

BAB 2 DASAR TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Pada penelitian E.M.Alfaroby, N.M. Ardiansyah, and K.Anwar pada tahun 2018 yang berjudul “*Study on Channel Model for Indonesia 5G Network*” membahas mengenai pemodelan kanal 5G dengan menggunakan teknik *stastical channel model* (SSCM). Penelitian ini menggunakan *bandwidth* sebesar 200 MHz dan menggunakan frekuensi 28 GHz serta menggunakan parameter keadaan alam di kota Bandung, seperti parameter tekanan udara sebesar 924,1 mBar, kelembapan sebesar 77,87 %, dan suhu rata – rata sebesar 23,65 °C. Dilakukan serangkaian simulasi komputer untuk mengevaluasi kinerja Indonesia 5G di bawah model saluran yang diperoleh berdasarkan *cyclic prefix-orthogonal frequency division multiplexing* (CP-OFDM) [2].

Simulator yang digunakan pada penelitian ini untuk mendapatkan *Instantaneous Power Delay Profile* (PDP) menggunakan *software* aplikasi *Network University Simulation (NYUSIM)*. Kemudian data PDP tersebut diolah menggunakan *Cumulative Distribution Function* (CDF) sehingga mendapatkan representatif PDP. Berdasarkan evaluasi kinerja jaringan nirkabel 5G di Indonesia dengan parameter lingkungan di kota Bandung, Indonesia ditemukan bahwa saluran Indonesia 5G dapat dimodelkan dan diwakilkan oleh *fading multipath* memiliki 18 jalur dengan *delay* interval 10 ns. Proses CDF digunakan untuk mengetahui *outage probability* pada kapasitas kanal, dengan mempertimbangkan modulasi BPSK, *coding rate* (R) yang digunakan adalah $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, dan 1 serta penggunaan E_b/N_0 yang beragam. Pada penelitian ini, pengujian *frame error rate* (FER) dan *bit error rate* (BER) dilakukan untuk melakukan validasi dari *outage probability* terhadap model kanal yang diusulkan [2].

Pada penelitian Khoirun Ni’amah, Shelly Nurjanah, dan Achmad Rizal Danisya pada tahun 2020 yang berjudul “*Model Kanal 5G Frekuensi 28 GHz dengan Pengaruh Suhu di Kota Yogyakarta*” membahas mengenai pemodelan kanal 5G di bawah pengaruh suhu minimum dan suhu maksimum. Penelitian tersebut menggunakan *environtment* parameter keadaan alam kota Yogyakarta yang

dianggap mewakili keadaan alam yang ada di Indonesia. Penelitian ini menggunakan frekuensi kerja sebesar 28 GHz dengan *bandwidth* yang digunakan sebesar 50 MHz. Parameter keadaan alam di kota Yogyakarta yang digunakan yaitu suhu minimum sebesar 22,53 °C, suhu maksimum sebesar 30,83 °C, tekanan udara sebesar 991,75 mbar, kelembapan udara sebesar 79,69 %, dan curah hujan sebesar 150mm/h. Hasil *instantaneous* PDP diperoleh dari simulasi menggunakan NYUSIM yang selanjutnya diolah sehingga mendapatkan representatif PDP. Kemudian *representative* PDP diproses dengan menggunakan perhitungan kapasitas kanal sehingga didapatkan hasil *outage probability* dengan *coding rate* (R) sebesar $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, 1, dan E_b/N_0 yang beragam. Hasil penelitian tersebut membandingkan antara suhu maksimum dan minimum pada model kanal 5G dalam hal kebutuhan E_b/N_0 untuk mendapatkan probabilitas kapasitas kanal jatuh di bawah *channel coding rate* ($P(C < R)$) lebih kecil sama dengan dari 10^{-4} . Pada *coding rate* $\frac{1}{2}$ diperlukan 17,26 dB dan 15,25 dB untuk menekan probabilitas C jatuh di bawah R hingga lebih kecil sama dengan dari 10^{-4} , *coding rate* $\frac{3}{4}$ adalah 19,53 dB dan 17,45 dB dan *coding rate* 1 adalah 22,11 dB dan 19,82 dB. Hal ini menunjukkan bahwa suhu mempengaruhi performansi sistem komunikasi pada 5G dan menunjukkan bahwa dengan *coding rate* $\frac{1}{2}$ lebih efisien dalam kualitas dan kapasitas kanal [10].

