

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 KAJIAN PUSTAKA

Penelitian menggunakan referensi jurnal yang sesuai dengan penelitian penulis, sebagai dasar teori dan panduan dalam tahapan penyusunan dan pelaksanaan penelitian.

Penelitian pertama [5] membahas mengenai penggunaan teknik *Statistical Spatial Channel Model* (SSCM) untuk pemodelan kanal 5G. Parameter-parameter *input* yang digunakan meliputi frekuensi 28 GHz, *bandwidth* 200 MHz, serta data lingkungan kota Bandung, yang memiliki nilai rata-rata tekanan udara 924,1 mbar, kelembapan 77,87%, dan suhu rata-rata 23,65 °C. Untuk melakukan evaluasi terhadap kinerja teknologi 5G di Indonesia, dilakukan simulasi dengan menggunakan metode CP-OFDM, untuk pemodelan kanal. Simulasi ini menghasilkan *Instantaneous Power Delay Profile* (PDP), kemudian memanfaatkan *Cumulative Distribution Function* (CDF) untuk mendapatkan representasi PDP. Dari hasil evaluasi kinerja jaringan 5G di Indonesia dengan mempertimbangkan karakteristik lingkungan di kota Bandung, disimpulkan bahwa saluran 5G di Indonesia dapat dianggap sebagai *fading multipath* dengan terdapat 18 *path* (jalur) sinyal dan interval *delay* antar jalur sebesar 10 ns. Penggunaan modulasi BPSK dan variasi tingkat *coding rate* (R) seperti 1/2, 3/4, dan 1, serta variasi nilai E_b/N_0 . Dalam penelitian ini, juga dilakukan pengujian BER dan FER terhadap model kanal yang akan diusulkan [5].

Penelitian selanjutnya [2] membahas perbandingan dua teknik pengkodean antara *polar code* dan *repetition code*, untuk *error correction* dalam sistem komunikasi 5G. Pada penelitian ini menggunakan modulasi 16 QAM dengan kanal *multipath* 5G dan teknik *multicarrier* CP-OFDM dengan *numerology* 2. Kemudian pemodelan kanal menggunakan frekuensi 2,1 GHz mempertimbangkan parameter lingkungan di kota Bandung. Hasil dari pemodelan kanal menunjukkan adanya 9

jalur (*path*) yang dihasilkan pada *representative* PDP. Dalam penggunaan *repetition code*, nilai *bit error rate* (BER) yang dihasilkan sebesar 1×10^{-4} pada Eb/No 34,62 dB, pada *polar code* berada pada BER dengan rentang Eb/No > 20 dB dan pada *uncoded* BER sebesar 37,92 dB. Hasil simulasi menggunakan teknik *polar code* menghasilkan nilai *frame error rate* (FER) yang jauh lebih rendah sebesar $6,13 \times 10^{-3}$ dengan Eb/No 19,8 dB, sementara *repetition codes* menghasilkan FER dengan nilai $3,66 \times 10^{-1}$ dan *uncoded* $3,98 \times 10^{-1}$. FER pada *polar codes* yang terbukti sangat efektif menekan terjadinya *frame error* bahkan jauh lebih rendah dibandingkan dengan *repetition code* dan *uncoded*. Berdasarkan hasil penelitian, terdapat kesimpulan bahwa teknik *channel coding* yang paling efektif dalam untuk menurunkan tingkat kesalahan *bit* dan *frame* pada sistem komunikasi 5G adalah *polar codes* [2].

Dalam penelitian [6], membahas mengenai pemodelan kanal 5G terhadap pengaruh suhu minimum dan suhu maksimum di kota Yogyakarta. Penelitian ini bertujuan untuk menguji model kanal 5G dan memahami karakteristik kanal dengan performansi jaringan 5G. Karakteristik kanal sangat penting untuk mencapai performansi jaringan yang optimal dalam sistem komunikasi, namun pemakai frekuensi mmWave di atas 6 GHz sensitif terhadap pengaruh lingkungan. Dalam penelitian ini, dilakukan evaluasi kinerja sistem 5G dengan ketentuan *bandwidth* 50 MHz, frekuensi 28 GHz dan modulasi 16-QAM, serta metode CP-OFDM. Penelitian yang dihasilkan menampilkan *rasio* pemodelan kanal 5G supaya mencapai *outage probability* sebesar 1×10^{-4} pada suhu maksimum dan minimum. Hasil evaluasi ini menghasilkan nilai Eb/No yang digunakan pada *coding rate* 1:2 sebesar 17,26 dB dan 15,25 dB, *coding rate* 1 sebesar 22,11 dB dan 19,82 dB, dan *coding rate* 3:4 sebesar 19,53 dB dan 17,45 dB. Hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa suhu lingkungan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap performa sistem komunikasi pada jaringan 5G. Hasil analisis penggunaan *coding rate* ($R=1/2$) lebih bagus terhadap peningkatan kualitas dan kapasitas kanal. Hasil penelitian memberikan pemahaman terhadap pengaruh suhu agar performansi sistem komunikasi pada jaringan 5G dan mengidentifikasi pemilihan *coding rate* yang tepat dapat meningkatkan efisiensi dan kualitas kanal [6].

2.2 DASAR TEORI

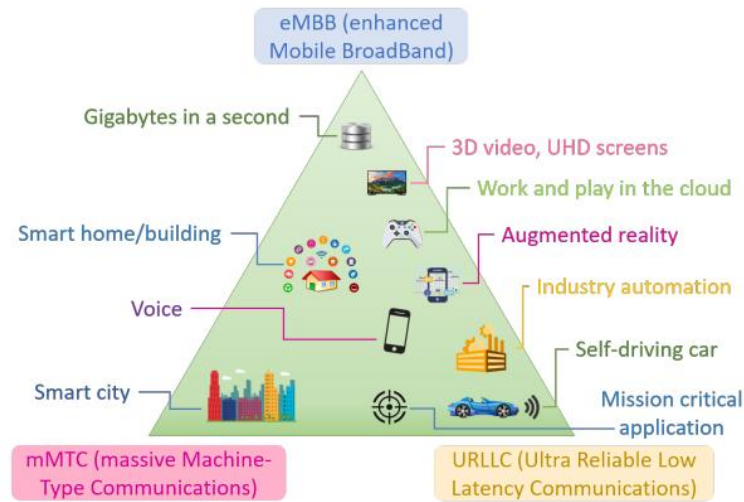
2.2.1 Teknologi 5G NR (*New Radio*)

Teknologi 5G (*New Radio*) adalah perkembangan teknologi sebelumnya yakni teknologi generasi ke empat (4G). Generasi keempat (4G) dan kelima (5G) adalah istilah yang digunakan untuk mengidentifikasi teknologi seluler generasi ke-4 dan ke-5. Teknologi 4G dirancang untuk menyediakan *broadband* seluler komunikasi, sedangkan generasi kelima 5G teknologi jaringan seluler adalah upaya yang dilakukan untuk menentukan, merancang dan menyebarkan generasi jaringan seluler berikutnya. Jaringan 5G akan mendukung layanan seperti peningkatan untuk mendukung berbagai layanan yang membutuhkan kinerja tinggi, seperti peningkatan *Mobile Broadband*, komunikasi yang andal dengan latensi rendah, dan komunikasi *Massive Machine-Type*. Hal ini akan membutuhkan kecepatan data puluhan gigabit per detik, latensi dalam hitungan milidetik, dan koneksi perangkat yang lebih luas [7].

