

## **BAB 2**

### **DASAR TEORI**

#### **2.2 KAJIAN PUSTAKA**

Dasar dari penelitian ini mengambil referensi dari penelitian sebelumnya yang relevan. Tinjauan terhadap hasil-hasil penelitian sebelumnya memegang peranan kunci dalam menyusun suatu penelitian baru. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan [5], dilakukan evaluasi QoS siaran TV DVB-T2 dengan pengukuran pada 12 titik daerah urban dan 8 titik pada daerah sub urban. Hasil penelitian menunjukkan pada beberapa daerah terdapat beberapa stasiun TV yang tidak ada siaran, tiga titik di daerah urban dan lima titik di sub urban daerah. Hal ini berdasarkan hasil kuat medan yang menunjukkan nilai kurang dari 45 dB $\mu$ V/m dan *pathloss* yang tinggi dari hasil pengukuran di lokasi tersebut.

Penggunaan beberapa model propagasi digunakan pada penelitian [6], pada penelitian ini membandingkan beberapa model propagasi dalam jaringan televisi terestrial digital DVB-T2 dengan penerimaan tetap di wilayah metropolitan kota DC Bogotá (Kolombia). Untuk simulasi model propagasi yang digunakan adalah ITU – R 526, ITU – R 1546, dan metode *Deygout*, serta menggunakan *software* simulasi *Xirio Online*. Dari hasil perancangan model propagasi tersebut lalu dibandingkan dengan hasil pengukuran di lapangan. Didapat bahwa hasil menggunakan ITU – R 1546 didapatkan rata-rata penyimpangan nilai sebesar 6,5.

Penelitian [7] membandingkan keakuratan dan kemampuan implementasi dari dua model ITU-R, yaitu ITU-R P.1546 dan ITU-R P.1812 yang akan dibandingkan dengan hasil pengukuran di lapangan. Penelitian ini dilakukan pada daerah perkotaan. Model propagasi ITU-R P.1546 memberikan hasil yang lebih bagus, hasil standar deviasi pada kasus perhitungan dengan ITU-R P.1546 memiliki nilai yang lebih rendah dari nilai maksimum yang ditentukan dalam Rekomendasi.

Evaluasi yang dilakukan [8] menggunakan dua model ITU-R, yaitu ITU-R P.1546 dan ITU-R P.1812. Dilakukan evaluasi agar didapatkan gelombang radio yang efektif dalam *Single Frequency Network* (SFN) untuk penyiaran televisi digital terestrial. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua metode yang dibandingkan memberikan kinerja prediksi propagasi yang berbeda sesuai dengan

geografi wilayah yang berbeda. Hasil penelitian menunjukkan prediksi propagasi yang lebih baik dalam hal cakupan lokasi penerima dengan menggunakan ITU-R P.1812 daripada ITU-R P.1546. Namun, dalam kasus tertentu, ITU-R P.1546 yang terutama didasarkan pada analisis statistik dari data eksperimen, menunjukkan peningkatan yang lebih baik dari ITU-R P.1812.

Di kota Uberlandia dilakukan penelitian [9], menganalisa sinyal UHF pada pita 488-584 MHz menggunakan tiga model propagasi yaitu ITU-R P.1546, Okumura-Hata dan *LogDistance*. Dilakukan pengujian dengan karakteristik daerah yang berbeda – beda yaitu urban, suburban dan rural. Menghasilkan bahwa di daerah urban, model yang berkinerja paling baik adalah model ITU-R P.1546 dengan standar deviasi 5,13 dB. Di daerah suburban, model Okumura-Hata berkinerja paling baik dengan standar deviasi 6,03 dB dan di daerah rural, model dengan standar deviasi terendah yaitu 4,94 dB adalah model *LogDistance*.

Perbandingan model propagasi *Longley-Rice*, ITU-R P.1546 dan Hata-Davidson sebagai prediksi *coverage area* DVB-T. Menggunakan *channel 23* UHF serta dengan *power* pemancar 1,6 KILOWATT. Model ITU-R 1546 sangat akurat untuk jarak yang lebih pendek di bawah 50 km. Namun model ini menjadi semakin tidak akurat untuk jarak yang lebih jauh dari 50 Km. Model *Longley-Rice* yang menggunakan data SRTM (*Satellite Radar Topography Mission*) memberikan hasil yang cukup bagus mendekati nilai pengukuran di lapangan. Model Hata-Davidson cukup sederhana untuk diimplementasikan dan mendapatkan hasil yang cukup akurat [10].

Tabel 2.1 memuat hasil dari penelitian sebelumnya yang dijadikan sebagai dasar dan perbandingan dengan penelitian ini.

Tabel 2. 1 Perbandingan dengan penelitian terdahulu.

Judul	Persamaan dan Perbedaan
<i>Performance Evaluation of DVB-T2 TV Broadcast For Fixed Reception</i> (2019)	Karakteristik daerah sama, akan ada perbedaan yaitu penambahan menggunakan software simulasi dan dengan model propagasi ITU-R 1546 serta penentuan <i>power</i> dari pemancar.

<p><i>Simulation of radio propagation coverage in a fixed reception network of DVB-T2 digital terrestrial television: Metropolitan scenario of Bogotá D. C. (Colombia)</i> (2017)</p>	<p>Menggunakan model progasi yang sama yaitu ITU-R 1546, namun dengan <i>software</i> simulasi dan karakteristik daerah yang berbeda.</p>
<p><i>Comparison Of Propagation Models ITU.R-P.1546 And ITU.R-P.1812</i> (2014)</p>	<p>Menggunakan model progasi yang sama yaitu ITU-R 1546 dan dibandingkan dengan hasil pengukuran dilapangan. Perbedaannya adalah karakteristik daerah pengukuran yang berbeda serta akan dibandingkan dengan hasil simulasi <i>software</i>.</p>
<p><i>Coverage Optimization for DVB-T2 SFNs Using ITU-R P.1546 and ITU-R P.1812</i> (2015)</p>	<p>Persamaannya adalah model propagasi yang sama digunakan untuk DVB-T. Sedangkan perbedaannya adalah akan ditambah dengan hasil simulasi <i>software</i>.</p>
<p><i>Analysis of UHF Signal Propagation in the City of Uberlandia, Using the Propagation Model ITU-R P.1546, OkumuraHata and LogDistancia</i> (2019)</p>	<p>Menggunakan model propagasi yang sama serta karakteristik daerah pengujian sama. Akan ada penambahan simulasi menggunakan <i>software</i>.</p>
<p><i>Comparison of Longley-Rice, ITU-R P.1546 and Hata-Davidson propagation models for DVB-T coverage prediction</i> (2014)</p>	<p>Model propagasi yang digunakan pada DVB-T sama, yaitu ITU-R P.1546. Sedangkan perbedaannya yaitu power pemancar dan <i>channel</i> yang berbeda serta akan ada penambahan penggunaan simulasi menggunakan <i>software</i>.</p>

## 2.3 PENYIARAN TELEVISI DIGITAL TERESTIAL

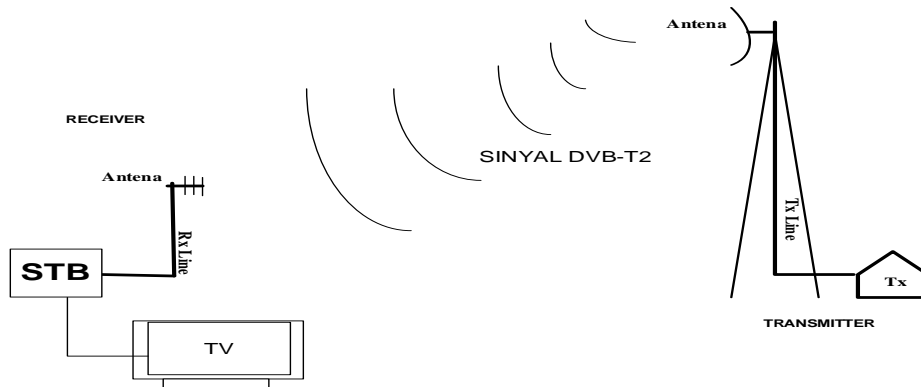
Televisi digital (*Digital Television/DTV*) adalah sistem televisi yang menggunakan modulasi dan kompresi digital untuk menyebarkan video, audio, dan data ke perangkat televisi. Standar internasional untuk televisi resolusi tinggi atau *high-definition television* (HDTV) ditampilkan dalam rasio 16:9 (dibandingkan dengan TV biasa yang memiliki rasio 4:3) dengan sistem suara *surround 5.1 Dolby Digital*. DTV menawarkan resolusi yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan standar televisi lama, memberikan gambar yang lebih tajam dengan detail warna yang lebih kaya dan kedalaman yang lebih besar daripada standar sebelumnya. HDTV memiliki jumlah *pixel* hingga 5 kali lipat dari standar analog PAL yang digunakan di Indonesia.

