

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 KAJIAN PUSTAKA

Pada penelitian ini membahas beberapa referensi jurnal sebagai kajian Pustaka. Pustaka yang relevan digunakan dan menjadi acuan bagi penulis dalam menyusun dan melakukan penelitian.

Penelitian B. Alfaresi, Z. Nawawi, R. F. Malik, dan K. Anwar yang berjudul “5G Channel Model for 28 GHz frequency in Palembang” meneliti mengenai pemodelan kanal 5G menggunakan spektrum mm-Wave pada frekuensi 28 GHz. Hasil validasi model kanal menggunakan sistem CP-OFDM untuk memastikan kinerja model saluran yang diperoleh serta menggunakan modulasi BPSK dengan bandwidth 200 MHz. Parameter yang digunakan untuk validasi adalah FER (*Frame Error Rate*) dan BER (*Bit Error Rate*) sebagai parameter KPI (*Key Performance Indicator*). Model kanal dianalisis berdasarkan karakteristik iklim di wilayah Palembang, diantaranya adalah parameter kelembaban sebesar 83,36%, tekanan udara sebesar 1010,06 mbar, suhu sebesar 26,72°C, dan curah hujan sebesar 132 mm/h. Dengan jarak antara pemancar (Tx) dengan penerima (Rx) sebesar 100 meter. Hasilnya menunjukkan perbandingan FER antara *Theoretical Outage* ($R=1/2$), CP-OFDM (*coded*, $R=1/2$) dan CP-OFDM (*uncoded*, $R=1$). CP-OFDM tanpa *channel coding* memiliki performa FER yang lebih buruk dibandingkan dengan perhitungan dengan menggunakan *channel coding*. Untuk hasil perspektif BER, pada kondisi E_b/N_0 dibawah 17 dB, CP-OFDM dengan *channel coding* (*coded*, $R = 1/2$) memiliki performansi BER yang lebih buruk dibandingkan dengan CP-OFDM tanpa *channel coding* (*uncoded*, $R = 1$), sedangkan pada kondisi E_b/N_0 di atas 17dB, CP-OFDM dengan *channel coding* (*coded*, $R = 1/2$) memiliki kinerja BER yang lebih baik [5].

Pada penelitian Nadya Indah Pratiwi, Achmad Ali Muayyadi, dan Uke Kurniawan Usman pada tahun 2020 yang berjudul “Perbandingan Performansi *Polar Code* dan *Repetition Codes* terhadap Kanal *Multipath* pada Sistem Komunikasi 5G” meneliti mengenai simulasi dan analisis teknik pengkodean *polar*

code dan *repetition code* pada pemodelan kanal *multipath* menggunakan modulasi 16 QAM dengan sistem CP-OFDM *nurmerology* 2. Simulasi dan analisis pada model kanal 5G dilakukan berdasarkan parameter lingkungan Kota Bandung dengan frekuensi kerja sebesar 28 GHz. Penelitian ini juga menganalisis performansi berdasarkan *Frame Error Rate* (FER) dan *Bit Error Rate* (BER). Hasil pemodelan kanal menghasilkan 9 *path* dengan nilai *mean excess delay* sebesar 5,039 ns dan *RMS delay spread* sebesar 22,747 ns. Pada *repetition code* nilai BER yang dihasilkan yaitu 1×10^{-4} pada Eb/No 34,62 dB sedangkan *polar code* pada Eb/No > 20 dB menghasilkan nilai BER = 0. Nilai FER yang dihasilkan *polar code* pada Eb/No 19,8 dB yaitu $6,13 \times 10^{-3}$ jauh lebih rendah daripada *repetition code* yaitu sebesar $3,66 \times 10^{-1}$. Dari hasil simulasi yang dihasilkan dapat disimpulkan bahwa teknik pengkodean kanal *polar code* lebih efektif untuk menurunkan *bit error rate* dan *frame error rate* pada sistem komunikasi 5G [3].

Pada penelitian M. Alfaroby E, Khoirul Anwar, dan Nachwan Mufti Adriansyah pada tahun 2018 yang berjudul “5G Channel Model Indonesia Menggunakan Teknik *Statistical Spatial Channel Model* (SSCM)” membahas mengenai pemodelan kanal 5G menggunakan teknik *Statistical Spatial Channel Model* (SSCM). Penelitian ini menggunakan *bandwidth* sebesar 200 MHz dan frekuensi 28 GHz serta parameter tekanan udara sebesar 924,1 mBar, kelembapan sebesar 77,87% dan suhu rata-rata sebesar 23,65°C. Penelitian ini mengusulkan model kanal untuk Indonesia dan juga mengevaluasi *outage probability*, FER, dan BER. Hasilnya menunjukkan model kanal 5G Indonesia memiliki 18 *paths*, dengan *mean excess delay* sebesar 7,15 ns, dan *RMS delay spread* sebesar 14,81 ns. Kapasitas kanal (per-link) dihitung menggunakan representatif PDP (*Power Delay Profile*) dan dievaluasi menggunakan CDF (*Cumulative Distribution Function*), dengan metode perhitungan *eigen value* seperti pada CP-OFDM. Validitas dari *outage performance* telah dikonfirmasi menggunakan simulasi komputer menggunakan sistem CP-OFDM dengan *convolutional codes* sebagai *encoder*-nya dan *viterbi algorithm* sebagai *decoder*-nya. Kinerja system 5G menggunakan *channel coding* sesuai standar 5G dan mendekati teori *outage performances* [4].