Sistem komunikasi 5G merupakan inovasi pertama dalam sistem radio yang mendukung spektrum dengan frekuensi tinggi. Dengan memiliki pilihan spektrum yang luas, teknologi 5G mempunyai kapasitas tinggi, jangkauan yang luas kecepatan data yang tinggi, dan keandalan yang tinggi. Pada jangkauan yang luas dan kecepatan data hingga beberapa Gbps, pita frekuensi rendah di bawah 6 GHz telah memenuhi kebutuhan tersebut. Frekuensi 3,5 GHz dan 4,5 GHz, serta gelombang milimeter pada rentang 24-28 GHz dan 39 GHz dengan menggunakan teknologi *Time Division Duplex* (TDD) merupakan pilihan utama untuk spektrum jaringan 5G pada tahap awal pengembangan [8].

Berdasarkan Organisasi *internasional International Telecommunication Union* (ITU) yang merilis rekomendasi ITU-R M.2083-0, yang mencakup visi mereka untuk tahun 2020 dan seterusnya. Rekomendasi ini diimplementasikan melalui program ITU-R dari tahun 2020 dan seterusnya (IMT-2020). *Internasional International Telecommunication Union* (ITU)-2020 bertujuan untuk memperluas

dan mendukung penggunaan skenario teknologi IMT saat ini. Penggunaan teknologi 5G dijelaskan dalam bentuk segitiga penggunaan dengan skenario sebagai berikut [9].



Gambar 2. 1 Penggunaan skenario IMT-2020 dan seterusnya [7].

Berbagai situasi penggunaan dan aplikasi yang berbeda akan menggabungkan berbagai kemampuan dengan mudah. Pada Gambar 2.1 menjelaskan beberapa skenario penggunaan IMT dari tahun 2020 dan seterusnya:

1. *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB) merupakan salah satu skenario penggunaan teknologi 5G yang mengalami permintaan yang terus meningkat seiring berjalannya waktu. Tujuan dari skenario penggunaan ini adalah untuk meningkatkan kapabilitas *mobile broadband* dalam mengakses konten media, layanan, dan data. Selain itu, skenario ini juga bertujuan untuk memperkenalkan aplikasi baru sebagai peningkatan kinerja *mobile broadband* yang sudah ada.
2. *Ultra-reliable and low latency communication* (URLLC) adalah salah satu skenario penggunaan dalam teknologi 5G yang bertujuan untuk memenuhi kebutuhan komunikasi yang handal dan dengan latensi rendah. Skenario ini membutuhkan latensi yang rendah, *throughput* yang baik, dan ketersediaan jaringan yang tinggi. Contoh penerapan dari URLLC antara lain jaringan nirkabel untuk proses produksi, *smart grid*, serta keamanan dalam sektor transportasi dan lainnya.

3. *Massive machine type communication* (mMTC) adalah salah satu kemampuan komunikasi dalam teknologi 5G yang fokus pada pengiriman data dalam volume yang relatif rendah dengan banyak perangkat yang terhubung. Untuk mewujudkan visi ini, diperlukan produksi perangkat terminal dengan biaya yang rendah dan daya tahan baterai yang lama. Hal ini menjadikan pengiriman data sensitif karena banyak perangkat yang terhubung secara efisien dan efektif [8].

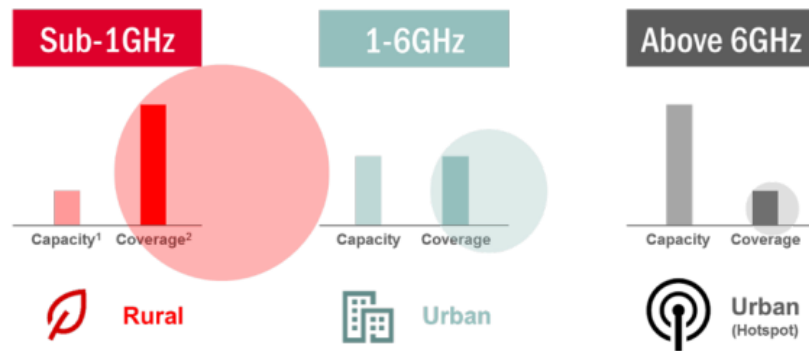
2.2.2 Kategori Spektrum 5G

Teknologi telekomunikasi seluler 5G menggunakan teknologi dengan konektivitas *mobile internet* yang menawarkan kecepatan yang lebih tinggi, koneksi yang lebih *reliable* pada *smartphone* dan perangkat lainnya dibandingkan teknologi sebelumnya. 5G diharapkan mampu mendukung secara signifikan kecepatan *mobile broadband* dan data *usage* yang lebih tinggi dibandingkan dengan teknologi sebelumnya yang akan dapat mendukung secara penuh *Internet of Things* (IoT). Karakteristik jaringan 5G menggunakan frekuensi tinggi, sehingga untuk mencapai *coverage* tertentu, teknologi 5G memerlukan lebih banyak *base station* dibandingkan dengan teknologi 3G/4G [10].

Pada Gambar 2.2 menjelaskan tentang pita spektrum yang dialokasikan untuk penyebaran 5G dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori utama: sub-1GHz, 1 sampai 6 GHz, dan di atas 6 GHz.

