

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Pada penelitian Analisis Performansi *Bit Error Rate* (BER) pada *Repetition Codes* dan *Uncoded* pada sistem 5G dengan Frekuensi 26 GHz, penulis akan mengungkapkan referensi kajian pustaka dari beberapa jurnal. Pustaka yang relevan digunakan dan menjadi acuan penulis dalam menyusun dan melakukan penelitian.

Pada penelitian [1] membahas performansi kinerja *channel coding polar code* dan *repetition code* terhadap kanal *multipath* pada sistem 5G dengan menggunakan frekuensi 28 GHz dan parameter keadaan alam Kota Bandung. Penelitian tersebut menganalisis teknik pengkodean kanal pada pemodelan kanal *multipath* dengan menggunakan modulasi 16 QAM dan teknik *multicarrier CP-OFDM numerology 2*. Hasil dari pemodelan kanal yaitu menghasilkan 9 *path*. Teknik pengkodean kanal yang efektif untuk menurunkan bit *error* dan *frame error* pada sistem komunikasi 5G yaitu *polar code* [7].

Pada penelitian [2] membahas performansi kinerja model kanal *mmWave* dengan menggunakan frekuensi 28 GHz, *bandwidth* 50 MHz, dan modulasi QPSK. Kemudian menggunakan parameter keadaan alam pada Kota Wonosobo, diantaranya adalah parameter suhu maksimum sebesar 30,4°C dan suhu minimum sebesar 18,0°C. Penelitian tersebut dilakukan menggunakan pemodelan kanal dengan rentang waktu 2 tahun yaitu Mei 2018-April 2020. Hasil yang diperoleh dari penelitian tersebut yaitu kinerja sistem komunikasi 5G mempengaruhi suhu maksimum dan minimum, dimana pada $R = \{3/4, 1\}$ dinyatakan tidak efisien karena membutuhkan E_b/N_0 yang lebih besar, dibandingkan dengan $R = 1/2$ dinyatakan lebih efisien karena membutuhkan E_b/N_0 yang lebih sedikit [8].

Pada penelitian [3] membahas performansi model kanal 5G dibawah pengaruh *Human Blockage* dengan menggunakan frekuensi 3,5 GHz, *bandwidth* 99 MHz, dan modulasi QPSK. Kemudian parameter yang digunakan meliputi parameter suhu sebesar 27,89°C, kelembapan udara sebesar 83,30 %, tekanan udara sebesar 1010,56 mBar, dan curah hujan sebesar 15,86 mm/hr pada Kota

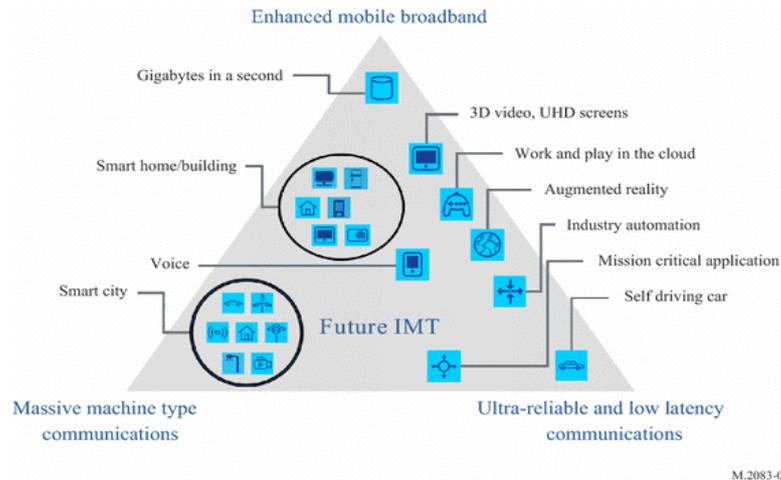
Purwokerto. Dengan jarak yang digunakan sebesar 250 meter antara pemancar dan penerima. Penelitian tersebut melakukan perbandingan kinerja dengan dan tanpa pengaruh *human blockage* pada model kanal 5G. Hasil penelitian tersebut menunjukkan model kanal 5G yang direpresentasikan dalam *Power Delay Profile* (PDP) *representatif* didapatkan sebanyak 37 *path* dengan dan tanpa pengaruh *human blockage*. Hasilnya menunjukkan bahwa *human blockage* pada frekuensi 3,5 GHz dapat mempengaruhi kinerja sistem 5G dan membutuhkan *strong codes* untuk meminimalkan *error* seperti *convolutional*, *polar*, dan *repetition codes* [9].

Pada penelitian [4] membahas performansi kinerja model kanal 5G dengan pengaruh kelembapan dengan menggunakan *channel coding convolutional code* dan frekuensi 3,3 GHz, *bandwidth* 99 MHz, berdasarkan spesifikasi 5G dari *cyclic prefix-orthogonal frequency division multiplexing* (CP-OFDM). Penelitian ini menggunakan parameter lingkungan Kota Bandung meliputi kelembapan minimum sebesar 36,37 %, kelembapan maksimum sebesar 74,88 %, kelembapan rata-rata sebesar 53,4 %, suhu rata-rata sebesar 28,03°C, dan tekanan udara rata-rata sebesar 937 mbar untuk menghasilkan 2000 *instantaneous* PDP. Hasil penelitian tersebut menunjukkan PDP *representative* dengan pengaruh kelembapan maksimum dan minimum masing-masing sebanyak 9 *path*. Hasilnya menunjukkan *convolutional codes* dapat menghemat daya *signal to noise ratio* (SNR) dibandingkan tanpa *channel coding (uncoded)* yang digunakan untuk memvalidasi *outage performances* [10].