Penelitian E. Christy, R.P Astuti, and K. Anwar pada tahun 2019 dalam penelitian “*Indonesia 5G Channel Model Under Foliage Effect*” yang membahas mengenai pemodelan kanal 5G di bawah pengaruh vegetasi atau dedaunan. Pada penelitian tersebut menggunakan frekuensi kerja sebesar 3.3 GHz dan *bandwidth* yang digunakan sebesar 40 MHz serta menggunakan parameter keadaan alam yang berada di kota Bandung seperti tekanan udara sebesar 1011 mBar, kelembapan udara sebesar 75%, suhu udara sebesar 27 °C dan curah hujan sebesar 130 mm/h. Penelitian ini mengusulkan model kanal 5G dengan hasil representatif PDP. Hasil dari simulasi NYUSIM tersebut diproses dan dievaluasi menjadi *outage performance* menggunakan efek dedaunan sebesar 20 %, 40 %, 60 %, 80 % dan tanpa efek dedaunan. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kanal 5G Indonesia bisa dimodelkan dengan 17 *path* tanpa efek dedaunan, dan kurang dari 15 *path* jika terdampak oleh dedaunan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa redaman

daun dapat menyebabkan penurunan jumlah *path* dan memburuknya *outage performance*. *Outage performance* yang sudah diperoleh kemudian dilakukan validasi menggunakan *Bit Error Rate* (BER) dan *Block Error Rate* (BLER) dari *cyclic-prefix orthogonal frequency division multiplexing* (CP-OFDM) *numerology zero* dengan 5G *complex binary phase shift keying* (BPSK) dan *Polar codes* [11].

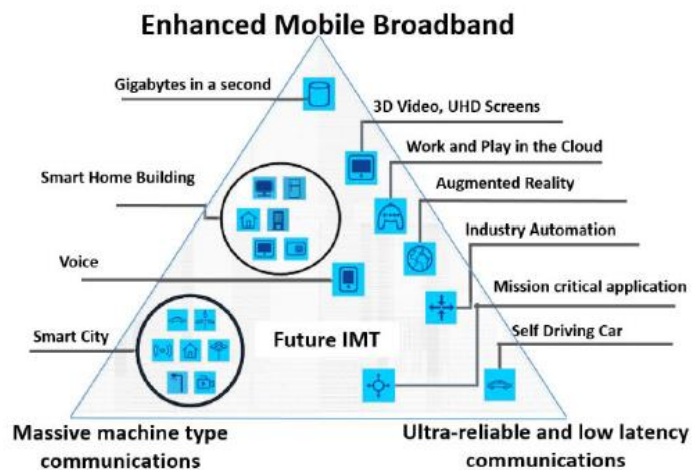
Pada penelitian M. N. Rahman and K. Anwar pada tahun 2018 yang berjudul “*Outage Performances of 5G Channel Model Considering Temperature Effects at 28 GHz*” yang membahas mengenai pemodelan kanal di kota Bandung dengan pengaruh suhu minimum dan suhu maksimum. Frekuensi kerja yang digunakan adalah sebesar 28 GHz dan *bandwidth* sebesar 400 MHz, serta menggunakan *environment* keadaan alam kota Bandung yang dianggap mewakili keadaan alam yang ada di Indoensia. Hasil penelitian tersebut menunjukkan total *path* dari representatif PDP dengan skenario suhu minimum memiliki 18 *path*, sedangkan untuk suhu maksimum memiliki 20 *path* [12]. Pada penelitian R.D. Wahyuni and K. Anwar pada tahun 2018 yang berjudul “*Outage Performances of 5G Channel Model Considering Humadity Effect*”, yang membahas mengenai pemodelan kanal di kota Bandung dengan pengaruh kelembapan udara minimum sebesar 52% dan kelembapan udara maksimum sebesar 100%. Frekuensi kerja yang digunakan adalah sebesar 3,3 GHz dan *bandwidth* sebesar 60 MHz, serta menggunakan *environment* keadaan alam kota Bandung yang dianggap mewakili keadaan alam yang ada di Indoensia. Hasil penelitian tersebut menunjukkan total *path* yang memiliki jumlah yang sama dari representatif PDP dengan skenario kelembapan udara minimum dan kelembapan udara maksimum memperoleh 13 *path* [13].

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Teknologi 5G New Radio (NR)

Teknologi 5G atau *Fifth Generation* (generasi kelima) merupakan sebuah istilah yang digunakan untuk menyambut generasi kelima sebagai fase berikutnya dari teknologi 4G. Banyak sekali perubahan yang terjadi pada teknologi 5G tersebut. Diantaranya adalah kecepatan data lebih tinggi yang di prediksi mencapai kecepatan 20 Gbits/s, serta penggunaan *bandwidth* yang lebih besar yang jauh lebih

baik dari pada generasi sebelumnya. *International Telecommunication Union* (ITU) yang merupakan sebuah organisasi internasional yang didirikan untuk membakukan serta meregulasi radio internasional dan telekomunikasi mengeluarkan rekomendasi ITU-R M 2083-0 mengenai *IMT Vision – Framework and overall objective of the future development of IMT for 2020 and beyond* yang memaparkan mengenai skema penggunaan teknologi 5G yang digambarkan dalam segitiga *usage* sebagai berikut:



Gambar 2.1 *Usage scenario of IMT for 2020 and beyond* [3].

