

Perencanaan Implementasi *Low Band* 700 Mhz Pasca ASO untuk Seluler 5G di Indonesia

DWI ARYANTA¹, MUHAMMAD IRFAN MAULANA²

¹Institut Teknologi Nasional Bandung

²Universitas Telkom

Email: dwiaryanta@itenas.ac.id

Received 29 Mei 202x | *Revised* 19 Juni 202x | *Accepted* 23 Juni 2023

ABSTRAK

Band 700 MHz merupakan golden frequency pasca ASO yang potensial untuk implementasi 5G pada Low Band dengan kelebihan jangkauan luas dan penetrasi gedung lebih baik. Penelitian ini membandingkan penggunaan lebar pita 15 MHz dan 20 MHz untuk melihat kebutuhan jumlah BTS suatu operator seluler dan biaya investasi selama sepuluh tahun perencanaan. Sampai dengan tiga tahun pertama perencanaan, jumlah BTS 5G dihitung berdasarkan pendekatan coverage dimensioning, setelahnya menggunakan perhitungan capacity dimensioning akibat peningkatan kapasitas trafik data. Untuk penambahan lebar pita dari 15 MHz menjadi 20 Mhz berdampak pada penghematan jumlah BTS, sampai dengan tahun 2032 untuk lebar pita 15 MHz diperlukan 26.033 BTS dan 19.427 BTS untuk lebar pita 20 MHz. Penghematan jumlah BTS menekan biaya implementasi selama 10 tahun sebesar sebesar 8.280 milyar rupiah dalam Present Value, besarnya cost reduction keseluruhan atas penambahan lebar pita ini sebesar 1.457 milyar rupiah per tahun dan Cost Reduction per MHz sebesar 146 milyar rupiah.

Kata kunci: *golden frequency, ASO, 5G, low band, cost reduction.*

ABSTRACT

The 700 MHz band is the post-ASO golden frequency which has the potential to implement 5G in the Low Band with the advantages of wide coverage and better building penetration. This study compares the use of 15 MHz and 20 MHz bandwidth to see the number of base stations needed by a cellular operator and the investment costs for 10 years of planning. Up to the first 3 years of planning, the number of 5G BTS was calculated based on the coverage dimensioning approach, after which it used capacity dimensioning calculations due to an increase in data traffic capacity. The addition of bandwidth from 15 MHz to 20 Mhz has an impact on saving the number of BTS, until 2032 for a bandwidth of 15 MHz, 26,033 BTS are needed and 19,427 BTS for a bandwidth of 20 MHz. Savings in the number of BTS reduce implementation costs for 10 years by 8,280 billion rupiah in Present Value, the overall cost reduction for this additional bandwidth is 1,457 billion rupiah per year and Cost Reduction per MHz is 146 billion rupiah.

Keywords: *golden frequency, ASO, 5G, low band, cost reduction.*

1. PENDAHULUAN

Implementasi 5G di Indonesia mengalami kendala ketersediaan frekuensi, dimana dari tiga *band* utama terdapat dua frekuensi yang belum tersedia, yaitu frekuensi 700 MHz yang masih digunakan oleh TV analog dan frekuensi 3,4 – 3,8 GHz yang masih digunakan untuk komunikasi satelit. Terkait percepatan penggelaran 5G di Indonesia, penyelenggara telekomunikasi pemegang izin penggunaan spektrum frekuensi radio dapat melakukan kerja sama penggunaan spektrum frekuensi radio untuk penerapan teknologi baru, serta mengatur batas akhir penerapan ASO selambat-lambatnya adalah tahun 2022 (**Rachman & Krisnadi, 2020**).

Peningkatan kapasitas jaringan dapat dilakukan dengan penambahan alokasi spektrum frekuensi radio. Permasalahan menarik adalah penggunaan frekuensi rendah di Indonesia berada di pita 700 MHz. Setelah program *Analog Switch Off* (ASO) berakhir, akan ada dividen digital di pita 700 MHz, dengan besaran 112 MHz yang dapat dialokasikan sebagai *band* IMT. Pemerintah telah menetapkan batas waktu untuk migrasi Televisi Analog ke Televisi Digital pada akhir tahun 2022 (**Laksana, dkk, 2021**).

5G memberikan solusi untuk industri dengan cakupan luas dan kapasitas jaringan tinggi, yang dapat dipenuhi melalui penerapan *Inter-band Carrier Agregation* (CA) pada *Low-Band* dan *Mid-Band*. *Low-band* menyediakan jangkauan luas, dan *Mid-Band* menawarkan lebar pita yang besar. *Inter-Band* CA akan meningkatkan kecepatan data dengan tetap menjaga luas cakupan. Frekuensi yang digunakan adalah 700 MHz dengan *bandwidth* 40 MHz dan 3500 MHz dengan *bandwidth* 100 MHz (**Pratama, dkk, 2021**).

Di Indonesia, layanan 5G yang saat ini beroperasi secara komersial oleh tiga operator seluler nasional yakni Telkomsel, Indosat, dan XL menggunakan dua pita frekuensi seluler eksisting yaitu pita frekuensi 1800 MHz dan 2,3 GHz. Kementerian Kominfo melakukan *farming* dan *refarming* spektrum frekuensi radio agar pemanfaatan pita frekuensi radio berlangsung optimal. Jaringan 5G di Indonesia disiapkan untuk *Low-Band* pada pita frekuensi 700 MHz, *Middle-Band* pada pita frekuensi 3,5 GHz dan 2,6 GHz, dan *High-Band* pada pita frekuensi 26 GHz dan 28 GHz (**Kominfo, 2022**). *Band* 700 MHz dikenal sebagai *golden frequency* karena memiliki jangkauan yang luas dan kemampuan penetrasi *indoor* yang baik (**Haryanto, 2021**).

Kementerian Komunikasi dan Informatika (Kemenkominfo) akan melakukan lelang frekuensi untuk teknologi 5G. Adapun spektrum frekuensi yang disiapkan untuk 5G, *band* frekuensi 700 Mhz, 26 Ghz, serta 3,5 Ghz. Tiga pita frekuensi tersebut dipergunakan untuk teknologi netral, di mana dapat digunakan pada teknologi seluler 4G maupun 5G bergantung pada operator penyedia layanan seluler. Pada frekuensi 700 Mhz akan terdapat pita frekuensi sebesar 112 Mhz setelah program *Analog Switch Off* (ASO). Dari lebar pita tersebut, akan dilelang sebesar 90 Mhz untuk dimanfaatkan teknologi 5G yang hanya bisa 2x45 FDD (90 Mhz) dan sisanya akan dimanfaatkan untuk kebutuhan lainnya (**Kure, 2022**).

Perluasan cakupan layanan seluler 5G dapat ditempuh melalui pemanfaatan *low band* yang tersedia saat ini, yaitu pita 700 MHz setelah siaran televisi analog berhenti pada akhir tahun 2022. Optimalisasi penggunaan *band* 700 MHz dengan lebar hanya 90 MHz akan digunakan oleh operator seluler perlu memperhatikan aspek teknis dan finansial. Bagaimana merencanakan kebutuhan jumlah BTS berdasarkan cakupan dan kebutuhan trafik agar peningkatan cakupan dapat melayani seluruh wilayah yang berpenduduk di Indonesia secara bertahap dalam jangka sepuluh tahun kedepan. Sementara dari sisi ekonomi, bagaimana agar tercipta pemerataan kepemilikan frekuensi, menjaga persaingan usaha yang baik, hingga perhitungan biaya investasi untuk penggelaran jaringan pada periode implementasi

yang direncanakan tersebut yang terlihat pada besaran *Capital Expenditure* (CapEx) dan *Operational Expenditure* (OpEx) perencanaan selama sepuluh tahun mendatang.

