

## BAB 2

### DASAR TEORI

#### 2.1 KAJIAN PUSTAKA

Penelitian [8] menganalisis kandidat pita frekuensi teknologi 5G *New Radio* (NR) untuk diterapkan di Indonesia berdasarkan kondisi alokasi spektrum frekuensi. Berdasarkan kandidat pita 5G NR yang terbagi menjadi tiga tingkatan, yaitu frekuensi rendah pada *band* 700 MHz, menengah pada *band* 3,3 GHz-4,2 GHz, dan tinggi pada *band* 24,25 GHz-29,5 GHz. Frekuensi yang paling sesuai diterapkan di Indonesia yaitu pita frekuensi menengah dengan *band* 3,3 GHz-4,2 GHz yang berguna memenuhi kapasitas dan cakupan yang tinggi untuk tiga *skenario* penggunaan dari sistem 5G. Sedangkan untuk memenuhi tuntutan *data rate* yang tinggi untuk eMBB yang merupakan *mobile cellular* sebagai pasar yang berharga di Indonesia, pita frekuensi tinggi pada *band* 24,25 GHz-29,5 GHz yang paling sesuai untuk penyebaran awal.

Penelitian [9] menganalisis cakupan frekuensi 3,5 GHz melalui uji coba skala penuh dengan *testbed* NR. Dengan memanfaatkan teknologi *beamforming*, kerugian propagasi yang meningkat pada frekuensi 3,5 GHz dibandingkan dengan 2,1 GHz dapat ditoleransi, sehingga cakupan yang setara dengan cakupan LTE *fixed antenna* 2,1 GHz tercapai, baik diluar maupun didalam ruangan. Penggunaan *massive* MIMO pada frekuensi 3,5 GHz juga menunjukkan *coverage* yang sangat baik. Hasil uji coba menunjukkan *throughput downlink* sebesar 700 Mbps pada lebar *carrier* 80 MHz, dengan jangkauan mencapai 700 m untuk kondisi *Line of sight* (LOS). Dalam lingkungan *cell micro* yang padat di perkotaan, dapat menyediakan layanan hingga 200 Mbps dalam *Non-Line of sight* (NLOS) dalam jangkauan sel yang diinginkan.

Penelitian [5] menganalisis perencanaan cakupan pada frekuensi *mmWave* 28 GHz di kawasan industri Pulogadung. Terdapat 8 Skenario yang digunakan untuk menguji kondisi *uplink* dan *downlink* mencakup *outdoor-to-outdoor* (O2O) dan *outdoor-to-indoor* (O2I) serta *Line of sight* (LOS) dan *Non-Line of sight* (NLOS). Berdasarkan pengamatan parameter (SS-RSRP), skenario 1 (*uplink-O2OLOS*) menunjukkan nilai rata-rata SS-RSRP yang lebih rendah yaitu -99,54

dBm. Sementara skenario 8 (*downlink*-O2O -LOS) menghasilkan nilai rata-rata SS-RSRP yang lebih tinggi yaitu -74,45 dBm. Perbedaan tersebut dikarenakan oleh jumlah *site* yang lebih banyak dalam skenario 2 untuk mencakup area yang telah direncanakan.

Penelitian [10] menganalisis perbandingan perencanaan jaringan pada *mid-band* pada 2,6 GHz dan pada *high-band* 26 GHz. Perencanaan dilakukan berdasarkan *coverage area* di kawasan industri Jababeka menggunakan *software* Mentum Planet versi 7.3 dengan memanfaatkan model propagasi *Urban Macro* (UMa) dan *Urban micro* (UMi) dalam skenario *downlink Outdoor-to-outdoor* (O2O) dengan *Line of sight* (LOS) dan *Non-Line of sight* (NLOS). Parameter yang diukur meliputi SS-RSRP, SS-SINR, dan *data rate*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa skenario 1 (*downlink*-O2O-LOS) menghasilkan jaringan yang lebih optimal dibandingkan skenario 2 (*downlink*-O2O-NLOS). Skenario NLOS memerlukan jumlah *gNodeB* yang lebih tinggi daripada skenario LOS karena terdapat masalah antara *gNodeB* dan terminal pengguna dalam skenario NLOS.

Penelitian [11] menganalisis perencanaan jaringan 5G NR *Standalone* (SA) dengan frekuensi 3,5 GHz di kawasan industri Pulogadung menggunakan *software* Mentum Planet versi 7.2.1 dengan model propagasi *Urban Macro* (Uma). Dua skenario yang dipertimbangkan adalah DL O2O LOS dan UL O2O LOS. Penelitian ini membahas jumlah *site* yang dibutuhkan dengan mempertimbangkan parameter SS-RSRP dan menghasilkan 8 *site* untuk *downlink*, sementara skenario *uplink* memerlukan 5 *site*. Rata-rata nilai SS-RSRP dipengaruhi oleh jumlah lokasi yang mencakup wilayah perencanaan dan skenario *downlink*-O2O-LOS memiliki parameter tertinggi dengan hasil -92,95 dBm.

Penelitian [12] menganalisis perencanaan jaringan 5G NR berdasarkan *coverage* pada frekuensi 26 GHz di Kawasan industri Karawang. Skenario yang digunakan yaitu kondisi *downlink* dengan kondisi O2O; LOS; NLOS dengan menggunakan model propagasi *Urban micro* (Umi) dengan *software* Planet versi 7.3.0. parameter yang dihitung yaitu *data rate*, SS-RSRP dan SS-SINR. Hasil dari perencanaan tersebut memiliki performansi jaringan yang baik dan normal dengan memperhatikan parameter SS-RSRP dan SS-SINR. Namun dari segi parameter

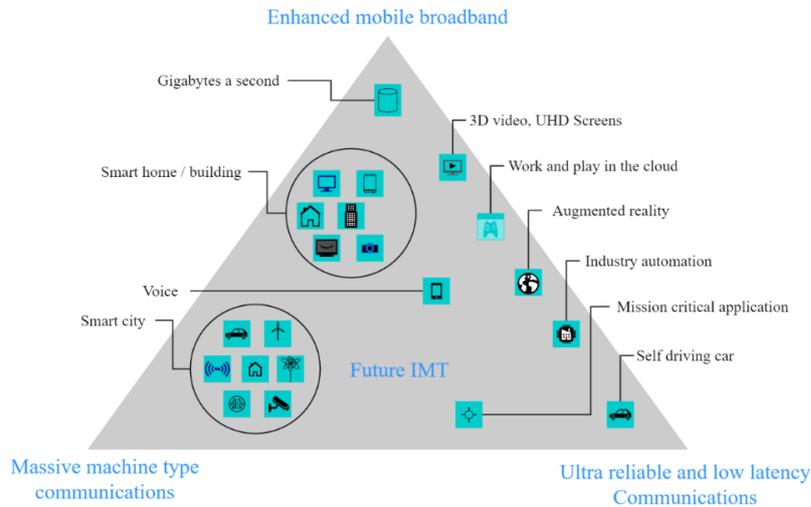
*data rate* kinerjanya kurang baik dengan hasil 51,05 Mbps dengan *skenario downlink-O2O NLOS*.