Pada penelitian Handoko Obed, Khoirul Anwar, dan Syahibudin Budi pada tahun 2019 yang berjudul “Studi Parameter Bhattacharyya Untuk *Polar Codes*

Block Pendek dan Menengah di Kanal AWGN dan Rayleigh Fading” yang menganalisa desain *polar codes* terhadap pengaruh perubahan kanal AWGN dan *Rayleigh Fading* menggunakan parameter Bhattacharyya dalam penentuan kapasitas kanalnya. Parameter Bhattacharyya diuji pada *polar codes* dengan panjang blok 8, 16, 32, 64 dan 128 bit dengan *signal-to-noise power ratio* (SNR). Skema *transmit-receive polar codes* dengan *encoding* standar *polar codes* dan *soft decoding Polar codes* dirancang menggunakan modulasi BPSK (*Binary Phase Shift Keying*). Hasilnya menunjukkan bahwa SNR mempengaruhi parameter Bhattacharyya dalam peletakkan bit informasi dan bit *frozen*. Performansi BER *polar codes* dengan parameter Bhattacharyya lebih unggul di SNR yang tinggi [6].

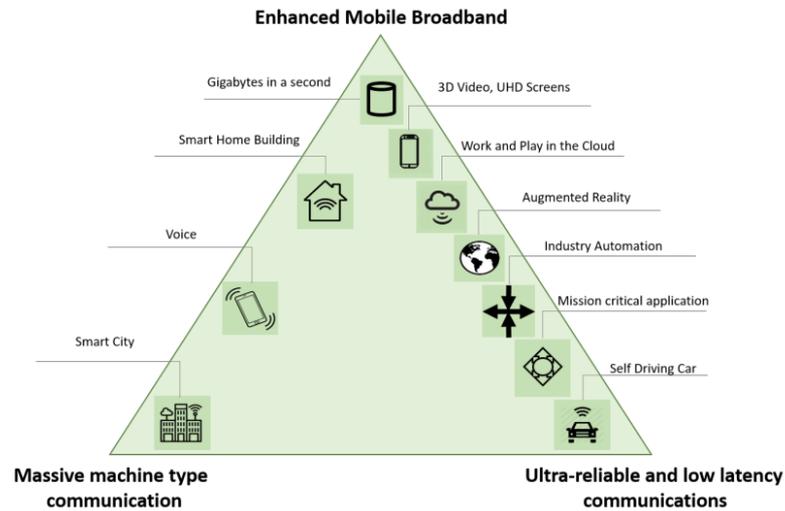
Pada penelitian Shihao Ju, Ojas Kanhere, Yunchou Xing dan Theodore S. Rappaport pada tahun 2019 yang berjudul “*A Milimeter-Wave Channel Simulator NYUSIM with Spatial Consistency and Human Blockage*” membahas mengenai simulator NYUSIM versi 2.0 dengan berbagai fitur terbaru diantaranya *spatial consistency*, *human blockage*, dan *outdoor-to-indoor penetration loss*. Dengan menggunakan frekuensi sebesar 73 GHz, *bandwidth* 800 MHz, menggunakan skenario UMi LOS dan NLOS, dengan rentang jarak Tx dan Rx sebesar 100m hingga 500m serta 1000 UT *location*. Simulator ini menunjukkan bagaimana kemampuan dan keakuratannya dalam pengolahan data di era teknologi generasi ke-5 (5G) [7].

2.2 DASAR TEORI

2.2.1 5G New Radio (NR)

Teknologi generasi ke-5 atau 5G merupakan teknologi jaringan seluler yang memiliki kemampuan yang lebih unggul dari generasi sebelumnya. Teknologi 5G menawarkan kecepatan transfer data yang tinggi dengan latensi rendah. Diprediksi teknologi 5G memiliki kecepatan mencapai 20 Gbits/s dengan *bandwidth* yang lebih besar. *International Telecommunication Union* (ITU) merupakan suatu organisasi internasional yang didirikan untuk menstandarkan serta meregulasi jaringan radio internasional dan telekomunikasi merekomendasikan ITU-R M 2083-0 mengenai *IMT Vision-Framework and overall objective of the future*

development of IMT for 2020 and beyond menguraikan bagan penggunaan teknologi 5G yang diilustrasikan dalam segitiga *usage* [8].



