

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka

Pada penelitian [5] tentang “Perbandingan Performansi *Polar Code* dan *Repetition Code* Terhadap kanal *Multipath* Pada Sistem Komunikasi 5G”. Pada penelitian ini meneliti efektivitas metode pengkodean dua saluran untuk koreksi kesalahan adalah subjek dari penelitian ini. Menggunakan modulasi 16 QAM dan teknik *multicarrier numerologi* CP-OFDM 2, mensimulasikan dan menganalisis *polar codes* dan teknik pengkodean *repetition code* pada pemodelan saluran 5G *multipath* sebagai bagian dari penelitian. Selain itu, simulasi dan analisis pemodelan saluran 5G terkait dengan parameter lingkungan kota Bandung dan spesifikasi sistem 5G yang beroperasi pada 28 GHz. Sembilan jalur dihasilkan dari hasil pemodelan kanal, dengan mean *excess delay* sebesar 5,039 ns dan RMS *delay spread* sebesar 22,747 ns. Pada Eb/No 34,62 dB, nilai BER yang dihasilkan untuk *repetition codes* adalah $110 \cdot 10^{-4}$, sedangkan nilai FER untuk *polar codes* pada Eb/No > 20 dB adalah 0 dan $6,13 \cdot 10^{-3}$, sedangkan nilai FER untuk *repetition codes* adalah $3,66 \cdot 10^{-1}$. *Polar codes* digunakan dalam sistem komunikasi 5G untuk memastikan bahwa teknik pengkodean saluran mengurangi kesalahan bingkai dan bit. Dari hasil simulasi dapat ditarik kesimpulan bahwa teknik pengkodean *polar codes* lebih efektif menurunkan *bit error rate* dan *frame error rate* pada sistem komunikasi 5G [5].

Pada penelitian [7] tentang “5G Channel Model Indonesia Menggunakan Teknik *Statistical Spatial Channel Model* (SSCM)”, Membahas Model teknik Saluran *Spasial Statistic* (SSCM) untuk pemodelan saluran 5G. Penelitian ini menggunakan *bandwidth* 198 MHz, frekuensi 28 GHz, tekanan udara 924,1 mBar, kelembaban 77,87 %, dan suhu rata-rata 23,65°C sebagai parameternya. Selain mengevaluasi probabilitas *outage*, FER, dan BER, studi ini juga mengusulkan model kanal untuk Indonesia. Model kanal 5G Indonesia memiliki 18 jalur, dengan *mean excess delay* 7,15 ns dan RMS *delay spread* 14,81 ns, menurut temuan tersebut. *Power Delay Profile* (PDP) yang representatif digunakan untuk

menghitung kapasitas saluran (per tautan), dan CDF (Fungsi Distribusi Kumulatif) digunakan untuk mengevaluasinya menggunakan metode perhitungan nilai yang sama seperti pada CP-OFDM. Simulasi komputer menggunakan sistem CP-OFDM dengan *convolutional codes* sebagai *encoder* dan algoritma *Viterbi* sebagai *decoder* memastikan validitas kinerja *outage*. Kinerja sistem 5G menggunakan pengkodean saluran mengikuti standar 5G dan mendekati teori *outage performance* [7].

Pada penelitian [8] tentang “*Hummidty Effect to Performance Under Palmebang Channel Model at 28 Ghz*”. 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 0,15 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 [8].

Pada penelitian [9] tentang “*Investigating Bhattacharyya Parameters for Short and Long Polar in AWGM and Rayleigh Fading Channels*”. Membahas Salah satu aspek terpenting dari sistem komunikasi nirkabel adalah pengkodean koreksi kesalahan. Pada generasi telekomunikasi kelima (5G) New Radio (NR), *kode Polar* dan kode *Low Density Parity Check* (LDPC) digunakan sebagai skema pengkodean saluran. *Kode polar* adalah tipe baru dari kode saluran yang efisien

dengan kinerja tinggi dan kompleksitas komputasi *encoding* dan *decoding* yang rendah. Performa *kode Polar* bergantung pada kualitas saluran, mengingat saluran praktis. Tulisan ini mengkaji batasan *Bhattacharyya* sebagai batas untuk memilih *bit frozen* pada *polar codes* dengan panjang blok 8, 16, 32, 64 dan 128 bit dengan rentang *signal-to-noise power ratio* (SNR) -15 dB sampai 50 dB dengan simulasi komputer. mengikuti perbedaan kualitas saluran. Berdasarkan *Signal to Noise power Ratio* (SNR), makalah ini membandingkan kinerja *Bit Error Rate* (BER) dari *kode Polar* dalam *additive white Gaussian noise* (AWGN) dan kanal *fading Rayleigh* dan mempertimbangkan parameter *Bhattacharyya* untuk *Polar* pendek dan panjang kode yang berguna untuk membuat *Polar codes* dengan berbagai panjang blok informasi dan SNR. Hasilnya menunjukkan bahwa SNR mempengaruhi parameter *Bhattacharyya* dalam penempatan bit informasi dan bit *frozen*. BER *polar codes* dengan parameter *Bhattacharyya* lebih unggul di SNR yang tinggi [9].

Pada penelitian [10] tentang “*Humidity Effect to The Indonesia 5G Channel Model at 3,3 Ghz*” membahas mengenai modulasi C-BPSK menggunakan *bandwidth* 99 MHz, dan frekuensi 3,3 GHz. Kemudian memanfaatkan kondisi alam di Bandung seperti kelembapan maksimal 74,88 persen, kelembapan minimal 36,37 persen, suhu 28,03 derajat Celcius, tekanan *barometrik* 973 mbar, dan curah hujan 0,15 mm/h. dengan jarak 250 meter memisahkan pemancar dan penerima. Berdasarkan penelitian, kelimanya menghasilkan usulan model 5G yang meliputi 9 jalur untuk kelembapan maksimum dan minimum. Performa pemadaman dengan *convolutional codes* modulasi C-BPSK 5G, *Outage performance* yang akan berfungsi sebagai referensi teoretis menggunakan performa BER untuk CP-OFDM *numerology* $\mu = 1$ [10].

