

BAB II

DASAR TEORI

2.1 KAJIAN PUSTAKA

Pada penelitian [20] membahas tentang Skema OFDM dalam transmisi gambar melalui kanal *multipath rayleigh fading*. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) adalah teknik yang digunakan untuk mengurangi efek saluran *multipath* atau ISI (*Inter Symbol Interference*). Dalam penelitian ini juga menggunakan skema OFDM dalam kanal *multipath rayleigh fading* dan *noise* AWGN. Perbedaan penelitian ini terdapat pada *input* berupa data teks dalam pengiriman, serta menganalisa hasil nilai SNR dan juga BER dari data yang dikirimkan. Selain itu, juga menambahkan CCDF (*Complementary Cumulative Distribution Function*) sebagai fungsi untuk mengukur nilai probabilitas kekuatan sinyal (SNR) dan juga tidak membahas mengenai *Inter Symbol Interference*.

Penelitian [21] ini difokuskan pada pengembangan model *transceiver* OFDM yang efisien dengan menggunakan sistem radio berbasis perangkat lunak (SDR) dengan arsitektur yang dapat direkonfigurasi untuk komunikasi nirkabel. Penelitian tersebut menggunakan kanal *indoor* dilingkungan laboratorium. Selain selain itu menggunakan teknik modulasi BPSK dan QPSK. Pada penelitian laporan skripsi ini juga menggunakan *multicarrier* OFDM dengan teknik modulasi QPSK dalam kanal *indoor multipath rayleigh fading*. Perbedaan dengan penelitian laporan skripsi ini adalah penelitian [21] menggunakan dua teknik modulasi dari sistem OFDM dan konsep terkait lainnya seperti PAPR juga diperhitungkan untuk merancang Sistem OFDM. Koding FEC dilakukan dengan menyarankan penggunaan pengkode konvolusional. Dalam penelitian [21], kinerja tingkat kesalahan bit (BER) dan tingkat kesalahan simbol dianalisis dengan variasi jumlah bit per simbol, ukuran jendela, dan skema modulasi. Hasil membuktikan bahwa nilai BER meningkat ketika ukuran skema modulasi (M) diperbesar. Sedangkan pada laporan skripsi ini difokuskan pada perbandingan nilai SNR dan BER dengan menggunakan fungsi CCDF dalam pengiriman data teks melalui *kanal multipath rayleigh fading*.

Pada penelitian [31] menjelaskan tentang analisa kinerja OFDM dengan kanal AWGN dan *Rayleigh* berbasis *Simulink*. OFDM adalah teknik transmisi

yang menggunakan frekuensi *subcarrier* yang saling ortogonal. *Subcarrier* saling *overlap* tanpa terjadi interferensi. Pada laporan skripsi ini juga membahas mengenai transmisi data menggunakan *multicarrier* OFDM dengan kanal AWGN dan *Rayleigh* dalam kondisi *indoor*. Selain itu, kedua penelitian ini menganalisa nilai BER yang dihasilkan dari simulasi. Pada penelitian [31] juga membahas mengenai *energy per bit to noise ratio* (E_b/E_0), konvergensi titik konstelasi sinyal terima dengan menggunakan modulasi 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, QPSK, 16-PSK dan 64-PSK. Sedangkan pada penelitian laporan skripsi ini, parameter yang dianalisa meliputi nilai BER, SNR, dan CCDF dalam kondisi *multipath fading* berbasis *Software Defined Radio*.

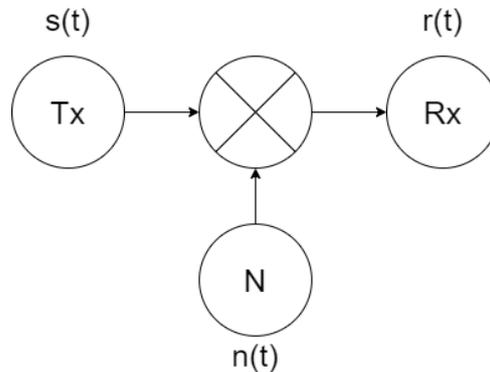
Pada penelitian [14] menjelaskan mengenai simulasi teknik OFDM QPSK menggunakan MATLAB. Sistem OFDM terdiri dari pemancar, saluran transmisi, dan penerima, dengan setiap tahapan melaksanakan proses tertentu dalam transmisi. Data yang dikirimkan berupa kalimat teks yang dikirimkan dalam bentuk bit secara paralel. Generasi sinyal OFDM melibatkan modulasi *subcarrier* menggunakan modulasi QPSK, penerapan *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT), dan pengiriman simbol hasilnya melalui saluran *Additive White Gaussian Noise* (AWGN). Pada penelitian ini juga menggunakan *multicarrier* OFDM dengan modulasi QPSK, serta penerapan IFFT dan FFT. Penelitian laporan skripsi ini juga menggunakan data teks dalam pengiriman. Pengembangan dari penelitian [14] adalah penggunaan kanal *multipath rayleigh fading* dan *noise* AWGN dalam kondisi *indoor*. Selain itu, menganalisa nilai SNR terhadap BER dengan fungsi CCDF sebagai pengukur nilai probabilitas kualitas sinyal. Karena, pada penelitian [14] keluarannya hanya sebatas gelombang *magnitude*, gelombang *phase* dan *bit stream* yang dikirim dan diterima.

2.2 DASAR TEORI

2.2.1 Model Kanal

Semua fenomena yang terjadi saat propagasi sinyal dari sisi pengirim dan penerima secara umum tidak akan dapat dipastikan model kanal komunikasi yang tepat sama persis dengan lingkungan yang ada. Model kanal tersebut hanya dapat mendekati estimasi nilai sinyal yang diterima dan juga nilai redaman pada masing-masing fenomena yang dihadapi.

Meskipun tidak mungkin untuk secara tepat memperkirakan redaman sinyal yang disebabkan oleh semua proses yang disebutkan sebelumnya (propagasi ruang bebas, refleksi, difraksi, hamburan, dan rugi penetrasi sinyal), sejumlah model telah diperkenalkan yang dapat memprediksi nilai sinyal yang diterima [19].



Gambar 2.1 Blok diagram pemodelan kanal

Pada Gambar 2.1 bahwa sebuah sistem komunikasi terjadi antara penerima (Tx) dan penerima (Rx), dimana sebuah data yang dikirim melalui sebuah kanal propagasi. Sinyal yang dikirimkan biasanya berupa sinyal analog dan terdapat derau, bisa berupa redaman atau distorsi. Sehingga didapatkan formula untuk merepresentasikan sistem komunikasi dengan,

$$r(t) = s(t).h(t) + n(t) \quad (2.1)$$

Dengan $r(t)$ sebagai penerima, $s(t)$ adalah sinyal yang dikirimkan, $h(t)$ merupakan nilai dari model kanal yang digunakan dan $n(t)$ adalah nilai *noise* yang didapat.

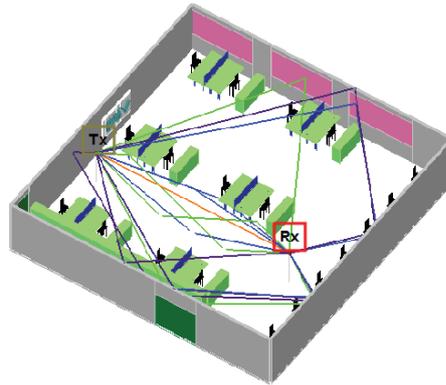
Pemodelan kanal dapat dibedakan menjadi dua, yaitu *indoor propagation* dan *outdoor propagasi*. Propagasi *indoor* dapat memodelkan transmisi sinyal di dalam bangunan atau struktur tertutup lainnya. Dalam kondisi *indoor* seperti gedung atau struktur bangunan, pantulan *multipath* terjadi dari berbagai permukaan, menciptakan variasi *multipath* yang kompleks. Dampaknya adalah kompleksitas yang meningkat dalam pemudaran dan *fading*, dengan durasi keterlambatan yang signifikan. Penurunan daya sinyal juga lebih tinggi di dalam ruangan karena hambatan seperti dinding dan struktur bangunan. Variasi bayangan menjadi lebih signifikan di dalam ruangan karena adanya hambatan seperti dinding dan

furnitur. Keseluruhan kondisi *indoor* menampilkan kompleksitas tambahan dalam propagasi sinyal dibandingkan dengan kondisi *outdoor*.