2.2 Dasar Teori

2.2.1 5G Radio (NR)

Pada generasi kelima (5G) akan banyak perubahan, salah satunya yaitu kecepatan data yang mencapai kecepatan 20 Gbps, dan *bandwidth* yang jauh lebih besar dan baik dari generasi sebelumnya. Pada Gambar 2.1 menunjukkan segitiga *usage* yang dapat diperlihatkan dalam skema penggunaan teknologi 5G, dimana *International Telecommunication Union* (ITU) sebagai suatu organisasi internasional untuk meregulasi 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*.



Gambar 2.1 Usage scenario of IMT for 2020 and beyond [11]

Terdapat tiga skenario yang digunakan untuk teknologi 5G diantaranya yaitu :

1) *Enhanced Mobile Broadband*

Permintaan *mobile broadband* akan terus meningkat untuk konten multimedia, 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 performansi dan *user experience* tanpa hambatan.

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 *industry manufacturing*, pembedahan medis jarak jauh, keamanan transportasi dan lain-lain.

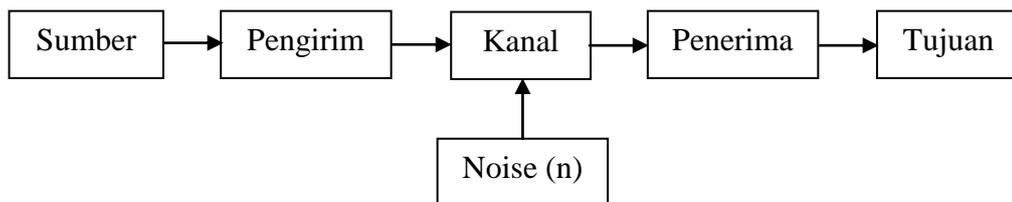
3) *Massive Machine Type Communication*

Kasus penggunaan ini di karakteristik oleh jumlah *device* yang terkoneksi sangat besar. *Device* diharuskan terjangkau, dan memiliki baterai yang tahan lama [11].

2.2.2 Komunikasi Wireless

Komunikasi *wireless* merupakan sistem komunikasi yang media transmisinya menggunakan gelombang elektromagnetik sebagai pengganti kabel. Data yang diubah menjadi sinyal untuk dikirimkan oleh pemancar dan pemancar

mengirimkannya melalui kanal. Kanal merupakan modifikasi dari sinyal untuk mengirimkan informasi ke tujuan dengan kesalahan (distorsi) sesedikit mungkin. Kanal *wireless* merupakan faktor utama dalam memutuskan kinerja sistem komunikasi. Jarak transmisi antara pemancar dan penerima dapat bervariasi dari LOS (*line of sight*) hingga tertutup oleh penghalang seperti bangunan, bukit, dan pepohonan. LOS (*line of sight*) merupakan karakteristik radiasi elektromagnetik dalam jalur langsung dari sumber ke penerima.



Gambar 2.2 Diagram Komunikasi Nirkabel

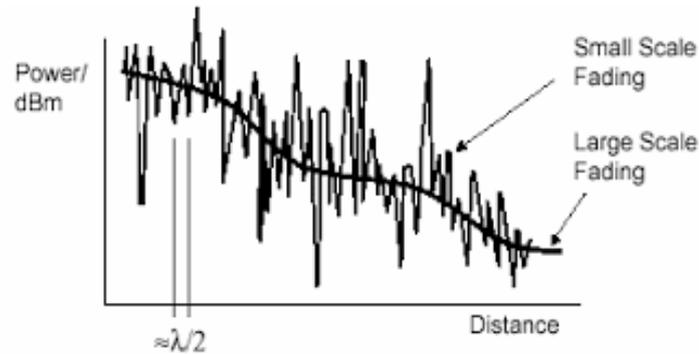
Terdapat tiga mekanisme dasar yang dapat mempengaruhi sinyal propagasi dalam komunikasi *wireless* :

- a) *Reflection* : terdapat sinyal tidak langsung yang datang ke penerima setelah mengalami pantulan terhadap objek. Terdapat banyak pantulan yang berkontribusi terhadap besarnya *delay*.
- b) *Diffraction* : propagasi melewati objek yang cukup besar sehingga menghasilkan sumber sekunder, seperti gedung, bukit, dan sebagainya.
- c) *Scattering* : propagasi melewati objek yang kecil sehingga menyebabkan banyak pantulan untuk arah yang berbeda.

Karakteristik kanal *wireless* dikelompokkan menjadi dua tipe yaitu *large scale fading* dan *small scale fading*. *Fading* merupakan fenomena terjadinya variasi amplitudo atau fasa pada satu atau lebih komponen frekuensi sinyal yang diterima. *Fading* terjadi karena interferensi gelombang *multipath* yang memiliki amplitudo dan fasa yang berbeda-beda.

1. *Large scale fading* merupakan daya sinyal rata-rata sebagai fungsi dari jarak antara pengirim dan penerima. *Large scale fading* disebabkan karena akibat keberadaan obyek-obyek pemantul serta penghalang pada kanal propagasi sehingga menghasilkan perubahan sinyal dalam hal energi, fasa, serta *delay* waktu yang bersifat *random*.