Penjelasan mengenai tiga skenario yang dirancang dalam penggunaan teknologi 5G sebagai berikut [3]:

1. *Enhanced Mobile Broadband*

Permintaan *mobile broadband* akan terus menerus meningkat untuk konten multi-media, layanan dan data. Skenario penggunaan *enhanced mobile broadband* akan hadir dengan aplikasi area yang baru dan persyaratan tambahan pada aplikasi *mobile broadband* yang sudah ada untuk meningkatkan kinerja dan *user experience* tanpa hambatan. Penelitian ini termasuk dalam skenario penggunaan *enhanced mobile broadband*, yang bertujuan untuk meningkatkan kecepatan mencapai 20 Gbps.

2. *Ultra-reliable and Low Latency Communications*

Kasus penggunaan ini harus memiliki persyaratan yang ketat untuk kemampuan *throughput*, *latency*, dan *availability*. Beberapa contoh yang

termasuk *wireless control* dari *industrial manufacturing*, pembedahan medis jarak jauh, keamanan transportasi, dll.

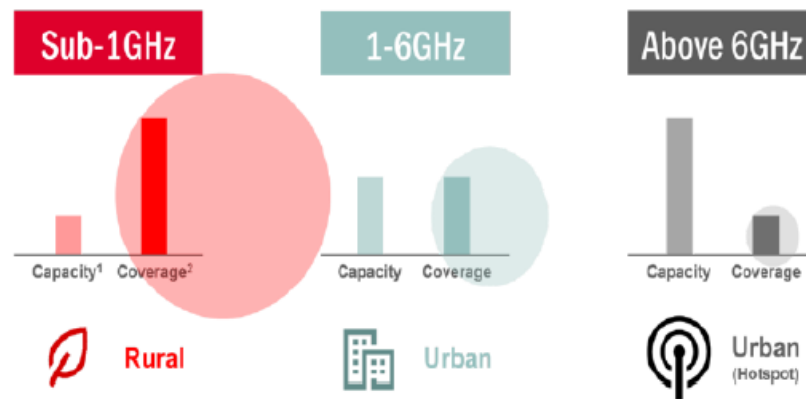
3. *Massive Machine Type Communications*

Kasus penggunaan ini dikarakteristikan dengan jumlah *device* yang terkoneksi sangat besar. *Device* diharuskan terjangkau dan memiliki baterai yang tahan lama.

2.2.2 Kategori Spektrum 5G

Berbeda dengan generasi sebelumnya, teknologi 5G hadir dengan berbagai skenario baru yang dapat membantu mempermudah kehidupan manusia sehari-hari seperti yang sudah di gambarkan pada segituga *usage* Gambar 2.1. Dengan meningkatnya kebutuhan tersebut, menyebabkan bertambahnya kebutuhan spektrum untuk layanan penyelenggaraan sistem telekomunikasi bergerak seluler dimasa yang akan datang. Spektrum untuk teknologi 5G dibagi menjadi tiga kategori yaitu [14]:

1. Rentang frekuensi sub – 1 GHz (Rural), pada rentang frekuensi ini, dapat digunakan untuk mendukung implementasi layanan IoT (*Internet of Things*) serta memiliki cakupan yang luas yaitu mulai dari urban, hingga suburban, dan area rural. Hal ini dikarenakan sifat propagasi dari sinyal frekuensi tersebut yang dapat membuat 5G memiliki cakupan yang lebih luas dan penetrasi sinyal pada bangunan yang dalam.
2. Rentang frekuensi 1 – 6 GHz (Urban), pada rentang frekuensi ini dapat diimplementasikan sebagai penggabungan dari cakupan dan kapasitas untuk layanan teknologi 5G serta dapat digunakan sebagai inisiasi teknologi 5G.
3. Rentang frekuensi diatas 6 GHz (Urban Hospot), pada rentang frekuensi ini memberikan kapasitas yang besar karena memiliki *bandwidth* yang sangat luas dan dapat dialokasikan untuk komunikasi bergerak dan skenario aplikasi eMBB.



Gambar 2.2 Spektrum 5G [14].