Dalam sistem siaran TV digital, sumber audio dan video dari studio dikodekan menjadi data digital sesuai dengan standar yang ditetapkan untuk program TV yang akan disiarkan. Program-program ini kemudian dimultiplex agar dapat disiarkan melalui pemancar menggunakan saluran yang tersedia. Dengan teknik *multiplexing*, beberapa program dapat disiarkan melalui 1 saluran yang sama, dan data yang dihasilkan dari proses *multiplexing* ini merupakan data digital. Data ini kemudian dimodulasi secara digital di *modulator* sehingga sinyal yang dikeluarkan dari pemancar adalah sinyal digital termodulasi. Berbeda dengan siaran TV analog yang mengirimkan sinyal video komposit sebagai sinyal AM dan sinyal audio sebagai sinyal FM, keduanya merupakan sinyal analog yang termodulasi. Salah satu standar penyiaran televisi digital terrestrial adalah DVB-T2 [11].

### 2.3.1 DVB-T2

Pada sistem analog, semakin jauh dari stasiun pemancar televisi, sinyal akan melemah dan kualitas gambar akan menurun, seringkali menjadi buram dan berbayang. Berbeda dengan sistem digital, di mana gambar yang jernih bisa dinikmati hingga titik di mana sinyal tidak dapat diterima lagi. Sistem televisi digital hanya mengenal dua kondisi status, yaitu menerima (kode 1) atau tidak (kode 0). Siaran televisi digital terrestrial berisi saluran televisi yang dapat dinikmati secara gratis (*free-to-air*), tanpa biaya langganan. Untuk menonton siaran televisi digital menggunakan televisi

analog, dibutuhkan perangkat *Digital Set Top Box (STB) /Digital Receiver/DVB-T Receiver* yang menghubungkan antena dengan televisi analog. Digital STB berperan sebagai *decoder* yang mengubah sinyal digital menjadi gambar dan suara, memungkinkan tampilan pada televisi analog. Sistem siaran televisi digital diilustrasikan dalam gambar 2.1.



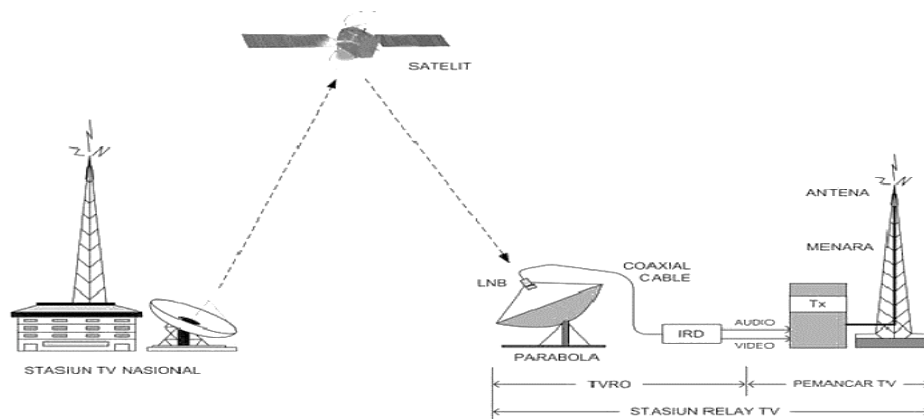
**Gambar 2. 1 Siaran Televisi Digital.**

*Digital Video Broadcasting Terrestrial 2 (DVB-T2)* merupakan salah satu standar penyiaran televisi digital terrestrial generasi kedua setelah standar *Digital Video Broadcasting Terrestrial (DVB-T)* yang sudah diakui secara internasional. DVB-T2 menawarkan manfaat signifikan dibandingkan dengan DVB-T. Teknologi DVB-T2 merupakan sebuah sistem transmisi penyiaran televisi terrestrial yang dikembangkan oleh *Digital Video Broadcasting (DVB)*. Dimana sistem tersebut mampu merubah ukuran *file* suatu video menjadi lebih kecil tanpa mengurangi kualitas dari video tersebut. Pada DVB-T2 siaran gambar yang jernih akan dapat dinikmati sampai pada titik terluar wilayah jangkauan siaran. [1] Munculnya DVB-T2 dilatar belakangi oleh efisiensi kanal yang lebih bagus dan dengan untuk transisi dari TV analog ke DVB-T2 sangat baik. Efisiensi kanal yang lebih tinggi berarti bahwa dengan jumlah spektrum yang sama, lebih banyak program dapat disiarkan atau jumlah program yang sama disiarkan dengan kualitas audio/video atau kualitas cakupan yang lebih tinggi. Sebagai alternatif, area jangkauan pemancar siaran digital televisi terrestrial dapat ditingkatkan secara besar-besaran sambil mempertahankan karakteristik pemancar serta mode penerimaan, kualitas video dan jumlah program yang konstan. DVB-T2

mempunyai tingkat kompresi dengan perbandingan 1:8, yaitu 1 kanal sistem digital dapat digunakan untuk membawa 8 kanal siaran video HD [2].

### 2.3.2 STASIUN RELAY

Setiap stasiun swasta nasional dilengkapi dengan perangkat khusus yang bertugas untuk mengirimkan siaran ke satelit. Selanjutnya, satelit memancarkan kembali siaran tersebut ke Bumi, memperluas cakupan wilayah siaran secara luas. Sinyal yang dipancarkan oleh satelit dapat diterima dengan baik oleh perangkat bernama *Television Receive Only* (TVRO). Dari TVRO ini kemudian akan dihasilkan sinyal audio dan video. Selanjutnya sinyal audio dan video dimasukkan ke pemancar TV dan kemudian dipancarkan ke seluruh wilayah jangkauan pemancar, sehingga sinyal yang dipancarkan dapat diterima oleh pesawat penerima TV disisi penonton. Gambar 2.2 memperlihatkan diagram tentang cara kerja Stasiun relay TV.



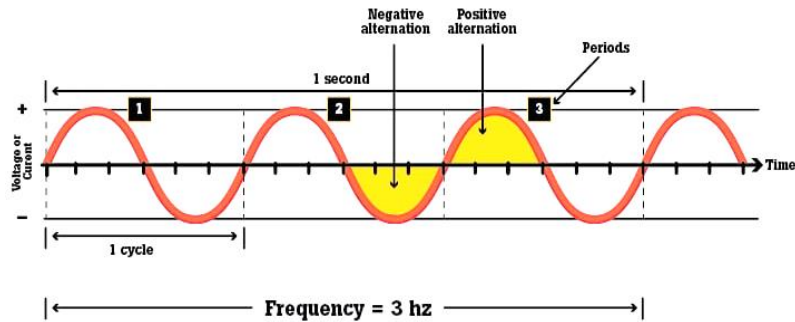
**Gambar 2. 2 Sistem kerja Stasiun Relay [11].**

Wilayah yang dapat dicapai oleh pemancar televisi tidak seluas wilayah yang dapat dijangkau oleh satelit. Pemancar TV dengan daya Pancar yang cukup besar hanya mampu menjangkau wilayah dalam radius sekitar 80 km. Hal ini disebabkan karena pada dasarnya bentuk permukaan bumi melengkung mengikuti bentuk bumi yang bulat. Akibatnya sinyal TV yang bekerja pada band frekuensi VHF dan UHF pada jarak lebih dari 80 KM akan terhalang oleh kelengkungan permukaan bumi. Sehingga pada jarak yang lebih jauh dari 80 KM sinyal TV sudah sulit diterima dengan baik. Sehingga perlu adanya stasiun relay di suatu daerah masing – masing [11].