Penelitian [13] menganalisis perencanaan berdasarkan *coverage* dan *capacity* di kota Bandung. Perencanaan berdasarkan *capacity* menentukan proyeksi pengguna, proyeksi permintaan lalu lintas, dan kecepatan data untuk menentukan *gNodeB*. Sedangkan *coverage planning* menggunakan skenario *uplink* dan *downlink* dari O2O-LOS berdasarkan modal propagasi *Urban Macro* (Uma). Hasil penelitian menunjukkan bahwa berdasarkan perencanaan *capacity* diperlukan 130 *gNodeB* untuk *uplink* dan 69 *gNodeB* untuk *downlink*. Sementara itu, untuk perencanaan *coverage*, memerlukan 61 *gNodeB* untuk *uplink* dan 97 *gNodeB* untuk *downlink*. Berdasarkan hasil tersebut, total jumlah *gNodeB* yang dibutuhkan di kota Bandung adalah 130 *gNodeB* dengan kecepatan data maksimum untuk *uplink* 1,875 Gbps dan *downlink* sebesar 3,506 Gbps.

## **2.2 DASAR TEORI**

### **2.2.1 5G New Radio (NR)**

Teknologi 5G merupakan generasi kelima dari jaringan seluler, dimana menjadi standar nirkabel setelah jaringan 1G, 2G, 3G, dan 4G. 5G membawa kemampuan untuk menghubungkan berbagai jenis perangkat, mesin, dan objek secara bersamaan. Keunggulan utama 5G dibandingkan teknologi sebelumnya adalah kemampuan untuk mentransmisikan data dengan kecepatan sangat tinggi, bahkan mencapai 20 kali lebih cepat daripada 4G, yaitu hingga 20 Gbps berdasarkan standar IMT-2020. Selain itu, 5G dirancang untuk menyediakan jaringan berkapasitas tinggi dengan memperluas penggunaan frekuensi baru seperti *mmWave*. Dengan penggunaan teknologi *mmWave*, 5G mampu memberikan kecepatan dan kapasitas data yang lebih tinggi. Salah satu keunggulan lain dari 5G adalah latensinya yang jauh lebih rendah, yang berarti waktu responnya lebih cepat. Bahkan ketika pengguna berpindah-pindah, 5G tetap dapat menjaga kecepatan data yang tinggi dan memberikan pengalaman berkomunikasi yang lancar dan responsif [14].



**Gambar 2.1 5G Skenario Penggunaan *International Mobile Telecommunications (IMT) 2020 dan Seterusnya [15].***

Pengembangan evolusi teknologi LTE telah mencakup spesifikasi baru yang akan mendefinisikan teknologi 5G. Setiap penyedia layanan telekomunikasi sedang mempersiapkan *Mobile Broadband Service (MBB)* yang akan berbasis pada konektivitas IP. Dalam skenario pada Gambar 2.1, teknologi 5G akan menjadi bagian integral dari *International Mobile Telecommunications (IMT)* untuk tahun 2020 dan seterusnya, dan akan memiliki dukungan untuk berbagai jenis penggunaan [16]:

a. *Enhanced Mobile BroadBand (eMBB)*

eMBB adalah kelanjutan dari perkembangan jaringan seluler berbasis teknologi LTE. Dengan teknologi 5G, *throughput* jaringan didorong lebih tinggi dan jumlah pengguna meningkat dengan target *throughput* sebesar 20 Gbps dalam saluran *downlink*. Oleh karena itu, untuk mencapai target tersebut, diperlukan pemanfaatan 5G dengan membentuk saluran hingga 1 GHz guna memenuhi kebutuhan *throughput* yang diinginkan.

b. *Massive Machine-type Communication (mMTC)*

mMTC merupakan jenis perangkat yang memiliki konsumsi energi yang sangat rendah dan mengirimkan jumlah data yang relatif kecil. *User Equipment (UE)* pada jenis perangkat ini berfungsi untuk melakukan komunikasi antar mesin dan memiliki mobilitas dalam berkomunikasi dengan perangkat yang dikendalikan oleh manusia. Komunikasi *Machine-to-Machine (M2M)* secara nirkabel, terutama dalam bidang perkembangan *Internet of Things (IoT)*

menjadi sangat relevan. M2M memanfaatkan berbagai protokol, teknologi, dan standar nirkabel seperti *Bluetooth*, 2G, 3G, 802.15.4, dan sebagainya yang dapat disesuaikan dengan lingkungan perangkat yang digunakan.

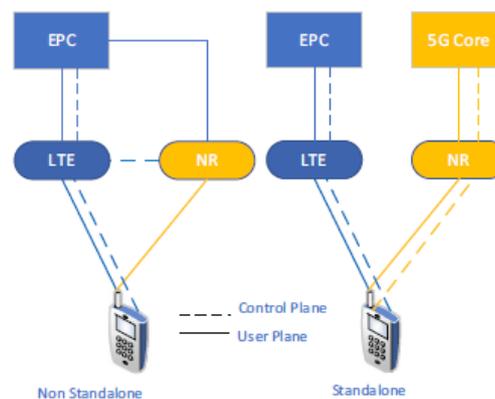
c. *Ultra-Reliable and Low Latency Communication (URLLC)*

URLLC menggunakan komunikasi mesin ke mesin yang berbeda pada mMTC. Latensi yang digunakan rendah kurang dari 1 ms dalam satu arah. Penggunaan ini digunakan dalam otomatisasi pabrik, keselamatan lalu lintas, *vehicle to everything (V2X)*, kontrol robot dan pengobatan jarak jauh. Selain itu, 5G harus lebih kuat pada pemrosesan data di *gNodeB* dan UE ketika memproses data jarak jauh dan dekat.

### 2.2.2 Arsitektur Jaringan 5G

Jaringan 5G NR diperkenalkan ke dalam dua model skenario, yaitu *non-standalone* (NSA) dan *standalone* (SA). Skenario dalam NSA adalah kombinasi sel radio NR dan sel radio *Long-Term Evolution (LTE)* menggunakan konektivitas ganda untuk menyediakan akses radio dan jaringan inti baik dari inti paket (EPC) atau inti 5G (5GC) yang berevolusi. Dalam skenario SA, hanya teknologi akses radio 5G NR atau LTE yang dikembangkan dan jaringan inti tunggal yang dioperasikan [17].

Gambar 2.2 opsi *3-core* NSA menggunakan EPC pada LTE dan penambahan eNodeB (gNB) generasi kelima pada *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)* sehingga baru diperlukan fitur yang dapat mendukung konektivitas ganda. Sedangkan pada gambar *Standalone* keseluruhan arsitektur didukung oleh NR menggunakan inti generasi kelima (5GC) [18].



**Gambar 2.2 Arsitektur Jaringan *Standalone* dan *Non standalone* [19].**

Penyebaran pertama jaringan 5G diharapkan di bawah operasi *Non-Standalone* (NSA), menurut spesifikasi 3GPP Rilis 15 bahwa jaringan 5G akan menggunakan kembali infrastruktur 4G yang ada. Artinya perangkat berkemampuan 5G akan terhubung ke sel NR untuk data bidang pengguna tetapi masih akan menggunakan 4G untuk prosedur terkait bidang kontrol. Prinsip mode operasional NSA dan *Standalone* (SA) ditunjukkan pada Gambar 2.2 [19].

### 2.2.3 5G Spectrum Frequency

5G NR diharapkan dapat mengambil peran perubahan mendasar dalam peran penting teknologi telekomunikasi dalam kehidupan masyarakat. Dari segi spektrum yang dimaksudkan untuk implementasi 5G NR, dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori seperti pada Gambar 2.3 [18]:

- a. Sub-1 GHz: rentang frekuensi ini cocok untuk mendukung implementasi layanan *Internet of Things* (IoT) dan memperluas cakupan komunikasi *mobile broadband* dari perkotaan ke pinggiran kota dan pedesaan. Hal ini disebabkan oleh karakteristik propagasi frekuensi dibawah 1 GHz yang memungkinkan 5G NR memiliki cakupan yang baik dan kemampuan penetrasi sinyal di dalam gedung-gedung.
- b. 1 - 6 GHz: dalam rentang frekuensi ini dapat diimplementasikan sebagai kombinasi cakupan dan kapasitas untuk layanan 5G NR. Rentang frekuensi ini telah diimplementasikan dalam komunikasi *mobile broadband* yang dapat digunakan sebagai inisiasi 5G NR.
- c. Di atas 6 GHz: pita spektrum di atas 6 GHz menyediakan kapasitas besar karena memiliki lebar *bandwidth* yang dapat dialokasikan untuk komunikasi seluler dan berbagai skenario aplikasi eMBB. Penggunaan frekuensi tinggi dapat disebut sebagai gelombang *millimeter Wave* (*mmWave*) dimana cakupan area akan berkurang (sekitar 200 meter) karena redaman yang kuat karena kepekaan terhadap kondisi alam.