2.2.3 Kanal Wireless

Kanal (*channel*) adalah media yang digunakan untuk mentransmisikan sinyal antara antenna pengirim dan antena penerima yang perlu dimodelkan sehingga menghasilkan desain sistem komunikasi yang meminimalkan *error* dan memaksimalkan transmisi informasi atau kecepatan data [2]. Kinerja sistem komunikasi *wireless* sangat bergantung pada keadaan lingkungan kanal yang mengakibatkan kanal *wireless* dinamis dan tidak dapat diprediksi [15]. Karakteristik yang menentukan kanal *wireless* pada komunikasi bergerak adalah variasi dari kekuatan kanal dari waktu ke waktu dan tiap frekuensi yang dibagi menjadi dua tipe [16]:

1. *Large-scale fading*, yang disebabkan oleh *path loss* pada sinyal sebagai fungsi dari jarak dan *shadowing* dari objek yang besar seperti bangunan dan bukit. *Large-scale fading* lebih relevan pada masalah seperti perencanaan *cell-site*.
2. *Small-scale fading*, yang disebabkan interferensi yang konstruktif dan dekonstruktif dari *path* sinyal jamak antara pemancar dan penerima. Hal ini terjadi pada skala spatial dari panjang gelombang pembawa dan bergantung pada frekuensi. *Small-scale multipath fading* lebih relevan pada desain kehandalan dan efisiensi sistem komunikasi.

2.2.3.1 Kanal Narrowband

Kanal *narrowband* biasanya digunakan untuk sistem dengan kecepatan rendah. *Narrowband* memiliki karakteristik kanal dimana *bandwidth* informasi tidak melebihi *coherence bandwidth* sehingga menyebabkan tidak adanya efek *multipath*. Berdasarkan teori *Shannon - Hartley*, kapasitas kanal *narrowband* dapat dihitung dengan Persamaan berikut [17]:

$$C = B \cdot \log_2(1 + |h|^2 \cdot \gamma). \quad (2.1)$$

Keterangan:

C : Kapasitas kanal

B : *Bandwidth*

h : *Gain* kanal (menunjukkan bahwa hanya terdapat satu *path* yang terjadi dalam transmisi)

γ : *Signal to Noise power Ratio* (SNR).

Perhitungan kapasitas terhadap *energy per bit to noise power spectral density ratio* (E_b/N_0) dinyatakan dengan [2]:

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + |h|^2 \cdot \frac{E_b}{N_0} \cdot M \cdot R \right) \quad (2.2)$$

dengan M adalah indeks modulasi dan R adalah *channel coding rate* [2].

2.2.3.2 Kanal Broadband

Kanal *broadband* merupakan sistem perkanalan yang memiliki kanal yang sangat lebar sehingga kapasitas yang dapat ditampung lebih besar jika dibandingkan dengan kanal *narrowband*. Berdasarkan teori *Shannon* kapasitas kanal *broadband* dapat dihitung dengan Persamaan [9]:

$$C \approx \frac{B}{N} + \sum_{n=1}^N \log_2(1 + (|\Psi_n|^2 \cdot \gamma)). \quad (2.3)$$

Pada kanal *broadband* memiliki lebih dari satu *path* yang diindikasikan dengan Ψ_n (*multipath*) dimana $N = \{1, 2, 3, 4, \dots, N\}$ dengan N adalah panjang blok transmisi. Kapasitas kanal *broadband* dengan mempertimbangkan E_b/N_0 dapat dihitung dengan [2]:

$$\frac{C}{B} \approx \frac{1}{N} + \sum_{n=1}^N \log_2 \left(1 + (m.R. (|\Psi_n|^2 \cdot \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{N}{N+Q})) \right). \quad (2.4)$$

Dimana:

- C : Kapasitas kanal
- B : *Bandwidth*
- N : Panjang blok transmisi
- m : Indeks modulasi
- R : *Channel coding rate*
- Ψ_n : *Multipath*
- E_b : Energi bit
- N_0 : Noise
- Q : Panjang *cyclic prefix*

Notasi Ψ_n dapat dijabarkan pada persamaan berikut [2]:

$$\Psi = \text{diag}[F.Hc.F^H] \quad (2.5)$$

Dimana :

- F : Matriks FFT (*Fast Fourier Transform*)
- Hc : Matriks *circulant* hasil penambahan *cyclic prefix* (CP)
- F^H : Matriks *inverse fast fourier transform* (IFFT).