1.1. Teknologi Seluler 5G

Setiap sepuluh tahun, migrasi teknologi jaringan seluler selalu terjadi. Pada tahun 2020 penggunaan teknologi 4G hampir secara menyeluruh dapat dinikmati di Indonesia. Teknologi komunikasi yang tak pernah berhenti, kini sudah mulai mempersiapkan negara ini untuk memasuki tahap selanjutnya, yaitu konektivitas komunikasi berbasis 5G (**Masa, dkk, 2023**).

Teknologi seluler 5G memberikan sejumlah peningkatan kinerja dibandingkan dengan teknologi 4G LTE. Teknologi 5G pada intinya memberikan tiga jenis layanan, yaitu *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB), *Massive Machine-Type Communications* (mMTC) dan *Ultra-reliable Low Latency Communication* (URLLC) (**HKT-GSA-Huawei, 2019**). Untuk menentukan parameter sistem komunikasi seluler 5G, dikelompokkan ke dalam tiga segmentasi karakteristik layanan sistem yaitu (**Ekawibowo, dkk, 2018**):

- eMBB, peningkatan *broadband* seluler yang digunakan untuk aplikasi *resource-intensive* dan akses internet pita lebar;
- mMTC, komunikasi tipe mesin masif, digunakan dalam pengoperasian aplikasi IoT dalam skala besar;
- URLLC, komunikasi sangat andal dan latensi rendah biasanya untuk kendaraan tanpa awak dan operasi jarak jauh.

1.1.1. Pita Frekuensi Teknologi 5G

Implementasi teknologi seluler 5G disokong oleh tiga *band* frekuensi yaitu pada *Low-Band*, *Mid-Band* dan *High-Band* (*mmWave*). *Low-Band* menggunakan frekuensi kurang dari 1GHz digunakan untuk perluasan cakupan layanan khususnya untuk layanan mMTC (*massive IoT* dan *mobile broadband*). Pada *Mid-Band* menggunakan frekuensi 1 – 6 GHz digunakan untuk layanan *mission-critical* dan *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB), dan untuk menggunakan frekuensi di atas 24 GHz (*mmWave*) untuk layanan dengan kecepatan sangat tinggi (**Puslitbang SDPPI, 2018**).

Layanan teknologi 5G memerlukan tiga *layer* yang terdiri dari *upper band* pada frekuensi 26 GHz, *middle band* pada frekuensi 2,6 GHz, dan *lower band* pada rentang frekuensi 700 MHz - 800 MHz (**Pertiwi, 2021**). Sub-700MHz UHF (470-694 / 8MHz) dapat memberikan cakupan area yang luas dan berkualitas tinggi untuk layanan *broadband* seluler termasuk di daerah pedesaan dan layanan di dalam bangunan (**Puslitbang SDPPI, 2018**). Kinerja dan segmentasi layanan setiap pita frekuensi pendukung teknologi 5G ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Pita Frekuensi Pendukung Teknologi 5G (Zehle, 2019) (Rehfuess, 2017)

<i>Band</i>	Frekuensi	Keterangan
Low Band	<1 GHz	<ul style="list-style-type: none"> Jangkauan area yang luas, dengan kecepatan rendah (50 Mbps) Digunakan di daerah rural dan sangat baik dalam hal penetrasi <i>outdoor</i> ke <i>indoor</i>. Diaplikasikan pada layanan eMBB dan URLLC.
Mid Band	1,8 – 6 GHz	<ul style="list-style-type: none"> keseimbangan kecepatan dan jangkauan baik pada cakupan <i>outdoor</i> maupun <i>indoor</i> dengan kecepatan hingga 900 Mbps, dan latensi lebih rendah (< 3ms) Diaplikasikan pada layanan eMBB, URLLC indoor, <i>Massive IOT</i>).
High Band	>24 GHz	<ul style="list-style-type: none"> Kecepatan sangat tinggi hingga 10 Gbps, jangkauan pendek dan latensi rendah (< 1ms). Diaplikasikan pada layanan eMBB, FWA, URLLC, dan Backhaul

1.1.2. Teknologi 5G *New Radio* (NR)

Implementasi teknologi 5G dapat diterapkan ditumpangkan pada jaringan 4G. Migrasi tersebut dapat berupa model *Non-Standalone* (NSA) dan *Standalone* (SA). Model 5G NSA dilakukan dengan menggunakan akses radio LTE dan *Core Network* (EPC) yang sudah ada, sehingga implementasi menjadi lebih singkat dan dengan biaya lebih rendah (Bima, 2019).

1.2. Distribusi *Bandwidth Golden Frequency* 700 MHz di Indonesia

Penghentian siaran TV analog pada *band* 700 MHz dan dialihkan TV digital atau dikenal dengan ASO menghasilkan *digital dividen* di pita frekuensi 700 MHz sebesar 112 MHz yang dapat dimanfaatkan untuk layanan nirkabel. Pada *band* 700 MHz tersebut terdapat alokasi 2 x 45 MHz akan digunakan untuk perluasan jaringan 5G di Indonesia (Haryanto, 2022).

Berdasarkan tabel alokasi ITU dalam RR 2020 dan pada Tabel Alokasi Spektrum Frekuensi Republik Indonesia (TASFRI) 2022, *band* 700 MHz dialokasikan untuk dinas bergerak (*mobile*) dengan kategori primer, yang mendukung rencana pemanfaatan pita ini untuk layanan seluler. Selain untuk alokasi dinas bergerak, juga terdapat alokasi dinas lainnya, secara khusus dinas penyiaran merupakan pemanfaatan yang dominan di Indonesia. Secara teknis, penggunaan *band* 700 Mhz pada teknologi seluler 4G dan 5G dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Alokasi *Band* 700 Pada Teknologi 4G dan 5G

Teknologi	Spektrum (MHz)	Duplex Mode	Subcarrier Spacing (kHz)	Channel Bandwidth (MHz)
4G	703-748 (UL) 758-803 (DL)	FDD	-	3, 5, 10, 15, 20
5G	703-748 (UL) 758-803 (DL)	FDD	15	5, 10, 15, 20, 30, 40
			30	10, 15, 20, 30, 40
			60	-

Band 700 MHz berdasarkan skema perencanaan awal ditujukan untuk harmonisasi global dan bekerja pada mode FDD berlaku di seluruh dunia. 3GPP mensyaratkan spesifikasi teknis *band* 700 MHz ini dapat diimplementasikan pada 4G maupun 5G dengan masing-masing *channel bandwidth* yang telah ditentukan. Berdasarkan standar teknis ini, dipilih dua opsi untuk mendistribusi *band* 700 MHz menjadi beberapa blok frekuensi, yaitu 2 x 5 MHz dan 2 x 15 MHz. Pertimbangan pemilihan ini dikarenakan kedua lebar pita ini keduanya tersedia baik pada 4G maupun 5G dan dapat merealisasikan penerapan teknologi netral pada *band* 700 MHz.

Operator seluler di Indonesia nantinya dapat menargetkan sejumlah blok frekuensi yang tersedia melalui proses lelang. Kinerja jaringan 5G akan cukup baik pada alokasi pita sekurang-kurangnya 10 MHz, sehingga diperlukan minimal dua blok frekuensi 5MHz. Dari sisi operator seluler, lebar pita yang ideal adalah sebesar pita 15 MHz atau 20 MHz, mengingat penggunaan pita ini berdampak pada rendahnya biaya investasi jaringan. Pada penelitian ini, digunakan perhitungan lebar pita 2 x 15 MHz dan memungkinkan dapat ditambah sebesar 2 x 5 MHz, untuk menekan biaya investasi implementasi 5G selama sepuluh tahun perencanaan.