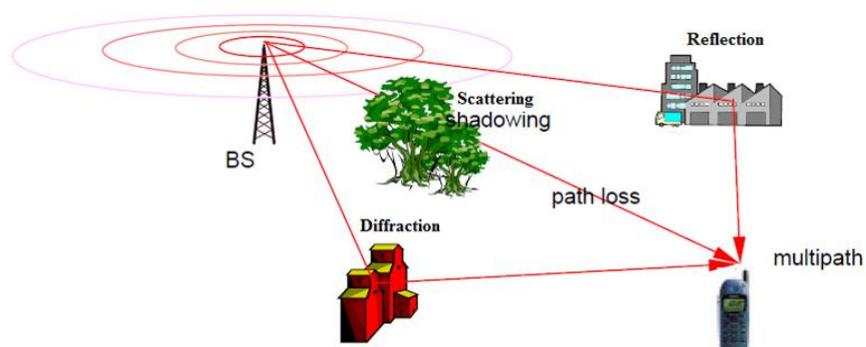
2. *Small scale fading* merupakan fluktuasi sinyal dalam periode waktu yang singkat pada nilai rata-ratanya. *Small scale fading* biasa disebut juga dengan *multipath fading* atau *short term fading*. *Multipath fading* dihasilkan oleh dua macam mekanisme, yaitu *time spreading* sinyal sebagai akibat dari *multipath* dan *time varying channel* yang disebabkan oleh pergerakan [12].



Gambar 2.3 Large scale dan small scale fading

2.2.3 Kanal Multipath Fading

Karakteristik kanal *wireless* ditentukan dengan adanya propagasi *multipath*. Sinyal yang ditransmisikan oleh antena akan dipancarkan melalui berbagai objek di lingkungan dalam mencapai antena penerima. Sinyal yang dikirim pada akhirnya akan digandakan kedalam beberapa sinyal, kemudian sinyal akan datang ke penerima dalam waktu, amplitudo, polaritas, sudut kedatangan, ataupun frekuensi yang berbeda [13].



Gambar 2.4 Konfigurasi kanal *multipath fading*

Perambatan sinyal antara pemancar dan penerima melalui berbagai lintasan yang berbeda. Dengan adanya *multipath* memungkinkan sinyal yang dikirim dapat diterima meskipun lintasan terhalang. Sinyal yang diterima oleh

penerima merupakan jumlah superposisi dari keseluruhan sinyal yang dipantulkan akibat banyak lintasan (*multipath*) [14]. Sinyal yang diterima oleh kanal dapat ditulis sebagai berikut :

$$r(t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cos(2\pi f_c t + \varphi_i) \quad (2.1)$$

Keterangan :

$r(t)$ = sinyal terima

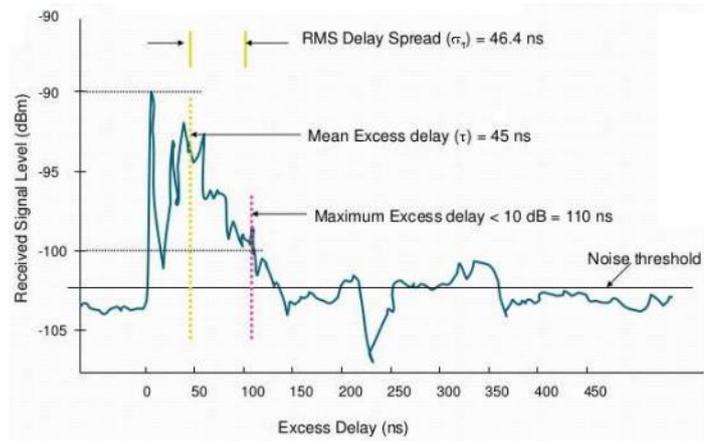
α_i = variable *random* dengan i komponen sinyal

t = waktu

φ_i = variable *random uniform* distribusi untuk sudut fasa dari komponen sinyal ke-i

2.2.4 Power Delay Profile (PDP)

Power Delay Profile (PDP) merupakan intensitas yang berasal dari sinyal yang diterima oleh *receiver* melalui *multipath channel* fungsi dari waktu *delay*. *Power delay profile* biasa disebut juga *multipath otensity profile* dideskripsikan untuk *autocorrelation*, yaitu dimana $A_C(\Delta t)$ merupakan fungsi dari *autocorrelation* dapat dideskripsikan *channel impulse response* terkait dengan waktu ke waktu seperti Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Contoh *Power Delay Profile* (PDP)

Nilai PDP berasal dari pengolahan respon impuls sinyal pada pengukuran. Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut [15] :

$$pdp(\tau) = \langle |\mathbf{h}(\tau)|^2 \rangle_{ss} \quad (2.2)$$

Keterangan :

$pdp(\tau)$ = *power delay profile*

s = jumlah sampel spasial

$h(\tau)$ = fungsi transfer kanal pada domain waktu.

Pada PDP juga terdapat perhitungan untuk menentukan *representative* PDP menggunakan metode *scalling* pada FFT. Metode *scalling* berfungsi untuk mengetahui total *path* modif yang benar dan sesuai untuk mewakili keseluruhan dari *path* asli yang berasal dari kanal. Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut :

$$\sum \mathbf{Path}_{modif} = \frac{\mathbf{FFT}_{modif}}{\mathbf{FFT}_{real}} \cdot \sum \mathbf{Path}_{real} \quad (2.3)$$

2.2.4.1 Delay Spread

Time spreading menyebabkan sinyal yang datang dengan delay yang berbeda-beda atau disebut dengan *delay spread*. *Delay spread* biasanya digambarkan dengan *delay profile*, dimana sinyal utama dan sinyal *delay* digambarkan dengan beberapa sinyal pulsa dengan *delay* dan daya yang berbeda-beda. Parameter-parameter yang digunakan pada *delay spread* :

1. *Maximum Excess Delay* (τ_m)

Maximum Excess Delay atau yang dapat disebut juga dengan *maximum delay spread* (τ_m) merupakan perbedaan waktu relatif yang dihitung dari komponen sinyal yang diterima pertama kali sampai komponen sinyal terakhir yang memiliki daya di atas sensitivitas *receiver* (*threshold*).