Notasi Q (panjang CP) dapat dihitung dengan Persamaan berikut [18]:

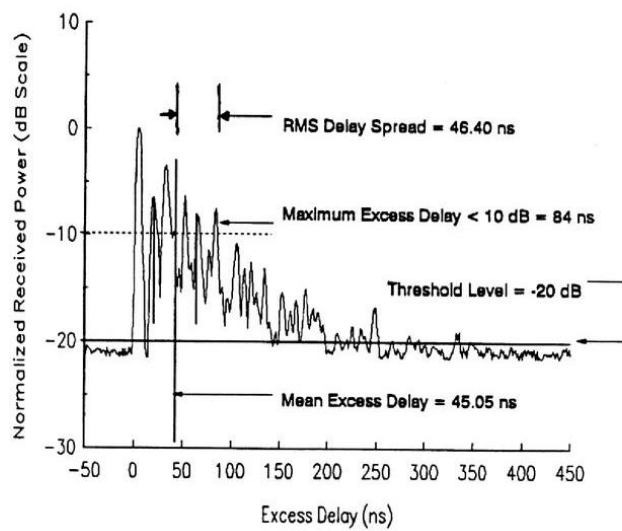
$$Q = \frac{T_{cp(i)}}{T_{ofdm(i)}} \cdot N_{FFT} \quad (2.6)$$

2.2.4 Power Delay Profile (PDP)

Power Delay Profile merupakan intensitas dari sinyal yang diterima *receiver* melalui *multipath channel* sebagai fungsi dari waktu *delay*. Daya yang diterima dan dispersifitas *multipath* dalam saluran nirkabel (*wireless*) dapat diprediksi berdasarkan nilai PDP. *Power delay profile* disebut juga dengan *multipath intensity profile* yang didefinisikan sebagai *autocorrelation*., dimana

$A_C(\Delta t)$ merupakan fungsi *autocorelation* yang mendefinisikan bagaimana *channel impulse response* terkait dari waktu ke waktu [8]. Khususnya $A_C(\Delta t = T) = 0$ mengindikasikan bahwa observasi dari *channel impulse response* pada waktu yang dipisahkan oleh T tidak berkorelasi dan independen, karena *channel* tersebut proses random Gaussian [8].

$$\Delta t = 0 : A_C(\tau) \triangleq A_C(\tau, 0). \quad (2.7)$$



Gambar 2.3 Contoh *Power Delay Profile* [8].

Pada Gambar 2.3 merupakan contoh hasil dari *channel sounding by impulse respon*, hasil tersebut merepresentasikan bahwa PDP yang diperoleh memiliki daya tertinggi pada *path* sinyal yang pertama dan berikutnya *path* sinyal yang datang memiliki daya yang lebih rendah. PDP dapat dikarakteristikan dengan *maximum excess delay*, *mean excess delay*, dan *root mean square delay spread* [11].

2.2.4.1 *Maximum Excess Delay*

Maximum excess delay adalah perbedaan komponen sinyal pertama yang diterima oleh *receiver* dengan komponen sinyal terakhir yang diterima oleh *receiver* dimana level *power* diatas *sensitivitas receiver*.

2.2.4.2 Mean Excess Delay

Mean excess delay adalah momen pertama dari PDP, dimana mewakili seluruh bobot proporsional pada *power* sinyal dari seluruh *delay*. Secara matematis, *Mean excess delay* dapat di hitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut [11]:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{k=0}^k Ac(\tau_k) \cdot \tau_k}{\sum_{k=0}^k Ac(\tau_k)} \quad (2.8)$$

Dengan:

- $\bar{\tau}$: *Mean excess delay* (Momen pertama dari PDP)
- k : Jumlah dari PDP
- $Ac(\tau_k)$: daya sinyal yang diterima dalam waktu τ_k (*Watt*)
- τ_k : Waktu (detik)

2.2.4.3 Root Mean Square (RMS) Delay Spread

RMS delay spread adalah akar pangkat dari momen kedua PDP, yang digunakan untuk karakteristik *delay dispersion* atau *frequency selective* dari sebuah kanal. RMS dapat dihitung secara matematis dengan menggunakan persamaan berikut [11]:

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\bar{\tau})^2} \quad (2.9)$$

Dimana $\overline{\tau^2}$ dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut [11]:

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_{k=0}^k P(\tau_k) \cdot \tau_k^2}{\sum_{k=0}^k P(\tau_k)} \quad (2.10)$$