Model kanal *outdoor* berkaitan dengan transmisi sinyal di area terbuka, tanpa batasan fisik bangunan. Penurunan daya sinyal dengan jarak (*pathloss*) adalah karakteristik utama dalam kanal *outdoor*, menunjukkan redaman yang lambat namun mencakup area lebih luas. *Fading* dan *multipath* lebih sederhana dibandingkan *indoor*. Topografi, vegetasi, dan faktor musiman seperti curah hujan mempengaruhi karakter kanal. *Efek Doppler spread* terjadi akibat pergerakan dan dapat diprediksi dengan model Jakes. Dalam rangka perancangan sistem komunikasi di lingkungan terbuka, karakteristik propagasi sinyal *outdoor* perlu diperhitungkan. Beberapa propagasi *outdoor* seperti *Longley-Rice* model, *Okumura* model, Hatta model, *Wideband* model.

2.2.2 Model Kanal Indoor

Model kanal *indoor* merujuk pada model matematika atau simulasi yang digunakan untuk menggambarkan sifat transmisi sinyal nirkabel di dalam lingkungan *indoor* atau dalam ruangan. Dalam konteks propagasi gelombang radio dalam ruangan, perambatan sinyal dipengaruhi oleh karakteristik fisik lingkungan ruangan itu sendiri. Faktor-faktor ini memengaruhi perkecilan sinyal dengan tingkat yang lebih cepat dan membatasi cakupan area sinyal, sebagaimana dampak dari adanya dinding dan elemen lainnya. Selain itu, elemen-elemen seperti dinding, lantai, dan furnitur yang ada dalam ruangan tersebut memiliki potensi untuk menyebabkan redaman atau dispersi sinyal radio [12]. Dalam kanal *indoor* merupakan perpaduan antara banyaknya *multipath* dan juga kondisi LOS. Dalam kanal *indoor* biasanya menggambarkan saluran ketika sedikit LOS dan banyak gelombang *multipath* acak yang diterima. Sehingga model kanal yang digunakan biasanya distribusi *Rayleigh*, yang efektif dalam menggambarkan kondisi perambatan sinyal pada lingkungan *indoor* dengan *multipath* yang dominan. Model ini dapat digunakan untuk merancang dan mengoptimalkan sistem komunikasi nirkabel yang mampu beradaptasi dengan tantangan-tantangan yang ditimbulkan oleh lingkungan *indoor*.

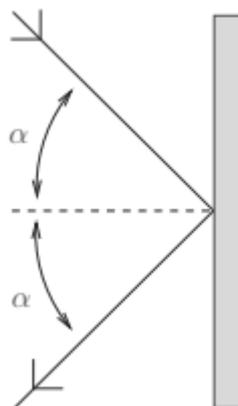


Gambar 2.2 Ilustrasi model kanal *indoor*

Gambar 2.2 merupakan faktor yang menyebabkan perubahan sinyal dalam jumlah yang signifikan. Sinyal yang dikirim dari penerima menuju penerima mengalami penyebaran atau *multipath* yang disebabkan oleh benda-benda yang berada di dalam ruangan, seperti lemari, sekat atau pembatas di dalam ruangan, sehingga mengalami fenomena refleksi, difraksi, dan *scattering* yang menyebabkan sinyal terbagi menjadi beberapa jalur sampai diterima oleh penerima.

a. Refleksi

Pada Gambar 2.3 pantulan terjadi saat gelombang datang menabrak sebuah benda datar sehingga mengalami pemantulan, sehingga arah gelombang pantul membentuk sudut α yang sama terhadap permukaan normal. Arah pemantulan sinyal gelombang membentuk sudut 90° . Refleksi terjadi pada saat gelombang datar berinteraksi dengan suatu objek yang memiliki luas yang secara signifikan lebih besar dibandingkan dengan panjang gelombangnya.



Gambar 2.3 Fenomena Refleksi [23]

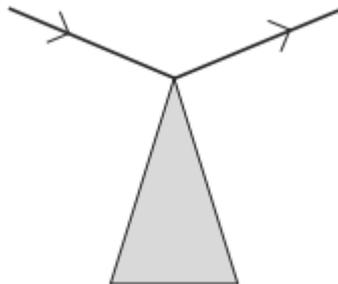
Dari fenomena refleksi tersebut, jumlah energi yang dipantulkan dan di transmisikan bergantung pada koefisien refleksi, yang dikenal dengan notasi R , yang dapat dihitung berdasarkan sifat material dari dua medium yaitu permitivitas relatif (ϵ_r), permeabilitas (μ_1), sudut datang (θ_i), dan frekuensi sinyal (f) atau panjang gelombang (λ). Jika pada sebuah propagasi gelombang, di mana gelombang elektromagnetik mengenai sebuah objek dan keduanya memiliki *permeability* yang sama atau $\mu_1 = \mu_1$ maka nilai koefisien refleksi R dapat ditentukan dalam format polarisasi vertikal R_{\perp} dan polarisasi horizontal R_{\parallel} sebagai berikut :

$$R_{\parallel} = \frac{-\epsilon_r \sin \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}}{\epsilon_r \sin \theta_1 + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_1}} \quad (2.2)$$

$$R_{\perp} = \frac{\sin \theta_1 - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_1}}{\sin \theta_1 + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_1}} \quad (2.3)$$

b. Difraksi

Difraksi terjadi ketika gelombang mengalami perubahan arah sebagai akibat dari interaksi dengan penghalang atau celah yang memiliki dimensi sebanding dengan panjang gelombangnya. Seperti pada Gambar 2.4 bahwa suatu gelombang sinyal datang mengenai tepi suatu objek sehingga sinyal pantul dapat mengalami perubahan arah. Fenomena ini dapat menghasilkan pembentukan pola interferensi di sekitar objek tersebut. Difraksi terjadi ketika gelombang datar mengenai suatu objek dengan ukuran atau luas tertentu yang mendekati panjang gelombangnya.



Gambar 2.4 Fenomena Difraksi [23]

Model paling sederhana yang digunakan untuk menghitung rugi-rugi sinyal akibat difraksi adalah mode *Knife-Edge*.

$$\frac{E_d}{E_0} = F(v) = \frac{(1+j)}{2} \int_v^\infty \exp((-j\pi t^2)) dt \quad (2.4)$$

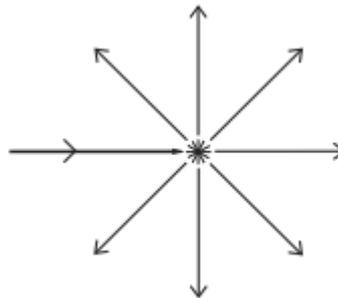
Dimana nilai E_d merupakan *electric field strength* dari gelombang yang terdifraksi. E_0 merupakan *free space field strength* dan v merupakan parameter difraksi *Fresnell-Kirchoff* yang nilainya adalah

$$v = h \sqrt{\frac{2d}{\lambda(d-d_{obs})d_{obs}}} \quad (2.5)$$

Dimana nilai h adalah tinggi dari objek penghalang dan nilai d adalah jarak dari pemancar ke penerima, d_{obs} merupakan jarak dari pemancar ke objek penghalang.

c. *Scattering*

Pada Gambar 2.5 dapat terlihat bahwa sebuah sinyal datang berinteraksi atau menumbuk suatu objek benda yang berada ditengah gambar sehingga mengakibatkan sinyal tersebut berhamburan keluar menjadi sinyal pantul ke berbagai arah. *Scattering* terjadi ketika gelombang berinteraksi dengan objek yang memiliki permukaan kasar atau struktur yang memiliki skala yang lebih kecil daripada panjang gelombangnya. Fenomena hamburan dapat terjadi pada berbagai jenis gelombang, termasuk gelombang suara dan cahaya.



Gambar 2.5 Fenomena *Scattering* [29]

Kekasaran permukaan umumnya diukur secara relatif terhadap ketinggian kritis, h_c , yang ditentukan oleh kriteria pemodelan *Rayleigh*. Suatu permukaan dianggap memiliki sifat yang halus ketika nilai kerugian yang diukur berkisar dari minimum hingga maksimumnya yang kurang dari h_c . Sebaliknya, jika nilai tersebut melebihi h_c , permukaan dianggap kasar.