1.3. Kinerja BTS 5G Pada Frekuensi 700 MHz

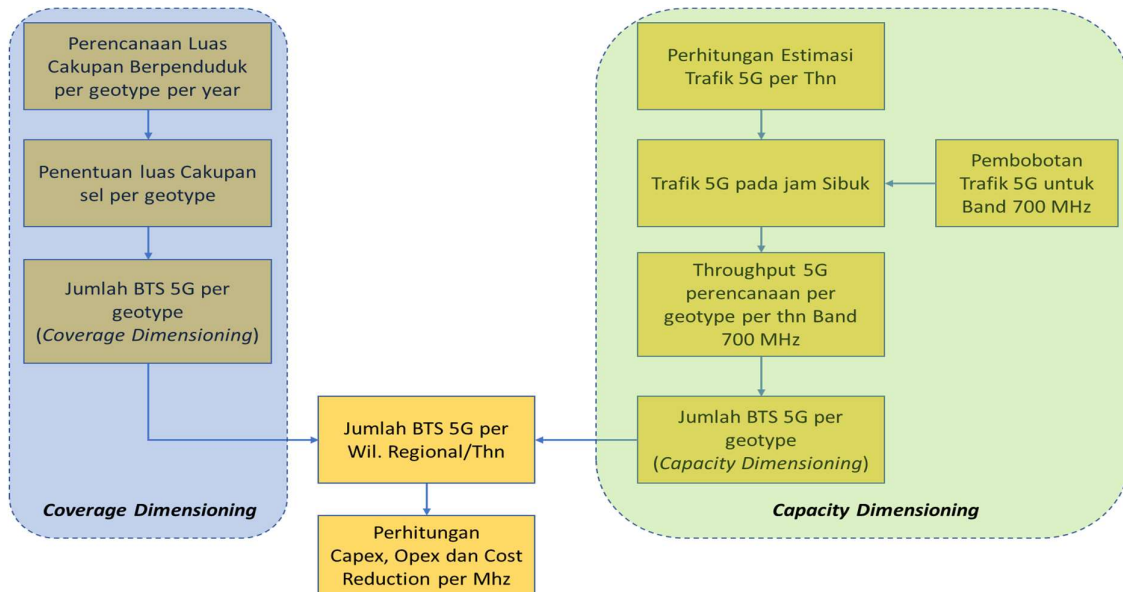
Coverage area dan *throughput* suatu BTS teknologi 5G sangat dipengaruhi oleh penggunaan frekuensi dan lebar kanal yg digunakan. *Coverage planning* adalah sistem perencanaan jaringan yang didasarkan pada bagaimana jaringan dapat mencakup pengguna, menghasilkan data dalam bentuk berapa banyak BTS yang dibutuhkan untuk melayani area tertentu. Perencanaan cakupan mempertimbangkan *Radio Link Budget* dan model propagasi yang digunakan. Perhitungan *Radio Link Budget* digunakan untuk memperkirakan redaman

sinyal maksimum atau *path loss* antara *User Terminal* (UT) dan antena gNodeB (Esa, dkk, 2020).

2. METODE PENELITIAN

Untuk mengimplementasikan teknologi 5G pada sektor telekomunikasi dan lainnya, diperlukan perencanaan penggunaan frekuensi spektrum khususnya untuk jaringan seluler. Berdasarkan permasalahan tersebut, diperlukan perhitungan perencanaan frekuensi radio pita lebar 5G di Indonesia. Proses perhitungan meliputi pertimbangan tren pasar, infrastruktur, dan layanan *mobile broadband* di Indonesia (Effendi, dkk, 2020).

Pada penelitian ini diawali dengan melakukan kajian terkait dengan beberapa kemungkinan sebaran alokasi lebar pita *Low-Band* 700 MHz yang akan digunakan oleh operator seluler, mengingat terbatasnya *band* 700 Mhz hanya selebar 2x45 MHz. Kebutuhan jumlah BTS yang digunakan akan dilakukan perhitungan melalui pendekatan kapasitas trafik data (*capacity dimensioning*) dan cakupan (*coverage dimensioning*) yang dibutuhkan selama sepuluh tahun untuk seluruh wilayah di Indonesia yang akan dikelompokkan menjadi enam Area. Perencanaan implementasi *band* 700 MHz ini pada seluler 5G dilakukan mulai tahun 2023 sampai tahun 2032. Langkah penelitian diilustrasikan pada Gambar 1 mulai dari proses melakukan perencanaan kebutuhan trafik dan luas cakupan per *geotype* untuk setiap area hingga penentuan kebutuhan jumlah BTS dan biaya (CapEx dan OpEx).



Gambar 1. Skema Perhitungan BTS dan Biaya Implementasi

Perhitungan jumlah sel berdasarkan pendekatan *capacity dimensioning* menggunakan data estimasi (*forecast*) kebutuhan trafik data 5G per area dihitung dengan melakukan perhitungan perencanaan kebutuhan trafik data berdasarkan populasi penduduk yang menggunakan perangkat seluler berbasis teknologi 5G. Parameter yang digunakan dalam perencanaan kapasitas trafik pengguna layanan 5G yang akan dilayani pada frekuensi 700 MHz meliputi: estimasi jumlah trafik data per tahun selama sepuluh tahun kedepan, jumlah hari sibuk per tahun, persentase trafik pada hari sibuk, jumlah jam sibuk dalam satu hari sibuk, persentase trafik dalam jam sibuk. Berdasarkan pembobotan/*sharing* layanan antara *low band* dengan *mid band* dan *high band* (*mm Wave*), maka akan didapatkan besaran trafik dan nilai *throughput* 5G perencanaan selama sepuluh tahun per *geotype*. Melalui pendekatan

empiris kapasitas *throughput* per BTS pada frekuensi 700 MHz, modulasi 64 QAM, serta penggunaan lebar pita 15 MHz dan 20 MHz maka ditemukan kebutuhan jumlah BTS per tahun per *geotype* untuk setiap area.

Perhitungan kebutuhan jumlah sel berdasarkan metode *coverage dimensioning* mengacu pada luas wilayah yang berpenduduk berdasarkan klasifikasi *geotype* dan rata-rata luas cakupan BTS pada frekuensi 700 Mhz arah *uplink*. Luas wilayah yang berpenduduk per *geotype* untuk enam area dilakukan perhitungan perencanaan (*forecast*) untuk sepuluh tahun kedepan. Berdasarkan luasan cakupan BTS empiris yang merupakan parameter praktis dari suatu vendor perangkat BTS global, kemudian akan diperoleh jumlah kebutuhan BTS per area selama sepuluh tahun perencanaan, baik pada penggunaan pita 15 MHz maupun 20 MHz.

Berdasarkan kedua langkah di atas, kemudian dilakukan perbandingan dan dipilih jumlah BTS yang terbesar per tahun per *geotype* di setiap area untuk sepuluh tahun perencanaan. Langkah akhir setelah jumlah BTS 5G ditentukan, adalah melakukan perhitungan kebutuhan biaya *Capital Expenditure* (CapEx) dan *Operational Expenditure* (OpEx) perencanaan selama sepuluh tahun mendatang dengan memperhitungkan nilai umur ekonomis aset, serta penurunan dan kenaikan harga baik OpEx maupun CapEx. Analisis akhir dilakukan untuk melihat besarnya *cost reduction* dari penggunaan lebar pita 20 MHz terhadap pita 15 MHz.

