rata dalam satu tahun

Adapun langkah-langkah dalam menentukan redaman hujan berdasarkan ITU-R adalah :

a. Tentukan curah hujan lokasi pengukuran stasiun bumi

$$h_R = h_o + 0.36 \text{ (km)} \quad (3.2)$$

h_o = ketinggian atmosfer tempat transisi antara hujan dan es

- b. Hitung panjang lintasan miring dan proyeksi terhadap sumbu horisontal

$$L_S = \begin{cases} \frac{(h_R - h_S)}{\sin \theta} & \text{untuk } \theta \geq 5^\circ \\ \frac{2(h_R - h_S)}{\left[(\sin \theta)^2 + \frac{2(h_R - h_S)}{R_e} \right]^{1/2} + \sin \theta} & \text{untuk } \theta < 5^\circ \end{cases} \quad (3.3)$$

h_R = ketinggian hujan (km)

h_S = ketinggian stasiun bumi diatas permukaan laut (km)

θ = sudut elevasi

R_e = jari-jari efektif bumi = 6378.14 km

Perhitungan hasil proyeksi horisontal :

$$L_G = L_S \cos \theta \quad (\text{km}) \quad (3.4)$$

- c. Tentukan curah hujan 0.01% rata-rata per tahun
Memperoleh tingkat curah hujan, $R_{0.01}$, ataupun melebihi 0.01% rata-rata setiap tahun untuk lokasi stasiun bumi tempat pengukuran.
- d. Hitung redaman spesifik

$$\gamma_R = k R_{0.01}^\alpha \quad (\text{dB/km}) \quad (3.5)$$

Besarnya k dan α merupakan koefisien regresi untuk menentukan redaman spesifik.

Tabel 3.1 Tabel koefisien regresi

Frequency (GHz)	k_H	k_V	α_H	α_V
1	0.0000259	0.0000308	0.9691	0.8592
2	0.0000847	0.0000998	1.0664	0.9490
4	0.0001071	0.0002461	1.6009	1.2476
6	0.007056	0.0004878	1.5900	1.5882
7	0.001915	0.001425	1.4810	1.4745
8	0.004115	0.003450	1.3905	1.3797
10	0.01217	0.01129	1.2571	1.2156
12	0.02386	0.02455	1.1825	1.1216
15	0.04481	0.05008	1.1233	1.0440
20	0.09164	0.09611	1.0586	0.9847
25	0.1571	0.1533	0.9991	0.9491
30	0.2403	0.2291	0.9485	0.9129
35	0.3374	0.3224	0.9047	0.8761
40	0.4431	0.4274	0.8673	0.8421
45	0.5521	0.5375	0.8355	0.8123
50	0.6600	0.6472	0.8084	0.7871
60	0.8606	0.8515	0.7656	0.7486
70	1.0315	1.0253	0.7345	0.7215
80	1.1704	1.1668	0.7115	0.7021
90	1.2807	1.2795	0.6944	0.6876
100	1.3671	1.3680	0.6815	0.6765

Untuk frekuensi 14 GHz, maka besarnya $k_V = 0.04157$ dan $k_H = 0.03782$ sedangkan besarnya $\alpha_V = 1.0957$ dan $\alpha_H = 1.1430$. Karena menggunakan polarisasi vertikal, maka untuk memperoleh besar k dan α untuk polarisasi sirkular digunakan rumus :

$$k = \frac{k_H + k_V + (k_H - k_V)(\cos \theta)^2 \cos 2\tau}{2} \quad (3.6)$$

$$\alpha = \frac{[k_H \alpha_H + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V)(\cos \theta)^2 \cos 2\tau]}{2k} \quad (3.7)$$

- e. Hitung faktor reduksi horisontal

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38(1 - e^{-2L_G})} \quad (3.8)$$