Ketinggian kritis diukur dalam panjang gelombang sinyal λ dan sudut datang θ_i . Nilai ketinggian kritis h_c didefinisikan dengan

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \sin \theta_i} \quad (2.6)$$

Untuk permukaan yang kasar, intensitas medan listrik dari gelombang yang terkena *scattering* dapat dihitung dengan cara yang sama seperti gelombang refleksi tetapi dengan koefisien pantul yang dimodifikasi, seperti persamaan berikut ini

$$R_{rough} = psR \quad (2.7)$$

$$ps = \exp \left[-8 \left(\frac{\pi \sigma_h \sin \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right] I_0 \left[8 \left(\frac{\pi \sigma_h \sin \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (2.8)$$

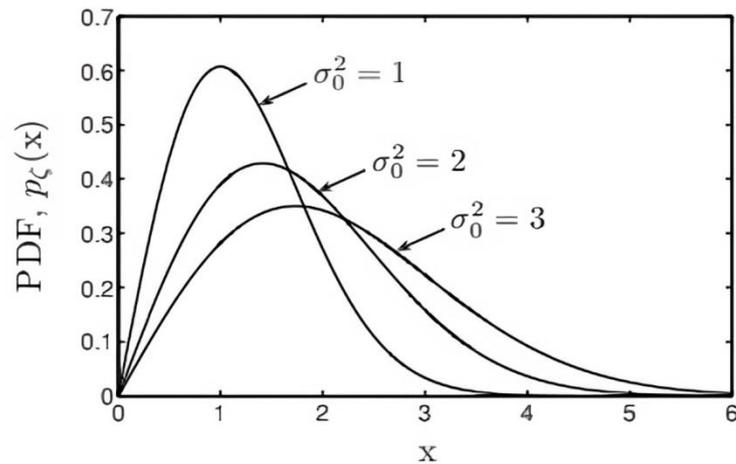
Dimana nilai σ_h adalah standar deviasi dari tinggi permukaan dan nilai I_0 adalah *Fungsi Bessel* tingkat pertama, orde ke nol.

Ketiga fenomena ini memperpanjang jalur perambatan sinyal dalam lingkungan dalam dari pengirim ke penerima. Kualitas kanal *indoor* dapat dikenali melalui tingginya tingkat pelemahan jalur dan perubahan yang cepat dalam tingkat sinyal.

2.2.3 Distribusi Rayleigh dan Rician

a. Distribusi *Rayleigh*

Pada Gambar 2.6 mencerminkan gelombang amplitudo dengan nilai σ yang berbeda-beda dan mempunyai nilai yang bervariasi. Terlihat pada Gambar 2.6 sumbu x adalah nilai variabel dari fungsi sinyal $p(x)$ yang merupakan *Probability Density Function* (PDF) atau fungsi tentang sebaran probabilitas variabel acak dalam suatu rentang nilai. PDF dapat menggambarkan distribusi probabilitas dari magnitude sinyal pada kanal yang mengalami *fading*. Grafik tersebut menunjukkan bahwa seiring dengan meningkatnya nilai σ_0^2 puncak dari PDF bergeser ke kanan dan menjadi lebih rendah, yang mengindikasikan bahwa sinyal dengan variabilitas yang lebih tinggi memiliki distribusi probabilitas yang lebih tersebar. Di mana nilai varians yang lebih tinggi menyebabkan penyebaran probabilitas yang lebih luas dan menurunnya probabilitas puncak pada nilai tertentu.



Gambar 2.6 Distribusi *Rayleigh* [23]

Distribusi *Rayleigh* biasanya digunakan untuk menggambarkan kanal ketika tidak ada komponen sinyal LOS yang dominan dan banyak gelombang *multipath* acak yang diterima.

$$P(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), & 0 \leq x \leq \infty \\ 0 & \end{cases} \quad (2.9)$$

Dimana nilai σ merupakan nilai *root mean square* (RMS) dari amplitudo sinyal yang diterima, sementara σ^2 menunjukkan rata-rata daya persatuan waktu yang diterima dan x adalah variabel random kontinyu dari fungsi sinyal $p(x)$. Pada distribusi *Rayleigh* dapat dicirikan dengan melihat adanya konstanta rata-rata (*mean*) serta *variance*. Persamaan *mean* dan *variance* yang diperoleh sebagai berikut :

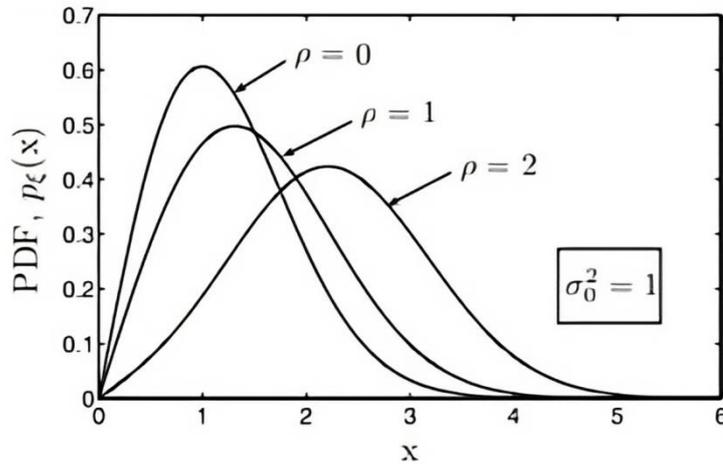
$$E(x) = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (2.10)$$

$$Var(x) = \sigma^2 \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.11)$$

b. Distribusi Rician

Dalam distribusi Rician, kondisi LOS (*Line of Sight*) umumnya merupakan komponen terkuat yang mengalami pemudaran yang lebih signifikan dibandingkan dengan komponen *multipath*. Gambar 2.7 menggambarkan gelombang sinyal amplitudo dengan nilai puncak amplitudo yang berbeda-beda. Jika nilai ρ sama dengan nol, maka akan

menyamai distribusi *Rayleigh*. Pada kondisi yang berbeda, jika suatu kondisi dimana sinyal yang datang dari LOS sangat dominan dibanding sinyal dari *multipath*. Sifat sinyal semacam ini diestimasi dengan distribusi *Rician*.



Gambar 2.7 Distribusi Rician [23]

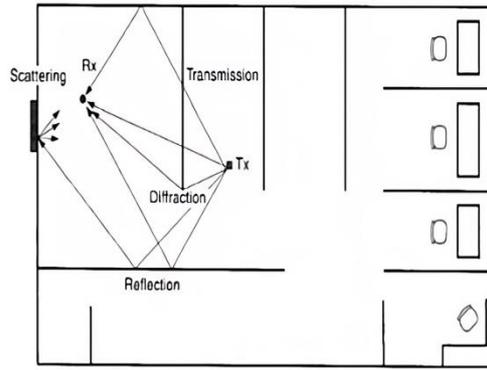
Nilai *Probability Density Function* (PDF) diwakili oleh:

$$p(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+\rho^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{x\rho}{\sigma^2}\right), & 0 \leq x < \infty \\ 0 & \end{cases} \quad (2.12)$$

Dimana nilai ρ adalah amplitudo puncak dan I_0 fungsi *Bessel* tingkat pertama, orde ke nol [18].