**Gambar 2.3 Kategori *Spectrum Frequency* 5G NR [18].**

Berdasarkan spesifikasi NR dari 3GPP, telah ditetapkan pita frekuensi yang mencakup daftar pita dimana 5G NR dapat beroperasi. Spesifikasi ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu FR1 dan FR2 dan daftar pita frekuensinya ditunjukkan pada Tabel 2.1 [20].

**Tabel 2.1 Spesifikasi *Frequency Ranges* 5G NR [20].**

<i>Band</i>	<i>Frequency</i>	<i>Type</i>
FR1	450 to 6000 MHz	Sub 6 GHz
FR2	24250 to 52600 MHz	<i>mmWave</i>

*Numerology* merupakan penyederhanaan hubungan antara saluran dan frekuensi pembawa dalam pita spektral yang berbeda. Setelah menentukan frekuensi yang akan digunakan dalam desain, langkah selanjutnya menentukan nilai parameter untuk *numerology* dan *Subscriber Spacing* (SCS). Hubungan *numerology*, *bandwidth* dan *Subscriber Spacing* ditunjukkan pada Tabel 2.2 dan Tabel 2.3 [13].

**Tabel 2. 2 Jumlah *Resource Block* untuk *Low* dan *Middle Frequency Band* [21] [22].**

$\mu$ ( <i>numerologi</i> )	0	1	2
SCS	15	30	60
<i>Bandwidth</i>	(KHz)	(KHz)	(KHz)
5 (MHz)	25	11	N/A
10 (MHz)	52	24	11
15 (MHz)	79	38	18
20 (MHz)	106	51	24

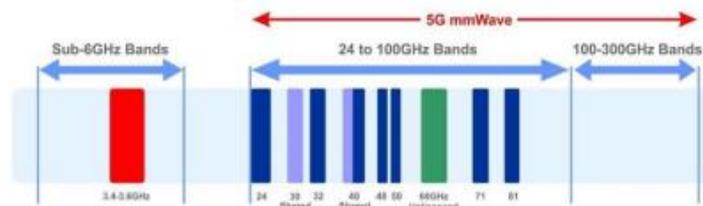
$\mu$ (numerologi)	0	1	2
SCS	15	30	60
Bandwidth	(KHz)	(KHz)	(KHz)
25 (MHz)	133	65	31
30 (MHz)	160	78	38
40 (MHz)	216	106	51
50 (MHz)	270	133	65
60 (MHz)	N/A	162	79
70 (MHz)	N/A	189	93
80 (MHz)	N/A	217	107
90 (MHz)	N/A	245	121
100 (MHz)	N/A	273	135

Tabel 2. 3 Jumlah *Resource block* untuk *High Frequency Band* [22].

$\mu$ (numerologi)	2	3
SCS	60	120
Bandwidth	(KHz)	(KHz)
50 (MHz)	66	32
100 (MHz)	132	66
200 (MHz)	264	132
400 (MHz)	N/A	264

#### 2.2.4 millimeter Wave (mmWave)

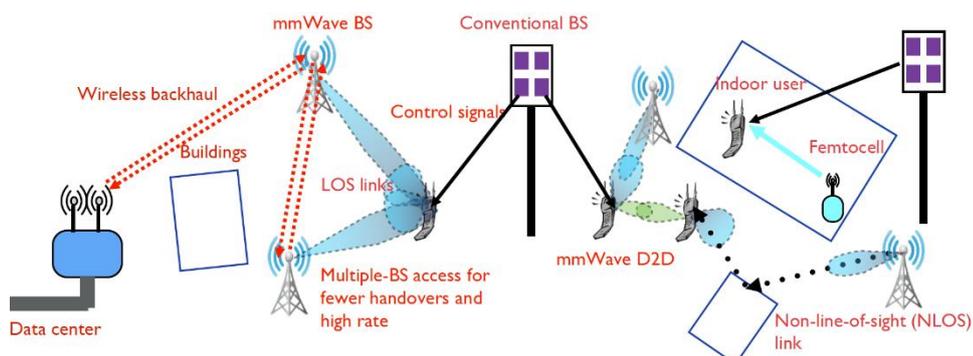
Penelitian 5G *mmWave* diharapkan dapat memenuhi kebutuhan yang ditetapkan oleh IMT 2020, untuk diintegrasikan kedalam sistem seluler 5G pada tahun 2020. Visi utama 5G *mmWave* adalah untuk memungkinkan konektivitas yang lancar untuk perangkat *Internet of Things* (IoT) dan *Big-Data*, menciptakan platform bagi jutaan pengguna dengan koneksi otomatis. Sistem komunikasi 5G *mmWave* menawarkan opsi latensi yang bervariasi dan melayani aplikasi berkecepatan tinggi dengan persyaratan khusus.



**Gambar 2.4 Spektrum frekuensi [23].**

*mmWave* termasuk dalam kategori *Extremely High Frequency* (EHF) atau *Very High Frequency* (VHF). Penggunaan *mmWave* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 digunakan untuk menerapkan teknologi dengan *data rate* yang tinggi, mencapai kecepatan hingga 10Gbps. Untuk memenuhi harapan teknologi 5G, teknologi *mmWave* diharapkan dapat memberikan kecepatan data puncak hingga 20Gbps untuk *downlink* dan 10 Gbps untuk *uplink*, dengan latensi sekecil 1ms untuk *Ultra Reliable Low Latency Communication* (URLLC). Panjang gelombang *mmWave* berkisar dari 1 mm hingga 10 mm.

*International Telecommunication Union* (ITU) telah merilis daftar frekuensi global yang disarankan dan layak mulai dari 24 GHz hingga 86 GHz, berdasarkan hasil *World Radio Communication Conference* (WRC). Alasan penggunaan *mmWave* terletak pada kapasitasnya untuk mengalokasikan frekuensi *bandwidth* yang signifikan, yang secara langsung berdampak pada kecepatan data selama transmisi data. Tantangan menggunakan *mmWave* untuk *mobile* yang memiliki isu sensitifitas terhadap halangan, sehingga propagasi menggunakan kondisi *Line-of-Sight* yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.