Gambar 2.1 Skenario Penggunaan 5G yang ditentukan oleh ITU-R [9]

Berdasarkan Gambar 2.1 terdapat tiga skenario dan layanan 5G yang telah ditentukan oleh ITU-R diantaranya [8]:

1. *Enhanced Mobile Broadband*

Permintaan layanan *mobile broadband* akan terus meningkat untuk konten multimedia, layanan *web-access* dan data. Hal ini dikarenakan kemampuan transfer data dengan kapasitas yang besar pada kecepatan yang sangat tinggi, yakni *downlink* hingga 20 Gbit/detik dan *uplink* hingga 10 Gbit/detik. Contoh layanan eMBB adalah pada video *streaming Netflix* di layar TV 4K atau 8K dan *game mobile legend*.

2. *Ultra-reliable and Low Latency Communications*

Skenario ini memiliki kemampuan *throughput* yang tinggi dengan *latency* rendah. Artinya layanan ini menghasilkan *delay* yang sekecil mungkin karena semakin rendah latensi (diukur dalam milidetik) makasemakin baik kinerja jaringan. Penerapan layanan ini diantaranya *wireless control* dari *industrial automation*, pengendalian *drone*, *new medical equipment* dan *Autonomous Vehicles*. Contoh layanan URLLC adalah pada kendaraan otonom, kendaraan otonom tabrakan kendaraan otonom akan cenderung lebih jarang terjadi pada era 5G, karena untuk penundaan sinyal hanya satu milidetik (ms), sehingga

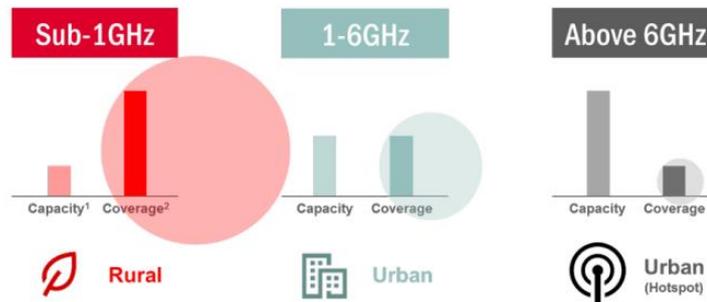
dengan demikian mobil hanya akan bergerak beberapa sentimeter sebelum berhenti saat bahaya terdeteksi.

3. *Massive Machine Type Communications*

Skenario ditujukan untuk melayani perangkat (*device*) dalam jumlah yang besar. *Device* harus berbiaya rendah, dan memiliki masa baterai yang tahan lama. Contoh aplikasi pada layanan ini adalah *internet of things* (IoT), *industrial IoT* (IIoT), *smart home*, *smart city*, *wearable*, yang mengaplikasikan berbagai sensor dengan *narrowband* dan jumlah koneksi yang besar sekali.

2.2.2 Klasifikasi Spektrum 5G

Teknologi 5G tampil dengan berbagai skenario penggunaan yang dapat mempermudah kehidupan manusia sehari-hari seperti yang telah diilustrasikan pada Gambar 2.1. Hal tersebut mengakibatkan meningkatnya kebutuhan terhadap layanan 5G. Dengan meningkatnya kebutuhan tersebut, juga terjadi peningkatan terhadap spektrum untuk layanan penyelenggaraan sistem telekomunikasi bergerak seluler dimasa yang akan datang



Gambar 2.2 Klasifikasi Kapasitas dan Cakupan Spektrum Frekuensi 5G [10]

Teknologi 5G *New Radio* (NR) terbagi menjadi tiga klasifikasi spektrum frekuensi yaitu [10]:

1. *Low Bands*, dengan frekuensi di bawah 1 GHz (Rural Makro). Spektrum ini digunakan untuk mendukung penanganan *coverage* terutama dalam implementasi layanan IoT (*Internet of Things*) karena memiliki jangkauan layanan yang luas mulai dari urban hingga suburban dan area rural. Hal ini dikarenakan sifat propagasi sinyal pada frekuensi tersebut memungkinkan 5G

memiliki cakupan yang luas sehingga dapat melakukan penetrasi sinyal sampai ke dalam bangunan.

2. *Mid Bands*, dengan rentang frekuensi 1 hingga 6 GHz (Urban Makro). Spektrum ini memiliki kapasitas dan *coverage* yang ideal untuk mendukung layanan *enhanced Mobile Broadband* (eMBB) dan *mission-critical*.
3. *High Bands*, dengan frekuensi diatas 6 GHz (Urban Mikro). Spektrum frekuensi ini memiliki rentang frekuensi antara 26-28 GHz digunakan untuk memberikan layanan *throughput* yang sangat besar. Spektrum ini juga paling banyak diimplementasikan oleh dunia internasional karena kapasitasnya yang sangat besar.

2.2.3 Kanal Wireless

Karakteristik yang menentukan kanal *wireless* adalah variasi kapasitas kanal dari waktu ke waktu dan frekuensi. Variasi terbagi menjadi dua jenis yaitu [11]:

1. *Large-scale fading*, disebabkan oleh keberadaan objek pemantul serta penghalang pada kanal seperti bangunan dan bukit. *Large-scale fading* lebih relevan pada perencanaan *cell-site*.
2. *Small-scale fading*, disebabkan oleh interferensi yang konstruktif dan destruktif dari *path* sinyal jamak antara *transmitter* dan *receiver*. Hal ini terjadi pada skala spasial dari panjang gelombang pembawa dan bergantung pada frekuensi. *Small-scale fading* lebih relevan dengan desain sistem komunikasi yang andal dan efisien.