## 2.4 BESARAN SINYAL

### 2.4.1 FREKUENSI

Frekuensi mengacu pada jumlah getaran yang terjadi dalam satu detik. Dalam konteks gelombang radio, frekuensi adalah banyaknya getaran yang terjadi dalam setiap detik, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3. Satu *Hertz* setara dengan satu getaran atau satu gelombang listrik dalam waktu satu detik ( $1 \text{ Hertz} = 1 \text{ gelombang per detik}$ ). Istilah "*Hertz*" berasal dari nama fisikawan Jerman, Heinrich Rudolf Hertz. Saat ini frekuensi radio digunakan untuk beberapa aplikasi di dunia. Beberapa penggunaan yang umum meliputi televisi, radio FM, *mobile network*, satelit dan lain sebagainya.



**Gambar 2. 3 Frekuensi 3 Hz [12].**

Umumnya, Frekuensi dilambangkan menggunakan huruf "f" dengan satuannya *Hertz* atau disingkat dengan Hz, dimana 1 Hz menunjukkan 1 getaran per detik seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.1.

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

Keterangan:

$$\begin{aligned} f &= \text{Frekuensi} \\ T &= \text{Waktu (s)} \end{aligned}$$

Frekuensi yang digunakan dalam telekomunikasi mencakup rentang dari 3 KHz hingga 3 THz (*TeraHertz* =  $10^{12}$  *Hertz*). Dengan rentang yang luas ini, penggunaan frekuensi perlu diatur melalui alokasi frekuensi untuk mencegah gangguan antara sistem-sistem radio. Dalam pengaturan alokasi kanal frekuensi untuk DVB-T2, seperti yang terlihat di tabel 2.2, setiap sistem penyiaran DVB-T2 memiliki rentang frekuensi kerja yang berbeda,

memungkinkan setiap sistem beroperasi pada frekuensi yang unik. Hal ini membantu mengurangi risiko interferensi yang mungkin terjadi ketika dua atau lebih sistem menggunakan frekuensi yang sama [13].

Tabel 2. 2 Alokasi Kanal Freuenkuensi DVB T-2.

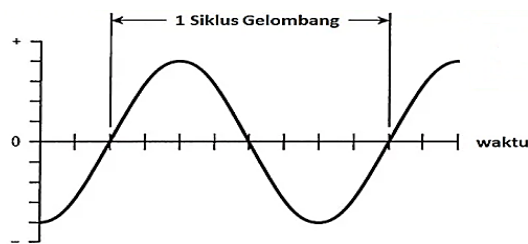
Nomor Kanal	Rentang Frekuensi Radio (MHz)	<i>Center</i> Frekuensi (MHz)
27	518 – 526	522
28	526 – 534	530
29	534 – 542	538
30	542 – 550	546
31	550 – 558	554
32	558 – 566	562
33	566 – 574	570
34	574 – 582	578
35	582 – 590	586
36	590 – 598	594
37	598 – 606	602
38	606 – 614	610
39	614 – 622	618
40	622 – 630	626
41	630 – 638	634
42	638 – 646	642
43	646 – 654	650
44	654 – 662	658
45	662 – 670	666
46	670 – 678	674
47	678 – 686	682
48	686 – 694	690

#### 2.4.2 PANJANG GELOMBANG

Ada banyak tipe gelombang elektromagnetik yang berbeda. Gelombang elektromagnetik ini dapat dideskripsikan melalui fungsi



*sinusoidal*, yang digambarkan oleh panjang gelombang. Panjang gelombang ( $\lambda$ ) adalah panjang dari satu osilasi lengkap yaitu satu bukit dan satu lembah atau satu rapatan dan satu renggangan seperti yang terlihat pada gambar 2.4. Gelombang radio berkisar dari beberapa meter hingga ribuan kilometer. Panjang gelombang ini digunakan dalam komunikasi radio, seperti penyiaran AM (*Amplitude Modulation*) dengan panjang gelombang sekitar 300-3.000 meter, penyiaran FM (*Frequency Modulation*) dengan panjang gelombang sekitar 3-10 meter, dan gelombang mikro dengan panjang gelombang sekitar sentimeter hingga milimeter.



**Gambar 2. 4 Gelombang [12].**

Panjang gelombang diukur dalam meter (m). Frekuensi dan panjang gelombang dihubungkan lewat kecepatan propagasi, dimana untuk gelombang radio adalah kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8$  m/s). Panjang gelombang dari suatu frekuensi dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.2 [12].

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2.2)$$

Keterangan:

$\lambda$  = Panjang Gelombang

$f$  = Frekuensi

$v$  = Kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8$  m/s)

### 2.4.3 KUAT MEDAN DAYA PENERIMA

Dalam telekomunikasi, terutama dalam sistem komunikasi radio, level daya atau sering disebut sebagai kuat sinyal, mengacu pada nilai daya yang diterima oleh antena referensi pada penerima dari daya yang dipancarkan oleh pemancar pada medan jauh (*Far field*). Pemancaran gelombang radio dari *transmitter* harus mencapai penerima, seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.5. Kuat daya yang diterima oleh penerima adalah

faktor penting yang memengaruhi kualitas penerimaan. Jika daya yang diterima oleh penerima mencapai tingkat yang memadai, kualitas gambar dan suara yang baik dapat diperoleh. Besarnya daya yang diterima oleh penerima dapat dihitung menggunakan persamaan 2.3 [6]:

$$E = \frac{88\sqrt{G.P.ht.hr}}{\lambda d^2} \quad (2.3)$$

Keterangan:

$E$  = kuat daya (V/m)

$G$  = *Gain* antena pemancar

$ht$  = tinggi antena pemancar (m)

$hr$  = tinggi antena penerima (m)

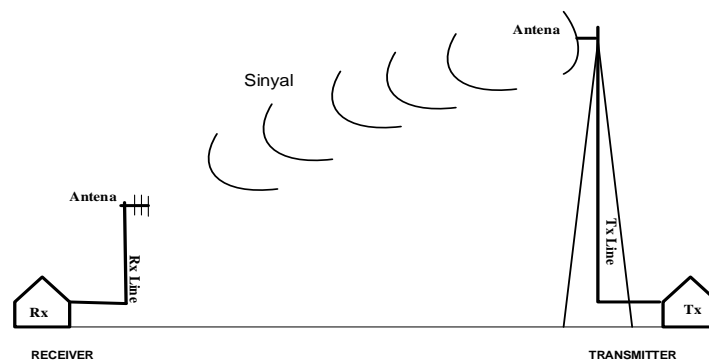
$d$  = jarak antara antena pemancar dengan antena penerima (m)

$\lambda$  = panjang gelombang (m)

$P$  = daya pancar (watt)

Dengan nilai  $E$  (V/m) dapat dikonversikan ke  $E$  (dB $\mu$ V/m) menggunakan persamaan 2.4.

$$(\text{dB}\mu\text{V/m}) = 20 \log (\text{V/m}) + 120 \quad (2.4)$$



**Gambar 2. 5 Pemancaran Gelombang Radio.**

Pentransmisi dengan daya besar, seperti yang digunakan dalam siaran terestrial, umumnya diukur dalam dB-*milivolt* per meter (dBmV/m). Namun, sistem-sistem dengan daya yang rendah, seperti ponsel, sering diukur dalam dB-*mikrovolt*s per meter (dB $\mu$ V/m) atau menggunakan satuan desibel dengan referensi di atas satu miliwatt (dBm). Dalam konteks penyiaran, 1 mV/m setara dengan 1000  $\mu$ V/m atau 60 dB $\mu$  (juga sering ditulis sebagai dBu). Kuat medan berdasarkan penguatan antena penerima dan frekuensi,

ketika diterapkan pada antenna dengan impedansi 50 Ohm, dapat dihitung menggunakan persamaan 2.5 [13] :

$$E \text{ (dB}\mu\text{V/m)} = E \text{ (dB}\mu\text{V)} - Gr \text{ (dBi)} + 20\log f \text{ (MHz)} - 29.8 \quad (2.5)$$

Keterangan:

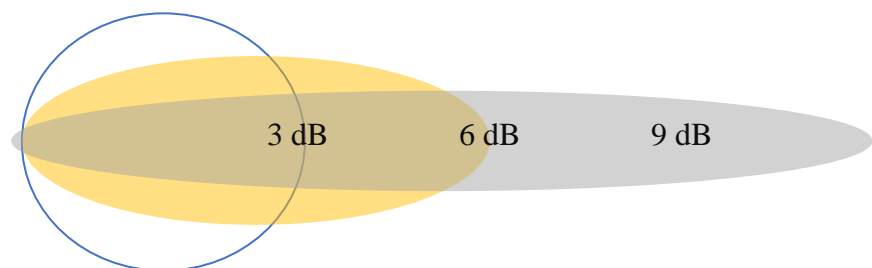
- $E \text{ (dB}\mu\text{V/m)}$  = Kuat medan
- $E \text{ (dB}\mu\text{V)}$  = *Power* yang diterima
- $Gr \text{ (dBi)}$  = *Gain* antenna penerima
- $f \text{ (MHz)}$  = Frekuensi