2. *Mean Excess Delay* ($\bar{\tau}$)

Mean excess delay merupakan momen pertama dari *power delay profile* (PDP) yang dinormalisasikan dengan daya sinyal rata-rata. *Mean excess delay* dapat dihitung dengan persamaan [16] :

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{k=0}^k \mathbf{P}(\tau_k) \cdot \tau_k}{\sum_{k=0}^k \mathbf{P}(\tau_k)} \quad (2.4)$$

Keterangan :

$\bar{\tau}$ = *Mean excess delay*

k = Jumlah dari *power delay profile*

$P(\tau_k)$ = Power dari setiap *power delay profile* (watt)

τ_k = waktu (s)

3. *Root Mean Square (RMS) Delay Spread* (σ_τ)

Momen kedua dari mean *excess delay* yaitu *root mean square delay spread*, dan dapat dihitung dengan persamaan :

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\overline{\tau})^2} \quad (2.5)$$

Keterangan :

σ_τ = *Root mean square (RMS) delay spread*

$\overline{\tau^2}$ = *Mean square delay spread*

Dimana $\overline{\tau^2}$ merupakan *mean excess delay* dari momen pertama *power delay profile* dan dapat dihitung dengan persamaan:

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_{k=0}^k P(\tau_k) \cdot \tau_k^2}{\sum_{k=0}^k P(\tau_k)} \quad (2.6)$$

Efek yang ditimbulkan oleh *delay spread* antara lain :

1. *Flat fading*

Kanal yang memiliki gain konstan dan respon fasa yang *linier* terhadap *bandwidth* yang lebih besar daripada *bandwidth* sinyal transmisi atau nilai maksimum *excess delay* lebih kecil dibandingkan dengan durasi simbol ($W_0 > W$ atau $\tau_m < T_s$).

2. *Frequency selective fading*

Kanal yang memiliki gain konstan dan respon fasa yang *linier* terhadap *bandwidth* yang lebih kecil daripada *bandwidth* sinyal transmisi atau nilai maksimum *excess delay* lebih besar dibandingkan dengan durasi simbol ($W_0 < W$ atau $\tau_m > T_s$).

2.2.4.2 *Doppler spread*

Doppler spread merupakan parameter yang merepresentasikan ukuran pelebaran spektrum karena adanya pergerakan relatif kanal antara pemancar dan

penerima. Pelebaran spektrum terjadi karena pergeseran frekuensi dari pergerakan pengguna atau objek di sekitarnya. Pergeseran frekuensi dapat dihitung dengan persamaan :

$$\Delta f = \frac{f v \cos \theta}{c} = \frac{v}{\lambda} \quad (2.7)$$

Keterangan :

f = Frekuensi *carrier*

v = Kecepatan pengguna

θ = Sudut kedatangan sinyal relatif terhadap arah kecepatan pengguna

Pergeseran frekuensi maksimum terjadi pada saat sudut kedatangan sinyal sama dengan 0° dan nilai tersebut dapat bernilai positif dan negatif sehingga nilai maksimum pelebaran spektrum adalah dua kali besar pergeseran frekuensi maksimum (f_m).

$$f_m = \frac{f v}{c} \quad (2.8)$$

Efek yang ditimbulkan oleh *Doppler spread* antara lain :

1. *Slow fading*

Kecepatan perubahan respon impuls kanal lebih lambat daripada durasi simbol sinyal yang ditransmisikan.

2. *Fast fading*

Respon impuls kanal berubah dengan cepat dalam satu durasi simbol [17].

2.2.4.3 Cumulative Distribution Function (CDF)

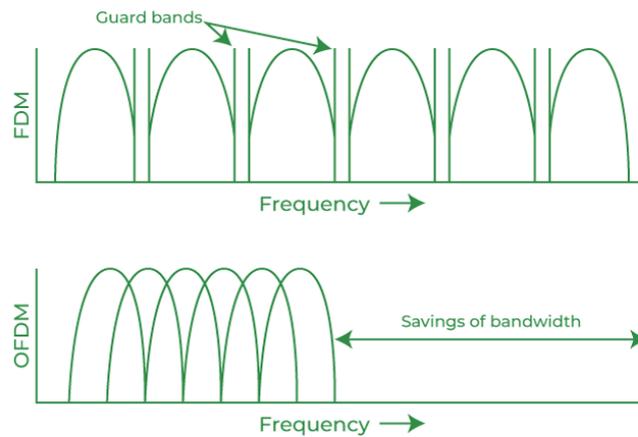
Cumulative Distribution Function (CDF) merupakan salah satu metode untuk menggambarkan distribusi *variable* acak. Kelebihan dari CDF yaitu dapat menggunakan semua jenis *variable* acak seperti diskrit, kontinu, dan campuran. CDF (X) didefinisikan sebagai :

$$F_x(x) = P(X \leq x), \text{ for all } x \in \mathbb{R} \quad (2.9)$$

Dari rumus di atas dapat dijelaskan bahwa X merupakan CDF dari *variable* acak X, dan CDF didefinisikan untuk semua $x \in \mathbb{R}$ [18].

2.2.5 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) merupakan sebuah skema *multiplexing* yang baik dalam mentransmisi data dengan kecepatan tinggi dan kuat untuk melewati kanal *multipath fading*. OFDM akan menjadikan efek *frequency-flat fading* yang ditransmisikan secara *parallel*. OFDM memiliki kolerasi antar sub *channel* sehingga sub *channel* yang satu dengan yang lainnya tidak saling mengganggu [19].