- a. Pita spektrum sub-1 GHz, yang juga dikenal sebagai *Low Band*, diimplementasikan untuk mendukung layanan *Internet of Things* (IoT) dan memperlebar jangkauan *broadband* seluler dari area perkotaan ke wilayah pedesaan. Frekuensi *Low Band* (di bawah 1 GHz) memiliki sifat propagasi sinyal yang memungkinkan cakupan yang sangat luas, sehingga sangat ideal untuk implementasi IoT. Dengan memanfaatkan karakteristik frekuensi tersebut, jangkauan sinyal dapat diperluas ke wilayah-wilayah yang sebelumnya sulit terjangkau, seperti pinggiran kota dan pedesaan. Hal ini memungkinkan konektivitas yang lebih luas dan lebih baik untuk perangkat-perangkat IoT, serta memfasilitasi pertumbuhan teknologi di berbagai lingkungan geografis.

- b. *Middle band* dengan Pita 1-6 GHz (Urban), menawarkan campuran cakupan dan kapasitas untuk layanan 5G. Spektrum *broadband Middle band* yang dapat untuk penerapan 5G awal.
- c. *High Band* dengan spektrum di atas 6 GHz, menyediakan kapasitas *bandwidth* yang sangat besar dan sangat cocok untuk digunakan dalam komunikasi seluler, yang memungkinkan penerapan aplikasi *broadband* seluler yang lebih canggih [11].



Gambar 2. 2 Spektrum 5G [11]

2.2.3 Kanal Wireless

Kanal merupakan jalur komunikasi antara antena *transmitter* dan antena *receiver* yang diperlukan pemodelan untuk merancang *communication system* yang efisien dalam mengurangi kesalahan (*error*) dan meningkatkan transmisi informasi atau *bit rate* [4]. Sinyal perangkat seluler yang ditransmisikan melalui saluran nirkabel akan mengalami fluktuasi acak dalam waktu karena pantulan dan pelemahan sinyal antara pemancar dan penerima. Dalam rangka membuat rancangan implementasi sistem nirkabel yang optimal, diperlukan perencanaan yang optimal. Diperlukan *equalizer* atau *orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM) untuk memproses sinyal yang diterima dengan *inter-symbol interference* (ISI) yang minimum [12].

2.2.3.1 Kanal Narrowband

Kanal *narrowband* biasanya digunakan untuk sistem berkecepatan rendah. Salah satu karakteristik kanal *narrowband* adalah tidak adanya efek *multipath* karena *bandwidth* yang sempit. Suatu sistem komunikasi dikategorikan sebagai

kanal *narrowband* ketika terdapat satu sinyal yang diterima oleh penerima. Sistem komunikasi dengan kanal *narrowband* banyak digunakan dalam situasi komunikasi yang membutuhkan cakupan yang luas, daya terbatas, dan kehandalan dalam komunikasi. Ini disebabkan oleh beberapa faktor, seperti rendahnya *noise bandwidth* pada kanal *narrowband*, tingkat sensitivitas yang lebih baik dibandingkan dengan kanal lainnya, dan jangkauan (*coverage*) yang lebih luas [13]. Kanal *narrowband* umumnya digunakan pada sistem dengan kecepatan transmisi yang kecil. Kanal *narrowband* memiliki ciri khas adanya efek *multipath* yang rendah karena lebar pita yang terbatas. Persamaan menghitung kapasitas kanal *narrowband* adalah sebagai berikut :

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

Keterangan:

C : Kapasitas kanal (Bit/detik)

B : *Bandwidth* (MHz)

h : Gain kanal (saat transmisi data terdapat satu jalur atau path yang terjadi)

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

Menurut teori informasi Shannon, dalam perhitungan kapasitas kanal (*information theory*) terdapat variabel h yang menunjukkan bahwa hanya terdapat satu jalur transmisi, B adalah lebar *bandwidth*, dan *signal to noise power ratio* (SNR) merupakan *rasio power* sinyal terhadap kebisingan. Persamaan untuk menghitung kapasitas berdasarkan *rasio energy per bit* terhadap kerapatan daya kebisingan (E_b/N_0) sebagai berikut ini [4] :

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

Keterangan :

N : Panjang blok transmisi (*block*)

M : Indeks modulasi

R : Coding rate (bit per transmission)
 E_b/N_o : Energi bit / Noise (dB)

2.2.3.2 Kanal Broadband

Kanal *Broadband* merupakan merupakan kanal *multiptah* yang memiliki kapasitas kanal yang lebar untuk sistem berkecepatan tinggi sehingga kapasitasnya lebih besar dari pada kanal *narrowband*. Model kanal *broadband* digunakan untuk layanan yang membutuhkan tingkat data yang tinggi. Namun, kanal *broadband* memiliki kekurangan dalam hal daya pancar yang relatif kecil, sehingga cakupan area yang dapat dicapai juga lebih terbatas dibandingkan dengan *kanal narrowband* [13].

Penggunaan kanal *broadband* pada teknologi 3G, 4G, dan 5G, memiliki kapasitas yang lebih besar dibandingkan kanal *narrowband*, karena memanfaatkan kanal dengan lebar pita yang sangat luas. Kapasitas kanal *broadband* dihitung dengan menggunakan:

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

Keterangan:

N = Panjang blok transmisi

ψ_n = *Multipath*

Pada *broadband channel*, mempunyai jalur (*path*) lebih dari satu yang ditunjukkan melalui ψ_n untuk $n = \{1,2,3 \dots N\}$. Panjang blok transmisi dilambangkan dengan N , dimana ketika kapasitas kanal dihitung menggunakan *rasio energy per bit* terhadap kebisingan atau *noise* (E_b/N_o), dapat dihitung menggunakan persamaan :

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

Keterangan:

- C = Kapasitas kanal
- B = Lebar pita (*Bandwidth*)
- N = Panjang blok transmisi
- m = Indeks modulasi
- R = *Channel coding rate*
- ψ_n = *Multipath*
- E_b = *Energy Bit*
- N_o = Gangguan atau *Noise*
- Q = Panjang *cyclic prefix* (CP)

Notasi ψ_n dapat dijelaskan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\psi_n = \text{diag} [F \cdot H_C \cdot F^H] \quad (2.5)$$

Keterangan :

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

H_C = Matriks *Fast Fourier Transform* (FFT)

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

Panjang *cyclic prefix* dinotasikan dengan Q yang dituliskan dengan persamaan berikut :

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

Dimana $T_{cp}(i)$ dan $T_{ofdm}(i)$ menunjukkan durasi *cyclic prefix* [14]

Keterangan :

$T_{cp}(i)$ = *Cyclic prefix duration* (μs)

$T_{ofdm}(i)$ = *OFDM system duration* (μs)