2.1. Perencanaan Kebutuhan BTS Melalui Coverage Dimensioning

Link budget radio adalah perincian tingkat daya *transmitter*, *loss* sistem, dan penguatan. Selain itu, bisa menghitung pelemahan *downlink* dan *uplink* antara antena MS dan BTS. Perhitungan ini disebut nilai *Maximum Allowable Pathloss* (MAPL). Nilai MAPL dimasukkan ke dalam model propagasi untuk menemukan radius sel. Dalam hal ini *link budget* difokuskan pada arah *downlink* pada komunikasi *outdoor* ke *outdoor* (O2O) dengan kondisi *Line of Sight* (LOS). Kebutuhan jumlah BTS pada suatu wilayah dapat dihitung melalui Persamaan (1).

$$\text{Jumlah BTS [cov]} = \frac{\text{Luas Wilay (km}^2\text{)}}{\text{Luas Cakupan BTS (km}^2\text{)}} \quad (1)$$

Luas wilayah yang akan digunakan pada penelitian ini merupakan luasan suatu wilayah berpenduduk yang didefinisikan per *geotype* hasil perencanaan selama sepuluh tahun ke depan. Sementara radius BTS yang digunakan merupakan hasil pengujian yang dilakukan oleh ZTE yang merupakan salah satu vendor perangkat jaringan 5G. Tabel 3 menampilkan data luas cakupan BTS per *geotype* hasil perhitungan dengan asumsi bentuk sel hexagonal dengan luas sel sebesar 2,6 dikalikan dengan kuadrat radius sel.

Tabel 3. Radius dan Luas Cakupan BTS per Geotype (ZTE, 2013)

	Dense Urban	Urban	Sub-Urban	Rural
Radius Sel (km)	0,7	1,21	3,37	8,48
Luas Sel (km ²)	1,27	3,80	29,51	186,83

2.1.1. Capacity Planning Band 700 MHz

Throughput data pengguna dalam sistem seluler dipengaruhi oleh dua komponen, pertama adalah jumlah blok sumber daya yang tersedia untuk setiap pengguna, dan bergantung pada kepadatan jumlah BTS, kepadatan pengguna dan kapasitas yang digunakan, menghasilkan jumlah blok pita frekuensi untuk dibagikan kepada pengguna. Komponen kedua adalah efisiensi spektral sistem berupa *throughput* yang diberikan per PRB (Tomic, 2022).

$$\text{Jumlah BTS [cap]} = \frac{TD_{BH}}{R_B} \quad (2)$$

dimana:

TD_{BH} = trafik data pada jam sibuk (bps)
 R_B = bit rate maksimum BTS

Trafik data pada jam sibuk dihitung melalui Persamaan (3) berikut:

$$TD_{BH} = (N_{BD} \times \%_{BD} \times N_{BH} \times \%T_{BH}) \times D_{TD} \quad (3)$$

dimana:

N_{BD} = jumlah hari dimana trafik yang berada di atas trafik rata-rata dalam 1 tahun
 $\%_{BD}$ = total persentase trafik pada hari sibuk terhadap trafik 1 tahun
 N_{BH} = jumlah jam tersibuk yang berada di atas pada trafik rata-rata di hari sibuk
 $\%T_{BH}$ = total persentase trafik pada jam paling sibuk terhadap total trafik di hari sibuk
 D_{TD} = *demand* trafik data

Bit rate maksimum yang dapat diberikan pada teknologi 5G dinyatakan dengan Persamaan (4) (ETSI, 2020):

$$R_B = 10^{-6} \sum_{j=1}^J \left[v_{Layers}^{(j)} \cdot Q_m^{(j)} \cdot f^{(j)} \cdot R_{max} \cdot \frac{N_{PRB}^{BW(j),\mu} \cdot 12}{T_s^\mu} \cdot (1 - OH^{(j)}) \right] [MHz] \quad (4)$$

dimana :

J = jumlah *aggregated Component Carriers* (CC)
 $v_{Layers}^{(j)}$ = jumlah *layer* maksimum
 $Q_m^{(j)}$ = derajat modulasi tertinggi
 $f^{(j)}$ = faktor skala (opsi = 1; 0,8; 0,75; dan 0,4)
 R_{max} = bilangan bernilai 948/1024
 μ = *numerology* (0 – 5)
 T_s^μ = rata-rata periode simbol OFDM
 $N_{PRB}^{BW(j),\mu}$ = alokasi jumlah *Resource Block* (RB)
 $OH^{(j)}$ = *overhead*

Melalui Persamaan (4), kemudian dihitung nilai *throughput* BTS 5G *band* 700 MHz berdasarkan derajat modulasi digital seperti yang ditampilkan pada Tabel 4. Nilai *throughput* ini nantinya menjadi penentu untuk mengetahui kebutuhan jumlah BTS berdasarkan Persamaan (2).

Tabel 4. Throughput BTS Pada Sejumlah Derajat Modulasi

Pilihan Modulasi	Throughput (Gbps)	
	15MHz	20MHz
QPSK	0,4	0,5
16 QAM	0,8	1
64 QAM	1,2	1,5
256 QAM	1,6	2

2.1.2. Perhitungan *Economic Costing* dan *Cost Reduction*

Biaya yang ditanggung oleh operator merupakan biaya yang diperlukan untuk infrastruktur jaringan telekomunikasi, pemasaran, karyawan, dan beban usaha lainnya. Dilihat dari biaya infrastruktur jaringan, biaya dibedakan menjadi dua, yaitu Capex dan Opex (Kusumawati, dkk, 2016). Rincian biaya Capex dan Opex jaringan 5G ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Biaya per Komponen Capex dan Opex (hasil olahan)

Komponen	Biaya Capex (Juta Rp)	Biaya Opex (Juta Rp)	Keterangan
BTS	770	10% dari Capex BTS	1 kali/instalasi
<i>Core Network</i>	66000	6000	1 kali/instalasi
Site, Tower, Power	-	420	per tahun
<i>Transmission</i>	-	108	per Mbps per tahun

Untuk aktualisasi biaya jaringan, perlu mempertimbangkan nilai depresiasi aset serta kenaikan dan penurunan biaya sejumlah komponen biaya. Masa Umur Ekonomis Aset untuk jaringan telekomunikasi adalah pada angka sepuluh tahun, mengikuti pola evolusi teknologi seluler. Total biaya pada tahun berjalan selama masa perencanaan sepuluh tahun merupakan akumulasi biaya Opex ditambah dengan biaya *return of aset* yang merupakan nilai aset yang sudah terkomposisi dengan nilai Wacc yang diasumsikan pada angka 13,139%.

Tabel 6. Beberapa Faktor yang Menurunkan Beban Biaya (Admaja, 2015)

Enabler	Faktor pendukung	Keterangan
Standar global	Mendukung kompatibilitas dengan aplikasi yang dipasarkan secara global	Dapat menurunkan harga dari CPE
	Kompatibilitas dengan standar dunia baik pada perangkat maupun pita frekuensi yang ditetapkan oleh ITU atau 3GPP	Kemudahan mencari komponen pendukung sehingga harga akan lebih rendah
Virtualisasi jaringan	Penggunaan bersama sumber daya (<i>sharing</i>)	Penggunaan infrastruktur bersama akan mengurangi beban CAPEX
Multi RAT Network	Teknologi 5G bersifat <i>interwork</i> dengan teknologi eksisting (<i>sharing</i> infrastruktur)	Investasi teknologi eksisting tidak terbuang dan akan menurunkan beban CAPEX

Dalam industri jasa telekomunikasi hal yang terpenting adalah keuntungan (*revenue*) di mana hal tersebut berkaitan dengan biaya Capex dan Opex. Penurunan beban Capex dan Opex pada industri dapat bergantung dari kebijakan regulasi (Admaja, 2015). Peluang dalam menurunkan beban biaya pada saat teknologi 5G hadir dapat dilakukan antara lain melalui beberapa poin seperti yang ditampilkan pada Tabel 6.