**Gambar 2.5 Pemanfaatan Gelombang *mmWave* [23].**

Kelebihan dari *mmWave* sebagai berikut:

1. Ukuran dari antena yang digunakan semakin kecil dan *bandwidth* yang lebih tinggi.

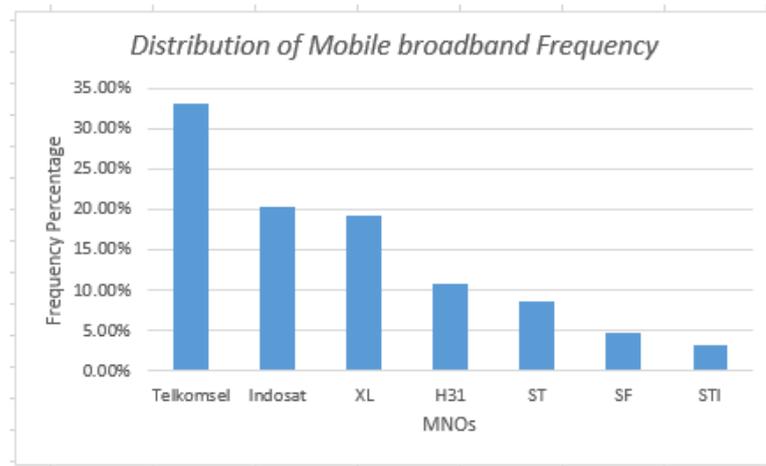
2. Kondisi yang menguntungkan untuk pengembangan *Small cell*.
3. *mmWave* di 5G memiliki dukungan jaringan backhaul *multi-gigabit* dengan jarak sekitar 400 meter dan jarak akses seluler hingga 200 - 300 meter.

Kekurangan *mmWave*:

1. Area cakupan yang sempit
2. Hanya mendukung propagasi *Line-of-Sight*.
3. Tantangan menggunakan *mmWave*

### 2.2.5 Frekuensi Jaringan 5G di Indonesia

PT Telkomsel, PT XL Axiata (XL), PT Indosat, PT Hutchison 3 Indonesia (H3I), PT Smartfren (SF), PT Smart Telecom (ST), dan PT Sampoerna Telekomunikasi Indonesia (STI) adalah beberapa *Mobile Network Operators* (MNOs) berlisensi di Indonesia. Distribusi frekuensi *mobile broadband* di Indonesia digambarkan pada Gambar 2.6. Oleh karena itu, perlu adanya pendekatan baru dengan menggabungkan berbagai pita frekuensi 2600 MHz (*highband*) dan 3500 MHz (*midband*) dan 26 GHz dan 28 GHz (*mmWave*).



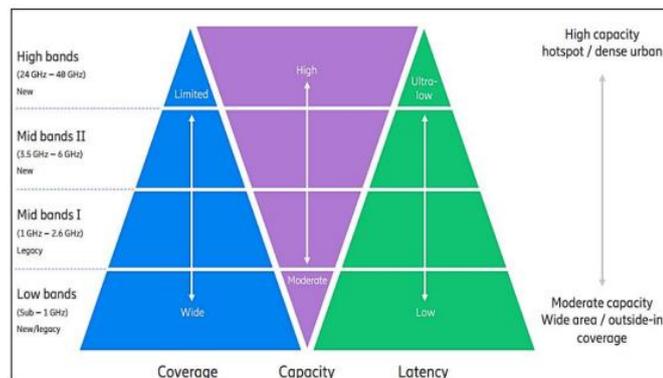
**Gambar 2.6 Alokasi Frekuensi *Mobile Broadband* di Indonesia [24].**

*Indonesian Telecommunication Regulations* menentukan kandidat frekuensi yang digunakan untuk IMT-2020 atau 5G. Tabel 2.4 menunjukkan kandidat pita frekuensi 5G di Indonesia. Beberapa faktor pemilihan pita frekuensi yaitu ekosistem pengujian pita frekuensi di seluruh dunia dan ketersediaan peralatan yang digunakan oleh *Mobile Network Operators* (MNOs) [24].

**Tabel 2.4 Kandidat Pita Frekuensi 5G di Indonesia [24].**

<i>NR Operating Band</i>	<i>Frequency Band (MHz)</i>	<i>Potential Bandwidth (MHz)</i>
n28	700	90
n40	2300	90
n41	2600	190
n77	3300	100
n78	3500	200
n258	26000	2750
n257	28000	2500

Rentang frekuensi antara 1 GHz hingga 6 GHz atau pita frekuensi menengah terdapat kandidat alternatif selain frekuensi 2,3 - 2,4 GHz, seperti frekuensi 3,3-4,2 GHz. Sebagaimana yang tercantum dalam Peraturan Menteri Komunikasi dan Informatika Nomor 25 Tahun 2014. Frekuensi 3,5 GHz sangat cocok untuk kinerja trafik data yang tinggi di daerah perkotaan. Namun, peraturan saat ini dalam ITU regional 3, termasuk Indonesia, juga mengalokasikan frekuensi 3,5 GHz untuk komunikasi satelit. Oleh karena itu, diperlukan peraturan baru untuk pengaturan spektrum frekuensi yang akan digunakan untuk implementasi 5G.



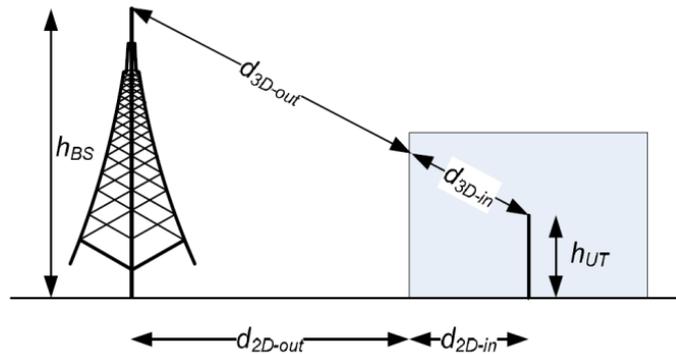
**Gambar 2.7 Spektrum Frekuensi 5G [25].**

Penggunaan spektrum frekuensi seperti yang tergambar dalam Gambar 2.7, yang berada di atas 6 GHz, merupakan gelombang *millimeter Wave* atau *mmWave* dengan rentang frekuensi antara 30 GHz hingga 300 GHz. Gelombang ini diharapkan dapat mendukung kinerja jaringan akses untuk mencapai tingkat *data rate* pada orde Gigabit per detik (Gbps). Namun, tantangan utama pada gelombang *mmWave* adalah kerentanannya terhadap *Path loss*, lintasan *non-Line-of-Sight*,

serta *noise*, karena menggunakan frekuensi *carrier* yang tinggi dan lebar *bandwidth*. Selain itu, faktor cuaca juga menjadi salah satu pertimbangan penting dalam merancang model propagasi untuk gelombang *mmWave* pada daerah tropis seperti Indonesia [25].

### 2.2.6 Path loss

*Path loss* adalah redaman atau penurunan daya yang terjadi selama pengiriman informasi melalui gelombang radio dari pemancar (*transmitter*) ke penerima (*receiver*). Fenomena ini merupakan kombinasi dari redaman yang terjadi di ruang bebas dan redaman akibat fading dari objek-objek di sekitarnya. Besarnya redaman *path* dipengaruhi oleh frekuensi dan jarak transmisi. Dalam pengiriman gelombang radio dalam suatu jaringan, tinggi antena pemancar ( $h_{BS}$ ) dan antena penerima ( $h_{UT}$ ) juga berperan penting dalam mempengaruhi *path loss*. Selain itu, propagasi gelombang radio dapat terjadi dalam dua kondisi, yaitu kondisi *Line of sight* (LOS) dan kondisi *Non-Line of sight* (NLOS) [26].