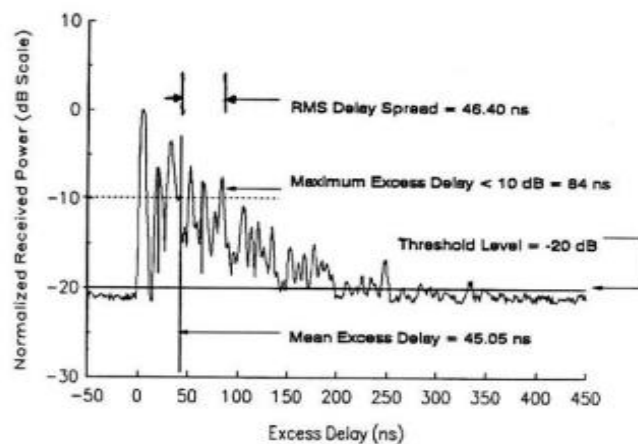
2.2.4 Kanal *Statistical Spatial Channel Model* (SSCM)

Kanal SSCM merupakan sebuah model kanal diajukan oleh *New York University Wireless* (NYU *Wireless*) yang digunakan dalam aplikasi NYUSIM. SSCM mengukur saluran dengan menggunakan sampel dalam jumlah besar dan menganalisis secara statistik dengan mempertimbangkan karakteristik spasial

lingkungan. SSCM memanfaatkan data dari banyak *experiment*, untuk parameter kanal yang akan dilakukan pemodelan secara statistik. Parameter-parameter yang *statistic* menggambarkan kondisi sebenarnya dari kanal komunikasi tersebut. SSCM digunakan berdasarkan berbagai data yang digunakan mengikuti skenario-skenario tertentu, frekuensi yang digunakan, *bandwith*, parameter lingkungan, radius sel dan lain-lain. Pada karakteristik kanal 5G di Indonesia dengan pemodelan *power delay profile* (PDP) berdasarkan data kondisi alam Indonesia yang diperoleh melalui simulasi menggunakan kanal SSCM [4].

2.2.5 Power Delay Profile (PDP)

Secara umum, model kanal untuk redaman skala kecil (*small-scale fading*) sering digambarkan menggunakan *power delay profile* (PDP) yang merupakan gambaran grafis. PDP ini menggambarkan tingkat kekuatan sinyal untuk berbagai tingkat *delay* yang berbeda. Pada *profile* atau gambar tinggi grafik menunjukkan besarnya kekuatan sinyal yang terkait dengan masing-masing tingkat *delay* yang berbeda [4]. Dalam langkah-langkah *plot* PDP, sumbu horizontal (X) mewakili penundaan propagasi untuk setiap jalur yang ada, sedangkan sumbu vertikal (Y) mewakili kekuatan sinyal dari setiap *path* atau jalur tersebut. Nilai PDP dapat digunakan untuk memprediksi *power* yang diterima. Model kanal dapat ditunjukkan dengan *power delay profile* (PDP) sebagai sinyal daya yang diterima melalui kanal *multipath*. Model saluran 5G pada PDP sesaat yang dihasilkan oleh simulator menggunakan parameter lapangan seperti suhu, kelembapan, dan tekanan, dimana PDP sesaat dapat berubah seiring waktu [15].



Gambar 2.3 Contoh Power Delay Profile [32]

Pada Gambar 2.3 merupakan contoh hasil dari *channel sounding by impulse respon*, hasil tersebut merepresentasikan bahwa PDP yang diperoleh memiliki daya tertinggi pada 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* [32].

2.2.5.1 Maximum Excess Delay

Maximum excess delay merupakan selisih waktu pada saat sinyal pertama kali diterima oleh penerima dan saat komponen sinyal terakhir penerima, di mana level daya sinyal tersebut berada di atas sensitivitas penerima. *Maximum excess delay* berkaitan dengan periode waktu simbol yang digunakan untuk mengklasifikasikan saluran menjadi kategori *frequency-selective* atau *frequency-nonselective* [12].

2.2.5.2 Mean Excess Delay

Momen pertama pada *delay* melalui PDP merupakan defenisi *mean excess delay*, di mana *delay* tersebut terkait dengan daya sinyal yang diterima dari setiap *delay* pada PDP. Secara matematis *mean excess delay* mencerminkan penundaan yang dihasilkan oleh komponen *multipath* berdasarkan dayanya. Untuk menghitung *mean excess delay*, menggunakan rumus berikut ini :

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{k=0}^k Ac(\tau_k) \cdot \tau_k}{\sum_{k=0}^k Ac(\tau_k)} \quad (2.7)$$

Keterangan

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

2.2.5.3 Root Mean Excess Square (RMS) Delay Spread

Nilai momen pusat dari *Power Delay Profile* (PDP) digunakan saat menggambarkan dispersi *delay* atau sifat selektif frekuensi dari suatu saluran merupakan defenisi *Root Mean Square Delay Spread*, sebagai standar dari variasi keterlambatan yang berhubungan dengan *mean excess delay* dan sama dengan daya sinyal yang diterima. Jumlah daya sinyal yang diterima dan dinyatakan dalam [12]:

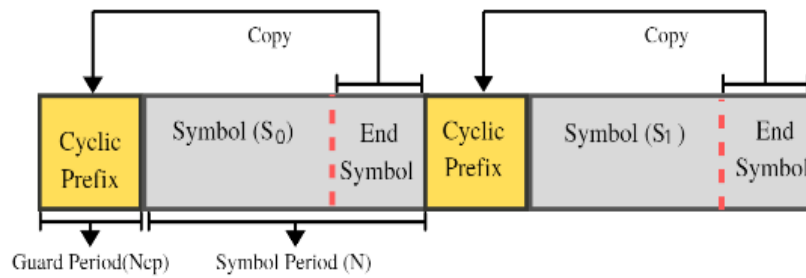
$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\bar{\tau})^2} \quad (2.8)$$

Untuk $\overline{\tau^2}$ dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_{k=0}^k P(\tau_k) \cdot \tau_k^2}{\sum_{k=0}^k P(\tau_k)} \quad (2.9)$$

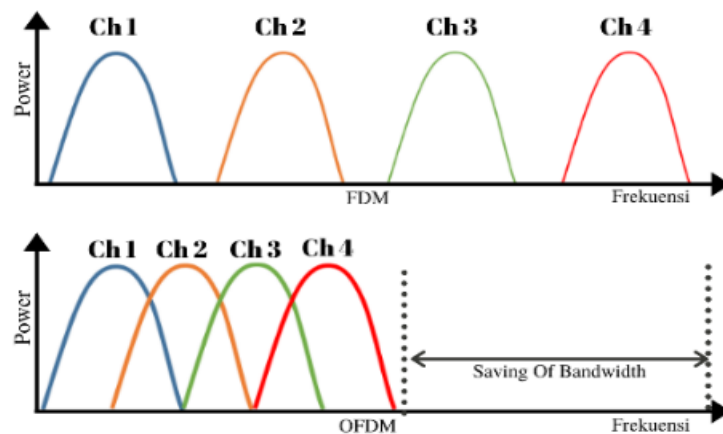
2.2.6 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