2.2.3.1 Kanal Narrowband

Kanal *narrowband* diperuntukkan pada sistem berkecepatan rendah. Karakteristik kanal *narrowband* memiliki *bandwidth* yang sempit sehingga menyebabkan tidak adanya efek *multipath*. Kapasitas kanal *narrowband* dapat dihitung berdasarkan teori Shannon-Hartley dengan persamaan [12]:

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

Keterangan:

C = Kapasitas dari kanal (bit/detik)

B = *Bandwidth* (MHz)

h = kanal

γ = *Signal to noise power ratio* (SNR) (dB)

Perhitungan kapasitas terhadap *energy per bit to noise power spectral density ratio* E_b/N_0 dinyatakan dengan [4]

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

dengan M adalah indeks modulasi dan R adalah *coding rate* dimana pada penelitian ini $R = \{1, 1/2\}$.

2.2.3.2 Kanal *Broadband*

Kanal *Broadband* merupakan salah satu media transmisi yang dapat mengirimkan data mulai dari 128 Kbps hingga 10 Mbps. Kanal *broadband* memiliki kapasitas kanal yang lebar sehingga dapat membawa banyak data dalam beberapa kanal *bandwidth*. Sistem kanal *broadband* dinyatakan dengan [9]

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

Keterangan:

N = Panjang blok transmisi (*block*)

Ψ_n = *Multipath*

Kanal *broadband* memiliki lebih dari satu path yang diindikasikan dengan Ψ_n untuk $n = \{1, 2, 3, 4, \dots, N\}$ dengan N adalah Panjang blok transmisi. Nilai untuk setiap kanal dinyatakan dengan [4]

$$\Psi_n = \text{diag} [F \cdot H_c \cdot F^H] \quad (2.4)$$

Keterangan:

F = Matriks *Fast Fourier Transform* (FFT)

H_c = Matriks *circulant* hasil penambahan *cyclic prefix* (CP)

F^H = Matriks *Invers Discrete Fourier Transform* (IDFT)

Signal to ratio (SNR) dinyatakan dengan [4]

$$\text{SNR} = \frac{E_b}{N_0} \cdot m \cdot R \quad (2.5)$$

dimana m adalah indeks modulasi yang memuat jumlah bit per simbol, misalnya $m = 1$ pada modulasi *binary phase shift keying* (BPSK) dan $m = 2$ pada *4-quadrature amplitude modulation* (QAM) [4].

Perhitungan kapasitas BPSK dengan $m = 1$ dapat dihitung dengan [13]

$$C \approx \frac{B}{2N} + \sum_{n=1}^N \log_2(1 + 2(|\psi_n|^2 \cdot m \cdot R \cdot \frac{N}{(N+Q)} \cdot \frac{E_b}{N_0})) \quad (2.6)$$

Keterangan:

R = Coding Rate (bit per transmission)

ψ_n = Multipath

E_b/N_0 = Energi bit/Noise (dB)

m = Indeks modulasi

N = Panjang blok transmisi (block)

Q = Panjang cyclic prefix

Nilai Q dapat dihitung dengan persamaan berikut [9]:

$$Q = \frac{T_{cp(\mu)}}{T_{ofdm(\mu)}} \cdot N \quad (2.7)$$

dimana $T_{cp(\mu)}$ dan $T_{ofdm(\mu)}$ menunjukkan durasi cyclic prefix.

2.2.4 Kanal SSCM (Statistical Spatial Channel Model)

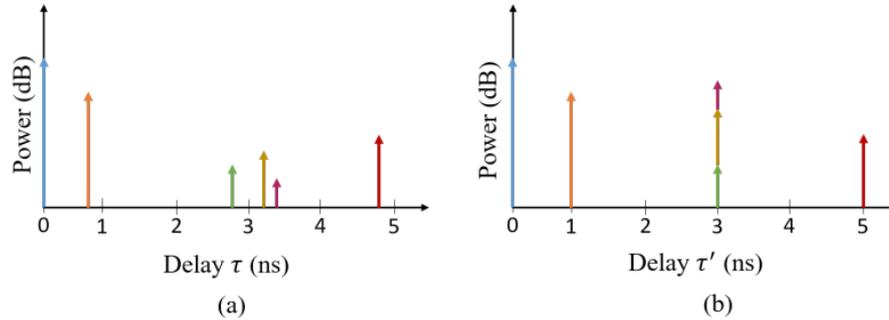
Kanal SSCM termasuk dalam jenis kanal *broadband* yang dikembangkan oleh NYU (New York University) dan diimplementasikan dalam simulator NYUSIM. Dalam penerapannya, *Statistical Spatial Channel Model* (SSCM) menggunakan data dari simulasi yang parameter kanal dan probabilitasnya dimodelkan secara statistik. Parameter statistik yang dimaksud dapat menampilkan kondisi kanal yang sebenarnya. Kanal SSCM dibuat melalui berbagai pengukuran dengan skenario yang diinginkan. Adapun beberapa *channel parameters* masukan untuk membangkitkan kanal SSCM seperti, radius sel, frekuensi, parameter lingkungan (suhu, kelembaban udara, tekanan udara dan curah hujan), dan lainnya [4]. Penelitian ini menggunakan kanal SSCM untuk memodelkan sistem 5G di Jawa Tengah, dimana karakteristik kanal SSCM nantinya akan direpresentasikan dalam *power delay profile* (PDP).