2.2.4.4 Coherence Bandwidth

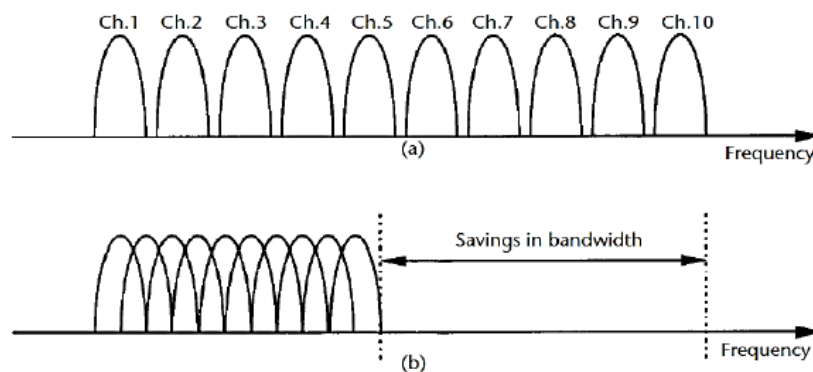
Coherence bandwidth adalah ukuran statistik dari rentang frekuensi yang mana kanal dikatakan '*flat*' jika sinyal frekuensi dalam rentang *coherence bandwidth* kemungkinan besar mengalami amplitudo *fading*. Sinyal *wideband* yang

menempati frekuensi *band* lebih besar dari *coherence bandwidth* sehingga mengalami *frequency selective fading*. Pengetahuan tentang *coherence bandwidth* dari kanal radio pada area yang tercakupi layanan sistem komunikasi radio dapat mempertimbangkan penggunaan sistem *multiplexing* atau OFDM pada *receiver*. Nilai dari *coherence bandwidth* yaitu penurunan dari RMS *delay spread*, yang dapat dihitung dengan persamaan [27]:

$$B_c = \frac{1}{5\sigma_\tau} \quad (2.11)$$

2.2.5 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) adalah sebuah teknik transmisi dengan menggunakan skema *multiplexing* yang saling tegak lurus (*orthogonal*) dan sangat baik untuk transmisi data dengan kecepatan yang tinggi serta kuat dan sederhana melewati kanal *multipath fading*. Secara umum, propagasi *multipath* pada komunikasi *broadband* adalah *frequency-selective fading*, yang disebabkan karena adanya *spread* pada waktu kedatangan atau disebut dengan *delay spread* yang menimbulkan *intersymbol interference* (ISI) dari beberapa komponen *multipath*. ISI mampu memurunkan kinerja sistem komunikasi *wireless*. Untuk mengatasi ISI dimana suatu sistem *broadband* tidak memerlukan sistem *multiplexing*, maka diperlukan *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM).



Gambar 2.4 Perbedaan bentuk sinyal (a) FDM dan (b) OFDM pada domain frekuensi [11].

Pada Gambar 2.4 (a) merupakan teknik modulasi *multicarrier nonoverlapping* pada *frequency division multiplexing* (FDM) dan terlihat jelas pada penggunaan *bandwidth* yang sangat banyak, jika dibandingkan dengan Gambar 2.3 (b) yang merupakan teknik modulasi *multicarrier overlapping* dengan mengimplementasikan *orthogonal* antara modulasi *carrier* yang berbeda dan terlihat jelas pada penggunaan *bandwidth* di OFDM yang lebih efisiensi.

2.2.6 Numerology OFDM

Penerapan teknologi radio akses 5G NR memiliki opsi kategori frekuensi di bawah 6 GHz dan di atas 6 GHz maka dibutuhkan *support* layanan yang berbeda. OFDM tunggal tidak dapat memenuhi kebutuhan kinerja seluruh rentang frekuensi yang diimplementasikan sehingga diperlukan OFDM *numerology* untuk 5G *radio access technology* (RAT), yang berisi *subcarrier spacing*, *cyclic prefix length*, dan lain-lain yang direpresentasikan pada Tabel 2.1 berikut [19]:

Table 2.1 Numerology OFDM pada 5G [19].

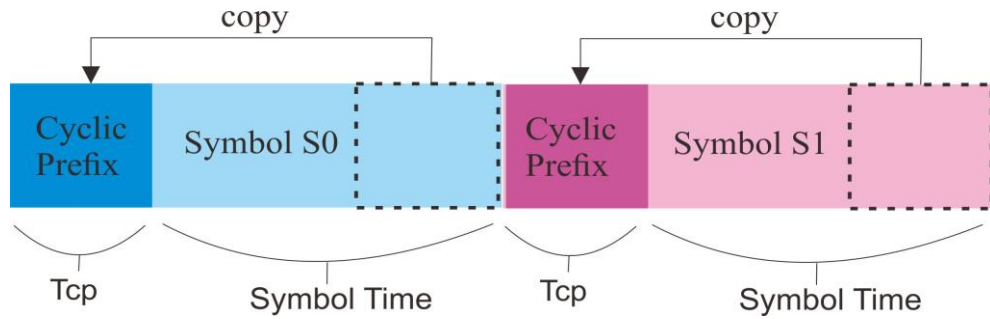
Parameter/Numerology (μ)	0	1	2	3	4
Subcarrier Spacing (KHz)	15	30	60	120	240
OFDM Symbol Duration (μs)	66.67	33.33	16.67	8.33	4.17
Cyclic Prefix Duration (μs)	4.69	2.34	1.17	0.57	0.29
OFDM Symbol incl. CP (μs)	71.35	35.68	17.84	8.92	4.46
Bandwidth minimum (MHz)	4.32	8.64	17.28	34.56	69.12
Bandwidth minimum (MHz)	49.5	99	198	396	397.44