OFDM merupakan suatu metode transmisi dengan memanfaatkan beberapa frekuensi (*multicarrier*) yang terhubung ortogonal. Teknik ini menggabungkan modulasi dan *multiplexing*, dimana modulasi merupakan proses perubahan gelombang secara periodik untuk membawa informasi dengan menggunakan parameter seperti fase, amplitudo, dan frekuensi. Sementara itu, *multiplexing* merupakan teknik untuk mentransfer banyak informasi melalui satu saluran. Dalam OFDM, frekuensi-frekuensi *multicarrier* tersebut dipilih agar saling ortogonal, yang menghasilkan eliminasi *crosstalk* antar *sub-channel* dan menghilangkan kebutuhan akan *inter-carrier guard bands* [16]. Dalam teknologi OFDM, setiap data yang dikirimkan dilengkapi dengan *cyclic prefix* (CP) yang berfungsi sebagai interval penjagaan (*guard interval*). Keberadaan *Cyclic prefix* membantu mengatasi masalah *Inter-Symbol Interference* (ISI) dengan ketentuan bahwa waktu CP harus lebih besar dari *delay spread*. Dengan kata lain, panjang CP setidaknya sebanding dengan jumlah jalur (*path*) dalam *power delay profile* (PDP). Dengan menggunakan *Cyclic prefix* yang memenuhi syarat tersebut, sistem akan terlindungi dari *Inter-Symbol Interference* (ISI).



Gambar 2. 4 Cyclic Prefix (CP) pada OFDM [2]

Pada gambar 2.4 menjelaskan *cyclic prefix* (CP) pada OFDM yang berfungsi untuk menghindari gangguan antara kanal *Inter-channel interference* (ICI) dan *inter-symbol interference* (ISI), setiap data dikirim dengan menggunakan *cyclic prefix* (CP). Dalam teknik OFDM, durasi pulsa lebih kecil dari periode simbol, dan CP harus memiliki nilai lebih besar dari *channel delay spread*. Dengan menerapkan periode simbol yang memenuhi syarat tersebut, serta menggunakan CP yang memiliki panjang yang sesuai, sistem OFDM dapat secara efektif mengurangi dampak dari gangguan ISI dan ICI, dan meningkatkan kualitas transmisi data. Dengan menggunakan CP, sistem dapat sukses mengatasi masalah ISI dan ICI yang dapat muncul dalam proses transmisi yang dijelaskan pada gambar 2.5 [2].



Gambar 2. 5 Konsep OFDM [2]

Teknik OFDM memiliki beberapa keunggulan yang dapat dirangkum sebagai berikut:

1. Efisiensi spektrum: OFDM menggunakan *sub-carrier* yang saling tumpang tindih dengan jarak yang dekat, sehingga dapat mengoptimalkan penggunaan spektrum yang tersedia dengan efisien.

2. Ketahanan terhadap *Inter-Symbol Interference* (ISI): OFDM memiliki keunggulan yang tinggi dalam mengatasi gangguan ISI antar simbol. Dengan menggunakan *cyclic prefix* dan penempatan *sub-carrier* yang *orthogonal*, OFDM dapat mengurangi dampak ISI secara signifikan.
3. Ketahanan terhadap *Inter-Channel Interference* ICI: OFDM juga memiliki ketahanan yang baik terhadap gangguan ICI antar kanal. Dengan menggunakan *sub-carrier orthogonal*, OFDM dapat meminimalkan interferensi antar kanal, yang memungkinkan penggunaan efektif dalam lingkungan dengan banyak kanal yang saling berdekatan.
4. Pengelolaan daya yang efisien: Dalam OFDM, daya sinyal dapat dibagi dan dialokasikan dengan presisi tinggi ke masing-masing sub-carrier, memungkinkan pengelolaan daya yang efisien dan adaptif sesuai dengan kondisi saluran [17].

2.2.7 Numerology OFDM

Teknologi akses radio 5G *New Radio* (NR) dalam penerapannya menggunakan frekuensi di bawah 6 GHz dan di atas 6 GHz, yang memerlukan perbedaan dukungan layanan. Penggunaan OFDM sendiri tidak dapat memenuhi performa yang diinginkan di semua rentang frekuensi yang diinginkan. Oleh karena itu, memerlukan konsep OFDM *numerology* untuk teknologi akses radio 5G (RAT). Teknologi akses radio 5G NR dapat menghadirkan performa yang optimal dan efisien dalam mengatasi tantangan yang dihadapi di berbagai frekuensi yang berbeda yang dapat dilihat pada gambar Tabel 2.1 [18].

Tabel 2. 1 OFDM Numerology Pada Sistem 5G [18]

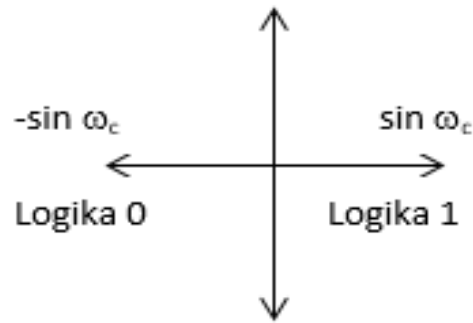
Parameter/ Numerology (μ)	0	1	2	3
<i>Subcarrier Spacing</i> (KHz)	15	30	60	120
OFDM Sym. (μs)	66,67	33,33	16,67	8,33
CP Duration (μs)	4,69	2,34	1,17	0,57
OFDM CP Sym. (μs)	71,35	35,68	17,84	8,92
Bw. min. (MHz)	4,32	8,64	17,28	34,56
Bw mak. (MHz)	49,5	99	198	396

Konsep OFDM *numerology* memungkinkan penyesuaian performa sesuai dengan kebutuhan pada berbagai rentang frekuensi yang digunakan. Konsep OFDM *numerology* ini membantu dalam mengoptimalkan dan mengatur parameter-parameter OFDM seperti *subcarrier spacing*, *cyclic prefix duration*, dan *symbol duration* sesuai dengan kebutuhan dan karakteristik dari setiap rentang frekuensi yang digunakan dalam teknologi 5G NR.