2.2.4 *Multipath Fading*

Multipath fading adalah fenomena yang terjadi ketika sinyal radio mencapai penerima melalui beberapa jalur, dan kekuatan relatif serta fase sinyal berubah. Hal ini dapat menyebabkan kekuatan dan kualitas sinyal berfluktuasi, sehingga mengakibatkan distorsi, pemudaran, dan interferensi. Seperti pada Gambar 2.8 *multipath fading* disebabkan oleh pemantulan, difraksi, dan hamburan gelombang radio oleh objek seperti dinding, lemari, sekat ruangan dan hambatan lainnya. Ini adalah masalah umum dalam sistem komunikasi nirkabel, khususnya yang beroperasi pada pita frekuensi tinggi. Untuk mengurangi dampak *multipath fading*, teknik seperti keragaman, pemerataan, dan pengkodean saluran dapat digunakan



Gambar 2.8 Multipath Propagation Indoor

$$s(t) = \text{Re}\{u(t)e^{j2\pi f_c t}\}, \quad (2.13)$$

Di mana $u(t)$ adalah *baseband* gelombang pembawa. e adalah nilai bilangan kompleks, Re adalah nilai *real*, dan f_c adalah frekuensi *carrier*. Akibat propagasi *multipath*, sinyal yang diterima menjadi

$$r(t) = \text{Re}\left\{\sum_{n=0}^{N(t)} \alpha_n(t)u(t - \tau_n)\right\}e^{j2\pi f_c(t - \tau_n(t) + \phi D_n(t))}, \quad (2.14)$$

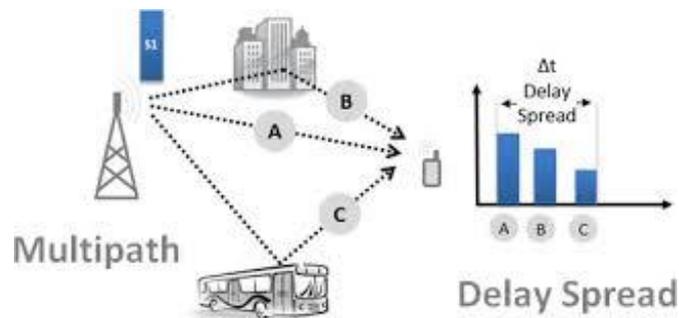
Di mana $N(t)$ adalah jumlah jalur, $\tau_n(t)$ adalah *delay*, $\alpha_n(t)$ adalah amplitudo, dan $\phi D_n(t)$ adalah pergeseran fase, semuanya untuk jalur ke- n pada waktu t . Perhatikan bahwa pergeseran fase $\phi D_n(t)$ berkaitan dengan pergeseran frekuensi *Doppler* sebagai $\phi D_n(t) = \int 2\pi f D_n(t) dt$. Setelah beberapa manipulasi dengan fokus pada masukan dan keluaran dasar gelombang kompleks [16].

2.2.5 Delay Spread

Delay spread adalah lebar pulsa dari impuls yang ditransmisikan antara pemancar dan penerima, disebabkan oleh propagasi pantulan dan hamburan pada saluran komunikasi. *Delay spread* dapat menyebabkan interferensi antar simbol (ISI) karena setiap simbol dapat saling tumpang tindih. Beberapa faktor pada delay spread yang dapat dianalisis untuk menentukan bit rate transmisi adalah *mean excess delay*, *maximum excess delay*, dan *Root Mean Square (RMS) delay spread*.

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\bar{\tau})^2}$$

Dimana σ_τ adalah *Root Mean Square (RMS) delay spread* dan $\overline{\tau^2}$ adalah rata-rata kuadrat dari waktu kedatangan.



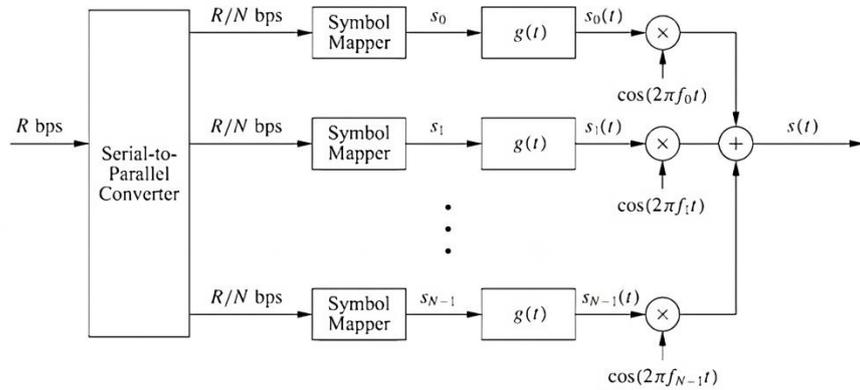
Gambar 2.9 Fenomena *delay spread* akibat *multipath* [18]

Gambar 2.9 mengilustrasikan konsep *multipath* dan *delay spread* dalam sistem komunikasi nirkabel. *Multipath* terjadi ketika sinyal yang dipancarkan dari pemancar mencapai penerima melalui beberapa jalur berbeda karena adanya refleksi, difraksi, dan hamburan oleh objek-objek di sekitar, seperti gedung, kendaraan, dan lain-lain. Dalam gambar ini, sinyal ditunjukkan mencapai penerima melalui tiga jalur, yaitu A, B, dan C. Jalur-jalur ini mengakibatkan perbedaan waktu kedatangan sinyal ke penerima, yang dikenal sebagai *delay spread* [18].

2.3.1 *Multicarrier*

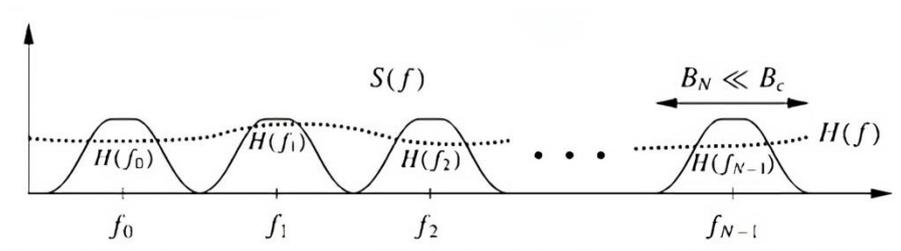
Konsep dasar dari *multicarrier* adalah memecah beberapa *subcarrier* yang ditransmisikan menjadi banyak aliran *subcarrier* yang berbeda dan mengirimkannya melalui banyak *subcarrier* yang berbeda. Idealnya, *subcarrier* tersebut bersifat ortogonal. Kecepatan data pada setiap *subcarrier* jauh lebih rendah daripada total kecepatan data, dan lebar pita *subcarrier* yang sesuai jauh lebih kecil daripada lebar pita sistem keseluruhan. Selain itu, *multicarrier* diimplementasikan secara efisien secara digital [11]. Dengan memecah sinyal menjadi beberapa *subcarrier*, sistem *multicarrier* dapat mengurangi efek selektif frekuensi fading, yang merupakan masalah umum dalam komunikasi nirkabel. Setiap *subcarrier* mengalami *fading* yang independen, sehingga kehilangan satu *subcarrier* tidak akan menyebabkan hilangnya seluruh data. Teknologi seperti *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)* memanfaatkan

prinsip *multicarrier* ini untuk menyediakan transmisi data yang lebih reliabel dan efisien.



Gambar 2.10 Multicarrier transmitter [11]

Seperti pada Gambar 2.10 sinyal masukan berupa data seri yang kemudian dikonversi ke dalam bentuk paralel. Setelah itu, dimodulasi pada tiap *subcarrier* dengan frekuensi yang berbeda-beda. Kemudian, pada *symbol mapper* berperan dalam menerapkan atau memetakan data dari domain informasi ke simbol-simbol yang akan ditransmisikan melalui saluran komunikasi. Blok $g(t)$ bisa diasumsikan sebagai *cosine pulses* yang dibangkitkan dengan waktu simbol $T_N = (1 + \beta)/B_N$. Kemudian, pada blok selanjutnya dimodulasi secara linier.



Gambar 2.11 Transmitted Signal [11]

Gambar 2.11 menunjukkan proses transmisi sinyal *multicarrier* yang dipecah menjadi *subcarrier* dengan frekuensi yang berbeda dan dimodulasi pada tiap *subcarrier* nya sejauh $f_N - 1$. Setiap *subcarrier* memiliki lebar *bandwidth* yang berbeda.