2.2.7 Cyclic prefix (CP)

Cyclic prefix atau yang disingkat dengan CP berfungsi sebagai *guard interval* yang memastikan semua simbol OFDM terkirim secara lengkap dalam interval FFT (*Fast Fourier Transform*) dengan waktu tunda yang sama. Hal ini akan menjaga *orthogonalitas* dari sinyal OFDM. *Cyclic prefix* dapat melakukan penggantian sebagai *symbol prefix* pada bagian akhir *symbol* OFDM. *Cyclic prefix* memiliki fungsi antara lain [18]:

1. Menyediakan *guard interval* untuk menghapus *intersymbol interference* (ISI) dari simbol seluruhnya.

2. Menggandakan simbol akhir, seperti pada linier konvolusi dari kanal *frequency selective* dapat dilakukan perhitungan konvolusi *circular*, untuk estimasi kanal sederhana dan ekualisasi.
3. Untuk menjamin kinerja bebas *intersymbol interference* (ISI), panjang *cyclic prefix* adalah sama atau lebar dari jumlah PDP.



Gambar 2.5 Ilustrasi *Cyclic Prefix* [18].

Ketika CP ditambahkan pada sisi *transmitter* (dan dieliminasi pada sisi *receiver*), matriks kanal H_c menjadi *circulant*. Konsep CP dapat dijelaskan secara sederhana jika PDP memiliki $h = [h_0, h_1]$ dan data yang ditransmisikan x ditambahkan panjang CP (Q) = 3 yaitu $x_{cp} = [x_4 \ x_5 \ x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]$, maka pada sinyal *receiver* (y) dengan tambahan *noise* (n) ditentukan sebagai berikut [2]:

$$y = H * x + n . \quad (2.12)$$

$$y = \begin{bmatrix} h_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_1 & h_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_1 & h_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_1 & h_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_1 & h_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_1 & h_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_1 & h_0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_4 \\ x_5 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ n_4 \\ n_5 \\ n_6 \\ n_7 \\ n_8 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Disisi *receiver* CP akan dieliminasi dan hanya blok yang diperlukan yang akan diambil, sehingga bentuk matriks sebagai berikut:

$$y = \begin{bmatrix} h_{1x5} + h_{0x1} \\ h_{1x1} + h_{0x2} \\ h_{1x2} + h_{0x3} \\ h_{1x3} + h_{0x4} \\ h_{1x4} + h_{0x5} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_3 \\ n_4 \\ n_5 \\ n_6 \\ n_7 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

y dapat diperoleh dari hasil perkalian antara matriks H_c dengan x karena matriks *circulant* bernilai sama dengan matriks hasil dari transmisi menggunakan CP. sehingga bentuk matriks seperti persamaan berikut:

$$y = \begin{bmatrix} h_0 & 0 & 0 & 0 & h_1 \\ h_1 & h_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_1 & h_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_1 & h_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_1 & h_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_3 \\ n_4 \\ n_5 \\ n_6 \\ n_7 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

2.2.8 Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

Quadrature phase shift keying (QPSK) adalah pengembangan dari PSK dan BPSK. QPSK lebih sering digunakan untuk menggandakan data *rate* dibandingkan dengan sistem BPSK, dengan tetap menjaga *bandwidth* yang sama dari sinyal dan untuk menjaga tingkat data BPSK namun mengurangi separuh *bandwidth* yang dibutuhkan. Modulasi QPSK juga dapat mentransmisikan dua kali tingkat data dalam *bandwidth* yang diberikan dibandingkan dengan BPSK pada BER yang sama [20]. Sesuai dengan namanya, QPSK memiliki empat buah bentuk sinyal termodulasi. Sinyal termodulasi QPSK didapatkan dari empat macam sinyal masukan yang berbeda, yaitu 00, 01, 11 dan 10. Setiap dua bit biner diwakili satu simbol. Modulasi QPSK dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut [22]:

$$d(i) = \frac{1}{\sqrt{2}} [(1 - 2b(i)) + j(1 - 2b(i))] \quad (2.16)$$

Dimana $b(i)$ merupakan biner pertama yang dipetakan dengan simbol angka modulasi kompleks $d(i)$.