- f. Hitung faktor penyesuaian vertikal

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left[31 \left(1 - e^{-\frac{\theta}{1+\chi}} \right) \sqrt{\frac{L_R \gamma_R}{f^2}} - 0.45 \right]} \quad (3.9)$$

$$L_R = \begin{cases} \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta} \quad (\text{km}) & \text{untuk } \zeta > \theta \\ \frac{(h_R - h_S)}{\sin \theta} \quad (\text{km}) & \text{untuk } \zeta \leq \theta \end{cases} \quad (3.10)$$

$$\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{h_R - h_S}{L_G r_{0.01}} \right) \quad (\text{derajat}) \quad (3.11)$$

$$\chi = 36 - |\varphi| \quad (\text{derajat}) \quad \text{untuk } |\varphi| < 36 \quad (3.12)$$

$$\chi = 0 \quad \text{untuk } |\varphi| \geq 36$$

- g. Tentukan panjang lintasan efektif

$$L_E = L_R v_{0.01} \quad (\text{km}) \quad (3.13)$$

- h. Hitung redaman melebihi untuk 0,01% dari tahun rata-rata

$$A_p = \gamma_R L_E \quad (\text{dB}) \quad (3.14)$$

3.2.3 Sintilasi

ITU-R memberikan perumusan dan metode yang mudah dan efisien dalam memprediksi sintilasi atau *scintillation* troposfer karena pengaruh kondisi lingkungan.. Parameter ini biasanya mengacu pada intensitas sintilasi, dan dipengaruhi oleh parameter sistem dan lingkungan sebagai berikut :

- Ukuran dan efisiensi antena antenna
- Sudut elevasi antena
- Frekuensi kerja
- Temperatur rata-rata per bulan
- Kelembaban relatif rata-rata perbulan

Prosedur ITU-R ini sudah diuji pada rentang frekuensi antara 7 dan 14 GHz dan untuk sudut elevasi $\geq 4^\circ$. Parameter input dari untuk sintilasi ITU-R adalah sebagai berikut :

T : suhu ambient rata-rata permukaan ($^\circ\text{C}$) dalam periode sebulan atau lebih

H : kelembaban ambient relative permukaan (%) dalam periode sebulan atau lebih

F : frekuensi (4 GHz $\leq f \leq$ 20 GHz)

θ : sudut elevasi lintasan, dimana $\theta \geq 4$

D : diameter fisik (m) antenna stasiun bumi

η : efisiensi antena, jika tidak diketahui $\eta = 0,5$

Adapun langkah-langkah dalam menentukan sintilasi berdasarkan ITU-R adalah :

- a. Menghitung batas tekanan uap air

$$e_s = 6.1121 \exp \left(\frac{17.502 T}{T + 240.97} \right) \quad (\text{kPa}) \quad (3.15)$$

- b. Menghitung *wet term* dari refraksi radio

$$N_{\text{wet}} = \frac{3732 H e_s}{(273 + T)^2} \quad (3.16)$$

- c. Mengitung standar deviasi amplitudo sinyal

$$\sigma_{\text{ref}} = 3.6 \times 10^{-3} + N_{\text{wet}} \times 10^{-4} \quad \text{dB} \quad (3.17)$$

- d. Menghitung panjang efektif lintasan L

$$L = \frac{2 h_L}{\sqrt{\sin^2 \theta + 2.35 \times 10^{-4} + \sin \theta}} \quad \text{m} \quad (3.18)$$

- e. Menghitung diameter efektif antena

$$D_{\text{eff}} = \sqrt{\eta} D \quad \text{m} \quad (3.19)$$

- f. Menghitung factor antena rata-rata

$$g(x) = \sqrt{3.86 (x^2 + 1)^{11/12} \cdot \sin \left[\frac{11}{6} \arctan \left(\frac{1}{x} \right) \right] - 7.08 x^{5/6}} \quad (3.20)$$

$$x = 1.22 \frac{D_{\text{eff}}^2 f}{L} \quad (3.21)$$

Menghitung standar deviasi dari sinyal untuk periode dan jalur propagasi :

$$\sigma = \sigma_{\text{ref}} f^{7/12} \frac{g(x)}{(\sin \theta)^{1.2}} \quad (3.22)$$

- g. Menghitung faktor persentase waktu

$$a(p) = -0.061 (\log_{10} p)^3 + 0.072 (\log_{10} p)^2 - 1.71 \log_{10} p + 3 \quad (3.23)$$

- h. Menghitung *scintillation fade depth*

$$A_s(p) = a(p) \cdot \sigma \text{ dB} \quad (3.24)$$

Dalam perhitungan kanal sintilasi, terlebih dahulu ditentukan indeks sintilasi (S_4) setiap daerah, yang diperoleh berdasarkan besar redaman sintilasi atau *scintillation fade depth* dari hasil perhitungan. Untuk menentukan besarnya koefisien sintilasi, digunakan rumus berikut :

$$S_4 \cong P_{p-p}^{0.794} \quad (3.25)$$

Dimana : S_4 = indeks sintilasi
 P_{p-p} = fluktuasi *peak to peak* atau besarnya *scintillation fade depth*