Sinyal termodulasi yang terkait dengan semua subkanal dijumlahkan untuk membentuk sinyal yang ditransmisikan, diberikan formula

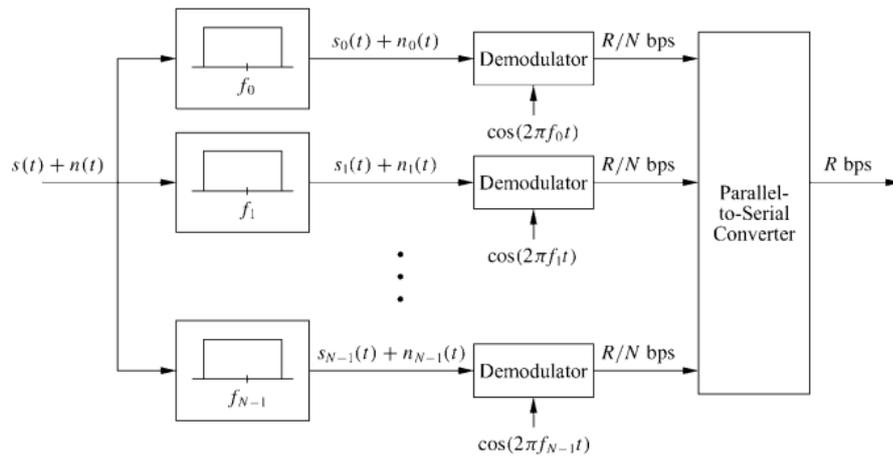
$$s(t) = \sum_{i=0}^{N-1} S_i g(t) \cos(2\pi f_i t + \phi_i) \quad (2.15)$$

Dimana S_i adalah simbol kompleks yang diasosiasikan dengan *subcarrier* ke- i dan ϕ_i adalah *offset* fasa dari pembawa ke- i . Untuk subkanal yang tidak tumpang tindih ditetapkan $f_i = f_0 + i(BN)$, $i = 0, \dots, N - 1$.

$$B = \frac{N(1+\beta+\varepsilon)}{T_N} \quad (2.16)$$

$$B = \frac{N+\beta+\varepsilon}{T_N} \approx \frac{N}{T_N} \quad (2.17)$$

Dimana B adalah *bandwidth*, bagian 2.9 menunjukkan subkanal yang tidak saling tumpang tindih, berbeda dengan bagian 2.10 implementasi diskrit dari modulasi *multicarrier* yang saling *overlapping*. N adalah banyaknya jumlah subkanal, T_N adalah waktu tunda dan ε adalah daya minimal *bandwidth*.



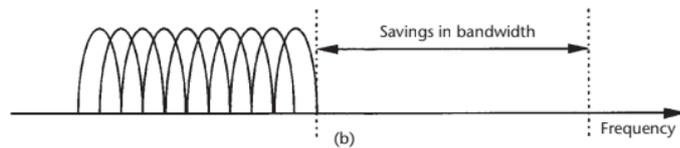
Gambar 2.12 Multicarrier receiver [11]

Gambar 2.12 menunjukkan gambar sistem *multicarrier* dari sisi *receiver*, di mana sebuah sinyal akan dikembalikan ke dalam bentuk semula dan dikonversi kembali dari bentuk paralel menjadi data serial. Pada blok f merupakan pembagian sinyal menjadi beberapa *subcarrier* dengan frekuensi yang berbeda. Kemudian, pada blok demodulator adalah mengembalikan sinyal ke bentuk awal setelah dimodulasi. Setelah itu, sinyal di konversi dari paralel menjadi serial.

Beberapa *multicarrier* yang biasa digunakan adalah seperti, OFDM, FBMC, GFDM.

a. Orthogonal Frequency Division Multiplexing

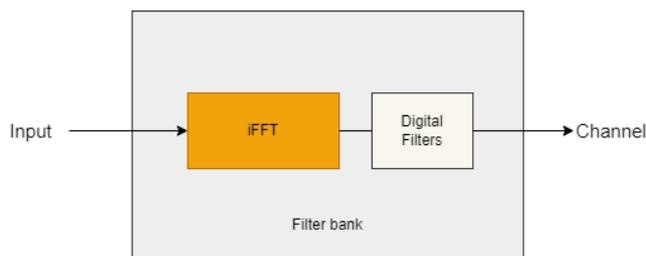
OFDM merupakan salah satu jenis *multicarrier* yang digunakan dalam komunikasi *wireless*. Seperti pada Gambar 2.12 merupakan ilustrasi OFDM, dimana suatu teknik dalam pengiriman sinyal yang mana *subcarrier*-nya saling ortogonal, sehingga memiliki keunggulan dapat menghemat ketersediaan *bandwidth* yang ada. Dalam OFDM, data yang akan dikirimkan dibagi menjadi beberapa bagian dan dimodulasi pada *subcarrier* yang berbeda. Setiap *subcarrier* memiliki lebar pita yang lebih kecil dibandingkan dengan lebar pita sinyal asli, sehingga dapat mengurangi *inter-symbol interference* (ISI). OFDM juga memungkinkan penggunaan modulasi adaptif, yang memungkinkan penggunaan lebih banyak *subcarrier*.



Gambar 2.13 OFDM [7]

b. Filter Bank Multicarrier

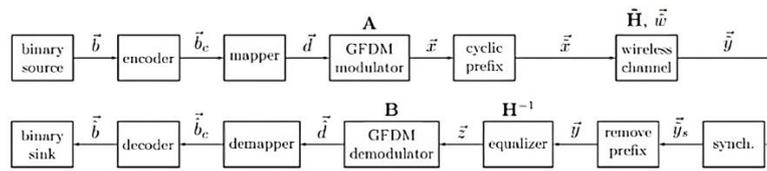
Dalam Filter Bank *Multicarrier* (FBMC), sekelompok simbol data paralel dikirimkan melalui serangkaian filter yang dimodulasi. Seleksi filter prototipe mempengaruhi lokalisasi frekuensi pulsa yang dihasilkan dan dapat meningkatkan kinerja dalam mengatasi interferensi saluran yang berdekatan dibandingkan dengan *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), seperti pada Gambar 2.14 filter bank dalam konteks *Filter Bank Multicarrier* (FBMC) memiliki peran esensial dalam pemisahan frekuensi, pengurangan interferensi antar-subkanal, pembentukan spektrum sinyal, penanganan *Inter-Symbol Interference* (ISI), dan mitigasi perambatan sinyal.



Gambar 2.14 Blok Diagram FBMC

c. Generalized Frequency Division Multiplexing

Generalized Frequency Division Multiplexing (GFDM) merupakan metode modulasi *multicarrier* yang melibatkan penggunaan filter blok, di mana satu blok dapat mentransmisikan beberapa subsimbol per *subcarrier*. Dalam GFDM, pembentukan pulsa melingkar diterapkan pada setiap *subcarrier*. Pada Gambar 2.15 GFDM juga dapat menyerupai sistem *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)* yang dikenal dengan menggunakan *cyclic prefix* dalam pengiriman, sekaligus mirip dengan *Single-Carrier Frequency-Domain Equalization (SC-FDE)* yang menggunakan satu *subcarrier* dengan beberapa subsimbol [24].



Gambar 2.15 Transceiver pada GFDM [24]

2.3.2 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

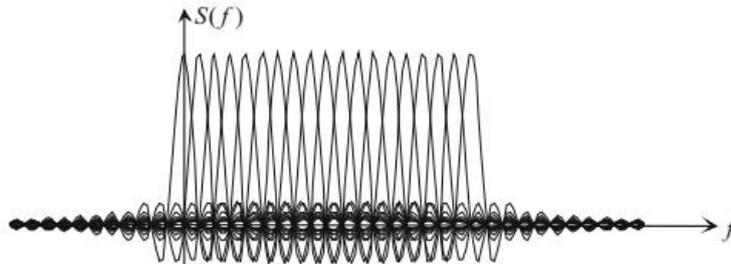
Teknik transmisi OFDM adalah pendekatan dalam komunikasi yang membagi *bandwidth* total menjadi banyak sub-kanal frekuensi dengan sinyal ortogonal. Data tingkat tinggi dibagi menjadi aliran data rendah dan dimodulasi secara terpisah, kemudian ditransmisikan secara bersamaan dalam bentuk *overlapped* dan paralel. Seperti pada Gambar 2.16 sinyal OFDM terdiri dari banyak *subcarrier* yang saling ortogonal dengan jarak frekuensi yang sama. Semua *subcarrier* tetap ortogonal selama durasi simbol. OFDM memungkinkan durasi simbol yang lebih besar dibandingkan dengan penundaan *multipath* maksimum dalam sistem OFDM. Oleh karena itu, sinyal transmisi OFDM terdiri dari N *subcarrier* yang berdekatan dan bersifat ortogonal yang diberi jarak frekuensi Δf pada sumbu frekuensi. Semua sinyal *subcarrier* bersifat ortogonal satu sama lain dalam durasi simbol dengan panjang TS , jika jarak *subcarrier* dan durasi simbol dipilih sedemikian rupa sehingga [17]

$$TS = \frac{1}{\Delta f} \tag{2.19}$$

Dengan menggunakan teknik modulasi *multicarrier overlapping* dapat menghemat *bandwidth*. Untuk dapat merealisasikan teknik ini, bagaimanapun tetap diperlukan adanya pengurangan cakup silang (*cross talk*) antar *subcarrier*, yang berarti bahwa dibutuhkan ortogonalitas antar *subcarrier*. Pentingnya mempertahankan ortogonalitas di antara *subcarrier* sinyal OFDM selain untuk menjaga *subcarrier* tidak mengalami interferensi adalah agar setiap *subcarrier* dapat dideteksi oleh prosedur dari transformasi *Fourier* [18]. Sinyal OFDM dapat direpresentasikan sebagai berikut :

$$\text{OFDM signal : } c(t) = \sum_{n=0}^{N-1} S_n(t) \sin(2\pi f_n t) \quad (2.20)$$

Dimana $c(t)$ sebagai sinyal OFDM, $s(t)$ adalah simbol yang dipetakan ke konstelasi terpilih dan f_n merupakan frekuensi orthogonal.