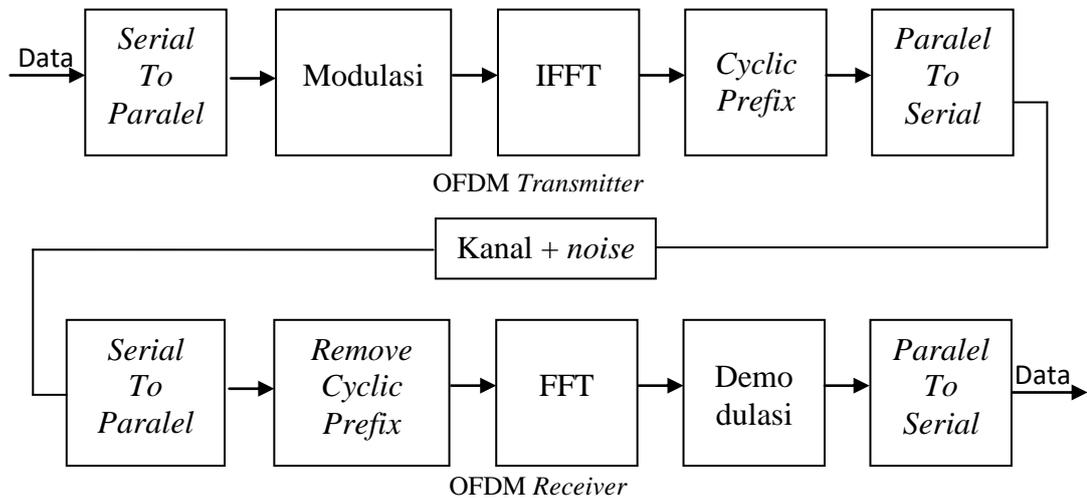
Gambar 2.6 Bentuk Sinyal FDM dan OFDM

Prinsip dari OFDM yaitu merubah pengiriman informasi yang tadinya berbentuk serial menjadi bentuk paralel. Selain itu OFDM juga mengurangi kompleksitas seperti penggunaan *equalizer* pada pengimplementasian sistem data dengan kecepatan tinggi jika dibandingkan dengan teknik *single carrier*.

Pembagian pita frekuensi pada OFDM hampir sama dengan *frequency division multiplexing* (FDM) yaitu membagi pita lebar yang ada ke dalam berbagai frekuensi pembawa, hanya saja OFDM membaginya lebih efisien. Setiap frekuensi pembawa yang saling *orthogonal* akan terjadi tanpa tindih dengan frekuensi pembawa yang lainnya dimana setiap frekuensi pembawa akan dipisahkan oleh *guard interval* atau lebih dikenal dengan *cyclic prefix* (CP) [20].

Pada pengiriman informasi dengan kecepatan tinggi akan membuat jarak antar simbol yang dikirimkan semakin rapat, dan akan muncul *inter-symbol interference* (ISI) yaitu berupa interferensi antar simbol yang diterima dikarenakan *multipath* selama perjalanan untuk informasi sampai ke penerima. Sehingga diperlukan teknik modulasi yang lebih tahan terhadap ISI. Cara untuk

menghilangkan ISI yaitu dengan menggandakan simbol dan menambah simbol secara periodik yang digunakan sebagai *guard interval*. Ketika *guard interval* lebih besar dari *multipath delay* maka dampak dari ISI dapat dihilangkan [21].



Gambar 2.7 Blok diagram OFDM

Pada Gambar 2.7 bagian *transmitter*, data atau informasi yang akan dikirim berbentuk serial kemudian dalam OFDM diubah menjadi paralel kemudian dimodulasi. Modulasi merupakan proses perubahan gelombang periodik menjadi sebuah sinyal yang mampu membawa informasi. Sinyal yang telah dimodulasi selanjutnya masuk ke dalam IFFT (*inverse fast fourier transform*) untuk membuat frekuensi data saling *orthogonal*. Setelah itu ditambahkan *cyclic prefix* sebagai pemisah frekuensi pembawa yang saling timpa tindih. Dengan menggunakan *cyclic prefix* akan mengurangi ISI (*inter symbol interference*) dan ICI (*inter carrier interference*). Kemudian diubah lagi ke dalam bentuk serial sebelum sinyal dikirim. Sinyal yang dikirim dari *transmitter* berupa sinyal yang saling *overlapping* (timpa tindih) sehingga dapat menghemat *bandwidth*.

Pada bagian *receiver*, sinyal diubah dari serial ke paralel kemudian dilakukan penghapusan *cyclic prefix* untuk mendapatkan simbol yang asli kembali. Setelah itu masuk ke dalam FFT (*fast fourier transform*). FFT berfungsi sebagai pemisah antara frekuensi *carrier* dengan simbol OFDM. Setelah itu didemodulasi dan sinyal diubah kembali ke dalam bentuk serial sebelum diterima kembali dalam bentuk data atau informasi.

Simbol OFDM dapat dinyatakan dengan persamaan [6]:

$$\int_a^b \varphi_p(t)\varphi_q(t)dt = 0, \text{ untuk } p \neq q \quad (2.10)$$

$$\int_a^b \varphi_p(t)\varphi_q(t)dt = K, \text{ untuk } p = q \quad (2.11)$$

2.2.5.1 Numerology OFDM

Numerologi OFDM pada 5G memerlukan penerapan teknologi radio akses 5G NR karena memiliki pilihan untuk kategori frekuensi di bawah 6 GHz dan di atas 6 GHz maka diperlukan dukungan layanan berbeda. *Numerology* OFDM tunggal tidak dapat memenuhi kebutuhan kinerja semua rentang frekuensi yang diimplementasikan sehingga diperlukannya OFDM *numerology* untuk 5G *radio access technology* (RAT) yang ditunjukkan pada Tabel 2.1 [22].