3.2.4 Depolarisasi

ITU-R merekomendasikan pemodelan untuk depolarisasi yang mencakup depolarisasi hujan dan depolarisasi es. Yang menjadi parameter input dalam pemodelan depolarisasi ITU-R adalah :

- f : frekuensi kerja, dalam GHz
- θ : sudut elevasi stasiun bumi terhadap satelit, dalam derajat
- τ : kemiringan sudut polarisasi terhadap sumbu horisontal (derajat)
- A_p : redaman hujan, dalam dB

Metode yang dijelaskan disini adalah menghitung statistik *cross-polarization discrimination* (XPD) dari redaman hujan pada lintasan yang sama. Pemodelan ini valid untuk rentang frekuensi $8 \leq f \leq 35$ GHz dan $\theta \leq 60^\circ$. Adapun langkah-langkah dalam menghitung depolarisasi ini yaitu :

a. Hitung *frequency-dependent term*

$$C_f = 30 \log_{10} f \text{ (dB)} \quad (3.26)$$
 untuk $8 \leq f \leq 35$ GHz

b. Hitung *rain attenuation dependent term*

$$C_A = V(f) \log_{10} A_p \text{ (dB)} \quad (3.27)$$
 Dimana :

$$V(f) = 12.8f^{0.19} \text{ untuk } 8 \leq f \leq 20 \text{ GHz} \quad (3.28)$$

c. Hitung *polarization improvement factor*

$$C_\tau = -10 \log_{10} [1 - 0.484(1 + \cos(4\tau))] \text{ (dB)} \quad (3.29)$$

Nilai $C_\tau = 0$ untuk $\tau = 45^\circ$ dan memiliki nilai maksimum 15 dB untuk $\tau = 0^\circ$ atau 90° .

d. Hitung *elevation angle-dependent term*

$$C_\theta = -40 \log_{10}(\cos \theta) \text{ (dB)} \text{ untuk } \theta \leq 60^\circ \quad (3.30)$$

e. Hitung *canting angle dependent term*

$$C_\sigma = 0.0052\sigma^2 \text{ (dB)} \quad (3.31)$$

Dimana σ adalah standar deviasi efektif dari distribusi sudut *canting* hujan, yang dinyatakan dalam derajat; σ bernilai 0° , 5° , 10° dan 15° untuk besar $p = 1\%$, 0.1% , 0.01% , dan 0.001% secara berurutan.

f. Hitung XPD hujan yang tidak melebihi p%

$$XPD_{rain} = C_f - C_A + C_\tau + C_\theta + C_\sigma \text{ (dB)} \quad (3.32)$$

g. Hitung *ice crystal dependent term*

$$C_{ice} = XPD_{rain} \times \frac{(0.3 + 0.1 \log_{10} p)}{2} \text{ (dB)} \quad (3.33)$$

h. Hitung XPD hujan yang tidak melebihi p% termasuk efek es

$$XPD_p = XPD_{rain} - C_{ice} \text{ (dB)} \quad (3.34)$$

4. ANALISIS

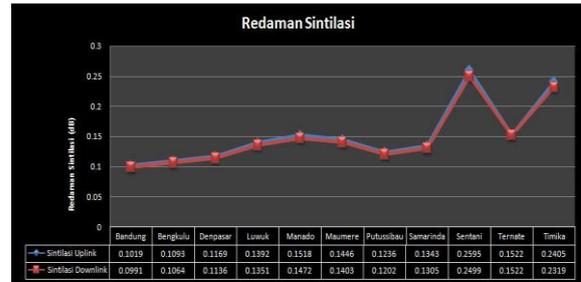
4.1 Sintilasi

Dari hasil simulasi maka dapat ditentukan sebagai berikut :

- a) Semakin besar diameter antenna stasiun bumi maka besarnya redaman sintilasi juga semakin besar
- b) Penggunaan frekuensi yang semakin besar akan meningkatkan redaman sintilasi
- c) Sudut elevasi yang semakin besar akan memperkecil redaman sintilasi
- d) Suhu yang semakin tinggi akan memperbesar redaman sintilasi
- e) Kelembaban yang semakin besar akan memperbesar redaman sintilasi

Sintilasi tiap daerah diukur terlebih dahulu untuk memperoleh besarnya redaman sintilasi.