2.2 Dasar Teori

2.2.1 *Bit Error Rate* (BER)

Bit Error Rate adalah parameter yang digunakan untuk mengevaluasi transmisi data sistem dengan membandingkan jumlah *bit* yang dikirim ke penerima

yang salah. BER ditentukan dengan menghitung jumlah kesalahan dan membandingkan urutan *bit* yang dikirim dan diterima. Jumlah *bit* yang diterima yang telah berubah pada saluran komunikasi sebagai akibat dari *noise*, *distorsi*, *fading*, *interferensi*, atau redundansi sinkronisasi *bit* disebut sebagai jumlah kesalahan *bit* dalam transmisi digital. Rasio kesalahan *bit* yang diterima dengan *bit* yang ditransmisikan dalam sistem transmisi selama periode waktu yang ditentukan oleh persamaan disebut sebagai tingkat kesalahan *bit error rate* (BER) [11].

$$\text{BER} = \frac{Be}{Bt} \quad (2.1)$$

Keterangan :

Be : *Bit* yang *error*

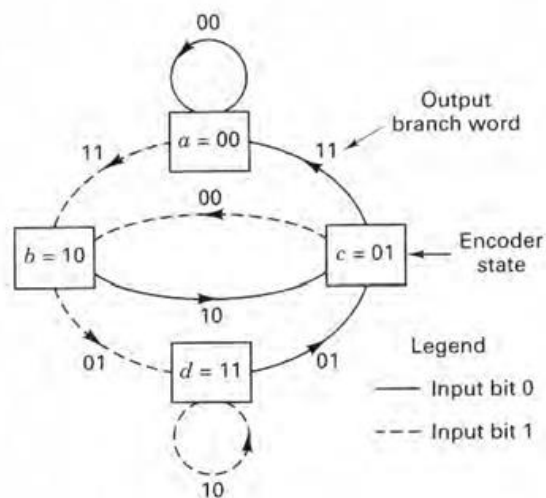
Bt : *Bit* yang di transmisikan

Perbandingan kesalahan (*error*) dengan bit yang dikirim secara keseluruhan dilakukan dengan *Bit Error Rate* (BER). Tingkat kesalahan bit menguji jumlah kesalahan membaca dipihak yang menang secara konsisten. Dalam kebanyakan kasus, sistem transmisi data dioptimalkan selama tahap desain sehingga parameter kinerja dapat disesuaikan diawal tahap konsep desain. Menangani transmisi data. Apakah sambungan radio/nirkabel atau sambungan telekomunikasi kabel menghubungkan dua lokasi, jumlah kesalahan pada data diujung jarak jauh merupakan parameter yang paling penting. Dalam kerangka serat optik, kesalahan *bit* pada dasarnya disebabkan oleh hamburan optik dan penyempitan yang mungkin tersedia. Selain itu, *noise* dapat masuk ke penerima optik dengan sendirinya. Untuk menentukan berapa banyak kesalahan pembacaan yang terjadi pada sisi penerima setiap detik, *Bit Error Rate* (BER) digunakan. BER 10^{13} digunakan untuk menggambarkan nilai BER. atau, dengan kata lain, dari 10^{13} bit yang dikirim, hanya satu yang mengalami kesalahan membaca atau menerima [12].

2.2.2 Convolutional Code

Parameter sering digunakan untuk menggambarkan *convolutional codes* panjang batasan dan kecepatan kode. Kode konvolusional seringkali dideskripsikan menggunakan dua parameter: *code rate* dan *constraint length*. *Code rate*, k/n , adalah perbandingan antara jumlah bit masukan pada enkoder

konvolusional (k) dengan jumlah keluaran simbol kanal pada enkoder konvolusional (n) dalam sebuah *encoder cycle*. Perbedaan antara kode konvolusional dengan kode blok adalah pada kode konvolusional terdapat memori yang dikategorikan sebagai *constraint length*, K . *Constraint length* menunjukkan jumlah k -bit stages yang tersedia untuk memenuhi logika kombinatorial yang menghasilkan simbol keluaran.



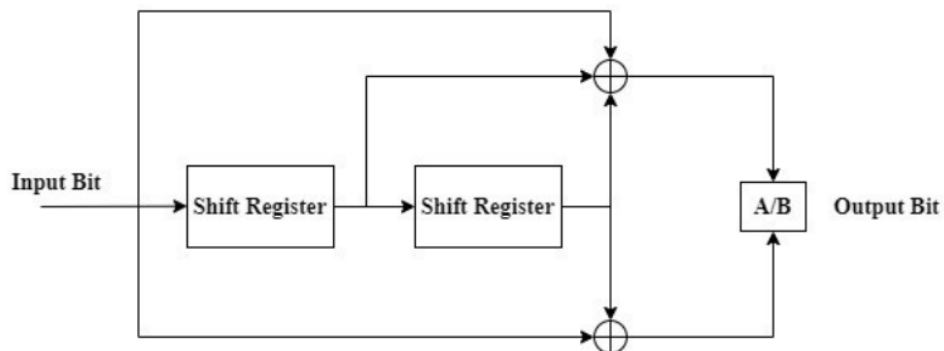
Gambar 2.1 Diagram *State Convolutional Code rate 1/2*

Pada gambar 2.1 garis lurus menunjukkan jeda bit *input* "0", sedangkan garis putus-putus adalah bit input "1". Dengan memindahkan satu bit dalam satu waktu maka hanya akan terjadi dua transisi state yang bisa dijalankan oleh register pada tiap bit waktu. Itulah alasan mengapa disebut pengkoreksian otomatis karena setiap panah menunjukkan nilai dari perhitungan selanjutnya. *kode rate* yang digunakan $R = \frac{1}{2}$ [13]. Kode Konvolusi biner memiliki $2^M - 1$ kemungkinan keadaan (*state*). Representasi diagram keadaan untuk kode Konvolusi dapat dilihat pada gambar 2.4. Krena untuk *encoder* ini $m=3$ maka terdapat 4 state yang mungkin baginya, yang masing-masing adalah $a = 00$, $b = 10$, $c = 01$, $d = 11$ [14].