Perhitungan *cost reduction* (CR) dimaksudkan untuk melihat besarnya penurunan biaya terhadap meningkatnya pita frekuensi yang digunakan setelah penggunaan pita selebar 15 MHz. Perhitungan CR mengacu kepada perhitungan 10 tahun perencanaan jaringan yang dihitung pada nilai saat ini (*Present Value – PV*). Besarnya CR per MHz dihitung dengan menghitung nilai CR selama sepuluh tahun menggunakan perhitungan PMT (*Payment*) kemudian dibagi dengan nilai sepuluh yang merupakan lebar total 2x5 MHz.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Jumlah BTS Berdasarkan *Capacity Dimensioning*

Perhitungan jumlah BTS berdasarkan *capacity dimensioning* ini mengacu pada data hasil *forecasting* kebutuhan trafik data pengguna 5G selama sepuluh tahun. Melalui data jumlah penduduk dan persentase penduduk yang memiliki telepon seluler yang diperoleh dari BPS 2020-2023 dapat diestimasi jumlah pengguna seluler di Indonesia hingga tahun 2032 seperti yang ditampilkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Estimasi Jumlah Pengguna Telepon Seluler di Indonesia (Juta Jiwa)

AREA	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Sumatera	43.72	46.26	48.87	51.55	54.30	57.12	60.01	62.98	66.02	69.15
Jabodetabek	9.17	9.49	9.82	10.15	10.48	10.82	11.16	11.50	11.85	12.21
Jawa Barat-Banten	45.85	48.30	50.80	53.36	55.99	58.68	61.43	64.25	67.14	70.09
Jateng -Yogya	28.70	29.74	30.80	31.88	32.98	34.10	35.24	36.40	37.58	38.78
Jatim-Bali-Nusra	37.85	39.34	40.85	42.39	43.95	45.54	47.17	48.81	50.49	52.20
Kalimantan-Sulawesi-Maluku-Papua	31.80	33.43	35.11	36.83	38.59	40.41	42.28	44.20	46.17	48.20
TOTAL	197.10	206.56	216.24	226.15	236.29	246.67	257.28	268.14	279.25	290.62

Sumber: Hasil olahan berdasarkan data Statistik Indonesia Tahun 2020-2022

Berdasarkan gambaran statistik terkait tren perkembangan pengguna berbagai teknologi seluler di Indonesia dan Asia Pasific, dimana berdasarkan berbagai data dari GSMA yang dihimpun, diperoleh informasi dimana sampai dengan tahun 2025, di Indonesia jumlah pengguna 5G sebesar 13% (**GSMA, 2022**). Sementara hingga tahun 2030, jumlah pengguna 5G di lingkup Asia Pasific mencapai 41% (**GSMA, 2023**).

Saat ini di Indonesia terdapat empat operator seluler yang berpotensi untuk mengembangkan layanan 5G menggunakan *band* 700 MHz. Bila digunakan asumsi, suatu operator memiliki *market share* 30%, maka dapat dihitung jumlah pelanggan 5G dan penggunaan trafik data dalam kurun waktu sepuluh tahun perencanaan seperti yang ditampilkan pada Tabel 8 dan Tabel 9.

Tabel 8. Jumlah Pelanggan 5G Suatu Operator Seluler di Indonesia (x10³)

	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Sumatera	671	2,478	4,846	5,912	7,077	8,232	9,015	10,029	11,043	12,057
Jabodetabek	178	631	1,186	1,447	1,732	2,014	2,206	2,454	2,702	2,950
Jawa Barat-Banten	908	3,324	6,450	7,868	9,419	10,956	11,998	13,347	14,697	16,046
Jateng -Yogya	571	2,063	3,953	4,822	5,772	6,714	7,352	8,179	9,006	9,833
Jatim-Bali-Nusra	757	2,754	5,310	6,477	7,753	9,019	9,876	10,987	12,098	13,209
Kalimantan-Sulawesi-Maluku-Papua	644	2,343	4,524	5,519	6,607	7,685	8,416	9,363	10,309	11,256
TOTAL	3,729	13,592	26,269	32,045	38,359	44,619	48,863	54,359	59,855	65,351

Tabel 9. Estimasi Kebutuhan Trafik Data 5G (x10¹⁸ Byte)

	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Sumatera	40	197	399	646	982	1,432	1,811	2,338	2,917	3,558
Jabodetabek	11	50	98	158	240	350	443	572	714	871
Jawa Barat-Banten	54	265	531	860	1,308	1,905	2,410	3,112	3,882	4,736
Jateng -Yogya	34	164	325	527	801	1,168	1,477	1,907	2,379	2,902
Jatim-Bali-Nusra	45	219	437	708	1,076	1,568	1,984	2,562	3,196	3,898
Kalimantan-Sulawesi-Maluku-Papua	39	187	373	603	917	1,336	1,690	2,183	2,723	3,322
TOTAL	224	1,083	2,163	3,502	5,325	7,760	9,815	12,675	15,811	19,287

Pendistribusian trafik data per *geotype* untuk enam area dilakukan mengacu pada data statistik suatu operator seluler. Masing-masing area terbagi menjadi empat kategori *geotype* yaitu *dense urban*, *urban*, *sub urban* dan *rural*. Melalui perencanaan komposisi sebaran trafik keempat kelompok *geotype*, kemudian didapatkan kebutuhan trafik data per *geotype*.

Mengingat teknologi 5G saat ini didukung oleh *band* 1800 MHz dan 2300 MHz, serta masih ada teknologi seluler lain, maka melalui perencanaan komposisi pembebanan trafik *band* 700 MHz dengan *band* lain, maka dapat dihitung estimasi kebutuhan trafik data aktual yang akan dilayani oleh *band* 700 MHz. Nilai *throughput* puncak dari kebutuhan trafik data ini kemudian dihitung dengan melakukan konversi trafik data (Gbyte) pada jam sibuk di hari sibuk menjadi *throughput* (Gbps) puncak pada jam sibuk. Nilai persentase trafik pada jam sibuk dalam suatu hari sibuk dalam satu tahun dihitung menggunakan sejumlah asumsi antara lain: parameter jumlah hari sibuk 171 hari per tahun, persentase trafik pada hari sibuk 50,8% dan jumlah jam sibuk 16 jam per hari. Nilai persentase trafik pada jam sibuk dalam suatu hari sibuk dalam satu tahun dapat kemudian dihitung sebesar 0,195%. Nilai *throughput* pada jam sibuk yang dihitung menggunakan beberapa asumsi data ini tertuang pada Tabel 9 selama sepuluh tahun perencanaan. Hasil perhitungan *throughput* pada jam sibuk per area per tahun ditampilkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Kebutuhan *Throughput* Puncak pada Jam Sibuk (Gbps)

Area	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Sumatera	40	197	399	645	934	2,208	2,799	3,622	4,525	5,527
Jabodetabek	11	50	98	158	228	535	677	876	1,094	1,336
Jawa Barat-Banten	54	264	530	859	1,241	2,916	3,695	4,781	5,974	7,301
Jateng -Yogya	34	164	325	526	766	1,781	2,256	2,917	3,643	4,450
Jatim-Bali-Nusra	45	219	437	707	1,026	2,392	3,030	3,918	4,894	5,978
Kalimantan-Sulawesi-Maluku-Papua	39	186	372	602	873	2,063	2,617	3,391	4,242	5,189
TOTAL	223	1,082	2,160	3,498	5,068	11,894	15,074	19,504	24,372	29,780

Mengacu pada data *throughput* maksimum suatu BTS 5G pada Tabel 10, maka diperoleh kebutuhan jumlah BTS per tahun berdasarkan *bandwidth* 15 MHz seperti pada Tabel 11 dan Tabel 12 untuk penggunaan *bandwidth* 20 MHz. Melalui kedua hasil ini dapat terlihat bahwa penggunaan lebar pita yang semakin tinggi akan memperkecil penggunaan jumlah BTS. Hal ini disebabkan karena semakin lebar pita, berdampak pada semakin besarnya kapasitas layanan yang dapat diberikan oleh suatu BTS pada frekuensi kerja yang sama.