Gambar 4.1 Redaman Sintilasi tiap daerah



Setelah memperoleh nilai redaman sintilasi setiap daerah, maka selanjutnya dilakukan pengukuran terhadap indeks sintilasi yang dimiliki setiap daerah dengan menggunakan persamaan :

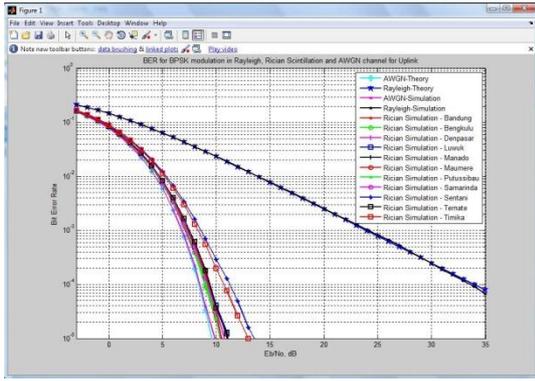
$$S_4 = (P_{p-p})^{0.794} \quad (4.1)$$

Dimana S_4 adalah indeks sintilasi dan P_{p-p} adalah besarnya redaman sintilasi. Adapun grafik indeks sintilasi untuk setiap daerah dapat ditentukan sebagai berikut :

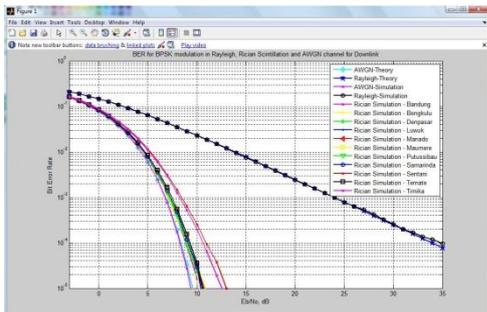


Gambar 4.2 Indeks Sintilasi

Indeks sintilasi ini digunakan untuk menentukan kanal sintilasi pada simulasi. Setelah memperoleh besarnya indeks sintilasi untuk setiap daerah maka akan dapat ditentukan pemodelan kanal sintilasi untuk semua kota. Adapun pemodelan kanalnya adalah sebagai berikut :



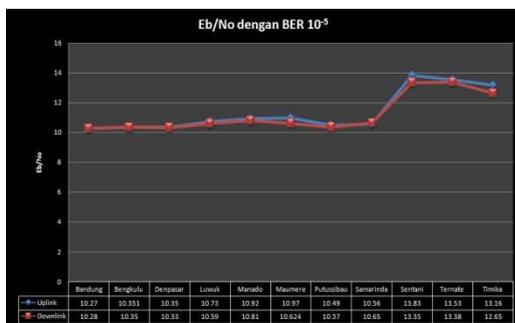
Gambar 4.3 Sintilasi Uplink



Gambar 4.4 Sintilasi Downlink

Indeks sintilasi yang diperoleh sebagai penentu pemodelan kanal sintilasi tersebut, dimana besarnya indeks sintilasi antara 0 – 1. Jika redaman sintilasi suatu daerah semakin besar, maka besarnya indeks sintilasi juga semakin besar. Jadi dari gambar dapat dilihat bahwa jika grafik semakin ke kanan maka besarnya indeks sintilasi semakin mendekati 1 dan jika grafik semakin ke kiri maka besarnya indeks sintilasi semakin mendekati 0. Jika indeks sintilasi mendekati 1 maka kanal sintilasi yang ada akan mendekati kanal Rayleigh sedangkan jika indeks sintilasi mendekati 0 maka kanal sintilasi yang ada akan mendekati kanal *Additive White Gaussian noise* (AWGN).