Gambar 2.16 Spektrum OFDM yang terdiri banyak subcarrier [17]

Gambar 2.16 merupakan proses sinyal yang saling tumpang tindih (*overlapping*) dalam rentang domain frekuensi tanpa terjadinya interferensi. Dua atau lebih sinyal dikatakan saling tegak lurus (ortogonal) jika sinyal yang satu dengan yang lainnya saling berdiri sendiri. Dalam matematika, vektor-vektor dikatakan ortogonal satu sama lain jika sudut antara mereka adalah 90 derajat, atau dengan kata lain, *dot product* (hasil perkalian titik) antara vektor-vektor tersebut sama dengan 0. Secara matematis, suatu kumpulan sinyal φ_i dengan $i = \pm 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, akan ortogonal pada interval $[a, b]$, jika memenuhi persamaan berikut [18]:

$$\int_a^b \varphi_l(t) \varphi_k^*(t) dt = \begin{cases} E_k, & \text{jika } l = k \\ 0, & \text{jika } l \neq k \end{cases} \quad (2.21)$$

$$= E_k \delta(l - k)$$

Dimana $\varphi_k^*(t)$ merupakan kompleks konjugate dari sinyal $\delta(l - k)$ yang merupakan fungsi delta *Kronecker*, yang didefinisikan sebagai:

$$\delta(l - k) = \begin{cases} 1, & \text{jika } l = k \\ 0, & \text{jika } l \neq k \end{cases} \quad (2.22)$$

Prinsip Orthonormalitas adalah kondisi di mana vektor-vektor bukan hanya ortogonal, tetapi juga memiliki panjang (magnitude) atau norma 1. Dengan kata lain, vektor-vektor tersebut adalah unit vektor dan ortogonal satu sama lain. Jika vektor A dan vektor B orthonormal, maka $A \cdot B = 0$ dan $\|A\| = \|B\| = 1$, dimana $\|A\|$ adalah norma atau panjang vektor A.

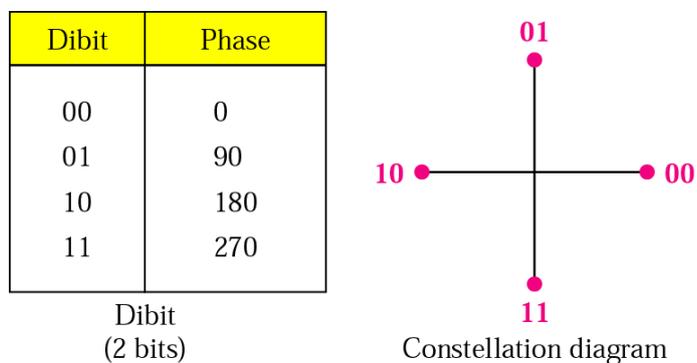
2.3.3 Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

QPSK merupakan perkembangan dari modulasi *Phase Shift Keying* (PSK) dan *Binary Phase Shift Keying* (BPSK). Untuk membedakan dua sinyal tersebut, digunakan dua sinyal pembawa ortogonal yang diberikan $\cos 2\pi f_c t$ dan $\sin 2\pi f_c t$. Kedua sinyal sinyal pembawa tersebut tetap ortogonal dalam satu periode.

$$\int_0^{T_c} \cos 2\pi f_c t \times \sin 2\pi f_c t = 0 \quad (2.23)$$

Dimana T_c adalah periode sinyal pembawa dan f_c adalah frekuensi pembawa dan $f_c = \frac{1}{T_c}$.

Penerapan QPSK lebih umum digunakan untuk meningkatkan *data rate* dibandingkan dengan sistem BPSK, sambil tetap mempertahankan lebar pita (*bandwidth*) yang sama dari sinyal dan mempertahankan tingkat data BPSK, tetapi dengan mengurangi separuh lebar pita yang diperlukan [32].



Gambar 2.17 Konstelasi diagram QPSK

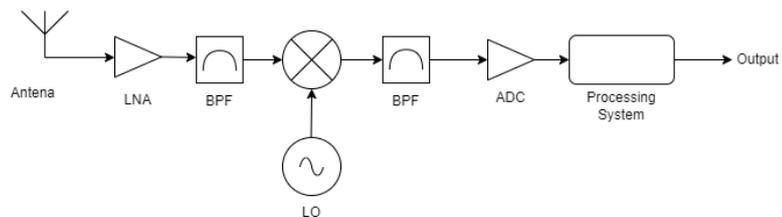
Seperti pada Gambar 2.17 terlihat bahwa, QPSK melibatkan empat bentuk sinyal termodulasi yang berasal dari empat kombinasi sinyal masukan yang berbeda, yaitu 00, 01, 11, dan 10. Setiap dua bit biner direpresentasikan sebagai satu simbol dalam modulasi ini. Dalam konstelasi diagram QPSK tersebut, setiap dua bit juga merepresentasikan nilai sudut *phase* yang berbeda-beda. Dengan menggunakan dua sinyal pembawa QPSK dapat ditulis dalam persamaan

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}d_I(t) \cos(2\pi f_c t) + \frac{1}{\sqrt{2}}d_Q(t) \cos(2\pi f_c t) \quad (2.24)$$

Dimana d_I adalah data input *in-phase* dari sinyal pembawa dan d_Q data input *quadrature phase* dari sinyal pembawa.

2.4.1 Software Defined Radio

Software Defined Radio (SDR) merupakan jenis radio yang dapat diatur ulang atau diprogram ulang, di mana karakteristik lapisan fisiknya dapat dimodifikasi secara signifikan melalui perubahan perangkat lunak. SDR memiliki kemampuan untuk mengimplementasikan berbagai fungsi pada waktu yang berbeda pada satu *platform*, mendefinisikan sejumlah fitur radio *baseband* dalam bentuk perangkat lunak (contohnya, modulasi, pengkodean koreksi kesalahan), dan memiliki tingkat kontrol perangkat lunak tertentu terhadap operasi *front-end* RF (contohnya, frekuensi pembawa transmisi). Pada Gambar 2.18 sebuah sistem SDR seluruh proses modulasi dan pemrosesan sinyal dijalankan oleh perangkat lunak, sehingga fungsi radio tergantung pada perangkat lunak yang beroperasi di dalamnya. Meskipun pencampuran sinyal ke *Intermediate Frequency* (IF) atau *Baseband* (BB) masih dapat dilakukan menggunakan *mixer* analog dan bukan melalui perangkat lunak, sehingga sistem ini tidak dapat disebut sebagai radio perangkat lunak yang "murni" [19].



Gambar 2.18 Software Defined Radio System [19]

Pada Gambar 2.18 menunjukkan sistem pada *Software Defined Radio* yang dimulai dari antena sebagai input, kemudian masuk melalui proses LNA (*Low Noise Amplifier*) yang berfungsi sebagai menguatkan sinyal radiofrekuensi (RF) yang masuk sebelum diolah oleh blok demodulasi atau pengolahan sinyal lainnya. Setelah itu, melalui proses BPF (*Band Pass Filter*) yang berfungsi untuk memfilter sinyal berdasarkan frekuensi dan membiarkan hanya sinyal dalam rentang frekuensi tertentu melewati. Sebuah sinyal akan melalui kanal setelah melewati blok BPF yang kemudian sinyal tersebut di konversi dari analog ke digital menggunakan ADC (*Analog Digital Converter*). Setelah itu, sinyal akan diproses dan kemudian dikeluarkan menjadi sebuah *output*.