Tabel 11. Kebutuhan Jumlah BTS per Tahun per Area (BW 15 MHz)

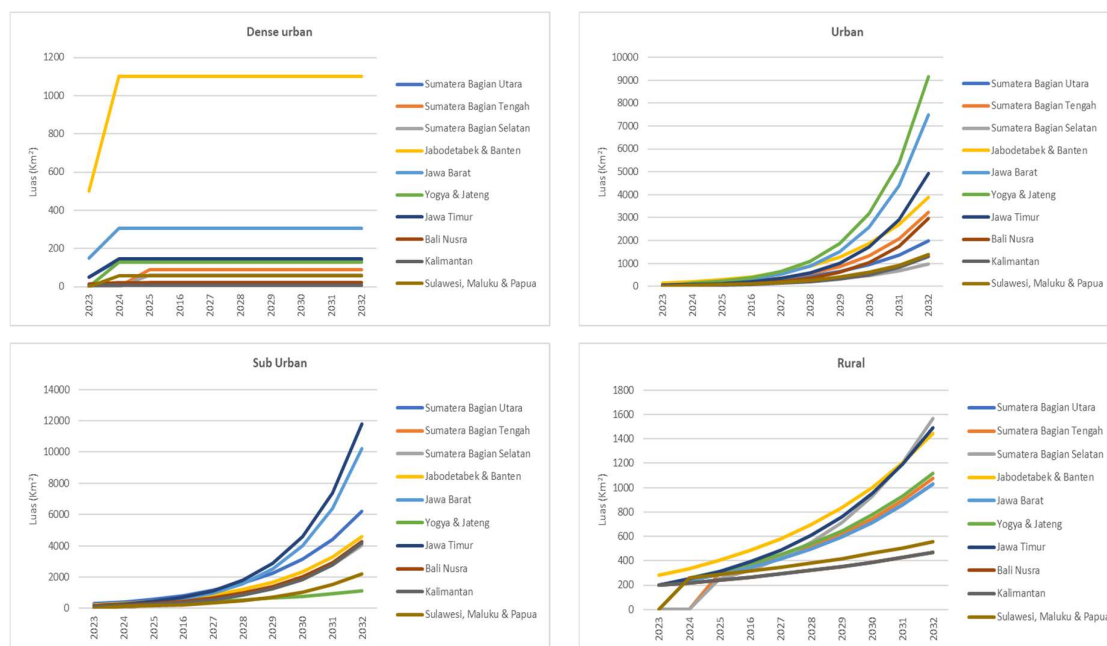
Area	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Sumatera	38	170	337	543	785	1,846	2,337	3,023	3,777	4,610
Jabodetabek	11	43	83	134	192	448	567	732	913	1,114
Jawa Barat-Banten	46	223	443	717	1,035	2,431	3,081	3,986	4,981	6,086
Jateng -Yogya	30	139	272	442	641	1,486	1,881	2,432	3,039	3,711
Jatim-Bali-Nusra	39	186	367	593	860	1,997	2,529	3,270	4,082	4,986
Kalimantan-Sulawesi-Maluku-Papua	35	160	315	506	732	1,722	2,184	2,828	3,537	4,328
TOTAL	199	921	1,817	2,935	4,245	9,930	12,579	16,271	20,329	24,835

Tabel 12. Kebutuhan Jumlah BTS per Tahun per Area (BW 20 MHz)

Area	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Sumatera	28	122	240	386	555	1,304	1,652	2,135	2,667	3,256
Jabodetabek	9	32	59	95	136	316	401	516	645	788
Jawa Barat-Banten	34	158	315	507	732	1,717	2,176	2,815	3,517	4,297
Jateng -Yogya	21	98	193	312	453	1,050	1,329	1,717	2,146	2,619
Jatim-Bali-Nusra	29	133	261	420	607	1,411	1,786	2,309	2,884	3,522
Kalimantan-Sulawesi-Maluku-Papua	26	114	223	358	518	1,218	1,544	1,998	2,498	3,057
TOTAL	147	657	1,291	2,078	3,001	7,016	8,888	11,490	14,357	17,539

3.2. Jumlah BTS Berdasarkan *Coverage Dimensioning*

Perhitungan jumlah BTS berdasarkan *coverage dimensioning* mengacu pada data hasil *forecasting* luas cakupan yang berpenduduk per area per *geotype* untuk teknologi 5G selama sepuluh tahun yang merupakan hasil perhitungan dari suatu operator seluler di Indonesia yang ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Data Perencanaan Luasan Wilayah Berpenduduk Berdasarkan Geotype

Berdasarkan luasan cakupan satu buah BTS seperti yang disampaikan pada Tabel 3, maka dapat dihitung kebutuhan jumlah BTS per area yang ditampilkan pada Tabel 13. Kebutuhan jumlah BTS mencakupi total keseluruhan *geotype* per per area selama sepuluh tahun perencanaan.

Tabel 13. Kebutuhan Jumlah BTS Berdasarkan *Coverage Dimensioning*

Area	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Sumatera	69	150	369	435	532	676	888	1,202	1,666	2,355
Jabodetabek	438	929	957	998	1,056	1,140	1,262	1,437	1,689	2,053
Jawa Barat-Banten	141	278	303	344	414	531	728	1,060	1,618	2,559
Jateng -Yogya	-	143	172	219	299	433	660	1,042	1,688	2,780
Jatim-Bali-Nusra	81	181	211	261	343	480	707	1,084	1,715	2,768
Kalimantan-Sulawesi-Maluku-Papua	16	85	101	127	165	224	313	450	658	976
TOTAL	745	1,766	2,113	2,384	2,810	3,484	4,558	6,274	9,034	13,491

3.2. Penentuan Kebutuhan Jumlah BTS 5G

Penentuan kebutuhan jumlah BTS 5G untuk *band* 700 MHz mengacu pada hasil dari kedua pendekatan perhitungan yang telah dilakukan pada tahapan sebelumnya, yaitu *Capacity Dimensioning* dan *Coverage Dimensioning*. Jumlah BTS terbesar per tahun per area dipilih dari kedua pendekatan perhitungan sebelumnya. Jumlah BTS yang diperlukan untuk memberikan layanan 5G pada *band* 700 MHz di enam area di Indonesia ditampilkan pada Tabel 14 untuk lebar pita 15 MHz dan Tabel 15 untuk lebar pita 20 MHz.