2.2.8 *Binary Phase Shift Keying (BPSK)*

Proses modulasi melibatkan pergerakan gelombang secara periodik sehingga memungkinkan sinyal untuk membawa informasi. Dalam proses ini, gelombang pembawa diubah untuk membawa sinyal informasi dengan mengatur parameter-*phase*, amplitudo, dan frekuensi gelombang pembawa yang akan menghasilkan sinyal termodulasi. Modulasi terbagi atas dua antara lain modulasi analog dan modulasi digital. Modulasi analog mengirimkan sinyal dalam bentuk analog, sementara modulasi digital mengirimkan sinyal dalam bentuk digital yang terdiri dari serangkaian bit 0 dan 1. Teknik modulasi digital memiliki tiga jenis yang umum digunakan, seperti *Phase Shift Keying (PSK)*, *Frequency Shift Keying (FSK)*, dan *Amplitude Shift Keying (ASK)* [19]. Dalam *Modulasi PSK*, fase sinyal digunakan untuk membawa informasi. Salah satu keuntungan dari teknik ini adalah penggunaan frekuensi yang konstan, yang membantu menjaga stabilitas pada *receiver*. Oleh karena itu, teknik modulasi yang sering digunakan dalam transmisi data dengan kecepatan tinggi menggunakan *Modulasi Phase Shift Keying (PSK)* [19]. Teknik modulasi PSK menggunakan sejumlah fase sehingga, dan setiap fase mewakili pola dan bit biner. Biasanya, setiap fase akan mengkodekan sejumlah bit tertentu. Pola bit ini membentuk simbol yang direpresentasikan dengan fase khusus. Salah satu bentuk paling sederhana dari modulasi PSK adalah *Modulasi Binary Phase Shift Keying (BPSK)*, di mana hanya menggunakan dua fase yang terpisah sejauh 180 derajat [20]. Fase dari sinyal pembawa diubah dengan dua nilai untuk menyatakan keadaan biner 1 dan 0 merupakan fase dari modulasi *Binary Phase Shift Keying (BPSK)*, dimana untuk fase dari sinyal pembawa diubah dengan dua nilai untuk menyatakan keadaan

biner 1 dan 0. Dalam BPSK, fase dari dua frekuensi pembawa yang berbeda akan memiliki selisih 180 derajat. Diagram konstelasi BPSK dijelaskan pada Gambar 2.6 [21].



Gambar 2. 6 Diagram Konstelasi BPSK [21]

Modulasi *Binary Phase Shift Keying* (BPSK) mampu mengubah bit yang dikirimkan menjadi bentuk simbol-simbol yang direpresentasikan oleh fase-fase pembawa yang berbeda dengan persamaan:

$$S(t) = m(t)c(t) \quad (2.10)$$

$$S(t) = \begin{cases} S_1(t) = -A \cos(2\pi f_c t), & t=0 \\ S_2(t) = +A \cos(2\pi f_c t), & t=1 \end{cases} \quad (2.11)$$

Dalam praktiknya, modulasi BPSK dapat dinyatakan sebagai $S(i) = 1-2 \times t(i)$ dengan kata lain, bit 0 akan menjadi sinyal digital +1, sedangkan bit 1 akan menjadi sinyal digital -1. [22].

Keterangan :

$m(t)$ = Sinyal Modulasi

$c(t)$ = Sinyal Pembawa

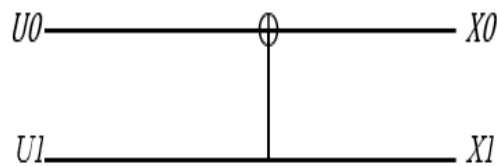
f_c = Frekuensi (Hz)

T = Waktu (s)

2.2.9 Polar code

Polar code adalah jenis *channel coding* yang digunakan untuk melakukan koreksi kesalahan atau *error* pada saat pengiriman data [2]. *Polar code* sangat efektif dalam meminimalisir kesalahan pada sistem jaringan 5G karena merupakan salah satu *strong codes*, sehingga *polar codes* direkomendasikan oleh ITU untuk diterapkan pada sistem jaringan 5G [23]. Banyaknya pengulangan yang berulang-ulang ini menghasilkan kanal virtual dengan reliabilitas tinggi atau rendah, fenomena yang dikenal sebagai polarisasi, dimana teknik *channel coding* ini dikenal sebagai *polar code*, yang termasuk ke kategori linier *block codes* [2].

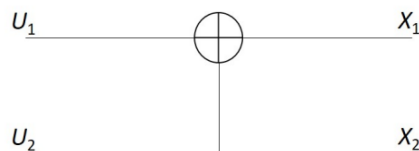
Struktur *polar codes* yang memiliki panjang blok 2 bit ditunjukkan pada Gambar 2.7. Bit-bit sebagai *transmitter* merupakan $U_0 U_1$ akan melalui operasi *channel polarization* (NYUSIM) dengan menggunakan $X \oplus R$ dengan nilai R, menghasilkan keluaran bit $X_0 X_1$ [23].



Gambar 2.7 Struktur Polar Codes dengan Panjang blok 2 [23]

2.2.10 Polar Encoder

Pada Gambar 2.8 menjelaskan proses *encoder*, bit informasi melakukan pengkodean sebelum dikirimkan sebagai bit *encoded*. *Polar Encoder* menggunakan operasi $X \oplus R$ (*eXclusive OR*) antara bit-bit konstruksi dengan matriks generator yang sesuai dengan panjang blok dari bit-bit konstruksi tersebut [24].



Gambar 2.8 Encoder polar codes dengan panjang blok 2 bit

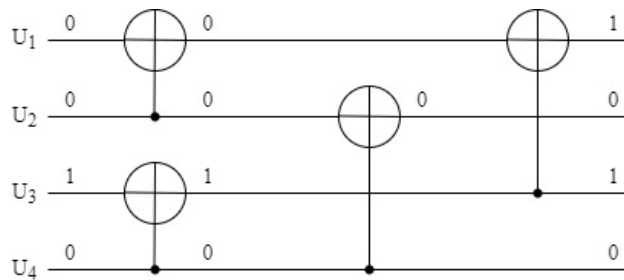
Skema encoding polar codes dengan perumusan:

$$\begin{aligned}
[X_1 \ X_2] &= [U] [G_m] \\
&= [U_1 \ U_2] \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \\
&= [U_1 \ U_2 \ U_2]
\end{aligned}
\tag{2.12}$$

Dalam konteks ini, bit masukan U terdiri dari kombinasi bit informasi dan bit frozen. X dihasilkan melalui operasi $X \oplus R$ antara bit-bit dalam U, yang dikenal sebagai proses *encoding*. Matriks generator G_m adalah matriks yang dapat diperluas dengan melakukan pemangkatan *Kronecker* sebanyak k kali, sesuai dengan panjang blok yang ditampilkan pada persamaan 2.13 sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
G_N &= G_2^{\otimes k} \\
G_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \\
G_4 &= \begin{bmatrix} G_2 & G_2 \\ G_2 & G_2 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{2.13}$$

Gambar 2.9 dibawah menunjukkan contoh *polar codes* dengan panjang 4 bit, dengan bit *input* = [0010], untuk menghasilkan bit *encoded* = [1010].