Sebuah sinyal menggambarkan fungsi dari satu atau lebih variabel independen. Misalnya sinyal gelombang kosinus didefinisikan sebagai

$$S(t) = A \cos(2\pi f t) \quad (2.25)$$

$$S(t) = A \cos(2\pi f n), \quad n = 1, \dots, N \quad (2.26)$$

Dimana amplitudo sinyal A dan frekuensi pembawa f adalah konstanta. Maka, sinyal ini merupakan fungsi dari t . Bagian 2.26 sinyal dapat diklasifikasikan sebagai sinyal waktu kontinu atau sinyal waktu diskrit. Dengan kata lain, sinyal ini berubah seiring waktu (n) [25].

Domain waktu dan frekuensi adalah cara alternatif untuk merepresentasikan sinyal yang sama. Transformasi sinyal dalam satu domain juga memengaruhi domain lain, meskipun dengan metode yang berbeda. Contohnya, konvolusi dalam domain waktu setara dengan perkalian dalam domain frekuensi. Operasi matematika lainnya, seperti penjumlahan, penskalaan, dan pergeseran, memiliki analogi operasi serupa dalam domain yang berlawanan. Sifat-sifat ini dikenal sebagai sifat transformasi *Fourier*, yang menjelaskan bagaimana perubahan matematis dalam satu domain dapat menciptakan perubahan serupa dalam domain lainnya.

$$x(t) = \sin(t) + \frac{\sin(3t)}{3} + \frac{\sin(5t)}{5} + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n \times t)}{n}; n = \text{odd} \quad (2.27)$$

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.28)$$

Bagian 2.28 merupakan formula dari FFT (*Fast Fourier Transform*) dimana t adalah variabel waktu dalam detik di seluruh domain waktu, dan ω adalah variabel frekuensi dalam radian per detik di seluruh domain frekuensi. Transformasi tersebut dapat menghasilkan IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*)

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j2\pi\omega t}d\omega, \quad (2.29)$$

Dengan cara kita menyatakan $x(t)$ sebagai hasil penjumlahan bobot dari eksponensial kompleks. Pasangan transformasi *Fourier* di atas dapat diungkapkan sebagai

$$x(t) \overset{F}{\leftrightarrow} X(\omega), \quad (2.30)$$

Dimana bagian kiri dari simbol $F \leftrightarrow$ sebelum transformasi *Fourier*, sedangkan bagian kanan dari simbol $F \leftrightarrow$ setelah transformasi *Fourier* [26].

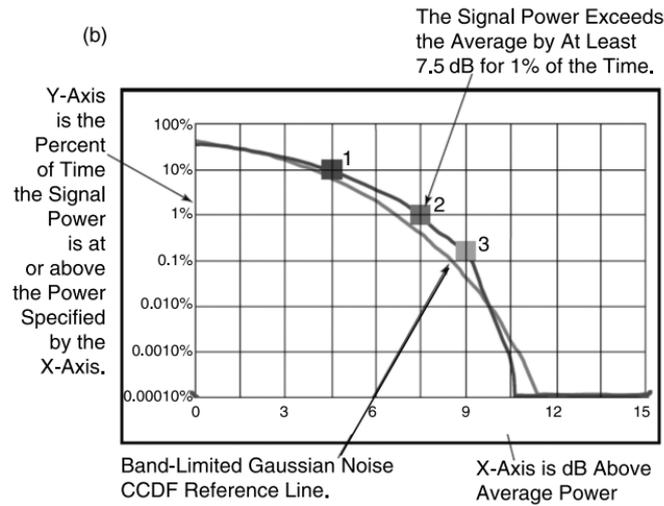
2.4.2 Parameter Pengujian Sistem

A. *Complementary Cumulative Distribution Function (CCDF)*

Cumulative Distribution Function (CDF) adalah fungsi matematika yang digunakan untuk menghitung probabilitas bahwa variabel acak x akan memiliki nilai kurang dari atau sama dengan nilai tertentu x . CDF dapat digunakan untuk menghitung probabilitas kumulatif dari suatu variabel acak dan juga dapat digunakan untuk menghitung nilai rata-rata, variansi, dan deviasi standar dari suatu distribusi probabilitas.

CCDF adalah metode statistik yang menunjukkan jumlah waktu yang dihabiskan sinyal di atas tingkat daya tertentu. Pengukuran *Complementary Cumulative Distribution Function (CCDF)* merupakan metode optimal untuk secara komprehensif mengkarakterisasi statistik daya sinyal yang telah mengalami modulasi digital. Format modulasi dapat dianalisis dengan membandingkan CCDF untuk mengevaluasi tekanan sinyal pada komponen seperti amplifier. Kurva CCDF juga dapat dimanfaatkan untuk menilai dampak penyaringan terhadap sinyal. Dari kurva CCDF pada sinyal modulasi digital, para perancang amplifier dapat memperoleh informasi akurat tentang berapa banyak ruang dinamis yang tersedia untuk mengatasi lonjakan daya puncak dan mencegah terjadinya kompresi. Oleh karena itu,

kurva CCDF menjadi alat yang efektif untuk mengamati dan mengkarakterisasi bagaimana berbagai faktor memengaruhi perubahan amplitudo puncak pada sinyal yang telah mengalami modulasi digital.



Gambar 2.19 Kurva CCDF [28]

Kurva CCDF menunjukkan berapa banyak waktu yang dihabiskan sinyal pada atau di atas tingkat daya tertentu. Tingkat daya dinyatakan dalam dB relatif terhadap daya rata-rata. CCDF sering digunakan untuk menganalisis puncak daya (*peak power*) atau daya maksimum yang dapat dicapai oleh sinyal dalam suatu sistem. CCDF mengukur probabilitas bahwa suatu sinyal akan memiliki daya lebih besar dari nilai tertentu. Kurva CCDF, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.19 adalah plot tingkat daya relatif versus probabilitas. Kurva tersebut terdiri dari Y-Axis pada sumbu vertikal dan X-Axis pada sumbu horizontal. Sumbu X diskalakan ke dB di atas daya sinyal rata-rata, dimana sebenarnya mengukur rasio puncak terhadap rata-rata bukan tingkat daya absolut. Sumbu Y adalah persentase waktu yang dihabiskan sinyal ada atau di atas tingkat daya yang ditentukan sumbu X. Posisi kurva CCDF menunjukkan tingkat deviasi puncak terhadap rata-rata dengan sinyal yang lebih menekan jauh ke kanan. Sehingga didapatkan formula CCDF

$$CCDF = 1 - CDF \quad (2.31)$$

$$CCDF = 1 - \left(1 - e^{\frac{-y^4}{2\sigma^2}}\right)^N \quad (2.32)$$

Dimana σ adalah parameter skala yang berkaitan dengan variansi saluran. N adalah jumlah *subcarrier* dan e adalah fungsi eksponensial.

Nilai CCDF (*Complementary Cumulative Distribution Function*) yang tinggi pada transmisi data dapat mencerminkan bahwa kekuatan sinyal melewati ambang tertentu dengan frekuensi yang tinggi. Dalam kerangka transmisi data, nilai CCDF yang tinggi bisa menandakan adanya kelebihan daya sinyal yang berpotensi menghambat kinerja sistem, seperti distorsi *non-linear* dan interferensi. Nilai CCDF (*Complementary Cumulative Distribution Function*) yang rendah mencerminkan bahwa kekuatan sinyal jarang melampaui ambang tertentu. Dalam konteks transmisi data, nilai CCDF yang rendah menggambarkan bahwa kelebihan daya sinyal yang dapat mengganggu kinerja sistem jarang terjadi. Hal ini dapat berkontribusi pada peningkatan kualitas transmisi data dan mengurangi potensi distorsi serta interferensi yang dapat diakibatkan oleh kelebihan daya sinyal [28].

B. *Peak-to-Average Power Ratio (PAPR)*

PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*) menyatakan pembagian antara daya maksimum sebuah cuplikan sinyal OFDM yang dikirimkan dengan daya rata-rata sinyal OFDM, dinyatakan dalam satuan dB [8]. PAPR sebuah sinyal OFDM $x(t)$ dapat didefinisikan seperti

$$PAPR(dB) = \frac{P_{peak}}{P_{average}} \quad (2.33)$$

Dimana P_{peak} adalah daya maksimum atau daya puncak dan $P_{average}$ adalah daya rata-rata sinyal. Keduanya daya tersebut dalam satuan dB (desibel).