Tabel 14. Kebutuhan Jumlah BTS pada BW 15 MHz

Area	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Sumatera	102	297	461	667	915	1,893	2,398	3,105	3,917	4,868
Jabodetabek	438	929	958	998	1,057	1,141	1,262	1,437	1,690	2,054
Jawa Barat-Banten	141	278	443	717	1,035	2,431	3,081	3,986	4,981	6,086
Jateng -Yogya	30	144	272	442	641	1,486	1,881	2,432	3,039	3,711
Jatim-Bali-Nusra	82	193	367	593	860	1,997	2,529	3,270	4,082	4,986
Kalimantan-Sulawesi-Maluku-Papua	38	160	315	506	732	1,722	2,184	2,828	3,537	4,328
NASIONAL	831	2,001	2,816	3,923	5,240	10,670	13,335	17,058	21,246	26,033

Tabel 15. Kebutuhan Jumlah BTS pada BW 20 MHz

Area	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Sumatera	92	255	400	529	714	1,420	1,800	2,329	2,949	3,685
Jabodetabek	438	929	958	998	1,057	1,141	1,262	1,437	1,690	2,054
Jawa Barat-Banten	141	278	315	507	732	1,717	2,176	2,815	3,517	4,297
Jateng -Yogya	21	144	193	312	453	1,050	1,329	1,717	2,146	2,780
Jatim-Bali-Nusra	82	182	261	420	607	1,411	1,786	2,309	2,884	3,554
Kalimantan-Sulawesi-Maluku-Papua	32	114	223	358	518	1,218	1,544	1,998	2,498	3,057
NASIONAL	806	1,902	2,350	3,124	4,081	7,957	9,897	12,605	15,684	19,427

Hingga akhir tahun 2032 kebutuhan BTS untuk lebar pita 15 Mhz adalah sebanyak 26.033 sementara untuk lebar pita 20 Mhz, dibutuhkan sebanyak 19.427 BTS. Terlihat untuk penggunaan lebar pita yg lebih besar, kebutuhan jumlah BTS semakin sedikit. Pada lebar pita 15 MHz, kebutuhan BTS sampai dengan tiga tahun pertama implementasi 5G kebutuhan jumlah BTS mengacu pada jumlah BTS hasil perhitungan *Coverage Dimensioning*. Pada tahun keempat, mengingat kebutuhan trafik data meningkat pesat, kebutuhan BTS 5G mengacu pada perhitungan *Capacity Dimensioning*. Sementara pada lebar pita 20 MHz kebutuhan BTS sampai dengan lima tahun pertama implementasi 5G kebutuhan jumlah BTS sebagian masih mengacu pada jumlah BTS hasil perhitungan *Coverage Dimensioning*. Pada tahun keempat, mengingat kebutuhan trafik data meningkat pesat, kebutuhan BTS 5G mengacu pada perhitungan *Capacity Dimensioning*.

Tabel 16. Biaya Implementasi pada BW 15 MHz (Milyar Rupiah)

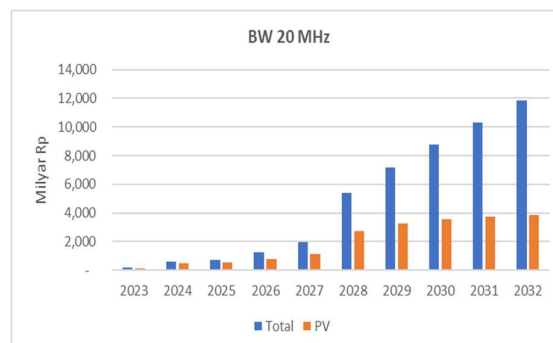
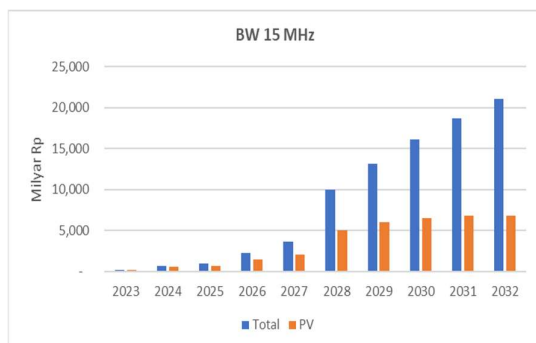
Area	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Sumatera	29	107	164	296	398	945	1,171	1,488	1,840	2,240
Jabodetabek	107	331	345	357	371	476	524	596	699	846
Jawa Barat-Banten	40	125	208	331	466	1,221	1,515	1,926	2,366	2,845
Jateng -Yogya	11	50	129	205	290	747	926	1,175	1,444	1,734
Jatim-Bali-Nusra	25	93	175	277	390	1,006	1,246	1,582	1,941	2,331
Kalimantan-Sulawesi-Maluku-Papua	13	66	151	237	332	871	1,081	1,374	1,690	2,034
TOTAL	224	772	1,172	1,702	2,247	5,267	6,463	8,142	9,979	12,030

3.3. Biaya Implementasi dan Operasional Jaringan 5G

Berdasarkan ketentuan yang telah disampaikan pada pembahasan sebelumnya yang telah disampaikan pada bagian perhitungan *Economic Costing* dan *Cost Reduction* kemudian dapat dihitung biaya keseluruhan (Capex dan Opex) implementasi 5G pada *band* 700 MHz untuk lebar pita 15 MHz dan lebar pita 20 MHz yang ditampilkan pada Tabel 16 dan Tabel 17.

Tabel 17. Biaya Implementasi pada BW 20 MHz (Milyar Rupiah)

Area	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Sumatera	22	77	111	185	242	551	686	872	1,088	1,340
Jabodetabek	104	320	329	336	344	424	460	515	597	718
Jawa Barat-Banten	34	97	110	174	244	661	822	1,048	1,289	1,553
Jateng -Yogya	5	33	68	108	152	405	503	639	787	1,006
Jatim-Bali-Nusra	19	66	94	147	206	546	678	862	1,059	1,286
Kalimantan-Sulawesi-Maluku-Papua	8	33	81	126	176	474	590	750	923	1,114
TOTAL	192	626	793	1,076	1,364	3,061	3,738	4,686	5,744	7,017



Gambar 3. Perbandingan Biaya Total Terhadap Present Value (PV)

Berdasarkan hasil perhitungan nilai PV pada Gambar 3, dapat dihitung akumulasi PV selama sepuluh tahun untuk penggunaan lebar pita 15 MHz didapatkan sebesar 20.549 milyar rupiah, sementara pada penggunaan lebar pita 20 MHz diperoleh akumulasi PV sebesar 12.269 milyar rupiah. Melalui kedua hasil ini dapat disimpulkan biaya implementasi lebih murah untuk penggunaan lebar pita yang semakin lebar. Terhadap penggunaan kedua lebar pita ini, terdapat selisih sebesar 8.280 milyar rupiah selama sepuluh tahun. Melalui pengkondisian nilai Wacc sebesar 13,139%, dengan sebaran sepuluh tahun perencanaan, maka secara perhitungan ekonomi untuk pembayaran, maka dapat dihitung nilai *Cost Reduction* per tahun adalah sebesar 1.457 milyar rupiah. Atas penambahan penggunaan lebar pita dari 15 MHz menjadi 20 MHz, dimana terdapat penambahan lebar pita 2x5 MHz

(FDD), sehingga dapat disimpulkan *Cost Reduction* per MHz adalah sebesar 146 milyar rupiah.

Melalui kajian perhitungan ekonomi yang berbasis pada perhitungan teknis kebutuhan jaringan untuk implementasi layanan teknologi seluler 5G ini, operator seluler dapat memperhitungkan eligibilitas teknis dan ekonomis dalam berperan dan bersaing dengan operator seluler lain untuk mengimplementasikan layanan 5G pada *band* 700 MHz ini di Indonesia. Sementara di sisi regulator di Indonesia juga bisa menjadikan acuan perhitungan ini sebagai bahan pertimbangan untuk menentukan kelayakan nilai Biaya Hak Penggunaan (BHP) spektrum frekuensi yang optimal untuk tetap menjaga kesehatan operasional dan kelangsungan industri Telekomunikasi di Indonesia.