Dari hasil simulasi maka dapat diperoleh *Bit Error Rate* (BER) rata-rata yang diperoleh yaitu 10^{-5} . Untuk memperoleh besarnya BER 10^{-5} tersebut maka diperlukan *Eb/No* setiap daerah. Adapun besarnya *Eb/No* yang dibutuhkan setiap daerah ditunjukkan oleh gambar berikut :



Gambar 4.5 Eb/No terhadap BER 10^{-5}



4.2 Redaman Hujan

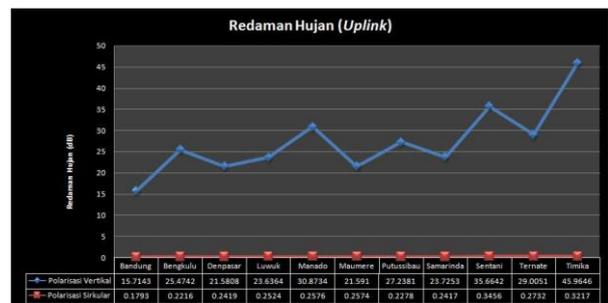
Redaman hujan yang dihitung didasarkan pada besarnya curah hujan yang terdapat pada setiap daerah. Dalam perhitungannya, redaman hujan diukur dengan menggunakan dua jenis polarisasi yaitu polarisasi linier vertikal dan polarisasi sirkular. Dari hasil perhitungan akan ditunjukkan pada gambar dibawah ini :

Gambar 4.6 Perbandingan redaman hujan polarisasi linier vertikal dan sirkular

Redaman hujan antara uplink dan downlink memiliki perbedaan dimana redaman hujan untuk uplink lebih besar dibandingkan downlink karena penggunaan frekuensi untuk uplink lebih besar dibandingkan downlink.

Adapun faktor yang mempengaruhi besarnya redaman hujan yaitu :

1. Semakin besar penggunaan frekuensi maka redaman hujan juga semakin besar
2. Semakin tinggi curah hujan suatu daerah maka besarnya redaman hujan juga semakin besar
3. Penggunaan polarisasi vertikal memiliki redaman hujan yang lebih besar dibandingkan dengan polarisasi sirkular. Hal ini dipengaruhi oleh besarnya α dan k yang menentukan besarnya redaman spesifik pada frekuensi 12 dan 14 GHz. Pada penggunaan frekuensi vertikal untuk frekuensi 14 GHz maka besarnya $k_v = 0.04157$ sedangkan besarnya $\alpha_v = 1.0957$. Sedangkan untuk penggunaan polarisasi sirkular frekuensi 12 GHz besarnya $\alpha_s = 0.0003414653811250000$ dan $k_s = 0.024205$, dan untuk frekuensi 14 GHz besarnya $\alpha_s = 0.0008579728903499999$ dan $k_s = 0.039695$. Semakin kecil besarnya α dan k yang dimiliki maka semakin kecil juga redaman hujannya sehingga besarnya redaman hujan dengan menggunakan polarisasi sirkular lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan polarisasi linier vertikal.
4. Semakin besar sudut elevasi stasiun bumi terhadap satelit maka besarnya redaman hujan akan semakin kecil.
5. Semakin besar derajat lintang stasiun bumi maka besarnya redaman hujan akan semakin kecil
6. Semakin tinggi letak stasiun bumi dari permukaan laut maka besarnya redaman hujan akan semakin kecil

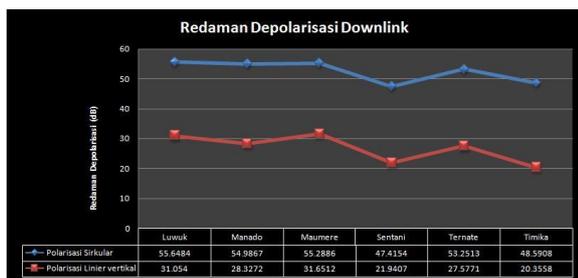


Gambar 4.7 Perbandingan redaman hujan polarisasi linier vertikal dan sirkular pada bagian uplink

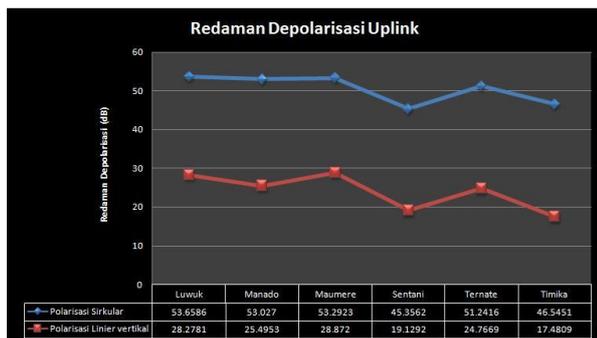
Dari perbandingan antara polarisasi vertikal dan sirkular dapat dilihat bahwa penggunaan polarisasi sirkular memiliki besar redaman hujan yang lebih kecil daripada polarisasi vertikal, sehingga untuk penggunaan frekuensi diatas 10 GHz yang rentan terhadap redaman hujan sebaiknya menggunakan polarisasi sirkular.