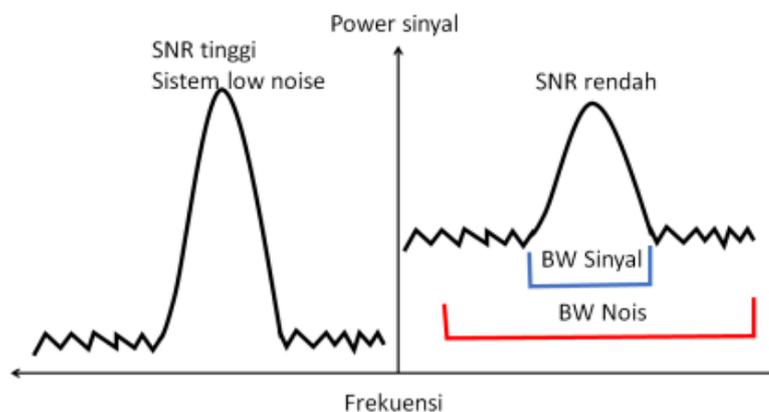
C. *Signal to Noise Ratio (SNR)*

Signal to Noise Ratio (SNR) adalah parameter yang umum digunakan untuk mengukur mutu sinyal atau kualitas transmisi dalam konteks transmisi analog. SNR menggambarkan perbandingan antara kekuatan sinyal dengan kekuatan derau pada titik tertentu dalam transmisi. Parameter SNR ini memiliki peran penting dalam menentukan kinerja atau performa jaringan

nirkabel. Semakin tinggi nilai SNR, semakin tinggi kualitas jalur transmisi yang bersangkutan. Ini berarti bahwa kemungkinan penggunaan jalur transmisi tersebut untuk mengirimkan data dan sinyal komunikasi pada kecepatan tinggi akan semakin besar [13]. Sehingga didapatkan formula sebagai berikut :

$$\frac{S}{N} = \frac{\text{signal power}}{\text{noise power}} \quad (2.34)$$

Dimana S adalah *Signal Power* atau kekuatan sinyal merupakan kuat sinyal yang diterima pada *receiver* dan N adalah derau, dimana sinyal-sinyal yang tidak diinginkan yang selalu ada dalam suatu sistem transmisi. *Level noise* yang cukup besar akan terasa mengganggu pada sisi penerima. *Noise* dalam kualitas sinyal tersebut merepresentasikan model AWGN (*Additive white Gaussian noise*).

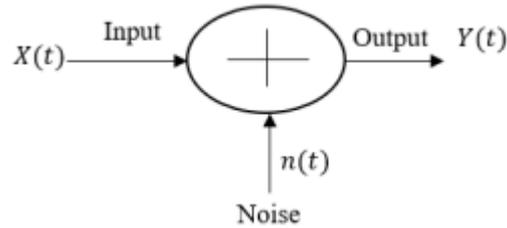


Gambar 2. 20 Perbandingan grafik SNR tinggi dan rendah [20]

Pada Gambar 2.20 Pengukuran SNR harus merujuk pada lebar BW yang sudah ditentukan, atau lazim disebut sebagai *Bandwidth Noise* (NBW). Gambar tersebut menunjukkan perbandingan SNR tinggi dan rendah sebanding dengan tinggi *power sinyal* dan sepanjang frekuensi tertentu. SNR yang tinggi memiliki sistem *low noise* sedangkan SNR rendah memiliki *bandwidth noise* yang besar.

AWGN adalah jenis *noise* yang terjadi secara pasti dalam setiap jaringan nirkabel. *Noise* ini memiliki sifat-sifat tambahan, yaitu bersifat aditif, putih, dan *gauss*. Sifat aditif mengindikasikan bahwa *noise* ini dijumlahkan dengan sinyal, sifat putih menyiratkan bahwa *noise* tidak tergantung pada frekuensi sistem operasi dan memiliki rapat daya yang

tetap, sedangkan sifat *gauss* menyatakan bahwa amplitudo *noise* mengikuti distribusi *gauss* yang memiliki kepadatan probabilitas yang konstan.



Gambar 2.21 Model AWGN

Sinyal keluaran yang melalui kanal AWGN sama dengan sinyal asli yang di tambah *noise* AWGN. Sebuah sinyal input $X(t)$ akan dikirimkan melalui sebuah kanal dengan adanya *noise* $n(t)$ sebelum menjadi *output* ($Y(t)$) seperti pada Gambar 2.21. Sehingga persamaanya :

$$Y(t) = n(t) + X(t) \quad (2.35)$$

Dimana $Y(t)$ adalah sinyal keluaran, $n(t)$ adalah *noise*, dan $X(t)$ adalah sinyal asli. *Noise* terjadi selama proses transmisi sinyal dikirim sampai diterima bagian *receiver*. Untuk probabilitas kemunculan derau dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (2.36)$$

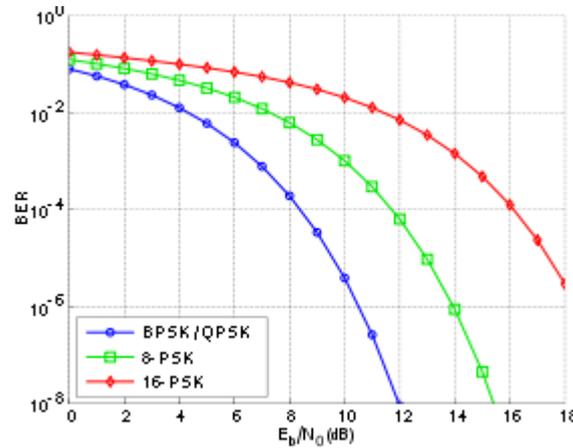
Dengan $p(x)$ adalah probabilitas kemunculan derau, σ adalah standar deviasi, m adalah rata-rata, dan x adalah variabel tegangan atau daya sinyal [27].

D. Bit Error Rate (BER)

Bit Error Rate (BER) merupakan parameter yang mengukur tingkat kesalahan bit yang terjadi selama transmisi data antara terminal pengirim dan terminal penerima. Kesalahan ini dapat diestimasi dengan membandingkan jumlah total bit yang dikirim dengan jumlah bit yang mengalami kerusakan selama proses transmisi, baik dari data masukan hingga keluaran [15]. Pada Gambar 2.22 contoh perbandingan hasil nilai BER dengan E_b/E_0 dari ketiga modulasi, dari gambar menunjukkan bahwa nilai BER yang paling baik dimulai dari modulasi BPSK, 8-PSK, 16-PSK antara hasil keluaran setelah demodulasi dengan data masukan asli. Secara umum, semakin tinggi perbandingan E_b/E_0 , semakin rendah nilai BER,

menandakan kinerja sistem yang lebih baik dalam mengurangi kesalahan bit. Namun, ada *trade-off* antara kinerja dan efisiensi spektrum, di mana modulasi dengan perbandingan energi yang lebih tinggi mungkin memerlukan lebih banyak spektrum. Kurva tersebut memberikan wawasan penting untuk pemilihan modulasi yang sesuai dengan karakteristik kanal, kebutuhan *bandwidth*, dan toleransi terhadap kesalahan. Persamaan untuk menghitung *Bit Error Rate* dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$BER = \frac{\text{jumlah bit eror}}{\text{jumlah total bit kirim}} \quad (2.37)$$



Gambar 2. 22 Contoh Grafik BER $\frac{E_b}{E_0}$ [15]

Teori BER *rayleigh fading* dijadikan sebagai pendekatan realistis kondisi kanal pada sistem komunikasi *wireless*. Dalam modulasi QPSK juga memiliki kemampuan untuk mentransmisikan data pada tingkat dua kali lipat dari yang dapat dicapai oleh BPSK dalam lebar pita yang sama pada tingkat *Bit Error Rate* (BER) yang setara. Perhitungan teori kerja dengan modulasi QPSK dapat ditulis dengan persamaan

$$BER_{QPSK_AWGN} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{E_b/E_0}) \quad (2.38)$$

$$BER_{QPSK(Rayleigh_Fading)} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2}{E_b/E_0}}} \right] \quad (2.39)$$

Dimana *erfc* merupakan *error function* pada sebuah modulasi yang mengakomodasi *shannon theory*. Probabilitas BER digunakan untuk mengukur kemungkinan eror yang disesuaikan dengan jenis kanal.