**Gambar 2.8 Definisi  $d_{2D}$ -  $d_{3D}$  untuk penggunaan *Outdoor* dan *Indoor* [21].**

Nilai dari  $d_{3D}$  dan  $d_{2D}$  sebagai *cell radius* dari rumus *pythagoras* sesuai pada Gambar 2.8 menggunakan Persamaan 2.1 dan Persamaan 2.2.

$$d_{3D-out} + d_{3D-in} = \sqrt{(d_{2D-out} + d_{3D-in})^2 - (h_{BS} - h_{UT})^2} \quad (2.1)$$

Keterangan:

$d_{3D}$  = sisi miring antara antena pemancar dengan *user*

$h_{UT}$  = tinggi *user*

$h_{BS}$  = tinggi antena

$$d_{2D} = \sqrt{(d_{3D})^2 - (h_{BS} - h_{UT})^2} \quad (2.2)$$

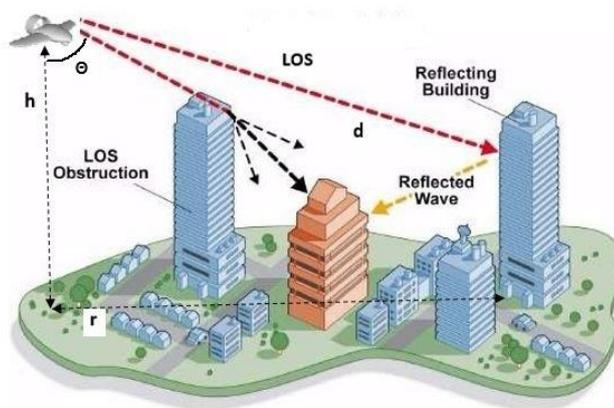
Keterangan:

- $d_{2D}$  = cell radius
- $d_{3D}$  = sisi miring antara antenna pemancar dengan user
- $h_{UT}$  = tinggi user
- $h_{BS}$  = tinggi antenna

### 2.2.7 Line of sight (LOS) dan Non-Line of sight (NLOS)

Banyak jenis transmisi radio bergantung pada LOS antara pemancar dan penerima. Dalam lingkungan LOS, *cluster* pertama dari komponen *multipath* terkadang tidak menempatkan komponen *multipath* terkuat sebagai komponen pertama yang akan datang. Sementara pantulan yang kuat dapat menyebabkan komponen *multipath* yang datang kemudian menjadi lebih kuat daripada komponen *multipath* yang datang pertama, secara umum ditemukan di lapangan bahwa komponen *multipath* pertama yang datang akan selalu paling kuat untuk kondisi LOS seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9.

Kondisi NLOS sambungan nirkabel hanya dapat dibuat jika jalur reflektif ada antara pemancar (*Base Station*) dan penerima (*subcarrier station*). Hambatan umum yang menyebabkan kondisi NLOS meliputi bangunan tinggi, pepohonan, perbukitan, pegunungan, dan jalur listrik dengan tegangan tinggi. Sebagian dari hambatan ini memantulkan frekuensi radio tertentu, sementara beberapa hanya menyerap sinyal. Namun, kasus tersebut mengakibatkan untuk membatasi penggunaan banyak jenis transmisi radio, khususnya jika anggaran daya rendah. Tingkat daya rendah pada *receiver* mengurangi peluang keberhasilan penerimaan transmisi [27].



**Gambar 2.9** Contoh LOS dan NLOS [28].

## 2.2.8 Model Propagasi 3GPP ETSI TR 138 900

### 2.2.8.1 Model Propagasi 3D- *Rural Macrocell* (RMa)

Model *pathloss* RMa sering digunakan untuk *transmitter* (Tx) dengan ketinggian di atas 35 meter untuk memprediksi probabilitas kekuatan sinyal yang diterima (*received signal*) di daerah *rural* atau pedesaan. Model *pathloss* ini dapat dikembangkan baik untuk sinyal *narrowband* ataupun *wideband*, karena rata rata yang diterima di area lokal (dalam waktu atau ruang) berasal dari seluruh *bandwidth* [29]. Model propagasi untuk kasus *Line of sight* (LOS) ditunjukkan pada Persamaan 2.3 dan 2.4 [21].

$$PL_1 = 20 \log_{10} \left( \frac{40\pi d_{3D} f_c}{3} \right) + \min(0.03h^{1.72}, 10) \log_{10}(d_{3D}) - \min(0.044h^{1.72}, 14.77) + 0.002 \log_{10}(h) d_{3d} \quad (2.3)$$

$$PL_2 = PL_1(d_{BP}) + 40 \log_{10} \left( \frac{d_{3D}}{d_{BP}} \right) \quad (2.4)$$

Keterangan:

$PL_{1\&2}$  = nilai *pathloss* (dBm)

$d_{3D}$  = resultan dari jarak antara hBS dan hUT (m)

$d'_{BP}$  = jarak *break point* (m)

$f_c$  = frekuensi (GHz)

$h_{BS}$  = tinggi *gNodeB* (m)

$h_{UT}$  = tinggi UT (m)

### 2.2.8.2 Model Propagasi *Urban Macro* (UMa)

UMa dengan *Outdoor to Outdoor* (O2O) dan *Outdoor to Indoor* (O2I) dipasang di atas tingkat *rooftop* bangunan sekitarnya, dengan tinggi TX biasanya sekitar 25 m; tinggi Rx sekitar 1,5-2,5 m dan ISD sebesar 500 m dalam keadaan daerah perkotaan yang padat seperti daerah *urban* dan *suburban*. Skema *pathloss* yang digunakan UMa saat kondisi LOS menggunakan Persamaan 2.5 dan 2.6 [21].

$$PL_1 = 28.0 + 22 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) \quad (2.5)$$

$$PL_2 = 28.0 + 40 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 9 \log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2) \quad (2.6)$$

Keterangan:

- PL = nilai *pathloss* (dBm)  
 $d_{3D}$  = resultan dari nilai  $(h_{BS}-h_{UT})$  dan nilai  $d_{2D}$   
 $f_c$  = frekuensi (GHz)

### 2.2.8.3 Model Propagasi *Urban micro* (UMi)

Pada skenario *Urban micro* (UMi), *Base Station Outdoor to Outdoor* (O2O) dan *Outdoor to Indoor* (O2I) terpasang di bawah tingkat *rooftop* gedung-gedung di sekitar area. Area terbuka ini digunakan untuk merekam skenario kehidupan nyata seperti kota atau terminal. Luas cakupan area terbuka biasanya sekitar 50-100 m, dengan tinggi *transmitter* (Tx) sekitar 10 m, tinggi *receiver* (Rx) sekitar 1,5-2,5 m, dan *Inter-Side Distance* (ISD) sekitar 200 m. *Pathloss* dalam kondisi LOS dihitung menggunakan rumus yang sesuai menggunakan Persamaan 2.7 atau Persamaan 2.8 [21].

$$PL_1 = 32.4 + 21\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c) \quad (2.7)$$

$$PL_2 = 32,4 + 40\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c) - 9.5\log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2) \quad (2.8)$$

Keterangan:

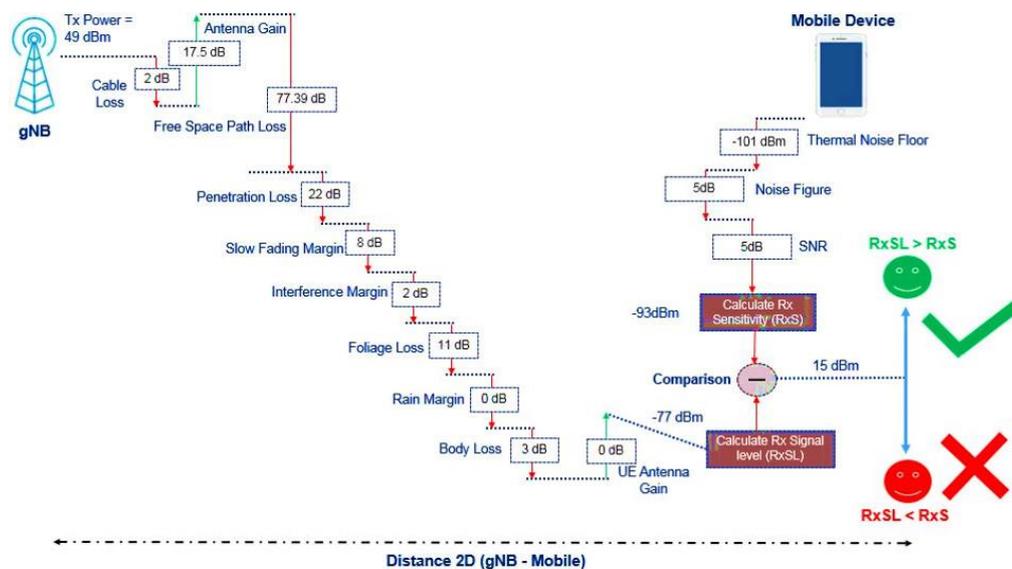
- PL = nilai *pathloss* (dBm)  
 $d_{3D}$  = resultan dari nilai  $(h_{BS}-h_{UT})$  dan nilai  $d_{2D}$   
 $f_c$  = frekuensi (GHz)