Gambar 2. 9 Panjang blok 4 bit menggunakan *encoder polar codes*

Encoding pada Gambar 2.9 dapat dilakukan perhitungan dengan persamaan berikut:

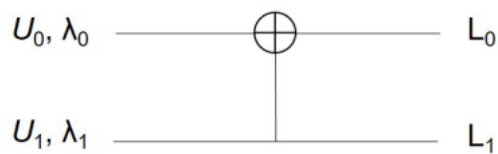
$$X_n = U_n \times G_n$$

$$\begin{aligned}
&= [0 \ 0 \ 1 \ 0] \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\
&= [0 \ 0 \ 1 \ 0]
\end{aligned}
\tag{2.14}$$

2.2.11 Polar Decoder

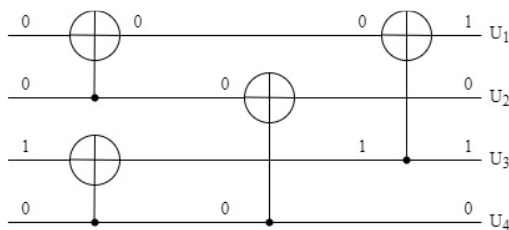
Decoder merupakan teknik yang digunakan untuk membuat kode atau mengurai bit-bit yang diterima melalui kanal sehingga menghasilkan bit-bit yang sesuai dengan yang dikirimkan. Dalam konteks *polar codes* terdapat beberapa variasi *polar decoder* yang umum. Salah satu variasi yang umum digunakan adalah *soft input successive cancellation decoding*, yang merupakan modifikasi dari *successive cancellation decoding* (SC) dengan menggunakan teknik *soft decoding* BPSK [24].

Bentuk *decoding* blok *polar code* ditampilkan pada Gambar 2.10 berikut:



Gambar 2. 10 Bentuk *decoding* blok *polar code*

Contoh proses *decoding polar codes*, dapat dilihat pada Gambar 2.10, dimana proses *decoding polar codes* diperoleh dengan melakukan operasi $X \oplus R$ kebalikan dari proses *encoding*.

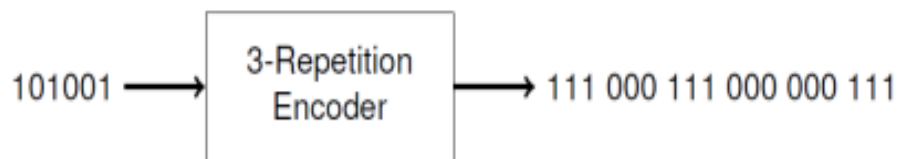


Gambar 2. 11 Contoh *decoder polar codes* dengan panjang blok 4 bit

Pada Gambar 2.11 menggambarkan bahwa bit yang diterima setara dengan bit yang ditransmisikan dan menghasilkan bit *decoded* = [0010].

2.2.12 Repetition code

Repetition Code adalah salah satu jenis kode koreksi eror yang paling sederhana di antara kode koreksi eror lainnya. Cara kerja dari *repetition code* mengulang pesan beberapa kali. Pada Gambar 2.12 menjelaskan konsep *repetition code* memiliki kemampuan untuk memulihkan pesan yang hilang ketika melewati kanal dengan *noise*. Keunggulan utama dari *repetition code* adalah lebih mudah untuk diimplementasinya karena rendahnya kompleksitas [2].



Gambar 2. 12 Penjelasan Konsep *Repetition Code*

Tabel 2.2 Contoh *encoder repetition codes* [2]

<i>Coding Rate</i>	<i>Message Bit</i>	<i>Encoded data</i>
1/3	0	000
	1	111
1/5	0	00000
	1	11111

Pada Tabel 2.2 menjelaskan contoh *encoder* pada *channel coding repetition code*, dengan menggunakan sistematika *repetition codes* dinyatakan melalui notasi (n,k), dimana n sebagai jumlah bit atau bit informasi dalam *codeword* tersebut. Pada *repetition codes*, jumlah bit asli (k) biasanya memiliki nilai 1. Sebagai contoh, *codeword* pada *repetition code* (n, 1) dapat dinyatakan dengan mengulang satu bit informasi sebanyak n kali sementara k menunjukkan jumlah bit asli. Jumlah bit asli (k) pada *repetition codes* biasanya bernilai 1. Pada *repetition codes* memiliki *codeword* dapat dinyatakan dengan [25]:

$$cr = m \times G \quad (2.15)$$

Dalam *repetition codes*, terdapat m yang menyatakan bit asli dan G menyatakan matriks generator, G dapat dinyatakan sebagai $G = [P|I_k]$, di mana P menyatakan matriks yang berisi *bit-bit parity*, dan I_k merupakan matriks identitas dengan ukuran $k \times k$. *Matriks parity check* (H) pada *repetition codes* dapat dinyatakan sebagai $H = [I_{n-k}|P^T]$, di mana I_{n-k} adalah matriks identitas dengan ukuran $(n-k) \times (n-k)$, dan P^T merupakan *transpose* dari matriks P yang dapat dilihat pada persamaan berikut [25] :

$$H = [I_{n-k} / P^T] \quad (2.16)$$

Tabel 2.3 Cara Kerja *repetition codes* untuk mengoreksi error [4]

<i>Message</i>	<i>Encoder</i>	<i>Error</i>	<i>Receiver</i>	<i>Decoder</i>	<i>Effect</i>
1	111	000	111	1	<i>Corrocted Error</i>
1	111	000	111	1	<i>Corrocted Error</i>
0	000	010	110	0	<i>Corrocted Error</i>
0	00	110	1101	1	<i>Corrocted Error</i>

Pada tabel 2.3 menjelaskan cara kerja *repetition codes* untuk memeriksa kesalahan saat pengiriman data, dimana bit data 1 akan dikirimkan melalui *encoder* yang akan mengambil data asli untuk dikirimkan dan *encoder* akan mengulanginya mejadi tiga bit. Pada penerima akan menerima data melalui *decoder* akan mengoreksi kesalahan dengan mengembalikan data ke bentuk aslinya untuk memeriksa data yang eror.