#### 2.4.4 DAYA

*Watt* (W) adalah satuan dasar daya, yang diambil dari nama James Watt, seorang penemu dari Skotlandia pada abad ke-18. Satu *watt* sama dengan 1 ampere arus yang mengalir pada 1 volt. Untuk alasan praktis sering dinyatakan dalam satuan *decibel Watt* disingkat dBW atau *decibel milliwatt* disingkat dBm, yang merupakan satuan logaritma yaitu perbandingan (ratio) antara dua besaran daya. Satuan dBW dan dBm adalah harga daya dalam besaran logaritma dengan ketentuan yang dinyatakan dalam persamaan 2.6 dan persamaan 2.7.

$$W = \frac{W}{1W} ; \text{ menjadi dBW} \quad (2.6)$$

$$W = \frac{W}{1mW} ; \text{ menjadi dBm} \quad (2.7)$$



**Gambar 2. 6 Kenaikan Daya [14].**

Perbandingan daya dengan satuan logaritma dinyatakan dengan satuan desibel dan disingkat dB. Ilustrasi daya dapat dilihat pada gambar 2.6. Desibel merupakan ukuran perbandingan daripada satuan daya itu sendiri. Ini digunakan untuk menggambarkan perbedaan antara dua nilai. Dalam konteks

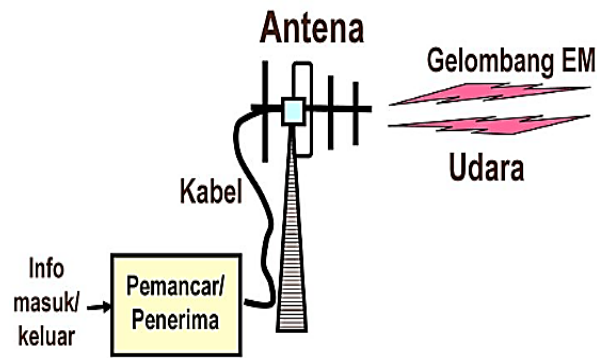
jaringan nirkabel, desibel sering digunakan untuk membandingkan daya antara dua pemancar. Nilai *Watt* yang dikonversikan ke dBW dan dBm dapat dilihat pada tabel 2.3 [14].

Tabel 2. 3 Konversi daya dari satuan Watt ke dBW dan dBm.

No.	Daya(Watt)	Pengucapan	Daya(dBW)	Daya(dBm)
1	0.000001	1 microwatt	-60	-30
2	0,00001	10 microwatt	-50	-20
3	0,0001	100 microwatt	-40	-10
4	0,001	1 milliwatt	-30	0
5	0,01	10 milliwatt	-20	10
6	0,1	100 milliwatt	-10	20
7	1	1 watt	0	30
8	10	10 watt	10	40
9	100	100 watt	20	50
10	1000	1000 watt	30	60
11	10.000	10.000 watt	40	70

## 2.5 ANTENA

Dalam domain radio, antena berperan sebagai penghubung antara gelombang radio yang bergerak di ruang dengan arus listrik yang bergerak dalam konduktor logam pada pemancar atau penerima. Pada sistem pemancar, antena menerima arus listrik dari pemancar radio, dan mengubah energi dari arus tersebut menjadi gelombang elektromagnetik (gelombang radio) yang dipancarkan. Sementara dalam proses penerimaan, antena menangkap sebagian energi gelombang elektromagnetik untuk menghasilkan arus listrik di terminalnya, yang kemudian diteruskan ke penerima untuk diperkuat. Antena memiliki peran krusial dalam peralatan radio, digunakan dalam berbagai aplikasi seperti penyiaran radio, siaran televisi, radio dua arah, penerima komunikasi, radar, telepon seluler, komunikasi satelit, dan perangkat lainnya.



**Gambar 2. 7 Ilustrasi Komunikasi dengan antena [15].**

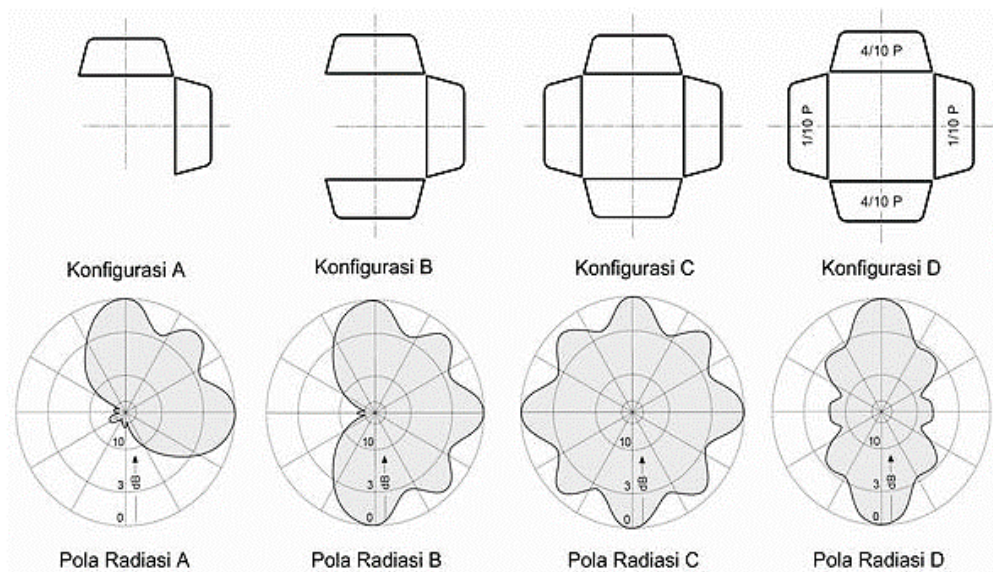
Antena merupakan kumpulan konduktor yang terhubung secara listrik ke penerima atau pemancar. Ketika terjadi transmisi, arus yang diberikan ke antena oleh pemancar menciptakan medan listrik dan medan magnet yang berfluktuasi di sekitar elemen antena. Fluktuasi medan ini menghasilkan energi yang dipancarkan dari antena ke ruang sebagai gelombang elektromagnetik yang melintang. Pada proses penerimaan, medan listrik dan medan magnet yang berfluktuasi dari gelombang radio yang masuk memberikan gaya pada elektron dalam elemen antena, mendorong mereka bergerak maju mundur dan menghasilkan arus osilasi dalam antena. Antena dirancang untuk dapat memancarkan dan menerima gelombang radio, baik dari maupun ke segala arah secara *horizontal* dengan merata (antena *omnidirectional*), maupun secara spesifik ke arah tertentu (antena *directional*). Bentuk fisik antena didasarkan pada frekuensi kerja antena, pola radiasi yang diinginkan, polarisasi, dan penguatan (*gain*) antena. [15].

### **2.5.1 ANTENA DIRECTIONAL**

Antena jenis ini memiliki gain yang sangat tinggi yang diarahkan ke titik spesifik. Dikenal juga sebagai antena *narrow bandwidth*, jenis ini memiliki pola radiasi yang sangat terarah dengan daya fokus yang tinggi, memungkinkan jarak terjauh namun tidak dapat menjangkau area yang luas. Antena *directional* berfungsi untuk mengirim dan menerima sinyal radio hanya pada satu arah tertentu, sering kali dengan fokus yang sangat sempit. Biasanya digunakan untuk koneksi titik ke titik (*point-to-point*) atau koneksi *multipoint*. Antena-antena *directional* meliputi beberapa jenis seperti antena *grid*, *dish* parabola, *yagi-uda*, dan antena *sectoral*.