**Tabel 2.5 Ketentuan Parameter untuk Model UMi dan UMa [30].**

<i>Parameters</i>		<b>Ketentuan UMi</b>	<b>Ketentuan UMa</b>
<i>Cell layout</i>		<i>Hexagonal grid, 19 micro sites, 3 sectors, per site (ISD = 200 m)</i>	<i>Hexagonal grid, 19 micro sites, 3 sectors, per site (ISD = 500 m)</i>
Tinggi antena <i>gNodeB</i> ( $h_{BS}$ )		10 m	25 m
Lokasi UT	<i>Outdoor/Indoor</i>	<i>Outdoor dan Indoor</i>	<i>Outdoor dan Indoor</i>
	LOS/NLOS	LOS dan NLOS	LOS dan NLOS
	<i>Height</i> $h_{UT}$	1,5 – 2,5 m	1,5 – 2,5 m
Mobilitas UE ( <i>horizontal plane only</i> )		3 km/h	3 km/h
Jarak minimal BS - UT (2D)		10 m	35 m

### 2.2.9 Link budget

Berdasarkan status saat ini sebagian besar penyebaran jaringan 5G akan berada dalam frekuensi yang sangat tinggi (gelombang millimeter) dan penyebaran frekuensi tinggi ini akan menjadi salah satu karakteristik terpenting dari 5G NR. Salah satu kasus penggunaan utama dari *link budget* yaitu pada aktivitas penerapan 5G. Mengetahui perkiraan jumlah situs 5G akan membantu vendor dan operator memperkirakan biaya dan upaya pada saat penerapan dan menyiapkan jaringan 5G. *Link budget* adalah perhitungan total *gain* dan *loss* dalam suatu sistem untuk menentukan level sinyal yang diterima (RxSL) oleh penerima (UE). Level sinyal yang diterima kemudian dibandingkan dengan sensitivitas penerima (RxS) untuk memverifikasi apakah saluran memiliki kualifikasi yang memadai (lulus) atau tidak memadai (gagal). *Pass* berarti UE menerima Min. Sinyal UL untuk berkomunikasi dengan jaringan [31].



**Gambar 2.10 Link budget 5G [31].**

Perbandingan *Link budget* antara 4G & 5G dengan faktor-faktor utama disebutkan pada Tabel 2.6.

**Tabel 2.6 Faktor-faktor Perbandingan 5G [31].**

<i>Link Factor</i>	<i>LTE Link budget</i>	<i>5G NR Link budget</i>
<i>Feeder loss</i>	Menggunakan RRU, dengan	Menggunakan AAU, tanpa antenna eksternal dan <i>feeder loss</i> .

<i>Link Factor</i>	<i>LTE Link budget</i>	<i>5G NR Link budget</i>
	antena eksternal <i>feeder loss</i>	Menggunakan RRU, dengan antena eksternal dan <i>feeder loss</i> .
<i>Gain antena pemancar</i>	Antena fisik berhubungan dengan TRX tunggal. <i>Gain</i> antena dari satu TRX adalah <i>gain</i> dari antena fisik.	Rangkaian antena <i>massive</i> MIMO berhubungan dengan beberapa TRX. Satu TRX berhubungan dengan beberapa <i>antenna</i> fisik. Total <i>antenna gain</i> = TRX tunggal <i>gain</i> + BF <i>gain</i> , dimana <i>Gain</i> antena pada <i>link budget</i> hanya <i>gain</i> antena TRX tunggal. <i>Gain</i> BF tercermin dalam batas demodulasi.
<i>Propagation model</i>	Cos231-Hata	UMa/RMa didefinisikan pada 3GPP TR 36.873 dan UMi model didefinisikan pada 3GPP TR 38.901
<i>Penetration loss</i>	Relatif rendah	Semakin tinggi frekuensi maka akan semakin tinggi <i>Penetration loss</i> .
<i>Interference margin (IM)</i>	Relatif besar	<i>Massive</i> MIMO beam secara inheren memiliki efek supresi interferensi. Oleh karena itu interferensi rendah.
<i>Body block loss</i>	N/A	<i>Body block loss</i> perlu dipertimbangkan dimana lokasi UE rendah dan volume trafik besar, khususnya dalam skenario <i>mmWave</i> .
<i>Rain attenuation</i>	N/A	Redaman hujan perlu dipertimbangkan pada skenario <i>mmWave</i> dengan curah hujan yang tinggi dan sering.
<i>Tree fading</i>	NA	Pemudaran sinyal oleh pohon perlu dipertimbangkan di area dengan vegetasi yang lebat dan LOS.

Berdasarkan Gambar 2.10 perhitungan nilai *pathloss* membutuhkan beberapa perhitungan parameter lain yaitu parameter *Thermal Noise* dan *Subcarrier quantity*. *Thermal Noise* merupakan jenis *noise* yang timbul akibat efek panas pada suatu perangkat dan dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.9, sedangkan untuk *Subcarrier quantity* menggunakan Persamaan 2.10 [21].

$$N_{Thermal} = 10 \times \log 10 (kxTXB) \quad (2.9)$$

Keterangan:

K = Konstanta Boltzman ( $1,38 \times 10^{-20}$  mWs/K)

T = Temperature (293° K)

B = Bandwidth (MHz)

$$Subcarrier\ Quantity = Resource\ Block \times Subcarrier\ per\ Resource\ Block \quad (2.10)$$

Perancangan jaringan berbasis *coverage* digunakan untuk mengestimasi pelemahan sinyal maksimum antara UE dengan *gNodeB*, sehingga perangkat dapat berfungsi optimal dalam melayani *user* dalam radius tertentu. Pelemahan tersebut dengan kata lain *Maximum Allowable Pathloss* (MAPL), dimana MAPL ini dihitung secara *uplink* dan *downlink* [32]. Tabel 2.7 menampilkan nilai *link budget* sedangkan Persamaan 2.11 merupakan perhitungan untuk menentukan *Receive Signal Level* (RxSL) pada jaringan 5G NR [31].

$$\begin{aligned} Received\ Signal\ Level\ at\ Receiver\ (dB) = & gNodeB\ transmitter\ power - (10 \times \\ & \log(Subcarrier\ quantity)) + gNodeB\ antenna\ gain - gNodeB\ cable\ loss - \\ & Path\ loss - Penetration\ loss - Foliage\ loss - Body\ block\ loss - \\ & Interference\ margin - Rain/ice\ margin - Slow\ fading\ margin + \\ & UT\ antenna\ gain - Thermal\ Noise\ power - UT\ noise\ figure - \\ & Demodulation\ threshold\ SINR \end{aligned} \quad (2.11)$$