2.2.5 Power Delay Profile (PDP)

Power delay profile (PDP) merupakan faktor utama untuk menentukan performansi sistem dari simulasi/pengukuran data [14]. *Power Delay Profile* adalah intensitas yang berasal dari sinyal yang diterima oleh *receiver* melalui kanal *multipath* sebagai fungsi dari waktu *delay*. Kanal *multipath* disebabkan karena

adanya refleksi (*reflection*), pembiasan (*refraction*), hamburan (*scattering*), dan penyaluran (*ducting*) sehingga terjadi ISI (*Inter-Symbol Interference*) [15].

Pada proses plot PDP, sumbu x menyatakan *delay* (ns) dari setiap *path* dan sumbu y menyatakan daya (dBm) dari setiap *path*. Gambar 2.3 menampilkan kondisi PDP yang sebenarnya dan setelah dimodifikasi, dimana PDP tersebut menghasilkan daya yang berbeda-beda di setiap *path* nya [16].



Gambar 2.3 (a) PDP Asli, (b) PDP yang dimodifikasi mengikuti spesifikasi teknis

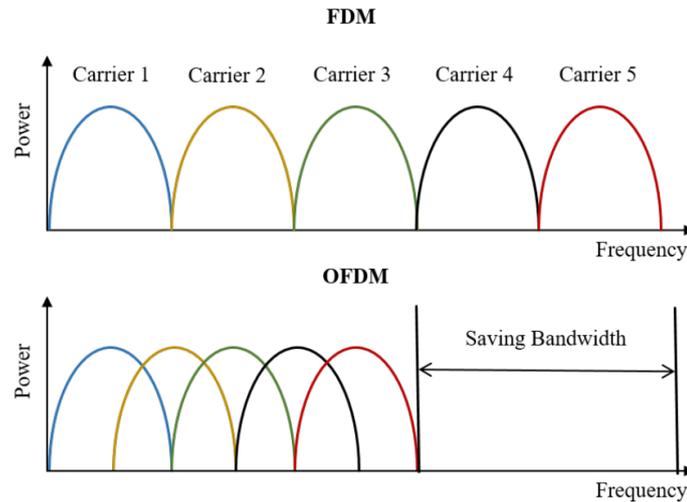
Inter-Symbol Interference (ISI) berhubungan langsung dengan fenomena *multipath* yang diperoleh dari parameter lingkungan seperti kelembaban, suhu, dan tekanan udara melalui saluran kanal antara pemancar dan penerima. Gambar 2.3 menunjukkan PDP asli dan yang dimodifikasi, dimana beberapa *path* dari PDP yang asli berakhir dengan *delay* yang sama, daya dari masing-masing *path* ditambahkan, menghasilkan *single path* dengan kekuatan gabungan [9].

2.2.6 OFDM

OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) merupakan sebuah teknik transmisi yang menggunakan beberapa buah frekuensi pembawa (*multicarrier*) dalam satu kanal dimana setiap frekuensi pembawa tersebut saling *orthogonal* (tegak lurus) [17]. OFDM memberikan transmisi data dengan kecepatan tinggi dan dapat mengurangi efek *multipath fading*. Frekuensi *sub-carrier* OFDM memungkinkan untuk saling tumpang tindih sehingga *orthogonal* tetap terjaga [14].

Berdasarkan Gambar 2.4 menunjukkan perbedaan antara Teknik OFDM dan FDM (*Frequency Division Multiplexing*), dimana sistem OFDM memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan FDM. Perbedaan yang mendasar

terletak pada frekuensi *sub-carrier*, dimana pada sistem OFDM frekuensi *sub-carrier* diperbolehkan untuk saling tumpang tindih sehingga dapat meminimalisir *bandwidth* dan meningkatkan kapasitas kanal serta mengurangi efek *multipath fading*. Efek dari *multipath fading* tersebut kerap menyebabkan ISI (*Inter-Symbol Interference*) selama proses transmisi [9].