4.3 Depolarisasi

Depolarisasi yang terjadi berkaitan dengan frekuensi, redaman hujan, sudut elevasi, dan juga kemiringan sudut polarisasi terhadap sumbu horizontal. Pengukuran depolarisasi juga dilakukan terhadap dua jenis polarisasi yang digunakan karena juga berkaitan dengan penggunaan besarnya redaman hujan setiap daerah.

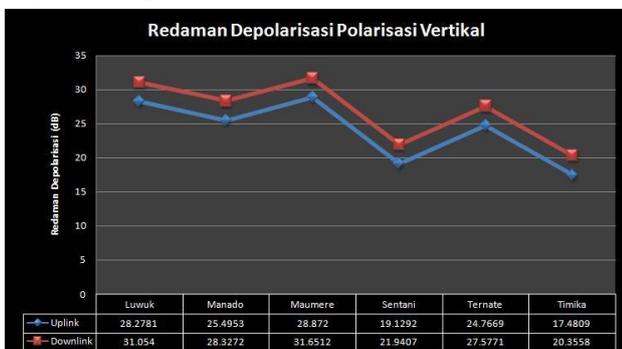


Gambar 4.8 Perbandingan redaman depolarisasi polarisasi linier vertikal dan polarisasi sirkular

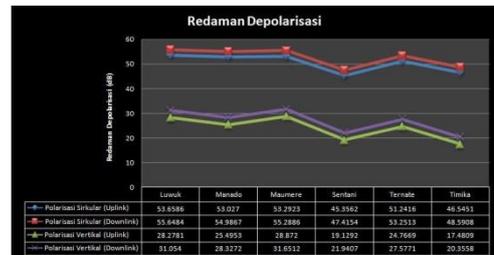


Gambar 4.9 Perbandingan redaman depolarisasi polarisasi linier vertikal dan polarisasi sirkular bagian uplink

Dari gambar dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan yang mencolok antara penggunaan polarisasi sirkular dan linier vertikal pada bagian *uplink*. Perbedaan redamannya dapat mencapai 29.0642 dB untuk kota Manado.



Gambar 4.10 Perbandingan redaman depolarisasi polarisasi linier vertikal dan polarisasi sirkular bagian downlink



Gambar 4.11 Perbandingan redaman depolarisasi bagian uplink dan downlink pada polarisasi linier vertikal

Penggunaan frekuensi yang semakin besar juga mempengaruhi besarnya redaman depolarisasi. Semakin besar frekuensi yang digunakan maka besarnya redaman depolarisasi yang dimiliki semakin kecil.

Faktor yang mempengaruhi besarnya redaman depolarisasi yaitu :

1. Semakin besar frekuensi yang digunakan maka redaman depolarisasi akan semakin kecil
2. Semakin besar sudut elevasi stasiun bumi terhadap satelit maka besarnya redaman depolarisasi juga semakin besar
3. Semakin besar redaman hujan maka besarnya redaman depolarisasi akan semakin kecil
4. Nilai *polarization improvement factor* berpengaruh besar pada penentuan besar redaman depolarisasi. Rumus untuk menentukan besarnya *polarization improvement factor* adalah :

$$C_{\tau} = -10 \log_{10}[1 - 0.484(1 + \cos(4\tau))] \quad (dB) \quad (4.2)$$

τ merupakan besarnya kemiringan sudut polarisasi terhadap sumbu horizontal. Untuk polarisasi vertikal maka besarnya $\tau = 90^{\circ}$ sedangkan untuk polarisasi sirkular maka besarnya $\tau = 45^{\circ}$. Jadi dalam menentukan besarnya C_{τ} dipengaruhi oleh besarnya τ dimana semakin besar nilai C_{τ} maka besarnya redaman depolarisasi akan semakin kecil.