2.2.2.1 *Convolutional Codes Encoder*

Convolutional encoder merupakan masukan bit pada *convolutional*

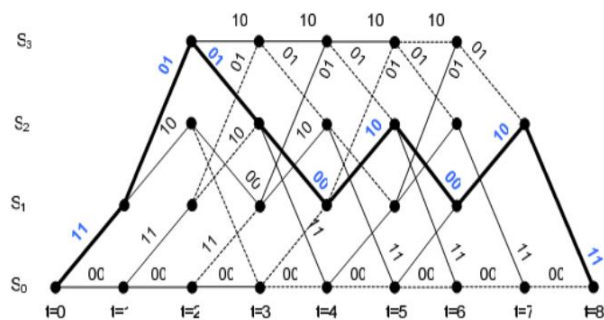
codes. Jika jumlah *output* lebih besar dari jumlah *input* ($n > k$), maka *convolutional codes* memiliki *bit input* k dan *bit output* n . Hal ini ditunjukkan dengan laju kode k/n . *Convolutional codes* didefinisikan sebagai $C(n,k,m)$, dengan k *bit input*, n *bit output*, dan memori m , karena *polynomial generator* mendefinisikan aspek *convolutional codes*, seperti panjang memori, n *bit output* (*number modulo-2 adder*), dan koneksi antara register geser dan gerbang logika XOR. *Convolutional codes* juga didefinisikan sebagai *polynomial generator*. Gambar ini merupakan contoh blok *encoder convolutional codes* dengan *coding rate* $1/2$ [15].



Gambar 2.2 Blok diagram *convolutional codes encoder* [15].

2.2.2.2 Convolutional Codes Decoder

Convolutional codes decoder merupakan hasil kebalikan dari *encoder*. Prosedur *traceback* pada pendekode (*decoder*) terlihat pada diagram trellis pada gambar berikut. Proses *traceback* ini berawal dari konsep bahwa setiap percabangan (*branch*) terkait dengan bit masukan tertentu pada pengkode. Sebagai contoh, percabangan dari *state* S_2 pada $t = 7$ menuju *state* S_0 pada $t = 8$ berhubungan dengan masukan bit '0' pada pengkode [14].



Gambar 2.3 Diagram Trellis *Decision Decoding*

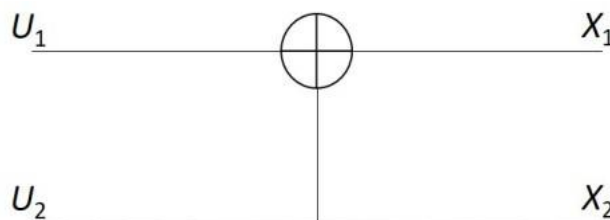
2.2.3 Polar Code

Polar Codes merupakan metode pengkodean saluran salah satunya yang dapat memperbaiki kesalahan transmisi data. Transformasi saluran fisik ke saluran virtual dimungkinkan oleh konstruksi kode berdasarkan beberapa pengulangan kode kernel. Istilah "polarisasi" mengacu pada fenomena di mana jumlah rekursif saluran virtual tinggi atau rendah. Akibatnya, metode pengkodean saluran ini dikenal sebagai *polar codes*. *Polar codes* dikategorikan ke dalam kode blok linier berdasarkan polarisasi saluran. *Polar codes* pertama yang diketahui untuk mencapai saturasi kapasitas untuk *Input Biner Diskrit Memoryless Channels* (BDMC) [5].

Polar codes adalah sekelompok kode blok linier berdasarkan fenomena polarisasi saluran. Terbukti mencapai kapasitas Shannon untuk *input biner* simetris saluran tanpa memori diskrit (B-DMC) adalah pencapaian pertama yang diketahui dari *Polar codes*. Konstruksi eksplisit, pengkodean sederhana, dan penguraian kode, di antara keuntungan inklusif lainnya, dari *polar codes*. *Throughput* tinggi dan kinerja BER yang unggul dapat dicapai dengan *Polar codes* dengan metode sederhana (tingkat kode variabel) dan pemendekan kode (panjang kode variabel) [16].

2.2.3.1 Polar Encoder

Polar encoder menggunakan teknik pengkodean sebelum dikirim. Bergantung pada N , teori pembuat *enkoder polar* menggunakan operasi matriks untuk menentukan hubungan antara konstruksi bit U dan generator matriks [9].



Gambar 2. 4 Struktur *Polar Code* dengan Panjang Blok 2 Bit [5].

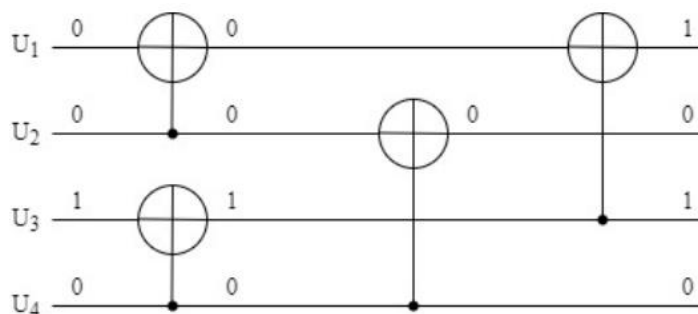
Gambar 2.4 menunjukkan *encoding polar* dengan rumus :

$$\begin{aligned}
[X_1 \ X_2] &= [U] [G_m] \\
&= [U_1 \ U_2] \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \\
&= [U_1 \oplus U_2 \ U_2.]
\end{aligned}
\tag{2.2}$$

X merupakan hasil operasi XOR antara U bit atau hasil proses *encoding*, dan Gm merupakan matriks pembangkit yang dapat mengembang berdasarkan hasil *rank Kronecker* k sesuai dengan panjang blok yang ditunjukkan oleh [5].

$$\begin{aligned}
G_n &= G_2^{\otimes k} \\
G_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \\
G_4 &= \begin{bmatrix} G_2 & G_2 \\ G_2 & G_2 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{2.3}$$