### a. Antena Panel

Pada umumnya, antena yang beroperasi di frekuensi UHF band IV dan V (470 - 806 MHz) sengaja ditutup untuk menghindari masuknya air hujan di antara elemen antena yang berukuran kecil. Hal ini dilakukan untuk mencegah perubahan karakteristik antena akibat air yang tergenang di sela-sela elemen. Konstruksi antena ini sudah rapat karena ukuran *dipole* yang relatif pendek, sekitar 18 cm hingga 31 cm. Penggunaan kubah (*radome*) sebagai penutupnya memungkinkan luas penutup yang relatif kecil sehingga tidak terlalu memberatkan dan tahan terhadap angin. Bagian penutup pada satu panel antena UHF dengan *dual doublet* memiliki penampang rata-rata sekitar 1.000 x 500 cm<sup>2</sup>, yaitu sekitar sepertujuh dari luas penutup antena VHF. Hal ini menjaga konstruksi *dipole* di dalamnya dari paparan hujan, angin, atau salju.



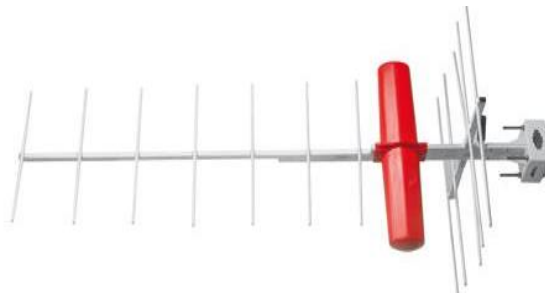
**Gambar 2. 8 Konfigurasi Antena Panel [11].**

Antena panel termasuk ke dalam kategori antena *directional* yang mengarahkan sinyalnya ke arah spesifik, bukan menyebarkan ke segala arah (*omnidirectional*). Oleh karena itu, beberapa antena panel dipasang dengan konfigurasi tertentu untuk memastikan sinyal yang dipancarkan mencakup wilayah yang diinginkan. Gambar 2.8 memberikan beberapa contoh konfigurasi antena ini, sementara luas

wilayah yang terjangkau direpresentasikan oleh pola radiasi yang dihasilkannya [11].

### **b. Antena Yagi-Uda**

Antena Yagi-Uda merupakan susunan parasitik yang terdiri dari beberapa elemen, termasuk sebuah antena *dipole* setengah-gelombang yang sering kali berbentuk *dipole* yang dilipat, sebuah reflektor parasit tunggal, dan satu atau lebih elemen direktor (biasanya hingga 13 elemen). Setiap elemen dipotong secara khusus untuk bekerja seolah-olah elemen sebelumnya adalah elemen pendorong, yang menyebabkan keseluruhan struktur mengecil seiring dengan arah rambatan gelombang, seperti yang digambarkan pada gambar 2.9. Semua elemen terhubung secara listrik pada batang penyangga tengah yang berperan sebagai penghantar dan ditanamkan ke tanah. Meskipun begitu, posisi penyangga tengah tidak memengaruhi arus-arus, karena titik penyangga pada setiap elemen berada pada simpul arus yang spesifik



**Gambar 2. 9 Antena Yagi-Uda [11].**

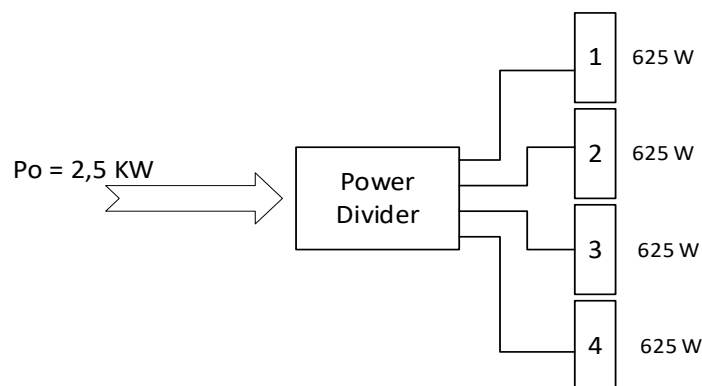
Antena jenis ini biasanya memiliki dimensi yang besar pada frekuensi rendah, dan seringkali digunakan terutama untuk jalur frekuensi *very high frequency* (VHF) dan *ultra high frequency* (UHF). Meskipun beberapa amatir radio telah mencoba membuat antena Yagi untuk jalur 20 meter, strukturnya cenderung besar dan kurang praktis. Keunggulan dalam arah yang tinggi membuat antena ini ideal untuk jaringan komunikasi tetap dari satu titik ke titik lain, baik pada stasiun terminal maupun relay. Selain itu, antena ini banyak digunakan pada stasiun induk dalam sistem komunikasi mobil yang beroperasi

sepanjang garis tertentu, seperti jalur kereta api, jalan raya, atau saluran pipa [11].

### 2.5.2 POWER DIVIDER

Antena memiliki keterbatasan dalam menyalurkan daya RF karena dimensinya yang terbatas, seperti dimensi *dipole* dan konektor yang digunakan. Antena VHF memiliki dimensi yang relatif besar, sehingga menggunakan konektor berukuran besar. Di sisi lain, antena UHF lebih kecil sehingga menggunakan konektor yang lebih kecil pula. Hal ini menyebabkan kemampuan antena UHF dalam menangani daya RF lebih rendah dibandingkan antena VHF.

Kemampuan menangani daya (*power handling*) antena UHF, tergantung pada desain dan konstruksinya, berkisar antara 1 hingga 2,5 *kiloWatt* (kW). Jika suatu antena diberi daya melebihi batas kemampuannya, elemen antena atau konektornya dapat mengalami kerusakan atau bahkan kebakaran. Daya pancar yang besar dapat ditangani dengan membagi daya tersebut ke beberapa antena. Sebagai contoh, untuk pemancar 10 kW, diperlukan minimal 10 antena dengan kemampuan menangani daya masing-masing sebesar 1 kW. Antena-antena ini kemudian diatur secara spesifik untuk menghasilkan pola radiasi yang sesuai dengan wilayah yang direncanakan.



**Gambar 2. 10 Power Divider dengan daya 2,5 KW [11].**

Gambar 2.10 menggambarkan bagaimana daya RF dapat dibagi ke beberapa antena untuk mencapai pola radiasi tertentu. Dalam contoh tersebut, daya RF dari pemancar sebesar 2,5 kW didistribusikan ke 4 antena, dimana



setiap panel mampu menangani daya sebesar 625 W. Pembagian daya ini dilakukan melalui *Power Divider* untuk memastikan bahwa daya yang diberikan ke setiap panel tidak melampaui batas kemampuannya. Namun, penting untuk diingat bahwa *Power Divider* juga memiliki kemampuan menangani daya yang berbeda-beda. Oleh karena itu, pemilihan *Power Divider* tidak boleh sembarangan. Jadi harus dipilih secara cermat [11].

### 2.5.3 GAIN ANTENA

Antena berfungsi sebagai perangkat untuk mentransmisikan dan menerima sinyal informasi dari ruang bebas, baik sebagai pemancar maupun penerima. *Gain* merupakan ukuran yang menunjukkan kemampuan antena dalam mengarahkan gelombang yang diinginkan ke arah tujuan, seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.11. Pada antena parabola, efisiensinya tidak mencapai 100% karena terdapat beberapa daya yang hilang. Secara umum, secara komersial, efisiensi antena parabola berkisar antara 50% hingga 70%. Nilai *gain* dapat dihitung menggunakan persamaan 2.7.

$$G = 20 \log f + 20 \log d + 10 \log \eta + 20,4 \quad (2.8)$$

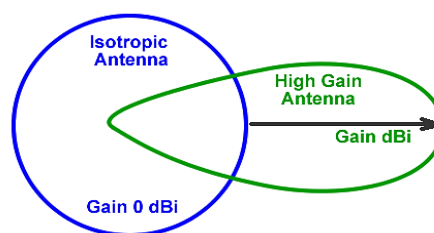
Dengan,

$G$  = *Gain* atau penguatan antena (dBi)

$f$  = frekuensi antena (GHz)

$d$  = Diameter antena (m)

$\eta$  = Efisiensi antena (50% - 70%)

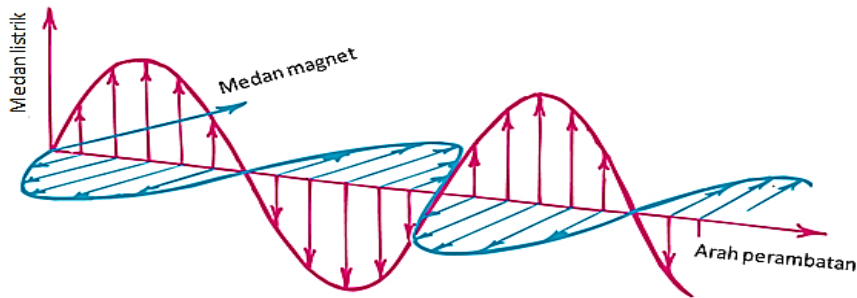


**Gambar 2. 11 Gain pada antena *isotropic* [14].**

### 2.5.4 POLARISASI

Polarisasi antena merujuk pada orientasi medan listrik gelombang radio terhadap permukaan bumi, ditentukan oleh struktur fisik antena dan cara antena tersebut diarahkan, berbeda dengan arah antena seperti yang

ditunjukkan pada gambar 2.12. Sebagai contoh, antena kawat lurus sederhana memiliki satu jenis polarisasi saat dipasang secara vertikal, dan jenis polarisasi yang berbeda saat dipasang secara horizontal. Dalam gelombang transversal, medan magnet dari gelombang radio sejajar dengan medan listrik, yang menjelaskan bahwa polarisasi antena berkaitan dengan arah medan listrik.