Keterangan :

- *Received Signal Level* (RxSL) : level sinyal pada sisi penerima atau Received Signal Level (RSL) dalam desibel (dB) (1 mW / 0 dBm).
- *gNodeB Transmitter Power* : Kekuatan daya pemancar pada perangkat *gNodeB* (dBm)
- *Subcarrier quantity* : Jumlah *subcarrier* pada sistem komunikasi
- *gNodeB Antenna Gain* : Penguatan antena pada perangkat *gNodeB* (dBi)

- *gNodeB Cable loss* : Penurunan kekuatan sinyal karena kabel yang menghubungkan *gNodeB* dengan antena (dB)
- *Path loss* : Pelemahan sinyal akibat perambatan gelombang radio melalui medium (dB)
- *Penetration loss* : Pelemahan sinyal akibat penetrasi dinding (dB)
- *Foliage loss* : Pelemahan sinyal akibat hambatan oleh dedaunan atau vegetasi (dB)
- *Body block loss* : Pelemahan sinyal akibat hambatan oleh tubuh manusia atau objek lainnya (dB)
- *Interference margin* : Cadangan daya untuk mengatasi interferensi sinyal lainnya (dB)
- *Slow fading margin* : Cadangan daya untuk mengatasi perubahan lambat dalam kondisi saluran nirkabel (dB)
- *Rain/ice margin* : Cadangan daya untuk mengatasi pelemahan sinyal akibat hujan atau es (dB)
- *UE Antenna Gain* : Penguatan antena pada perangkat *User Equipment* (dB)
- *Thermal Noise power* : Daya *noise thermal* pada penerima (dB)
- *Noise figure* : Angka kebisingan pada perangkat pengguna (dB)
- *Demodulation threshold SINR* : Ambang batas *Signal-to-Noise Ratio* (SINR) yang diperlukan untuk demodulasi sinyal dengan benar (dB).

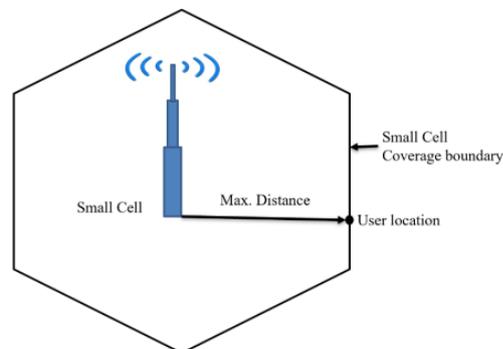
**Tabel 2.7 Link budget untuk Uplink dan Downlink O2O LOS [13] [22] [33].**

<i>Comment Parameter</i>	<b>3,5 GHz</b>		<b>26 GHz</b>	
	<i>Uplink</i>	<i>Downlink</i>	<i>Uplink</i>	<i>Downlink</i>
<i>gNodeB Transmitter Power</i> (dBm)	26	49	29	35
<i>Resource block</i>	273		264	
<i>Subcarrier quantity</i>	3276		3168	
<i>gNodeB Antenna Gain</i> (dBi)	2		2	
<i>gNodeB Cable loss</i> (dBi)	0		0	
<i>Penetration loss</i> (dB)	26.85		12.23	

<i>Comment Parameter</i>	<b>3,5 GHz</b>		<b>26 GHz</b>	
	<i>Uplink</i>	<i>Downlink</i>	<i>Uplink</i>	<i>Downlink</i>
<i>Foliage loss (dB)</i>	19.59		5	
<i>Body block loss (dB)</i>	3		15	
<i>interference margin (dB)</i>	2	6	0.5	1
<i>Rain/ice margin (dB)</i>	0		3	
<i>Slow fading margin (dB)</i>	7		7	
<i>UT Antenna Gain (dB)</i>	0		0	
<i>Boltzmann Constant (mWs/K)</i>	$1.38 \times 10^{-20}$		$1.38 \times 10^{-20}$	
<i>Temperature (Kelvin)</i>	293°		293°	
<i>Thermal Noise power (dBm)</i>	-153.9325329		-147.9119330	
<i>UT noise figure (dB)</i>	9		7	
<i>Demodulation threshold SINR (dB)</i>	-1.1		-1.1	

### 2.2.10 Perencanaan Coverage

Perencanaan *Coverage* berkaitan dengan wilayah sekitar *base station*, dimana pengguna dapat mengajukan permintaan layanan dan berhasil terhubung dengan *cell site* untuk menerima layanan. Selain itu, menghitung jarak maksimum dari *cell site* ke *user* (MAPL) agar menerima layanan tanpa gangguan atau disebut radius sel yang ditunjukkan pada Gambar 2.11. Radius sel menentukan cakupan sel/sel maksimum batas cakupan. Setelah menghitung rentang sel dapat memperkirakan jumlah situs sel yang diperlukan untuk mencakup area penyebaran [34].



**Gambar 2.11 Small Cell Network Coverage [34].**

### 2.2.11 Perencanaan *Capacity*

*Capacity planning* adalah suatu teknik perencanaan dalam membangun jaringan di suatu daerah berdasarkan jumlah pengguna (*Capacity*). Perencanaan ini bertujuan untuk menentukan kebutuhan jumlah *site* yang sesuai dengan mempertimbangkan trafik pelanggan di wilayah cakupan [35]. Perencanaan kapasitas adalah suatu metode persiapan yang mempertimbangkan kualitas dan kapasitas jaringan sehingga perencanaan akan menghasilkan informasi tentang perkiraan sumber daya yang dibutuhkan untuk mendukung pasokan trafik dengan *Quality of Service* (QoS) tertentu, misalnya *throughput*, *coverage area*, dan kebutuhan jaringan seluler [13].

Dalam merancang jaringan 5G NR, proyeksi pengguna/pasar dapat dicari menggunakan model *Bass* pada Persamaan 2.12. Selain proyeksi kedepan, perlu juga untuk melakukan proyeksi kebelakang untuk mendapatkan gambaran terbaru mengenai jumlah penduduk sejak tahun tertentu dengan menggunakan data jumlah penduduk yang didapatkan dari data BPS. Persamaan 2.13 dapat digunakan untuk menghitung proyeksi jumlah pengguna dan kapasitas pasar [36] [37].

$$P_t = P_o (1 + r)^t \quad (2.12)$$

dimana,

$P_t$  = Jumlah penduduk pada tahun t

$P_o$  = Jumlah penduduk pada tahun dasar

$R$  = Laju pertumbuhan penduduk

$T$  = periode waktu antara tahun dasar dan tahun t

$$N(t) = M \frac{1 - e^{-t(p+q)}}{1 + \frac{q}{p} e^{-t(p+q)}} \quad (2.13)$$

dimana,

$N(t)$  = Jumlah pengguna

$M$  = Kapasitas

$p \geq 0$  = koefisien inovasi

$q \leq 0$  = koefisien imitasi

Penyebaran jaringan dapat efektif dengan memproyeksikan pengguna untuk memproyeksikan nilai awal dalam proyeksi kedepannya. Perhitungan proyeksi jumlah pengguna dalam penelitian ini menggunakan lima tahun untuk pemodelan. Kemudian menghitung permintaan trafik seluler yang dapat menentukan kepadatan

pengguna per kilometer pada kinerja jaringan. Persamaan 2.14 digunakan untuk menentukan kebutuhan kebutuhan lalu lintas [13].

$$G(t) = \rho \frac{8}{Ndh.Nmd} \cdot \frac{1}{3600} \varphi(t). Dk \quad (2.14)$$