Gambar 2.5 contoh *encoder polar codes* sepanjang 4 bit



Gambar 2.6 contoh *encoder polar codes* dengan blok 4 bit

Gambar 2.5 merupakan contoh dari *polar codes* dengan 4 bit. Dengan

nilai input = [0010], dengan hasil *bit encoded* bernilai = [1010]. *Encoding* pada Gambar 2.5 diselesaikan dengan operasi perhitungan berikut [5]:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{X}_n &= \mathbf{U}_n \mathbf{x} \mathbf{G}_n \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

2.2.3.2 Polar Decoder

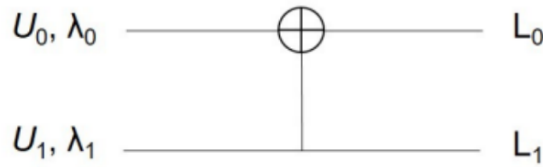
Polar decoder merupakan Metode untuk mengkodekan bit yang diterima oleh saluran dan kemudian mengkodekannya menjadi bit yang sama sesuai dengan *bit* yang dikirim dikenal sebagai *dekoder*. *Dekoder* pembatalan yang berhasil, *dekoder* berulang, *dekoder* daftar, *dekoder* propagasi kepercayaan, dan sebagainya adalah contoh *Dekoder Polar*. Metode ini menggunakan *decoding* pembatalan berturut-turut *input software*, yang menggabungkan *decoding* BPSK lunak dengan *decoding* pembatalan berturut-turut (SC). Penguraian kode ini memperhitungkan definisi Persamaan tentang rasio kemungkinan log (LLR) sebagai masukan [9] :

$$L_N^{(i)}(y_1^N, \hat{u}_1^{i-1}) = \log \left(\frac{W_N^{(i)}(y_1^N, \hat{u}_1^{i-1} | 0)}{W_N^{(i)}(y_1^N, \hat{u}_1^{i-1} | 1)} \right) \tag{2.5}$$

dengan *output* yang diperoleh berupa *bit* \hat{u}_i dengan rumus [9]:

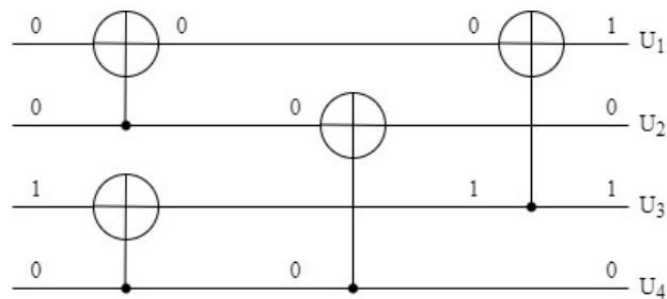
$$\hat{u}_i = \begin{cases} 0, & \text{if } L_N^{(i)}(y_1^N, \hat{u}_1^{i-1}) \geq 1 \\ 1, & \text{sebaliknya} \end{cases} \tag{2.6}$$

Atau dapat di ilustrasikan dengan sederhana pada Gambar 2.7



Gambar 2.7 decoding blok pada *polar codes*

Untuk contoh *decoding polar codes* dapat diamati pada Gambar 2.8. dari contoh ini dapat diperhatikan jika proses dari *decoding polar codes* diperoleh dari kebalikan kinerja XOR dari proses *encoding* pada Gambar 2.6.



Gambar 2.8 Contoh *decoder polar codes* dengan contoh balok panjang 4 bit

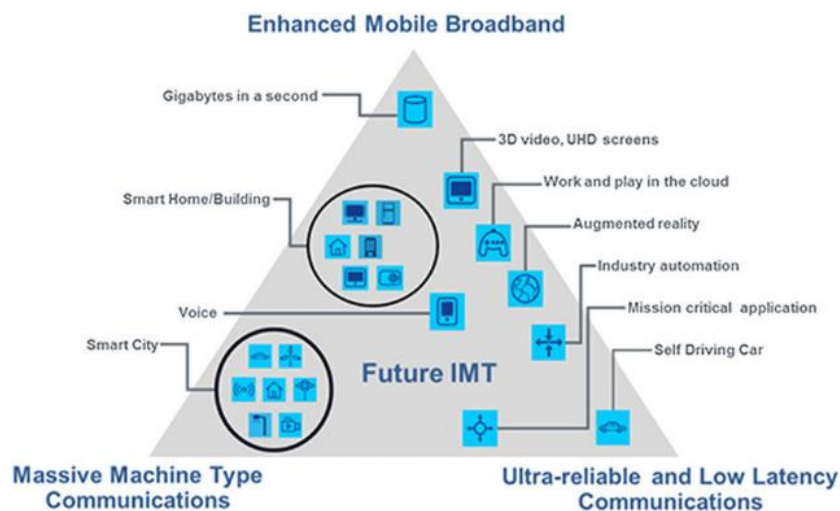
Dapat diamati pada gambar 2.8 merupakan *bit* yang diterima sama dengan *bit* yang di transmisikan dan mendapatkan hasil *bit decodeder* dengan nilai = 0010 [9].

2.2.4 Teknologi 5G

Teknologi 5G atau yang biasa disebut dengan *Fifth Generation*, yang sudah diperkenalkan pada tahun 2020, sedang mengalami perkembangan pesat. Rentang frekuensi teknologi 5G diperkirakan antara 1 GHz dan 100 GHz. Frekuensi tinggi ini menghadirkan ujian lain, khususnya masalah gelombang yang sangat tinggi yang menyebabkan pelemahan dipengaruhi oleh keadaan alam [7].

Teknologi 5G atau generasi kelima merupakan istilah yang digunakan untuk menyambut generasi kelima sebagai fase berikutnya dari teknologi 4G. Banyak sekali perubahan yang terjadi pada teknologi 5G tersebut. Diantaranya adalah kecepatan data yang lebih tinggi yang diprediksi mencapai kecepatan 20 Gbps, serta penggunaan *bandwidth* yang lebih besar yang jauh lebih baik daripada generasi

sebelumnya. *International Telecommunication Union* (ITU) yang merupakan sebuah organisasi internasional yang didirikan untuk membakukan serta meregulasi radio internasional dan telekomunikasi mengeluarkan rekomendasi ITU-R M 2083- 0 mengenai IMT Vision – *Framework and overall objective of the future development of IMT for 2020* yang menjelaskan mengenai skema penggunaan teknologi 5G yang digambarkan dalam segitiga *usage* pada gambar 2.3 [17]:



Gambar 2. 9 *Usage scenario of IMT for 2020 and beyond* [17]

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

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 dan persyaratan tambahan pada aplikasi *mobile broadband* yang sudah ada untuk meningkatkan kinerja dan *user experience* tanpa hambatan.