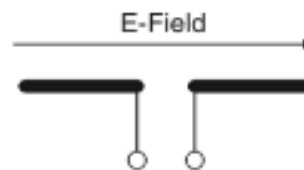
**Gambar 2. 12 Polarisasi Gelombang [15].**

Refleksi pada umumnya mempengaruhi polarisasi. Untuk gelombang radio, salah satu *reflector* yang penting adalah ionosfer yang dapat mengubah polarisasi gelombang. Dengan demikian, untuk sinyal yang diterima setelah pemantulan oleh ionosfer (gelombang langit), polarisasi yang konsisten tidak dapat diharapkan. Untuk komunikasi *line-of-sight* atau perambatan gelombang tanah, transmisi yang terpolarisasi secara horizontal atau vertikal umumnya tetap berada pada kondisi polarisasi yang sama di lokasi penerimaan. Mencocokkan polarisasi antena penerima dengan pemancar dapat membuat perbedaan yang sangat besar dalam kekuatan sinyal yang diterima. Gelombang terpolarisasi linier memiliki ujung yang bergerak sepanjang garis lurus seiring berjalannya waktu, sirkuler jika bergerak menyesuaikan lingkaran, dan elips jika bergerak mengikuti bentuk elips. Polarisasi linier terjadi ketika gelombang hanya bergetar dalam satu bidang getar, yang disebut sebagai bidang polarisasi. Polarisasi linear terdapat dua arah yaitu polarisasi horizontal dan vertikal [15].

a. Polarisasi Horizontal

Polarisasi dapat diprediksi dari geometri antena, meskipun dalam beberapa kasus tidak terlihat jelas (seperti pada antena *quad*). Polarisasi linear antena umumnya sepanjang arah (seperti yang dilihat dari lokasi

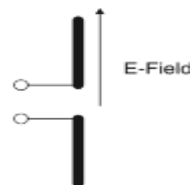
penerimaan) arus antenna ketika arah tersebut dapat ditentukan. Ketika susunan antenna *dipole* secara horizontal, polarisasinya berada pada arah horizontal yang sesuai dengan aliran arus seperti yang terlihat pada gambar 2.13. Polarisasi horizontal mengarahkan medan listrik secara horizontal terhadap permukaan tanah atau bumi. Polarisasi ini memungkinkan gelombang untuk merambat dengan sinyal yang lebih lebar namun memiliki jarak jangkauan yang lebih pendek.



**Gambar 2. 13 Polarisasi Horizontal [18].**

b. Polarisasi Vertikal

Polarisasi vertikal mengarahkan medan listrik tegak lurus dengan tanah atau permukaan bumi. Jenis polarisasi ini mendukung perambatan gelombang dengan sinyal yang lebih fokus dan memiliki daya jangkauan yang lebih jauh. Pada polarisasi vertikal, medan listrik sejajar dengan bidang dan berlawanan dengan arah refleksi, sementara medan listrik dan magnet yang ditransmisikan saling bersilangan. Jika antenna *dipole* diatur secara vertikal, maka polarisasinya berada dalam arah vertikal yang sejalan dengan arus yang mengalir. Sebagai perbandingan, polarisasi horizontal memiliki medan listrik yang sejajar dengan permukaan tanah atau bumi, sebagaimana terlihat pada gambar 2.14.

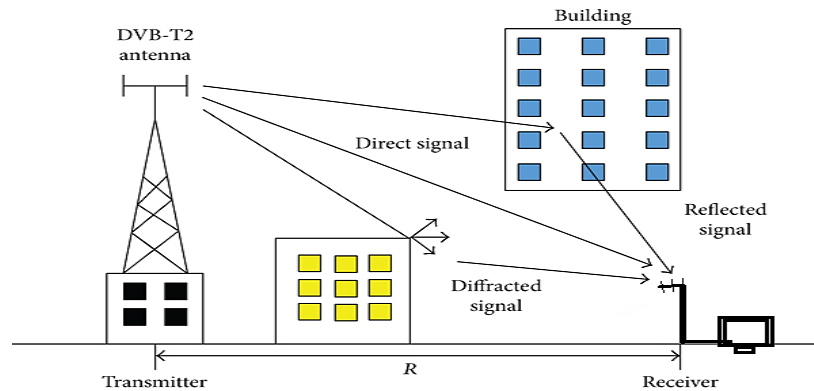


**Gambar 2. 14 Polarisasi Vertikal [18].**

## 2.6 PROPAGASI GELOMBANG RADIO

Sistem komunikasi gelombang radio adalah sistem yang memungkinkan pengiriman informasi dari pengirim ke penerima tanpa terhalang oleh kondisi

daratan. Suara, video, dan data dikirim melalui udara bebas, atau *air interface*, menggunakan frekuensi yang berkisar antara 3 KHz hingga 24 GHz, mengikuti standar yang disarankan oleh *Committee Consultative International on Radio* (CCIR).



**Gambar 2. 15 Propagasi Gelombang Radio pada DVB-T2 [17].**

Komunikasi gelombang radio sering digunakan dalam sistem satelit dan sistem *terrestrial* yang melalui atmosfer, di mana kondisi atmosfer dapat signifikan mempengaruhi perambatan gelombang. Perubahan tiba-tiba dalam energi gelombang yang disebabkan oleh fluktuasi ini dikenal sebagai *fading*. *Fading* merupakan penurunan tiba-tiba dalam daya sinyal yang diterima yang dapat mengganggu kualitas transmisi radio. Efek *fading* dapat termasuk refraksi, refleksi, difraksi, dan *scattering* (penghamburan), seperti yang dijelaskan dalam gambar 2.15 [17].

### 2.6.1 FREE SPACE LOSS

*Free Space Loss* merupakan redaman yang dipengaruhi oleh jarak dan frekuensi gelombang. Faktor-faktor yang memengaruhi nilai *Free Space Loss* meliputi jarak dan frekuensi. Ini merujuk pada redaman sinyal yang terjadi sepanjang ruang antara antena pemancar dan penerima. Ruang ini idealnya tidak memiliki penghalang, mengikuti karakteristik *Line of Sight* (tanpa hambatan). Besarnya *Free Space Loss* dapat dihitung menggunakan persamaan 2.8

$$FSL = 92,45 + 20 \log(f_{GHz}) + 20 \log(D_{Km}) \dots\dots\dots (2.9)$$

dengan,

FSL = *Free Space Loss* (dB)

F = frekuensi (Ghz)

$D$  = jarak antara antena pemancar dan penerima (km)

Persamaan 2.9 digunakan untuk menghitung *Free Space Loss* (FSL) ketika frekuensi yang digunakan dalam satuan Megahertz (MHz). Persamaan ini memungkinkan perhitungan redaman gelombang sepanjang jalur transmisi pada frekuensi tersebut. [7]

$$FSL = 32,45 + 20 \log (f_{\text{MHz}}) + 20 \log (D_{\text{Km}}) \quad (2.10)$$

dengan,

$FSL = \text{Free Space Loss}$  (dB)

$f$  = frekuensi (MHz)

$D$  = jarak antara antena pemancar dan penerima (km)

### 2.6.2 REFLEKSI

Ketika gelombang radio bertemu dengan permukaan bumi, pantulan tersebut tidak terjadi dari satu titik tetapi dari area tertentu yang luas. Area ini cukup besar untuk menjangkau beberapa zona *Fresnel*, dan bisa jauh lebih besar atau bahkan lebih kecil dari itu. Pantulan dari permukaan bumi memiliki dampak pada perubahan fasa bergantung pada polarisasi sinyal dan sudut datangnya. Gelombang dengan polarisasi horizontal yang dipantulkan dari permukaan bumi mengalami pergeseran fasa yang hampir mencapai  $180^\circ$ , menghasilkan perubahan panjang jalur hingga setengah panjang gelombang ( $\lambda/2$ ). Sedangkan pada sinyal dengan polarisasi vertikal, pergeseran fasa bisa bervariasi antara  $0^\circ$  dan  $180^\circ$ , tergantung pada sudut datang dan karakteristik pantul serta kondisi permukaan bumi. Untuk mengurangi efek pantulan bumi pada jalur LOS (*Line of Sight*), tinggi menara dapat diatur sedemikian rupa untuk memindahkan titik pantulan secara efektif ke wilayah tertentu, mengurangi dampak pantulan bumi pada transmisi sinyal. Untuk *loss* Gedung yang menggunakan beton berkisar sebesar 11 dB dan untuk bangunan bata *loss* bisa mencapai 4 dB [20].