Dimana,

$G(t)$  = proyeksi permintaan lalu lintas

$\rho$  = kepadatan pengguna

$Ndh$  = jumlah jam sibuk per hari

$Nmd$  = jumlah hari per bulan

$\varphi(t)$  = persentase pengguna aktif pada waktu tertentu untuk menghitung permintaan lalu lintas puncak

$Dk$  = permintaan lalu lintas rata-rata perbulan

Parameter perhitungan selanjutnya yaitu menghitung kapasitas trafik lalu lintas yang konsisten dengan melakukan konversi ke satuan tunggal. Satuan ini didefinisikan sebagai formula *Offered Data Volume (ODV)*. *Capacity planning* juga mengestimasi jumlah *gNodeB* yang diperlukan untuk meminimalisir resiko kemacetan lalu lintas komunikasi berdasarkan jenis layanan, tingkat penetrasi layanan, serta lamanya penggunaan layanan secara efektif dan *Busy Hour Call Attempt (BHCA)*. ODV diberikan dalam [Mbit/(busy) hour/ km<sup>2</sup>] dan secara teoritis didefinisikan pada Persamaan 2.15 [38].

$$ODV = BHCA \times Service Penetration \times Potential user / km^2 \times Service Throughput [Mbps] \times Effective Call duration [sec] \quad (2.15)$$

*Forecasting* jumlah pelanggan bertujuan untuk meramalkan atau memprediksi jumlah pelanggan yang akan menggunakan layanan dari jaringan yang akan dibangun. Kepadatan jumlah penduduk per km menggunakan perhitungan.

$$Kepadatan User / Km^2 = \frac{\Sigma user}{Luas Wilayah} \quad (2.16)$$

Pada jaringan seluler klasifikasi untuk *bit rate user* tiap pelanggan memiliki jenis layanan untuk *uplink* dan *downlink* pada Tabel 2.8.

**Tabel 2. 8 Nilai Bit Rate User Service [39][40][41].**

<i>Service Type</i>	<i>Uplink Bit Rate (kbps)</i>	<i>Downlink Bit Rate (kbps)</i>
<i>Speech/Voice</i>	64	128
<i>Simple Message</i>	128	128
<i>Switched Data</i>	384	384
<i>Medium Multimedia</i>	576	576
<i>High Multimedia</i>	2000	2000
<i>High Interactive Multimedia</i>	2000	3000

Selain itu, pada jaringan seluler membutuhkan estimasi penetrasi layanan untuk meramalkan pengguna pada setiap jenis layanan yang akan digunakan oleh pelanggan. Penetrasi layanan seluler yang digunakan di daerah urban berdasarkan standar ITU pada Tabel 2.9.

**Tabel 2. 9 Service Penetration [39][40].**

<i>Service Type</i>	<i>Urban</i>
<i>Speech/Voice</i>	73
<i>Simple Message</i>	40
<i>Switched Data</i>	13
<i>Medium Multimedia</i>	15
<i>High Multimedia</i>	15
<i>High Interactive Multimedia</i>	25

Berdasarkan nilai ODV dan kapasitas sel, luas *cell coverage* dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.17.

$$L = \frac{\text{Kapasitas Informasi Tiap Sel}}{\text{Offered Data Volume (ODV) total}} \quad (2.17)$$

Dengan demikian, jumlah *gNodeB* yang diperlukan dapat diestimasi menggunakan Persamaan 2.18.

$$\text{Jumlah } gNodeB = \frac{\text{Luas area layanan (km}^2\text{)}}{\text{Luas cakupan sel (km}^2\text{)}} \quad (2.18)$$

### 2.2.12 Parameter *Synchronization Signal-Reference Signal Received Power (SS-RSRP)*

*Synchronization Signal-Reference Signal Received Power (SS-RSRP)* merupakan kekuatan sinyal dari sinyal referensi. Dalam teknologi 2G dan 4G terdapat istilah yang dikenal sebagai level Rx, sedangkan pada teknologi 3G disebut sebagai *Reference Signal Code Power (RSCP)*. Namun, pada jaringan 5G, *User Equipment (UE)* melakukan pengukuran pada kekuatan sinyal yang diterima dari *Secondary Synchronization Signal (SSS)* untuk setiap pemancar *cell* terdekat. *Secondary Synchronization - Reference Signal Received Power (SS-RSRP)* didefinisikan sebagai rata-rata daya (*Watt*) dari sinyal sinkronisasi sekunder (SS) yang diberikan oleh pemancar *cell* dalam total waktu yang diukur pada *User Equipment (UE)*. Pengukuran SS-RSRP terbatas dalam durasi jendela *Secondary Synchronization - Physical Broadcast Channel (SS-PBCH)* [42].

*Range Key Performance Indicator (KPI)* untuk RSRP: - 45 s/d -144 dBm, ketentuan baik atau buruk nilai RSRP, dapat dilihat pada Tabel 2.10 [43].

**Tabel 2. 10 Range Nilai RSRP [43] [44].**

<b>Range Nilai RSRP</b>	<b>Kategori</b>	<b>Warna</b>
$- 65 \geq x$	<i>Very good</i>	
$-75 \leq x < -65$	<i>Good</i>	
$-95 \leq x < -75$	<i>Normal</i>	
$-110 \leq x < -95$	<i>Bad</i>	
$- 120 \leq x < -110$	<i>Very bad</i>	

### 2.2.13 Parameter *Data rate*

*Data rate* merupakan istilah yang mendefinisikan jumlah data yang ditransmisikan melalui jaringan selama periode waktu tertentu. Hal ini menunjukkan kecepatan transfer dari satu perangkat ke perangkat lain atau antara perangkat periferan dan komputer. Umumnya diukur dalam Mega bit per detik

(Mbps) atau *Megabyte* per detik (MBps). Misalnya, jika *bandwidth* 100 Mbps tetapi kecepatan data 50 Mbps, itu berarti maksimum 100 Mb data dapat ditransfer tetapi *channel* hanya mentransmisikan 50 Mb data per detik [45].

IMT-2020 memiliki spesifikasi *data rate* maksimum yang dibutuhkan untuk 5G dengan rasio 20 Gbps untuk *downlink* dan 10 Gbps untuk *uplink*. Selain itu, kecepatan data 5G didukung untuk menghitung data untuk kombinasi pita frekuensi yang digunakan oleh operator. Persamaan 2.19 digunakan untuk menghitung kebutuhan *downlink* dan *uplink data rate (throughput)* jaringan 5G NR [46].

$$Data\ Rate(Mbps) = 10^{-6} \sum_{j=1}^J [V_{layers}^{(j)} \cdot Q_m^{(j)} \cdot f^{(j)} \cdot Rmax \cdot \frac{N_{PRB}^{BW(j),\mu}}{T_s^\mu} \cdot 12 \cdot (1 - OH^{(j)})] \quad (2.19)$$

Dimana,

J = Jumlah komponen *carrier* teragregasi

$V_{layers}^{(j)}$  = jumlah maksimum lapisan MIMO

$Q_m^{(j)}$  = urutan modulasi maksimum

$f^{(j)}$  = *scaling factor*, dimana nilainya 1, 0,8, 0,75, dan 0,4

$Rmax$  = 948/1024

$\mu$  = Numerologi

$T_s^\mu$  = Durasi rata-rata symbol OFDM dalam *subframe* untuk *numerology*

$N_{PRB}^{BW(j),\mu}$  = Alokasi RB maksimum dalam *bandwidth*

$BW(j)$  = *bandwidth*

$OH^{(j)}$  = *Overhead* untuk *control channels* (nilai *overhead* 0,14 untuk frekuensi FR1 DL, 0,18 untuk frekuensi FR2 DL, 0,08 untuk frekuensi FR1 UL, 0,10 untuk frekuensi FR2 UL).