2. *Ultra-reliable and Low Latency Communications*

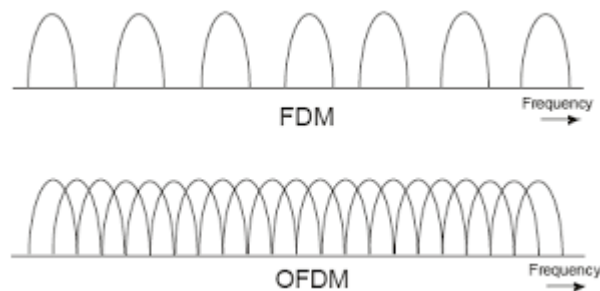
Kasus penggunaan ini harus memiliki persyaratan yang ketat untuk kemampuan *throughput*, *latency*, dan *availability*. Beberapa contoh yang termasuk *wireless control* dari *industrial manufacturing*, pembedahan medis jarak jauh, keamanan transportasi, dll.

3. *Massive Machine Type Communications*

Kasus penggunaan ini dikarakteristikan dengan jumlah *device* yang terkoneksi sangat besar. *Device* diharuskan terjangkau dan memiliki baterai yang tahan lama [18].

2.2.5 *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM)

OFDM merupakan bentuk khusus untuk suatu FDM (*Frequency Division Multiplexing*), pada FDM suatu *bandwidth* dibagi menjadi beberapa kanal. Berkecepatan tinggi dan cukup kuat untuk melewati saluran *multipath fading*, OFDM adalah skema *multiplexing* transmisi data yang efektif. Sub-saluran yang tidak saling eksklusif dikorelasikan menggunakan OFDM. Setiap datum dikirim dengan CP untuk menghindari antar gambar *obstruksi* ISI dan antara impedansi saluran (ICI) Supaya tidak mengganggu satu sama lain, maka diperlukan jarak (*guardband*), namun hal tersebut membuat penggunaan *bandwidth* menjadi tidak efisien. Sedangkan OFDM konsepnya adalah empat kanal dapat ditumpang tindihkan menjadi satu, OFDM dinilai memberikan efisiensi pada *bandwidth*, dan dapat dilihat pada gambar 2.10 [19].



Gambar 2.10 Frekuensi Antara FDM dan OFDM [19].

OFDM merupakan salah satu tipe dari metode *multicarrier* (FDM) yang memiliki efisiensi konsumsi frekuensi yang jauh lebih baik. Pada OFDM *overlap* antar frekuensi yang berdekatan diperbolehkan, sebab tiap-tiap telah saling *orthogonal*, sebaliknya pada sistem *multicarrier* konvensional buat mencegah interferensi antar frekuensi yang berdekatan butuh diselipkan frekuensi penghalang (*guard band*), dimana perihal ini mempunyai dampak samping berbentuk menurunnya kecepatan transmisi apabila dibandingkan dengan sistem *single*

carrier dengan lebar spektrum yang sama. Sehingga salah satu ciri dari OFDM merupakan tingginya tingkatan efisiensi dalam konsumsi frekuensi. Tidak hanya itu pada *multicarrier* konvensional pula dibutuhkan *band pass filter* sebanyak frekuensi yang digunakan, sebaliknya pada OFDM lumayan memakai FFT saja. Keunggulan utama yang lain dari OFDM merupakan kokoh mengalami *frequency selective fading* [20].

Dengan memakai teknologi OFDM, walaupun jalan komunikasi yang digunakan mempunyai ciri *frequency selective fading* (dimana *bandwidth* dari *channel* lebih kecil daripada *bandwidth* dari transmisi sehingga mengakibatkan pelemahan energi terima secara tidak seragam pada sebagian frekuensi tertentu), namun tiap *sub carrier* dari sistem OFDM hanya hadapi *flat fading* (pelemahan daya terima secara seragam). Pelemahan yang diakibatkan oleh *flat fading* ini lebih mudah dikendalikan, sehingga performansi dari sistem gampang buat ditingkatkan. Teknologi OFDM dapat mengganti *frequency selective fading* jadi *flat fading*, sebab meskipun sistem secara totalitas memiliki kecepatan transmisi yang sangat tinggi sehingga memiliki *bandwidth* yang lebar, sebab transmisi memakai *subcarrier* (frekuensi pembawa) dengan jumlah yang sangat banyak, sehingga kecepatan transmisi di masing- masing subcarrier sangat rendah dan *bandwidth* dari masing- masing *subcarrier* sangat kecil, lebih kecil daripada *coherence bandwidth* (lebar daripada *bandwidth* yang mempunyai ciri yang relatif sama)[20].

2.2.6 Numerology OFDM

Numerology OFDM untuk 5G diperlukan karena penerapan teknologi radio akses 5G NR mempunyai opsi kategori frekuensi dibawah 6 GHz dan diatas 6 GHz sehingga OFDM tunggal tidak bisa memenuhi kebutuhan dari performansi dari semua rentang frekuensi yang diimplementasikan. Sehingga diperlukannya OFDM *numerology* untuk 5G *radio access technology* (RAT) yang bisa dilihat pada Tabel 2.1 [21].

Tabel 2.1 *Subcarrier spacing*, jumlah simbol dan slot OFDM [21].