### 2.6.3 DIFRAKSI

Difraksi terjadi ketika gelombang radio menghadapi penghalang yang lebih besar dibandingkan dengan panjang gelombang yang

dipancarkannya. Ini menyebabkan pelemahan atau redaman yang meningkat pada sinyal informasi yang ditransmisikan melalui gelombang radio. Pada frekuensi di bawah 1000 MHz, difraksi terjadi saat gelombang radio dibelokkan oleh penghalang dengan peningkatan redaman yang sejalan dengan ukuran penghalang tersebut. Namun, pada frekuensi di atas 1000 MHz, redaman meningkat lebih signifikan seiring dengan peningkatan ukuran penghalang, menyebabkan ketidakstabilan pengiriman sinyal. Jumlah redaman yang terjadi bergantung pada area yang tertutup oleh penghalang terhadap energi yang dipancarkan dan sifat difraksi dari penghalang tersebut [20].

#### 2.6.4 REFRAKSI

Refraksi merupakan pembelokan gelombang radio karena perubahan karakteristik atmosfer, seperti suhu, kepadatan, dan kelembaban. Perubahan ini memengaruhi kecepatan perambatan gelombang dalam atmosfer. Secara faktual, lintasan gelombang radio melengkung, namun untuk keperluan analisis, lintasan tersebut dimanipulasi untuk memudahkan representasi, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 2.17. Pembelokan gelombang radio karena atmosfer dan bumi direpresentasikan oleh *k-factor*, yang merupakan perbandingan antara radius bumi ekuivalen dengan radius bumi sebenarnya, seperti yang tercantum dalam persamaan 2.10.

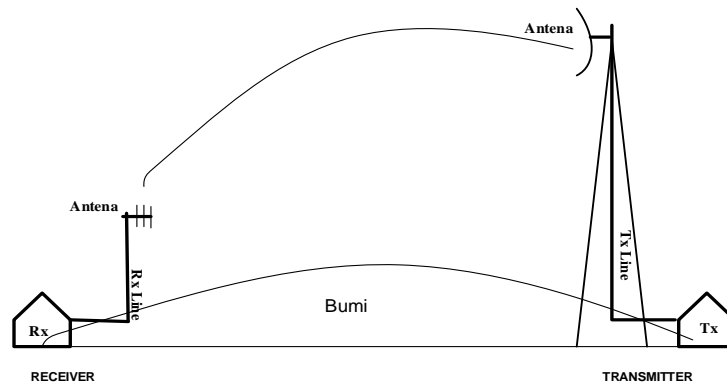
$$k = \frac{\text{equivalent earth radius}}{\text{true earth radius}} = \frac{r}{r_0} \quad (2.11)$$

dengan,

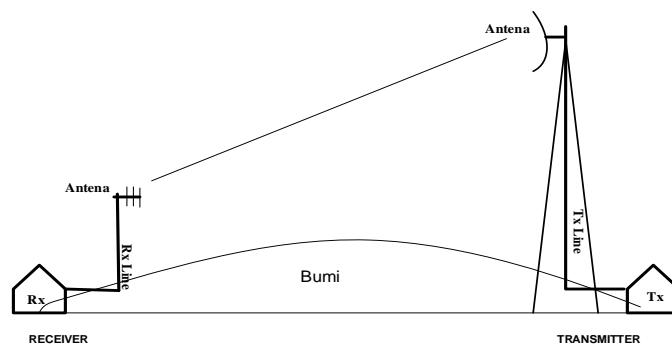
$k$  = *k-factor*

$r$  = radius bumi ekuivalen

$r_0$  = radius bumi sesungguhnya



**Gambar 2. 16 Microwave Path Real earth [17].**



**Gambar 2. 17 Microwave Path Equivalen earth [17].**

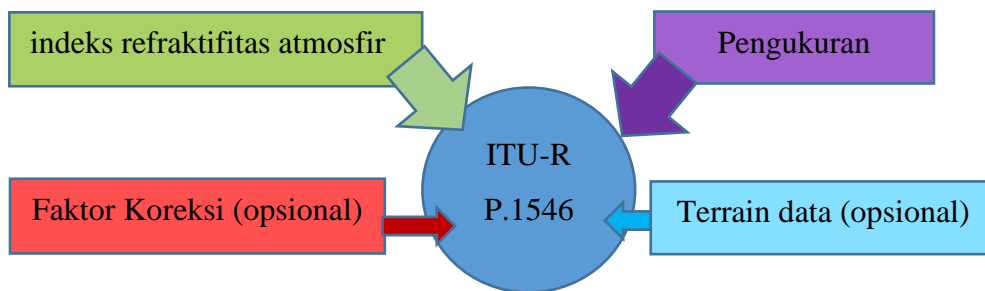
Dalam keadaan atmosfer normal, perhitungan lintasan propagasi gelombang sering menggunakan radius bumi ekuivalen  $k = 4/3$ . Dengan nilai ini, lintasan gelombang dapat dimodifikasi sehingga tampak sebagai garis lurus saat memetakannya. Proses ini menghasilkan profil lintasan yang disebut *Path Profile*  $k = 4/3$ . Jika nilai  $k < 4/3$ , ini disebut sebagai *Sub-refractive Atm.* Artinya, jalur gelombang radio terlalu dekat dengan permukaan bumi, dan nilai  $k$  yang terlalu rendah dapat meningkatkan kemungkinan gelombang terhalang oleh permukaan tanah. Sementara itu, ketika  $k > 4/3$ , ini disebut sebagai *Super-refractive Atm.* Dalam kondisi ini, jalur gelombang radio terlalu jauh dari permukaan bumi, yang dapat menyebabkan interferensi yang tidak diinginkan [17].

## 2.7 MODEL PREDIKSI PROPAGASI DVB-T2

### 2.7.1 ITU-R P. 1546

Rekomendasi dari International Telecommunication Union (ITU) ITU-R P.1546 merupakan model propagasi digunakan untuk prediksi *point to*

area layanan terrestrial pada pita frekuensi 30 MHz sampai 3000 MHz, jaringan radio troposfer di atas darat, laut atau jalur campuran hingga 1000 km dan ketinggian hingga 3000 m untuk antena pemancar. Rekomendasi ini merupakan pengembangan dari ITU-R 370. Rekomendasi ini terdiri dari kurva propagasi yang mewakili nilai kuat medan untuk 1 kW *Effective Received Power* (ERP) pada frekuensi nominal 100, 600 dan 2000 MHz, sebagai fungsi dari berbagai parameter. Beberapa kurva mengacu pada jalur darat, yang lainnya mengacu pada jalur laut. Interpolasi atau ekstrapolasi nilai yang diperoleh dari nilai frekuensi nominal ini harus digunakan untuk mendapatkan nilai kuat medan untuk frekuensi tertentu yang diperlukan. Rekomendasi ITU-R P.1546 didasarkan pada interpolasi/ekstrapolasi dari kurva kuat medan yang diperoleh secara empiris, sebagai fungsi dari jarak, ketinggian antena, frekuensi dan persentase waktu seperli yang terlihat pada gambar 2.18 [21].