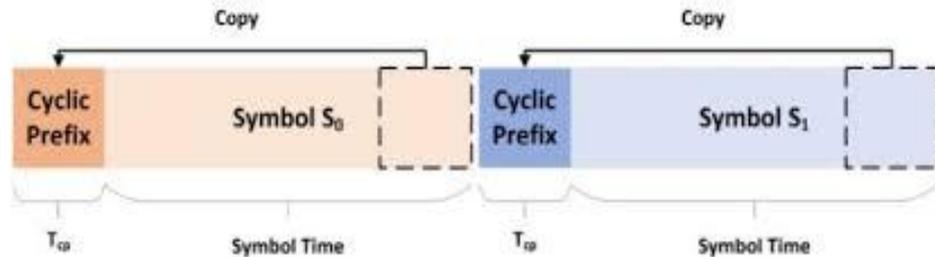
Tabel 2.1 *Numerology* OFDM pada 5G

Parameter/ <i>Numerology</i> (μ)	0	1	2	3	4
<i>Subcarrier Spacing</i> (KHz)	15	30	60	120	240
OFDM <i>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
OFDM <i>Symbol incl. CP</i> (μ s)	71.35	35.68	17.84	8.92	4.46
<i>Bandwidth</i> minimum (MHz)	4.32	8.64	17.28	34.56	69.12
<i>Bandwidth</i> maksimum (MHz)	49.5	99	198	396	397.44

2.2.5.2 *Cyclic Prefix* (CP)

Dalam OFDM tiap data yang dikirim diberikan *cyclic prefix* (CP), dimana fungsinya sebagai *guard interval* yang memastikan semua simbol OFDM terkirim secara lengkap dalam *inverse fast fourier transform* (IFFT) dengan penundaan waktu yang sama. Sehingga dapat menjaga orthogonalitas dari sinyal OFDM. *Inverse fast fourier transform* (IFFT) merupakan proses untuk menghasilkan simbol-simbol OFDM pada sisi *transmitter* dengan frekuensi dari setiap informasinya saling tegak lurus (*orthogonal*). *Cyclic prefix* (CP) merupakan pengulangan sebagai simbol *prefix* pada bagian akhir simbol OFDM. Dengan

adanya *cyclic prefix* dapat menggantikan *inter symbol interference* (ISI) dengan syarat durasi CP lebih besar dari *delay spread* atau panjang CP diharapkan lebih besar atau sama dengan jumlah *path* dalam *power delay profile* (PDP) agar sistem terbebas dari ISI [23].



Gambar 2.8 Ilustrasi *Cyclic Prefix*

Konsep dari CP dapat dijelaskan dengan sederhana, jika PDP mempunyai $h = [h_0, h_1]$, data yang ditransmisikan (x) ditambah dengan panjang CP (Q) = 3, maka $x_{cp} = [d e | a b c d e]$ pada sinyal *receiver* (y) yang sudah di tambahkan *noise* (n) ditentukan sebagai berikut [24] :

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

Keterangan :

- y = Sinyal penerima (*receiver*)
- H = Kanal *multipath*
- x = Sinyal pengirim (*transmitter*)
- n = *Noise*

2.2.5.3 Fast Fourier Transform (FFT)

Fast fourier transform (FFT) merupakan suatu proses pemisahan antara frekuensi *carrier* dengan simbol OFDM yang diterima pada sisi *receiver* sebelum didemodulasi dan diubah kembali ke dalam bentuk bit informasi. Fungsi FFT yaitu mengubah *domain* waktu ke *domain* frekuensi. FFT dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) + j \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (2.13)$$

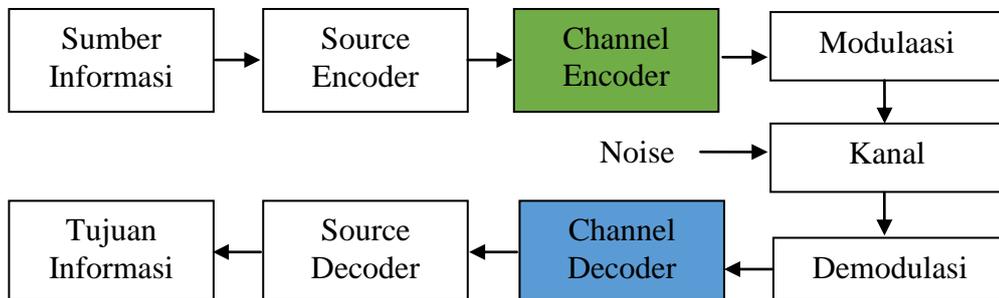
2.2.5.4 Inverse Fast Fourier Transform (IFFT)

Inverse fast fourier transform (IFFT) merupakan proses untuk menghasilkan simbol-simbol OFDM pada sisi *transmitter* dengan frekuensi dari setiap informasinya akan dibuat saling tegak lurus (*orthogonal*). Fungsi IFFT yaitu mengubah *domain* frekuensi ke *domain* waktu. IFFT dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut [6] :

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - j \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (2.14)$$

2.2.6 Channel Coding

Pada proses pengiriman suatu informasi atau data dari transmitter ke receiver, dilakukan beberapa proses terhadap informasi tersebut. Salah satu prosesnya yaitu *channel coding*. *Channel coding* berfungsi untuk menjaga informasi atau data dari *error* yang mungkin terjadi selama proses pentransmisian data dengan cara menambahkan bit *redundansi* (bit pelindung) ke dalam bit informasi yang akan dikirim melalui kanal. Tahapan proses *channel coding* dalam sistem transmisi dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Diagram Blok Sistem Transmisi