2.2.13 *Outage Probability*

Outage probability adalah probabilitas terjadinya suatu kondisi di mana *channel coding rate* (R) memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan kapasitas kanal (C) dengan nilai yang lebih kecil akibat efek *rayleigh fading* :

$$P(C \leq R) \quad (2.17)$$

Dalam teori kapasitas kanal Shannon, kegagalan transmisi terjadi ketika kesalahan (*error*) mendekati nol atau dalam kata lain saat nilai *coding rate* (R)

mendekati kapasitas kanal (C) ($R = C$). *Outage probability* dihitung berdasarkan *probability density function* (PDF) yang dibuat berdasarkan prinsip dari teori informasi dan pemrosesan sinyal, di mana kapasitas kanal (C) dihitung menggunakan teorema kapasitas Shannon. Selanjutnya, kapasitas kanal (C) akan dilakukan perbandingan dengan *coding rate* (R) untuk dievaluasi menggunakan *outage probability* untuk menentukan seberapa baik kinerja sistem dan seberapa dekat sistem tersebut mendekati kapasitas kanal teoritis [4].

2.2.14 *Outage Performance*

Outage performance dimanfaatkan dalam merancang sistem komunikasi dengan tujuan mencapai performa sistem yang optimal. Tujuan dari *outage performance* adalah meningkatkan efisiensi daya dengan mengatur daya pancar (PTrx) agar sejalan dengan kurva *outage performance* sesuai probabilitas yang diinginkan. Perhitungan *outage probability* pada kanal, dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [26] :

$$P_{Outage} = P_x(R > C) \quad (2.18)$$

Keterangan:

R = Channel Coding Rate

C = Kapasitas dari Kanal

2.2.15 *Frame Error Rate (FER)*

Frame error rate (FER) adalah *rasio* antara jumlah *frame* yang mengalami kesalahan (*error*) dengan jumlah total *frame* yang akan ditransmisikan. Sebuah *frame* dianggap *error* jika setidaknya satu bit di dalamnya mengalami kesalahan, yang dapat diungkapkan dalam persamaan [4]:

$$FER = \frac{F_e}{F_t} \quad (2.19)$$

Keterangan:

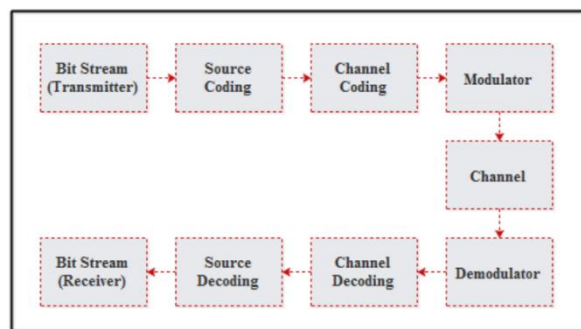
FER : *Frame Error Rate*

F_e : *Frame Error*

F_t : *Frame Transmitted*

2.2.16 Channel Coding

Gambar 2.13 menggambarkan implementasi sistem blok *channel coding* untuk mentransfer sinyal dari *transmitter* ke *receiver*. *Channel coding* berperan dalam menjaga keutuhan informasi atau data digital dari potensi kesalahan ketika terjadinya pengiriman data dengan cara memasukkan bit redundansi (*bit parity*) ke dalam bit informasi yang akan dikirim melalui kanal. Penggunaan *Channel code* yang umum digunakan ada dua, diantaranya *error detection code* yang bekerja ketika mendeteksi kesalahan bit informasi, dan *error correction code* yang bekerja saat memperbaiki kesalahan bit informasi [27] .



Gambar 2.13 Diagram Blok Sistem Transmisi dengan *Channel coding*

2.2.17 Signal to Noise Ratio (SNR)

Signal to Noise Ratio (SNR atau S/N) adalah nilai perbandingan level daya sinyal yang diinginkan dengan level daya *noise*. Nilai *rasio* tersebut sering dinyatakan dalam satuan *decibel* (dB). Apabila nilai SNR yang didapatkan melebihi 1:1 atau nilai $SNR > 0$ menunjukkan bahwa lebih banyak sinyal daripada *noise* [28] SNR digunakan untuk mengevaluasi kualitas *signal information* yang diterima pada sistem transmisi. Selain itu SNR juga dapat berfungsi sebagai batas ambang sinyal analog yang masih dapat diterima [29]. Dalam teknik modulasi digital menggunakan gelombang pembawa analog, dengan kualitas SNR cenderung lebih tinggi jika dibandingkan dengan modulasi analog. SNR juga merupakan parameter yang banyak digunakan untuk pencirian pada respons *detector*. Berikut persamaan

untuk menghitung nilai SNR dan mengubah nilai SNR (dB) ke nilai numerik [30]
:

$$SNR = 10 \log_{10}(S/N) \text{ dB} \quad (2.20)$$

$$SNR = 10^{\left(\frac{SNR}{10}\right)} \text{ mW} \quad (2.21)$$

Keterangan:

S = Daya sinyal rata-rata (Watt)

N = Daya derau (Watt)

2.2.18 Fast Fourier Transform (FFT)

Fast fourier Transform atau FFT ialah proses pemisahan antara frekuensi *carrier* dengan *symbol* OFDM yang diterima pada sisi *receiver* sebelum didemodulasi dan diubah kembali ke dalam bentuk bit informasi. FFT juga digunakan untuk implementasi *discrete fourier transform* agar lebih cepat dan efisien. ukuran FFT mengacu pada jumlah *subcarrier* dari simbol OFDM yang diharapkan dapat sesuai ukuran 2^n , dimana N ialah jumlah sampel yang diubah dari domain waktu ke domain frekuensi. Ukuran FFT juga ditentukan dengan memperhatikan keseimbangan antara perlindungan terhadap efek *multipath*, pergeseran dropler, dan kompleksitas sistem. Ukuran FFT yang besar dalam sistem 5G NR mampu mengurangi *subcarrier spacing* dan menambah durasi simbol. hal ini aka mempermudah dalam perlindungan simbol OFDM dari interferensi akibat *multipath*. Di sisi lain, berkurangnya *subcarrier spacing* akan membuat sistem lebih rentan terhadap ICI akibat efek *doppler spread* dalam sistem komunikasi *wireless* [32].