4.4 Power transmit

Besar *power transmit* atau daya kirim yang dibutuhkan oleh setiap stasiun bumi terkait dengan pengaruh redaman sintilasi, redaman hujan, dan depolarisasi berdasarkan besarnya E_b/N_0 yang diperoleh dari simulasi kanal sintilasi untuk BER 10^{-5} dapat dilihat dari gambar berikut :



Gambar 4.12 Gambar power transmit untuk polarisasi linier vertikal dan sirkular

Dari gambar dapat dilihat bahwa pola power transmit yang terjadi pada setiap kota berbeda tergantung dari ada atau tidaknya redaman depolarisasi. Redaman depolarisasi terjadi pada daerah dengan sudut elevasi lebih kecil atau

sama dengan 60 derajat. Adapun daerah yang memiliki redaman depolarisasi yaitu kota Luwuk, Manado, Maumere, Sentani, Ternate, dan Timika.

Untuk daerah yang tidak memiliki redaman depolarisasi maka besarnya power transmit yang dibutuhkan kurang lebih sama antara polarisasi sirkular dan polarisasi linier vertikal. Rentangnya tidak berbeda jauh dalam pemilihan salah satu dari antara kedua polarisasi tersebut.

Sedangkan di daerah yang memiliki redaman depolarisasi, terdapat perbedaan perbedaan yang cukup signifikan antara penggunaan polarisasi sirkular atau polarisasi linier vertikal. Misalkan untuk kota Putussibau besarnya power transmit dengan polarisasi sirkular sebesar -645.4329 dB sedangkan dengan polarisasi linier vertikal dibutuhkan power transmit sebesar -618.4226 dB. Terdapat rentang sebesar 27.0103 dB.

Karena itu untuk daerah dengan sudut elevasi yang lebih dari 60 derajat sebaiknya menggunakan polarisasi sirkular karena besarnya power transmit yang dibutuhkan lebih kecil dibandingkan polarisasi linier vertikal.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Pada Tugas Akhir ini ingin dilihat bagaimana efek penggunaan frekuensi Ku-band di wilayah Indonesia dimana yang disoroti ada tiga hal yaitu redaman hujan, depolarisasi, dan sintilasi. Setelah melakukan perhitungan dan simulasi terhadap tiga hal tersebut maka dapat disimpulkan :

1. Redaman hujan dihitung dalam dua jenis polarisasi yaitu polarisasi linier vertikal dan polarisasi sirkular. Terdapat perbedaan yang mencolok antara besar redaman hujan kedua frekuensi tersebut, dimana redaman hujan dengan menggunakan polarisasi sirkular tidak sampai 1 dB sedangkan redaman hujan dengan menggunakan polarisasi linier vertikal dapat mencapai 35 dB.
2. Depolarisasi terjadi pada stasiun bumi dengan sudut elevasi kurang dari 60° . Perhitungan untuk depolarisasi berkaitan dengan redaman hujan, sehingga besarnya redaman depolarisasi lebih besar menggunakan polarisasi sirkular dibandingkan polarisasi linier vertikal. Satelit yang digunakan adalah satelit geostasioner sehingga besarnya sudut elevasi stasiun bumi tidak berubah ubah sehingga besarnya depolarisasi setiap daerah tidak berubah-ubah.
3. Redaman sintilasi untuk penggunaan transmisi satelit Ku-band tergolong kecil. Redaman sintilasi terbesar diperoleh di kota Sentani sebesar 0.2595 dB. Kanal sintilasi hasil simulasi untuk kota-kota tersebut memiliki indeks sintilasi yang mendekati 0 sehingga kanal sintilasi yang terbentuk mendekati kanal *Additive White Gaussian noise* (AWGN).

5.2 Saran

Dari hasil pelaksanaan Tugas Akhir ini, agar hasil simulasi yang dilakukan selanjutnya lebih maksimal maka perlu diperhatikan beberapa saran berikut :

1. Agar hasil pengukuran lebih akurat maka jumlah kota yang dianalisis perlu diperbanyak, tidak hanya sampai sepuluh kota.
2. Data yang digunakan untuk menganalisis setiap kota hendaknya menggunakan data yang paling baru guna menghasilkan hasil perhitungan dan analisis yang lebih sesuai dengan kondisi alam saat ini.
3. Disarankan untuk melakukan pengukuran yang mendalam terhadap perhitungan redaman sintilasi berupa sintilasi akibat lapisan ionosfer, troposfer, dan juga karena objek lainnya

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Ippolito Jr., Louis. *Satellite Communication System Engineering*. Washington. 2008
- [2] Roody, Dennis. *Satellite Communication – Third Edition*. The Mc Graw Hill Book Company, 2001
- [3] Ku-Band. http://en.wikipedia.org/wiki/Ku_band. (Diakses tanggal 12 Oktober 2010)