2.2.9 Pengaruh Suhu

Penggunaan frekuensi yang tinggi sangat sensitif terhadap kondisi alam salah satunya adalah parameter suhu sangat berpengaruh pada redaman propagasi gelombang elektromagnetik [2]. Suhu sangat dipengaruhi oleh molekul H_2O di udara, yang dapat menyerap energi sinyal sehingga kinerja propagasi gelombang tidak dapat bekerja dengan baik [6]. Kondisi tersebut juga terjadi karena proses ionisasi yang dipengaruhi oleh suhu yang tinggi. Proses ionisasi terjadi ketika atom-atom yang terdapat di lapisan termosfer melebur menjadi ion yang bermuatan listrik, sehingga dapat digunakan sebagai media pemantulan gelombang elektromagnetik dari *transmitter* menuju ke *receiver*. Namun, ketika terdapat suhu yang tinggi berupa sinar *Ultra Violet* (UV) dari matahari, sinar UV tersebut dapat menyebabkan ion elektron yang berada di lapisan termosfer menjadi terkikis, sehingga akan menyebabkan fenomena *scattering* dan *absorption* yang akan berpengaruh pada redaman propagasi gelombang elektromagnetik. Perbedaan keadaan alam (curah hujan, kelembapan, tekanan udara, kerapatan vegetasi dan suhu) pada suatu wilayah menyebabkan *channel model* 5G di wilayah tertentu berbeda dari *channel model* di wilayah lainnya.

2.2.10 Outage Probability dan Outage Performance

Outage performance digunakan dalam perancangan sistem komunikasi agar kinerja sistem dapat optimal. Informasi mengenai *outage performance* berguna untuk meningkatkan efisiensi *power* dengan mengatur *power* pancar PTx agar mengikuti kurva *outage performance* untuk setiap kapasitas dan probabilitas yang diinginkan. *Outage performance* dapat diketahui dengan menghitung dan mengevaluasi *outage probability* dari kanal. *Outage performance* dirumuskan pada persamaan berikut [11]:

$$P_{outage} = Pr(R > C). \quad (2.17)$$

Outage probability merupakan probabilitas *channel capacity* (C) bernilai lebih kecil dari *channel coding rate* (R) yang diakibatkan karena terjadinya *Rayleigh fading*. Menurut teori Shannon bahwa kegagalan deteksi terjadi ketika *error* mendekati nol atau nilai $R = C$ [9]. *Outage probability* diperoleh dari PDP yang diolah berdasarkan prinsip *information theory* dan *signal processing* untuk

kemudian ditentukan nilai kapasitasnya berdasarkan teorema *shannon capacity* (C) dan kemudian dibandingkan dengan *coding rate* R untuk dievaluasi *outage probability*.

2.2.11 *Frame Error Rate (FER)*

Rasio *error* adalah rasio jumlah *frame*, bit, elemen, karakter, ataupun blok yang dikirim sepanjang interval waktu tertentu. FER dapat dituliskan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut [23]:

$$FER = \frac{\text{Frame error}}{\text{Frame transmitted}} \quad (2.19)$$

2.2.12 *Bit Error Rate (BER)*

Dalam telekomunikasi, rasio *error* adalah rasio jumlah bit, elemen, karakter, ataupun blok yang dikirim sepanjang interval waktu tertentu. Rasio yang paling sering ditemui adalah *bit error ratio* (BER). Contoh BER adalah jumlah kesalahan bit yang diterima dibagi dengan jumlah total bit yang dikirimkan. Biasanya kurva BER digambarkan dalam hubungan BER (dB) dengan E_b/N_0 (dB). BER dapat dituliskan dengan persamaan berikut [23]:

$$BER = \frac{\text{BITerror}}{\text{BITtransmitted}} \quad (2.19)$$

Teori BER *rayleigh fading* dijadikan sebagai pendekatan realistik kondisi kanal pada sistem komunikasi *wireless*. BER dianggap benar jika kurva BER pada kanal 5G dengan pengaruh suhu di kota Wonosobo memiliki gradien yang sama dengan kurva teori dari BER pada kanal *rayleigh fading (single path)*. Perhitungan teori kinerja BER untuk modulasi QPSK dengan menggunakan $R=1$, ditulis dengan menggunakan persamaan berikut [28]:

$$\text{BER}_{\text{QPSK}(Fading)} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2}{Eb/N_0}}} \right] \quad (2.20)$$