Gambar 2.4 Perbedaan bentuk sinyal antara FDM dan OFDM [9]

2.2.6.1 Numerology OFDM

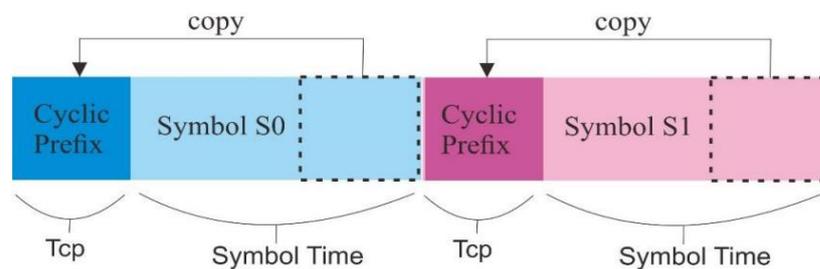
Penerapan teknologi jaringan akses radio 5G *New Radio* mempunyai opsi kategori frekuensi di bawah 6 GHz dan di atas 6 GHz. OFDM tunggal tidak dapat memenuhi kebutuhan dari performansi semua rentang frekuensi yang diterapkan. Oleh karena itu dibutuhkan *support* layanan yang berbeda yaitu OFDM *numerology* untuk 5G *radio access technology* (RAT) yang dapat diamati pada Tabel 2.1 [18].

Tabel 2.1 Parameter OFDM 5G *New Radio* [19]

Parameter/Numerology (μ)	0	1	2	3	4
<i>Subcarrier Spacing</i> (KHz)	15	30	60	120	240
<i>OFDM Symbol Duration</i> (μ s)	66.67	33.33	16.67	8.33	4.17
<i>Cyclic Prefix Duration</i> (μ s)	4.69	2.34	1.17	0.57	0.29
<i>OFDM Symbol incl. CP</i> (μ s)	71.35	35.68	17.84	8.92	4.46
<i>Bandwidth minimum</i> (MHz)	4.32	8.64	17.28	34.56	69.12
<i>Bandwidth maximum</i> (MHz)	49.5	100	198	396	397.44

2.2.6.2 Cyclic Prefix (CP)

Cyclic prefix berfungsi sebagai *guard interval* pada OFDM. Ortogonalitas dari OFDM dapat berubah ketika melewati kanal dispertif waktu. *Cyclic prefix* (CP) dapat membantu menjaga ke-ortogonalitasan dari sinyal OFDM tersebut. Pada awalnya sebelum ada *cyclic prefix*, jarak antara *sub-carrier* diisi dengan *guard interval*. Dalam implementasinya ternyata antara *sub-carrier* yang berisikan *guard interval* tersebut menimbulkan *Inter-Symbol Interference* (ISI) dikarenakan *crosstalk* antara *sub-carrier* yang mengakibatkan hilangnya ortogonalitas dari sinyal OFDM [20].



Gambar 2.5 *Cyclic prefix* (CP) pada OFDM

Berdasarkan Gambar 2.5 *cyclic prefix* terletak di bagian depan pada saat pengiriman sinyal OFDM dan ketika sampai ke penerima maka *cyclic prefix* tersebut akan dibuang dan hilang. Pada bagian penerima *cyclic prefix* tersebut dibuang sebelum proses demodulasi dengan FFT. *Cyclic prefix* memastikan semua simbol pada OFDM terkirim secara lengkap dalam interval FFT (*Fast Fourier Transform*) dengan *delay* yang sama sehingga ortogonalitas sinyal OFDM tetap terjaga [17].

Cyclic prefix merupakan bagian yang tidak membawa informasi karena *cyclic prefix* hanya berperan sebagai pelindung informasi agar informasi yang sampai ke penerima lengkap. *Cyclic prefix* memiliki 3 fungsi yaitu [17]:

1. Untuk menghindari *Inter-Symbol Interference* (ISI) sehingga kinerja sistem menjadi lebih baik. Hal tersebut dapat dijamin dengan syarat panjang *cyclic prefix* yaitu sama atau lebih dari jumlah *path* pada PDP.
2. Sebagai *guard interval* agar *Inter-Symbol Interference* (ISI) dapat dihapus dari simbol secara keseluruhan.

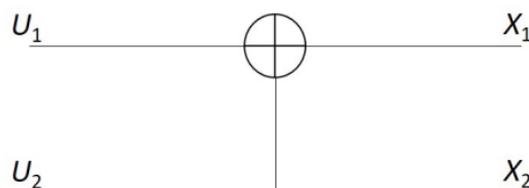
- Menduplikat simbol akhir. CP diperoleh dari menyalin bagian akhir dari tiap simbol dan kemudian akan diletakkan pada bagian awal simbol dan pada saat sampai di *receiver* CP tersebut akan dibuang atau dihilangkan karna tidak termasuk kedalam informasi.