**Gambar 2. 18 Parameter yang ada dalam ITU-R P.1546[21].**

Kurva yang diberikan dalam Rekomendasi ITU-R P.1546 didasarkan pada pengukuran yang dilakukan di daerah beriklim sedang. Kurva kekuatan medan dari rekomendasi ITU-R P.1546 mewakili probabilitas waktu 50%, 10% dan 1%. Probabilitas lokasi dapat bervariasi dalam kisaran dari 1% hingga 99%. Rekomendasi ITU-R P.1546 dapat digunakan dengan atau tanpa informasi tentang medan. Sejak pertama kali model ITU-R P.1546 dibuat, hingga saat ini, beberapa versi Rekomendasi telah diterbitkan. Penggunaan ITU-R P.1546 menggunakan persamaan 2.11.

$$E = g(f.D.htx.hrx) \quad (2.12)$$

Keterangan:

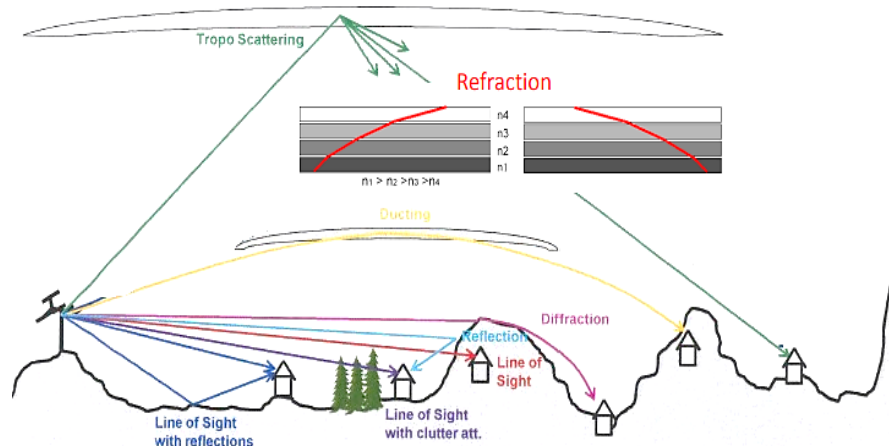
E = Kuat medan (dB $\mu$ V/m)



- $g$  = Power yang diterima (V/m)
- $f$  = Frekuensi (MHz)
- $D$  = Jarak Tx dan Rx (m)
- $h_{tx}$  = Tinggi antenna Tx (m)
- $h_{rx}$  = Tinggi antenna Rx (m)

### 2.7.2 ITU-R P. 1812

Model propagasi ITU-R P.1812 adalah model deterministik untuk layanan radio *point-to-area* yang membutuhkan data topografi (model medan digital) dan digunakan pada frekuensi 30 MHz hingga 3 GHz. Metode ini cocok untuk prediksi sistem komunikasi radio yang menggunakan sirkuit terestrial yang memiliki panjang lintasan dari 0,25 km hingga sekitar 3.000 km, dengan kedua terminal berada pada ketinggian sekitar 3 km di atas permukaan tanah. Metode ini tidak cocok untuk prediksi propagasi komunikasi ruang angkasa ke bumi. Metode prediksi propagasi ini direkomendasikan untuk evaluasi level sinyal secara terperinci untuk layanan point-to-point terestrial pada pita VHF dan UHF.



**Gambar 2. 19 Parameter yang ada dalam ITU-R P.1812 [22].**

Model propagasi dari metode ini adalah simetris dalam arti memperlakukan terminal radio, pemancar dan penerima dengan cara yang sama. Ini berarti bahwa dari sudut pandang model, tidak menjadi masalah terminal mana yang merupakan pemancar dan mana yang merupakan

penerima. Rekomendasi ITU-R P.1812 ditujukan terutama untuk digunakan pada sistem yang menggunakan antena dengan *gain* rendah. Prediksi kekuatan medan dari model ini didasarkan pada seperangkat persamaan umum dan beberapa persamaan tambahan khusus jalur untuk merefleksikan pengaruh parameter yang dipilih seperti yang terlihat pada gambar 2.18.

Elemen-elemen kunci dari model propagasi ITU-R P.1812 adalah perhitungan *line-of-sight*, difraksi (termasuk mencakup kasus-kasus sub-lintasan), permukaan bumi yang halus, medan yang tidak teratur dan hamburan troposfer lintasan; propagasi anomali (saluran dan pantulan/refleksi lapisan), variasi *gain* tinggi dalam gangguan, variabilitas lokasi dan kerugian oleh bangunan. Nilai kekuatan medan listrik E (dB $\mu$ V/m) untuk daya yang dipancarkan sebesar 1 kW dapat ditentukan menggunakan persamaan 2.12 [22].

$$E = 199,36 + 20 \log \log f - Lb \quad (2.13)$$

Keterangan:

- E (dB $\mu$ V/m) = Kuat medan
- f (MHz) = Frekuensi
- Lb (dB) = Pengurangan Keseluruhan

### **2.7.3 LONGLEY-RICE MODEL**

Model *Longley-Rice* adalah model propagasi yang banyak digunakan untuk memprediksi kehilangan jalur (*path loss*) dan cakupan gelombang radio dalam berbagai lingkungan. Model ini umumnya digunakan dalam rentang frekuensi 20 MHz hingga 20 GHz dan sering digunakan untuk link microwave *point to point* dan sistem *broadcast*. Sejak publikasi aslinya, telah ada beberapa revisi dan modifikasi dari model *Longley-Rice* dan beberapa koreksi yang telah dilakukan. Revisi dan modifikasi tersebut dijelaskan dalam laporan tahun 1982 dan memorandum setelahnya. Salah satu perkembangan yang signifikan, yang relevan dengan propagasi radio adalah pengenalan Urban Faktor (UF) yang digunakan untuk membuat prediksi di daerah perkotaan. Faktor ini diperoleh dengan membandingkan prediksi dari

model asli dengan kurva yang diberikan oleh Okumura untuk daerah perkotaan. Nilai UF didapat menggunakan persamaan 2.13.

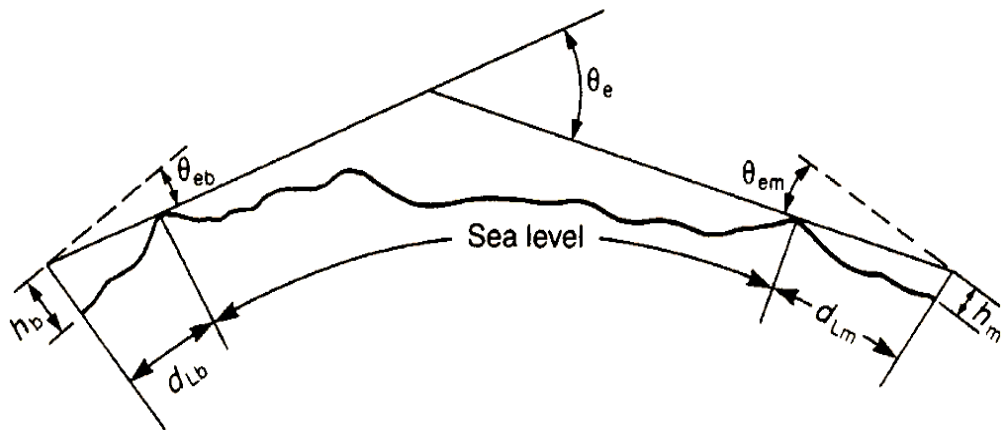
$$UF = 16.5 + 15 \log_{10} \left( \frac{f}{100} \right) - 0.12d \quad (2.14)$$

Keterangan:

UF = Urban Faktor (dB)

$f$  = Frekuensi (MHz)

$d$  = Jarak antara Tx dengan Rx (Km)



**Gambar 2. 20 Parameter untuk Longley-rice Model [20].**

Model *Longley-Rice* mempertimbangkan mekanisme propagasi yang berbeda, termasuk difraksi, pantulan, dan penyebaran, untuk menentukan kekuatan sinyal yang diterima di lokasi tertentu. Parameter khusus jalur komunikasi juga diperlukan pada model ini, seperti jarak horizontal antenna ( $d_{Lb}$  dan  $d_{Lm}$ ), sudut elevasi horizontal ( $\theta_{eb}$  dan  $\theta_{em}$ ), jarak sudut untuk jalur trans-horizontal ( $\theta_e$ ), ketinggian antenna efektif ( $h_b$  dan  $h_m$ ) dan parameter yang terkait dengan ketidakaturan medan. Beberapa parameter ini ditunjukkan pada gambar 2.20 [20].