Pada bagian *transmitter* terdapat sumber informasi yang akan masuk ke *source encoder*. *Source encoder* merupakan perangkat yang menjalankan fungsi *encoding*. Tujuan dari *source coding* adalah meminimalisasi bit dengan cara mengurangi redundansi didalam bit informasi. Setelah dari *source encoder* akan masuk ke *channel encoder*. *Channel encoder* merupakan kanal yang belum mengalami proses pentransmisian. Proses tersebut dilanjutkan dengan modulasi. Pada saat informasi melalui media transmisi atau kanal terjadi penambahan *noise*. *Noise* yang timbul sesuai dengan kondisi lingkungan yang dilewati.

Pada bagian *receiver* melalui proses demodulasi akan masuk ke *channel decoder*. *Channel decoder* merupakan hasil dari kanal yang sudah ditransmisikan. Selanjutnya masuk ke *source decoder* untuk memperoleh kembali informasi yang dikirimkan.

Dalam *channel coding* yang digunakan untuk mendeteksi *error* disebut *error detection codes*, sedangkan yang mampu untuk mengoreksi kesalahan disebut *error correction codes*. Ada dua klasifikasi pada *error control coding* yaitu :

1. *Automatic Repeat Request* (ARQ) merupakan pengkodean yang hanya dapat mendeteksi, di mana kesalahan transmisi dapat dideteksi oleh penerima tetapi tidak dapat diperbaiki.
2. *Forward Error Correction* (FEC) merupakan teknik untuk mendeteksi dan memperbaiki sejumlah *error* dalam data yang ditransmisikan tanpa perlu transmisi ulang [15].

Teori Shannon dapat direpresentasikan dalam *channel coding* dengan menggunakan rumus :

$$C = B \log_2(1 + P/N_0B) = B \log_2(1 + S/N) \quad (2.15)$$

Keterangan :

C = kapasitas kanal

B = *bandwidth* transmisi (Hz)

P = daya sinyal yang diterima (*watt*)

Ada dua jenis *channel coding* yaitu *block code* dan *convolutional code*.

1. *Block code*

Block code merupakan salah satu kode yang bersifat FEC yang mampu untuk mendeteksi dan mengoreksi *error* tanpa meminta proses transmisi ulang. Pada *block code*, sejumlah bit pariti ditambahkan pada bit informasi sehingga terbentuk sebuah *codeword* atau kode *block*. Pada bagian pengirim, sejumlah *k* (bit informasi) dikodekan kedalam *n* (*code bit*). *Block code* yang dihasilkan dapat direpresentasikan dalam bentuk (*n,k*) *code*.

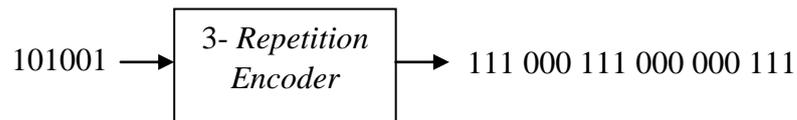
2. *Convolutional code*

Convolutional code merupakan jenis kode yang urutan bit informasi tidak dikelompokkan dalam blok-blok yang berbeda sebelum dikodekan. Pada

pengkodean konvolusi, tiap *codeword* selain bergantung pada *message* yang bersesuaian juga tergantung pada *m blok* message sebelumnya. *Codeword* dengan *k (input)*, *n (output)* dan *m* (tingkat memori) disebut dengan kode konvolusi (*n,k,m*).

2.2.6.1 Repetition Codes

Repetition codes merupakan salah satu *error correction codes* paling sederhana diantara *error correction codes* yang lain. *Repetition codes* memiliki konsep dasar yaitu mengulang pesan beberapa kali, dengan tujuan *error* yang terjadi pada kanal hanya meredakan sedikit bagian dari pengulangan yang dilakukan. Selain itu mampu menggantikan pesan yang hilang saat melewati *noise channel* [25]. Salah satu daya tarik utama dari *repetition codes* yaitu mudah dalam pengimplementasian karena mempunyai kompleksitas yang rendah.



Gambar 2.10 Konsep *Repetition Codes*

Tabel 2.2 Contoh *encoder Repetition Codes*

<i>Coding Rate</i>	<i>Message bit</i>	<i>Encoder data</i>
1/3	0	000
	1	111

Channel coding rate pada *repetition* dapat dinyatakan dengan persamaan [7] :

$$R = \frac{1}{repeat} \quad (2.16)$$

Tabel 2.3 Cara kerja *repetition codes* untuk mengoreksi *error*

<i>Message</i>	<i>Encoder</i>	<i>Received</i>	<i>Decoder</i>	<i>Effect</i>
1	111	111	1	<i>Corrected errors</i>
1	111	110	1	<i>Corrected errors</i>
0	000	010	0	<i>Corrected errors</i>
0	000	110	1	<i>Undetected errors</i>

Sistematika *repetition codes* dapat dinyatakan dengan (*n,k*) dengan *n* merupakan jumlah *codeword* dan *k* merupakan jumlah bit asli. *Codeword*

merupakan kombinasi dari bit informasi dan bit redundan. Jumlah bit asli (k) pada *repetition codes* biasanya bernilai 1. *Codeword* dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$C_r = m G \in R^{1 \times n} \quad (2.17)$$

Keterangan :