4. KESIMPULAN

Sampai dengan tahun 2032, diperkirakan terdapat 290,62 juta penduduk Indonesia yang menggunakan perangkat seluler, dimana terdapat sebanyak 65,35 juta pelanggan 5G yang akan dilayani oleh suatu operator seluler dengan estimasi kebutuhan trafik data sebesar $19,287 \times 10^{18}$ Byte. Kebutuhan ini akan dilayani secara proporsional menggunakan *band* 700 MHz sebagai *digital dividen* dengan lebar pita sebesar 2 x 45 MHz pasca ASO. Operator seluler di Indonesia dapat memanfaatkan *band* 700 MHz ini dimulai dari lebar pita minimal 15 MHz (FDD). Untuk menekan biaya, operator seluler dapat menambah lebar pita menjadi 20 MHz. Peningkatan lebar pita berdampak pada pengurangan jumlah BTS, dimana berdasarkan kombinasi dua pendekatan perhitungan *capacity dimensioning* dan *coverage dimensioning*, sampai dengan tahun 2032 diperlukan 26.033 BTS untuk penggunaan lebar pita 15 MHz dan 19.427 BTS untuk penggunaan pita 20 MHz. Pengurangan kebutuhan jumlah BTS ini berdampak juga untuk menekan biaya implementasi selama sepuluh tahun, dimana terdapat selisih biaya dalam PV (*Present Value*) sebesar 8.280 milyar rupiah lebih murah bila menambahkan lebar pita dari 15 MHz menjadi 20 Mhz. Disamping itu diperoleh besarnya *cost reduction* atas penambahan lebar pita ini sebesar 1.457 milyar rupiah per tahun dan disimpulkan berdampak pada *Cost Reduction* per MHz sebesar 146 milyar rupiah.

DAFTAR RUJUKAN

- Admaja, A.F.S. (2015). Kajian Awal 5G Indonesia. *Buletin Pos dan Telekomunikasi*, 13 (2), 97-114.
- Bima, dkk. (2019). Analisis Perbandingan Migrasi Jaringan 4G ke 5G dengan Menggunakan Model Konfigurasi 3A dan 7A. *e-Proceeding of Engineering, Telkom University*, 6(2), 3335-3342.
- Kominfo. (2022). Menkominfo Tegaskan Frekuensi 5G di Indonesia Tak Ganggu Penerbangan. Retrieved from https://www.kominfo.go.id/content/detail/39470/siaran-pers-no-14hmkominfo012022-tentang-menkominfo-tegaskan-frekuensi-5g-di-indonesia-tak-ganggu-penerbangan/0/siaran_pers.
- Effendi, dkk. (2020). Proposal on 5G Broadband Radio Frequency Planning in Indonesia. *27th International Conference on Telecommunications (ICT)*, (pp. 1-4).

- Ekawibowo, S. A., M. P. Pamungkas, and R. Hakimi. Analysis of 5G Band Candidates for Initial Deployment in Indonesia. *Proceeding 2018 4th Int. Conf. Wirel. Telemat. ICWT 2018*, (pp. 1–6).
- Esa, R.N., Hikmaturokhman, A., dan Danisya, A.R. (2020). 5G NR Planning at Frequency 3.5 GHz : Study Case in Indonesia Industrial Area. *2nd International Conference on Industrial Electrical and Electronics (ICIEE)*. (pp. 187-193).
- ETSI. (2020, July). *5G NR User Equipment (UE) Radio Access Capabilities. 3GPP, Technical Specification 38.306 version 16.1.0 Release 16*. Retrieved from <https://www.etsi.org>
- GSMA. (2022). *The Mobile Economy Asia Pacific 2022*. Retrieved from <https://www.gsma.com>.
- GSMA. (2023). *The Mobile Economy 2023*. Retrieved from <https://www.gsma.com>.
- Haryanto, Agus Tri. (2021, April 7). *Frekuensi Emas Bisa Dipakai Gelar 5G di Indonesia*. Retrieved from <https://inet.detik.com/telecommunication/d-5523570/frekuensi-emas-bisa-dipakai-gelar-5g-di-indonesia>.
- Haryanto, Agus Tri (2022). *Usai Suntik Mati TV Analog, Kominfo Akan Lelang Frekuensi 700 MHz*. Retrieved from <https://inet.detik.com/law-and-policy/d-6416011/usai-suntik-mati-tv-analog-kominfo-akan-lelang-frekuensi-700-mhz>.
- HKT-GSA-Huawei. (2019, October). *Indoor 5G Scenario Oriented White Paper*. Retrieved from <https://carrier.huawei.com>.
- Kure, Emanuel. (2022, December 6). *Siap-Siap, Tahun Depan Kemenkominfo Lelang Spektrum Frekuensi 5G*. Retrieved from <https://investor.id/it-and-telecommunication/315442/siapsiap-tahun-depan-kemenkominfo-lelang-spektrum-frekuensi-5g>.
- Kusumawati, dkk. (2016). *Kajian Lanjutan 5G Indonesia*. Retrieved from https://balitbangsdm.kominfo.go.id/publikasi_228_3_156.
- Laksana, G.U., Linawati dan Wiharta, D. (2021). Radio Frequency Band 700 MHz Utilization Plan for 5G Technology Implementation in Bali Province. *IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob)*. pp. 167-172.
- Masa, dkk. (2023). Analisis Potensi Teknologi Jaringan 5G Area Sulawesi Selatan. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 5(1), 41-47.
- Pratama, dkk. (2021). Performance evaluation of inter-band carrier aggregation for low-band and mid-band in 5G network. *The 3rd International Conference on Engineering, Technology and Innovative Researches*.

- Pertiwi. (2021). *Kominfo Sebut Frekuensi 2,3 GHz Bukan untuk 5G, Lantas Mana yang Ideal?*. Retrieved from <https://tekno.kompas.com/read/2021/02/03/14120067/>.
- Puslitbang SDPPI. (2018). *Studi Lanjutan 5G Indonesia 2018 Spektrum Outlook dan Use Case untuk Layanan 5G Indonesia*. Retrieved from <https://balitbangsdm.kominfo.go.id/>
- Rachman, I.A., & Krisnadi, I. (2020). *Tinjauan Penerapan Spectrum Sharing untuk Percepatan Penggelaran Jaringan 5G di Indonesia*. Retived form [https://www.academia.edu/44550475/Tinjauan Penerapan Spectrum Sharing untuk Percepatan Penggelaran Jaringan 5G di Indonesia](https://www.academia.edu/44550475/Tinjauan_Penerapan_Spectrum_Sharing_untuk_Percepatan_Penggelaran_Jaringan_5G_di_Indonesia).
- Stefan Zehle. (2019, June 27). *5G spectrum pricing, make or break the 5G momentum*. Retrieved from <https://www.gsma.com>.
- Tomic, I., Bleakley, E., Ivanis, P. (2022). Predictive Capacity Planning for Mobile Networks—ML Supported Prediction of Network Performance and User Experience Evolution. *Electronics Journal*, 11(4), 1-10.
- Ulrich Rehfuess. (2017). *5G for people and things 700 MHz Band as Key To Success for Wide-Area 5G Services*. Retrieved from <https://www.itu.int>.
- ZTE. (2013). *APT 700MHz - Best Choice for Nationwide Coverage*. Retrieved from <https://www.gsma.com>.