<i>Parameter/Numerology</i> (μ)	0	1	2	3	4
<i>Subcarrier Spacing</i> (KHz)	15	30	60	120	240

OFDM Symbol Duration (μs)	66.7	33.3	16.7	8.33	4.17
Cyclic Prefix Duration (μs)	4.7	2.3	1.2 (Normal CP), 4.13 (Extended CP)	0.59	0.29
Max. nominal system BW (MHz)	50	100	100 (sub-6 GHz), 200 (mmwave)	400	400
FFT size (max.)	4096	4096	4096	4096	4096
Symbol per slot	14	14	14 (normal CP), 12 (extended CP)	14	14
Slot per subframe	1	2	4	8	16
Slot per frame	10	20	40	80	160

Pada 5G NR memiliki spesifikasi 3GPP pembekuan pada daftar lokasi New Radio dapat bekerja. Pita frekuensi ini didesain dengan rentang frekuensi yang berbeda (FR) dan spesifikasi pada saat ini yang telah dirilis menerangkan mengenai rentang Frekuensi 1 dan Frekuensi 2. Tabel 2.2 menunjukkan frekuensi yang digunakan sesuai dengan setiap Frequency Range.

Tabel 2.2 Rentang Frekuensi pada FR 1 dan FR 2 [21].

Frequency Range Designation	Corresponding Frequency Range
FR 1 (Frequency Range 1)	410 MHz – 7125 MHz
FR 2 (Frequency Range 2)	24250 MHz – 52600 MHz

2.2.7 Modulasi Binary Phase Shift Keying (BPSK)

Modulasi ialah prosedur penumpangan sinyal data ke dalam sinyal pembawa yang mempunyai frekuensi lebih besar, sehingga tata cara ini sangat berguna dalam proses pengiriman data. Secara umum *Binary Phase Shift Keying*

ataupun biasa diartikan *bipolar modulation* merupakan metode modulasi digital dimana fasa dari sinyal carrier di ubah- ubah sesuai dengan 2 sinyal data yang mewakili biner 1 serta 0 dengan perbedaan sudut fase 180°. Salah satu kelebihan BPSK adalah menggunakan format yang sederhana serta cocok untuk transmisi dengan kecepatan tinggi.

Secara umum bentuk persamaan BPSK sebagai berikut :

$$S_n(t) = A \sin(2\pi f_c t + \pi(1-n)) ; n = 0,1, \dots, M-1$$

Keterangan :

A = Amplitudo (V)

f_c = Frekuensi carrier (Hz)

M= Jumlah sandi yang tersusun dari n bit. (BPSK, M=2)

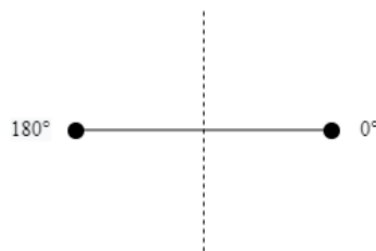
Dari persamaan (1), jika *input* biner adalah logika 1 maka persamaan BPSK yaitu:

$$S_1(t) = A \sin(2\pi f_c t + 0^\circ)$$

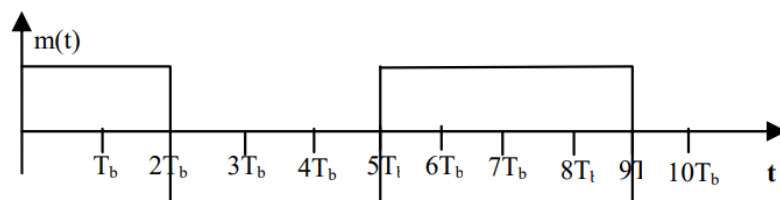
Jika input biner adalah logic 0, maka persamaan BPSK adalah

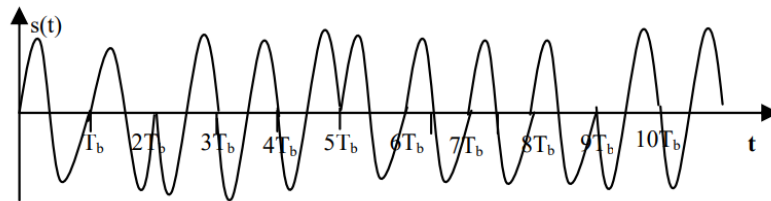
$$S_0(t) = A \sin(2\pi f_c t + 180^\circ)$$

Dari persamaan tersebut dapat dilihat bahwa sinyal termodulasi BPSK akan menghasilkan dua fasa yaitu 0° dan 180°.



Gambar 2.11 Diagram Konstelasi BPSK



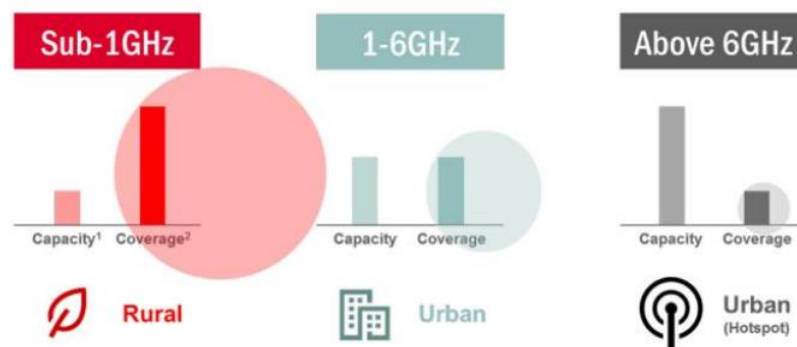


Gambar 2.12 Sinyal Informasi dan Sinyal Termodulasi

Pada kedua gambar diatas dapat diamati bahwa sinyal termodulasi berbeda fasa 180° pada saat terjadi transisi dari logika 1 ke 0 maupun sebaliknya pada sinyal informasi [22].

2.2.8 Klasifikasi Rentang Spektrum 5G

Seperti yang ditunjukkan Gambar 2.9, ada beragam aplikasi untuk teknologi 5G yang memudahkan kehidupan sehari-hari orang. Hal ini menyebabkan peningkatan permintaan untuk layanan 5G. Selain itu, ke depan akan semakin banyak spektrum yang tersedia untuk layanan penyelenggaraan sistem telekomunikasi seluler.