C_r = *Codeword*

m = Bit asli

G = Matriks generator

R = *Coding rate*

n = Jumlah *codeword*

Matriks generator dapat dinyatakan dengan persamaan [26]:

$$G = [I_k | P] \quad (2.18)$$

Keterangan :

I_k = Matriks identitas

P = Matriks

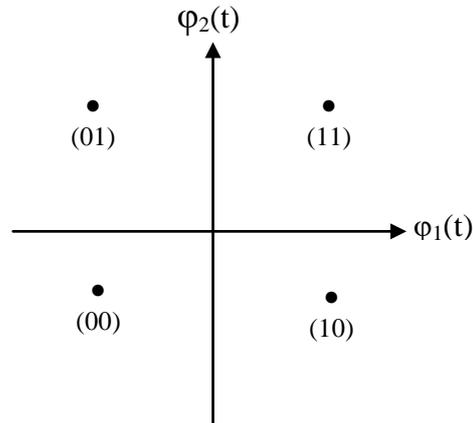
2.2.7 Modulasi Digital

Modulasi merupakan proses perubahan gelombang periodik menjadi sebuah sinyal yang mampu membawa informasi. Modulasi dapat dilakukan dengan mengubah sifat sinyal *carrier*. Dalam sistem komunikasi, modulasi berfungsi untuk mengurangi *noise* dan interferensi, serta menyamakan karakteristik sinyal dengan karakteristik kanal. Modulasi dibagi menjadi dua jenis, yaitu modulasi analog dan modulasi digital. Modulasi analog merupakan sebuah sinyal yang berbentuk gelombang kontinyu. Sedangkan modulasi digital merupakan sebuah sinyal analog yang dimodulasi berdasarkan data digital. Modulasi digital merupakan proses pengubah karakteristik dan sifat gelombang *carrier* sehingga bentuk hasilnya memiliki bit-bit 0 atau 1.

2.2.7.1 Modulasi *Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)*

Teknik modulasi QPSK merupakan pengembangan dari modulasi PSK (*Phase Shift Keying*), yaitu bentuk modulasi yang proses pemodulasian menggunakan cara pergeseran fasa (*phase*). Modulasi *Quadrature Phase Shift*

Keying (QPSK) merupakan teknik modulasi digital dengan memanfaatkan perubahan fasa dari sinyal pembawa. Modulasi QPSK dapat mengkodekan dua bit per simbol yang ditujukan untuk meminimalkan *bit error rate* (BER) [27]. QPSK mempunyai *bandwidth* yang lebih efisien. QPSK juga merupakan teknik pengodean M-ary di mana jumlah M=4.



Gambar 2.11 Diagram Konstelasi QPSK

Berdasarkan Gambar 2.11, modulasi QPSK mempunyai dua fungsi basis yaitu :

$$\varphi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos 2\pi f_c t \quad (2.19)$$

$$\varphi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \sin 2\pi f_c t \quad (2.20)$$

Setiap dua bit data diwakili satu simbol dalam sinyal QPSK, yaitu bit urutan ganjil dinyatakan dalam data I dan bit urutan genap dinyatakan dalam data Q. Sehingga satu simbol tersebut dapat digambarkan menggunakan bentuk fasor dan mengakibatkan sinyal mengalami pergeseran pada saat transmisi [27]. Modulasi QPSK dapat dihitung dengan persamaan :

$$d(I) = \frac{1}{\sqrt{2}} [(1 - 2b(i)) + j(1 - 2b(i))] \quad (2.21)$$

Keterangan :

$b(i)$ = Biner pertama yang dipetakan oleh simbol angka modulasi kompleks

j = imajiner

Kecepatan simbol QPSK dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$R_{QPSK} = R_b = 2R_s \quad (2.22)$$

Sedangkan *bandwidth* QPSK dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$BW_{QPSK} = \frac{2R_s}{2} = \frac{R_b}{2} \quad (2.23)$$

Keterangan :

R_s = *Baud rate* (simbol/detik)

R_b = *Bit rate* (bit/detik)

Energi simbol dapat dinyatakan sebagai fungsi energi bit $E = 2E_b$ sehingga probabilitas simbol yang *error* dinyatakan sebagai :

$$P_e \cong \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \right) \quad (2.24)$$

Nilai bit *error ratio* (BER) sebesar [28]:

$$P_e = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \right) = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_o}} \right) \quad (2.25)$$

2.2.8 Bit Error Rate (BER)

Dalam telekomunikasi, rasio *error* didefinisikan sebagai rasio jumlah *bit*, karakter, elemen, atau blok yang diterima dengan salah dibanding jumlah total *bit*, karakter, elemen, ataupun blok yang dikirim sepanjang *interval* waktu tertentu. Rasio yang sering ditemui dalam transmisi digital yaitu *bit error rate* (BER). *Bit error rate* (BER) merupakan rasio dari *error* yang diterima dengan *bit* yang ditransmisikan dalam sistem transmisi selama *interval* waktu, dimana dapat dirumuskan sebagai berikut [29]:

$$\text{BER} = \frac{\text{Bit}_{\text{error}}}{\text{Bit}_{\text{transmitted}}} \quad (2.26)$$

2.2.8.1 BER Untuk Modulasi QPSK pada Kanal Rayleigh Fading

Pada modulasi QPSK sinyal pembawa mempresentasikan keadaan fasa untuk menyatakan simbol dari bit sinyal informasi. QPSK memiliki empat simbol untuk merepresentasikan bit informasi, satu simbol QPSK terdiri dari dua bit yaitu 00, 01, 10, dan 11 [30]. Nilai BER pada kanal *rayleigh fading* dalam skema transmisi QPSK dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut [31]:

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{E_b/N_o}}} \right] \quad (2.27)$$