2.2.7 Polar Codes

Polar codes merupakan salah satu jenis pengkodean kanal yang mempunyai fungsi untuk mengoreksi kesalahan dalam pengiriman data. Data dikoreksi pada bagian *decoder* dan *encoder* dengan menggunakan penambahan sejumlah bit (bit *redundant*) pada bit informasi, dimana bit tambahan berupa matriks dengan menggunakan operasi XOR sehingga bit informasi yang diterima sesuai dengan bit yang ditransmisikan. Konstruksi kode dilandaskan pada beberapa perulangan dari rangkaian kode kernel yang mengubah kanal fisik menjadi kanal virtual. Ketika jumlah rekursif banyak, kanal virtual cenderung memiliki reliabilitas tinggi atau rendah yang disebut dengan polarisasi [6]. Oleh sebab itu, sistem pengkodean kanal ini dinamakan *polar codes*. *Polar codes* diuraikan dalam *linear block codes* yang didasarkan oleh fenomena yang dinamakan polarisasi kanal [6]. Prinsip *polar codes* adalah polarisasi pada kanal yang terdiri dari dua tahap yaitu pemisahan dan penggabungan kanal. Tahapan ini bertujuan untuk menentukan kumpulan kanal yang dapat diandalkan dan tidak dapat andalkan. Kanal yang dapat diandalkan adalah kanal yang dipilih untuk mentransfer bit informasi, sementara kanal yang tidak dapat diandalkan digunakan untuk mengirim *frozen* bit [21]

2.2.7.1 Polar Encoder

Encoder melakukan pengkodean pada bit informasi sebelum bit tersebut dikirimkan menjadi bit *encoded*. *Polar Encoder* menggunakan operasi bilangan XOR matriks antar bit konstruksi dengan matriks generator yang sesuai dengan panjang blok dari bit konstruksi tersebut [21].



Gambar 2.6 Bentuk *encoder polar codes* dengan panjang blok 2 bit

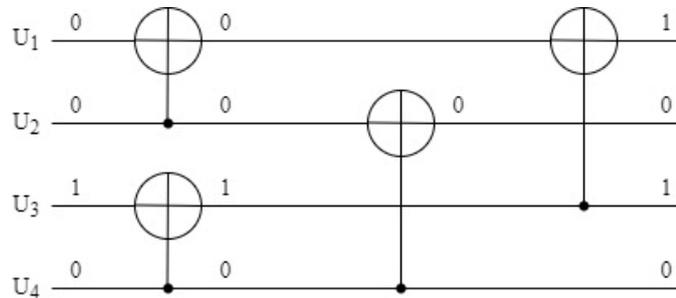
Gambar 2.6 menunjukkan *skema encoding polar codes* dengan perumusan [21]:

$$\begin{aligned}
 [X_1 \ X_2] &= [\mathbf{U}] [\mathbf{G}_m] \\
 &= [U_1 \ U_2] \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= [U_1 \oplus U_2 \ U_2.]
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

Dimana U adalah bit yang masuk terdiri atas bit informasi dan bit *frozen*, X adalah hasil operasi XOR antar bit U atau hasil dari proses *encoding*, sementara G_m adalah matriks generator yang dapat meluas berdasarkan hasil pemangkatan Kronecker k sesuai dengan panjang bloknya yang dinyatakan dengan [21]:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{G}_n &= \mathbf{G}_2^{\otimes k} \\
 \mathbf{G}_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{G}_4 &= \begin{bmatrix} G_2 & G_2 \\ G_2 & G_2 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$

Gambar 2.7 menunjukkan sebuah contoh *polar codes* sepanjang 4 bit, dengan bit *input* = [0010], untuk menghasilkan bit *encoded* = [1010].



Gambar 2.7 Contoh *encoder polar codes* dengan panjang blok 4 bit

Encoding pada Gambar 2.7 dapat dihitung dengan operasi [21]:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{X}_n &= \mathbf{U}_n \mathbf{x} \mathbf{G}_n \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

2.2.7.2 Polar Decoder

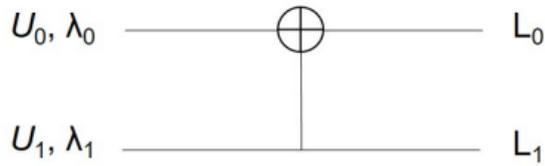
Decoder adalah teknik pengkodean bit yang diterima oleh kanal yang kemudian dikodekan menjadi bit yang sama sesuai dengan bit yang dikirimkan. Polar Decoder ada berbagai macam, seperti *successive cancellation decoding*, *iterative decoding*, *list decoding*, *belief propagation decoding*, dan sebagainya. Penelitian ini menggunakan *soft input successive cancellation decoding* yang merupakan modifikasi dari *successive cancellation decoding* (SC) dengan *soft decoding* BPSK [6]. Input yang dimasukkan ke dalam decoding ini berupa *log-likelihood ratio* (LLR) yang didefinisikan dengan persamaan [6]:

$$L_N^{(i)}(y_1^N, \hat{u}_1^{i-1}) = \log \frac{W_N^{(i)}(y_1^N, \hat{u}_1^{i-1} - 1 | 0)}{W_N^{(i)}(y_1^N, \hat{u}_1^{i-1} - 1 | 1)} \tag{2.11}$$

dengan *output* yang diperoleh berupa bit \hat{u}_1 dengan rumus [6]:

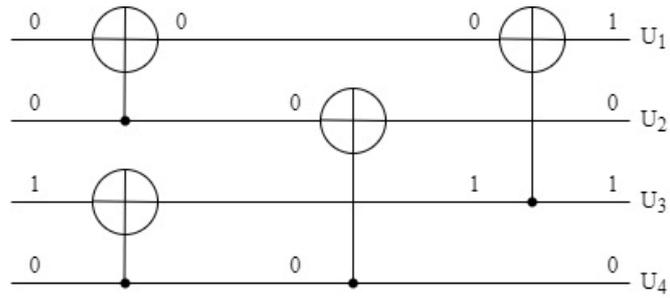
$$\hat{u}_i = \begin{cases} 0, & \text{if } L_N^{(i)}(y_1^N, \hat{u}_1^{i-1}) \geq 1 \\ 1, & \text{sebaliknya} \end{cases} \tag{2.12}$$

atau dapat diilustrasikan secara sederhana pada Gambar 2.8



Gambar 2.8 Bentuk *decoding* blok polar code

Sebagai contoh *decoding polar codes* dapat dilihat pada Gambar 2.9. Dari contoh tersebut dapat diamati bahwa proses *decoding polar codes* diperoleh berdasarkan kebalikan operasi XOR dari proses *encoding* pada Gambar 2.7.

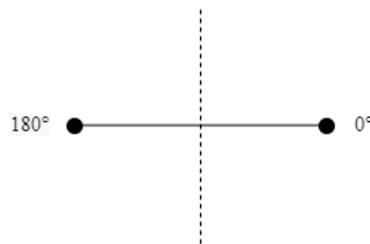


Gambar 2.9 Contoh *decoder polar codes* dengan panjang blok 4 bit

Pada Gambar 2.9 menunjukkan bit yang diterima sama dengan bit yang ditransmisikan dan menghasilkan bit *decoded* = [0010].

2.2.8 Binary Phase Shift Keying (BPSK)

Modulasi adalah proses perubahan suatu gelombang periodik sehingga menjadikan suatu sinyal mampu membawa suatu informasi. *Binary Phase Shift Keying* atau BPSK adalah salah satu teknik modulasi sinyal dengan konversi sinyal digital “0” atau “1” menjadi suatu simbol berupa sinyal kontinyu yang mempunyai dua fase yang berbeda. Untuk bit “1” mempunyai pergeseran fase 0° dan untuk bit “0” mempunyai pergeseran fase 180° . Diagram konstelasi modulasi BPSK diilustrasikan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Diagram Konstelasi BPSK

Modulasi BPSK merubah bit yang ditransmisikan menjadi bentuk simbol-simbol yang dinyatakan oleh [6]:

$$S(t) = m(t)c(t) \tag{2.15}$$

$$S(t) = \begin{cases} S_1(t) = -A \cos(2\pi f_c t), & t = 0 \\ S_2(t) = +A \cos(2\pi f_c t), & t = 1 \end{cases} \tag{2.16}$$

dengan $m(t)$ adalah sinyal modulasi, $c(t)$ adalah sinyal pembawa. Secara praktikal modulasi BPSK tersebut dapat dinyatakan dengan $S(i) = 1-2 \times t(i)$ atau sama dengan bit 0 berupa menjadi sinyal digital +1, dan bit 1 berubah menjadi sinyal digital -1.

2.2.9 Outage Probability

Outage probability adalah probabilitas dari kapasitas kanal (C) yang nilainya lebih kecil dari *channel coding rate* (R), disebabkan karena terjadinya *Rayleigh fading*. Pada teori Shannon *channel capacity* bahwa kegagalan dari transmisi terjadi pada saat *error* mendekati nol ($R=C$). *Outage probability* diperoleh dari PDP yang dibuat berdasarkan prinsip dari *information theory* dan *signal processing* yang nilai kapasitasnya ditentukan berdasarkan teorema *Shannon capacity* (C) yang kemudian dibandingkan dengan *coding rate* R untuk dievaluasi oleh *outage probability* [4].

2.2.10 Outage Performances

Outage performance digunakan pada perancangan sistem komunikasi agar kinerja sistem bisa maksimal. *Outage performance* memiliki fungsi untuk meningkatkan efisiensi daya dengan mengatur daya pancar PTx agar mengikuti kurva *outage performance* untuk setiap kapasitas dan probabilitas yang diinginkan. *Outage performance* bisa diketahui dengan cara menghitung *outage probability* dari kanal menggunakan rumus berikut [22]:

$$P_{\text{outage}} = P_r(R > C) \quad (2.17)$$

dimana R adalah *coding rate channel* dan C adalah kapasitas kanal.

2.2.11 Frame Error Rate (FER)

Frame Error Rate adalah suatu perbandingan jumlah *frame* yang *error* dengan *frame* yang telah ditransmisikan. *Frame* akan *error* pada saat terdapat setidaknya satu bit dalam *frame* tersebut yang *error*. FER ditetapkan dengan rumus berikut [23]:

$$FER = \frac{F_e}{F_t} \quad (2.18)$$

dimana F_e menunjukkan *frame* yang *error* dan F_t menunjukkan *frame* yang ditransmisikan.