Gambar 2.13 Klasifikasi Kapasitas dan Cakupan Spektrum 5G

Teknologi 5G *New Radio* dibagi menjadi tiga bagian spektrum antara lain sebagai berikut [23]:

1. *Low bands* dengan frekuensi di bawah 1 GHz (*Rural Makro*). Karena jangkauan layanannya menjangkau daerah perkotaan, pinggiran kota, dan pedesaan, spektrum ini digunakan untuk mendukung penanganan cakupan, khususnya dalam implementasi layanan IoT (*Internet of Things*). Karena sifat perambatan sinyal pada frekuensi tersebut, 5G memungkinkan untuk

menembus sinyal hingga ke gedung dengan jangkauannya yang luas.

2. *Mid bands* menggunakan rentang frekuensi 1 sampai 6 GHz (*Urban Makro*). frekuensi ini mempunyai kapasitas dan *coverage* yang baik serta dapat digunakan pada layanan *enhanced Mobile Broadband* (eMBB) dan *mission-critical*.
3. *High bands* dengan frekuensi yang lebih tinggi dari 6 GHz (*Urban Micro*). Spektrum frekuensi Ini digunakan untuk menyediakan *throughput* layanan yang sangat besar dan memiliki rentang frekuensi 26-28 GHz. Karena kapasitasnya yang sangat besar, spektrum ini juga yang paling banyak digunakan oleh masyarakat internasional [23].

2.2.9 Regulasi Frekuensi 5G Di Indonesia

Kepdirjen SDPPI Nomor 235 Tahun 2018 Mengenai pentuan nilai Pita Frekuensi Radio yang digunakan pada Unjuk Coba Penggunaan Teknologi IMT-2020 diinfokan yaitu pita frekuensi radio yang bisa difungsikan pada unjuk coba pemakaian teknologi dari IMT-2020 yaitu sebagai berikut [24]:

1. Pita frekuensi radio 3,5 GHz (3,3 – 4,2 GHz).
2. Pita frekuensi radio 15 GHz (14,5 – 15,35 GHz).
3. Pita frekuensi radio 26 GHz (24,25 – 27,5 GHz).
4. Pita frekuensi radio 28 GHz (26,5 – 29,5 GHz).

Pita frekuensi ini dipilih atas berbagai pertimbangan, uji coba pita frekuensi global dan ketersediaan perangkat yang digunakan oleh operator seluler dalam melakukan uji coba yang hanya dapat dijalankan pada rentang pita frekuensi tertentu menjadi faktor utama dalam pemilihan pita tersebut. Operator seluler juga merekomendasikan penggunaan pita ini. Karena perhitungan interferensi diperlukan jika teknologi IMT-2020 hadir dan menggunakan pita dalam rentang tersebut, sebagian besar pita frekuensi ini sudah memiliki basis pengguna yang signifikan.

Jika penggunaan pita frekuensi layanan bersifat *co-channel*, perhitungan ini akan menentukan jarak aman antara BTS dan teknologi seluler dengan layanan operator, atau berapa *guard band* yang harus disediakan jika penggunaan pita

frekuensi layanan berdekatan. Perbandingan dua layanan dalam rentang pita yang sama, apakah *co-channel* atau berdekatan, diperlukan untuk perhitungan interferensi. Karena pita 26 GHz berada di lokasi di Indonesia yang belum ada penggunaannya, maka tidak melakukan perhitungan *deterministik*. Karena tidak ada sumber atau referensi mask spektral dalam rentang 28 GHz, *magnitudo guard band* tidak dapat dihitung. Akibatnya, hanya perhitungan *co-channel* yang akan dilakukan dalam rentang frekuensi ini [24].

2.2.10 Aplikasi Perangkat Lunak NYUSIM

Model kanal pada frekuensi 26 GHz dapat menggunakan *software* dengan nama NYUSIM melalui perbandingan skenario *microcell* pedesaan (RMa), *macrocell* perkotaan (Uma), *microcell* perkotaan (UMi) pada saat kondisi *line of sight* (LOS) dan *non-light of sight* (NLOS) dalam kondisi suhu, kelembapan, curah hujan dan tekanan udara disuatu daerah. NYUSIM merupakan simulator kanal sistem GUI berbasis MATLAB *open source* yang dikembangkan oleh NYU *Wireless* yang diteliti selama kurang lebih 5 tahun pada data akurat yang dikonversi pada tampilan 3D ruang dimensi *elevasi*, 3D statistik spasial pemodelan kanal melalui komponen dengan sistem LOS. Dalam *Omni directional Channel Impulse Responses* (CIR), NYUSIM menggambarkan perilaku *multipath* dengan memanfaatkan konsep *time clusters* (TC) dan *spatial lobe* (SL). TC terdiri dari komponen *multipath* yang berjalan berdekatan satu sama lain dalam waktu dan tiba dari kemungkinan arah yang berbeda dalam jendela waktu propagasi singkat. Selama beberapa ratus nano detik, SLS menunjukkan arah utama keberangkatan (atau kedatangan) di mana energi tiba. NYUSIM memiliki beberapa kelebihan antaralain [25] :

1. Memiliki 3 skenario dari frekuensi 2 sampai 73 Ghz yaitu *microcell* pedesaan (RMa), *macrocell* perkotaan (Uma), *microcell* perkotaan (UMi)
2. Memiliki gambar 3D yang lebih terlihat realistik dan akurat jika dibandingkan dengan aplikasi lain.
3. Frekuensi masukan dari 500 MHz hingga 100 GHz, dengan *bandwidth* yang dimiliki sampai 800 MHz.

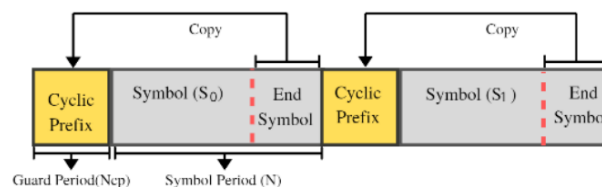
4. Telah diunduh 7000 lebih oleh peneliti yang ada di dunia.
5. Aplikasi yang berbasis opensource yang bisa mengupgrade perkembangan dari NYUSIM [25].

2.2.11 Kanal *Statistical Spatial Channel Model* (SSCM)

Kanal SSCM merupakan salah satu tipe kanal *broadband* yang dikembangkan oleh New York University (NYU) serta diimplementasikan dalam simulator NYUSIM. Dalam pelaksanaannya, *Statistical Spatial Channel Model* (SSCM) memakai informasi dari simulasi yang parameter kanal serta probabilitasnya dimodelkan secara statistik. Parameter statistik yang diartikan bisa menampilkan keadaan kanal yang sesungguhnya. Kanal SSCM terbuat lewat bermacam pengukuran dengan skenario yang di idamkan. Ada pula sebagian channel parameters masukan buat membangkitkan kanal SSCM semacam, radius sel, frekuensi, parameter area(temperatur, kelembaban hawa, tekanan hawa serta curah hujan), serta lainnya [7]. Riset ini memakai kanal SSCM buat memodelkan sistem 5G di Jawa Tengah, dimana ciri kanal SSCM nantinya akan direpresentasikan dalam *power delay profile* (PDP).

2.2.12 *Cyclic Prefix* (CP)

Sebagai interval penjaga, OFDM menetapkan awalan siklik untuk setiap data yang dikirim. Pengulangan sampel akhir yang ditambahkan di depan simbol disebut *cyclic prefix* (CP). Jika durasi CP lebih besar dari *delay spread*, atau dengan kata lain, jika sistem bebas *intersymbol interference* (ISI), usahakan agar panjang CP sama dengan atau lebih besar dari jumlah lintasan dalam *power delay profile* (PDP).



Gambar 2.14 *Cyclic Prefix* pada OFDM

Berdasarkan Gambar 2.13 cyclic prefix berada pada posisi depan di saat transmisi sinyal OFDM serta pada saat tiba ke penerima, ketika *cyclic prefix* akan

disingkirkan dan dihapus. Untuk bagian penerima *cyclic prefix* tersebut dibuang sebelum proses demodulasi dengan FFT. *Cyclic prefix* berfungsi melakukan pengecekan semua simbol pada OFDM terkirim secara utuh pada *interval Fast Fourier Transform (FFT)* dengan *delay* yang sama sehingga ortogonalitas sinyal OFDM tetap terjaga [5].

Cyclic prefix berperan selaku *guard interval* pada OFDM. Ortogonalitas dari OFDM bisa berganti kala melewati kanal dispertif waktu. *Cyclic prefix (CP)* bisa menolong melindungi ke-ortogonalitasan dari sinyal OFDM tersebut. Pada awal mulanya saat sebelum terdapat *cyclic prefix*, jarak antara *sub-carrier* diisi dengan *guard interval*. Dalam implementasinya nyatanya antara sub- carrier yang berisikan *guard interval* tersebut memunculkan *Inter Symbol Interference (ISI)* dikarenakan *crosstalk* antara *sub-carrier* yang menyebabkan hilangnya ortogonalitas dari sinyal OFDM *cyclic prefix* ialah bagian yang tidak bawa data karena *cyclic prefix* cuma berfungsi selaku pelindung data supaya data yang hingga ke penerima lengkap. *cyclic prefix* mempunyai 3 kegunaan ialah [26]:

1. Guna menjauhi *Inter Symbol Interference (ISI)* sehingga kinerja sistem jadi lebih baik. Perihal tersebut bisa dipastikan dengan ketentuan panjang *cyclic prefix* ialah sama ataupun lebih dari jumlah path pada PDP.
2. Selaku *guard interval* supaya *Inter Symbol Interference (ISI)* bisa dihapus dari simbol secara totalitas.
3. Menduplikat simbol akhir. CP diperoleh dari menyalin bagian akhir dari tiap simbol serta setelah itu hendak diletakkan pada bagian dini simbol serta pada saat hingga di *receiver* CP tersebut hendak dibuang ataupun dihilangkan karna tidak tercantum kedalam data.

2.2.13 Power Delay Profile

Hasil yang diperoleh dari NYUSIM *Wireless Simulator Software* adalah PDP *instantaneous*. Model saluran sampel yang dikenal sebagai PDP instan diterima oleh penerima pada jarak yang telah ditentukan dari pemancar. *Representative* PDP merupakan hasil kalkulasi selepas memperoleh *instantaneous* PDP dari efek cuaca, kondisi alam serta efek human blockage dari channel model [21].

2.2.14 Path loss

Pathloss adalah penurunan kekuatan yang diterima sinyal elektromagnetik saat mereka melakukan perjalanan melalui ruang angkasa. Pembiasan, difraksi, pemantulan, penggandengan dan kehilangan kabel, dan penyerapan semuanya berkontribusi pada kehilangan jalur. Lingkungan, jenis perambatan, jarak antara pemancar dan penerima, ketinggian antena, dan lokasi semuanya berdampak pada kehilangan jalur. Sinyal yang diterima tunduk pada interferensi yang bersifat konstruktif atau destruktif gelombang dan dapat mengambil beberapa jalur (multipath) untuk mencapai sisi penerima. Ini dapat mengakibatkan peningkatan atau penurunan level [25].

2.2.15 Resource Blok

Dalam 5G, One NR *Resource Block* (RB) berisi 12 *sub-carrier* dalam domain frekuensi yang mirip dengan LTE. Dalam *bandwidth* blok sumber daya LTE ditetapkan hingga 180 KHz tetapi dalam NR tidak tetap dan bergantung pada jarak *sub-carrier*. Untuk menentukan konfigurasi *bandwidth* transmisi maksimum untuk setiap saluran UE *channel* dan *sub-carrier spacing* yang disediakan dalam tabel di bawah ini. Nomor *resource block* yang ditampilkan adalah setelah menghapus *guard band* dari *channel bandwidth* dan *bandwidth* maksimum yang dipertimbangkan adalah 100 MHz yang ada pada tabel 2.3 dibawah ini [27].

Tabel 2.3 Konfigurasi *bandwidth* transmisi maksimum dan *sub-carrier spacing*

μ	SCS KHz	Supported Bandwidth	Min. Guard Band	Max Number of RB N_{RB}
0	15 KHz	50 MHz	692,5 KHz	270
1	30 KHz	100 MHz	845 KHz	273
2	60 KHz	100 MHz	1370 KHz	135