

Design Teknis Pemanfaatan Pita Frekuensi Radio 2600 MHz untuk Implementasi 5G di Bali Berbasis Data Okupansi dan Simulasi Seamcat

I Nyoman Suada, I Made Oka Widyantara*, Nyoman Pramaita

Universitas Udayana, Indonesia

Email: ada.snym@gmail.com, oka.widyantara@unud.ac.id*, pramaita@unud.ac.id

Keywords:

Coexistence; Interference probability; Protection distance; ITU-R; FSS.

Abstract

The implementation of 5G in Bali faces spectrum scarcity, while the potential 2600 MHz band remains unreleased due to interference concerns with Fixed Satellite Service (FSS) and a lack of real-data-driven technical studies. This research aims to formulate a technical design for utilizing the 2600 MHz band to support high data demand in Bali's tourism areas and realize the smart island vision. The methodology consists of direct field spectrum monitoring following ITU-R SM.1880-2 standards to analyze real occupancy, followed by coexistence simulations between 5G NR and FSS using SEAMCAT software with the Monte Carlo method to predict interference probability and determine mitigation parameters. The results show that the 2600 MHz band in Bali is completely unoccupied (clear). Co-channel simulation requires an 18 km protection distance to achieve 0% interference probability (PI), making it technically infeasible. However, the adjacent channel scenario with a 20 MHz guard band achieves $PI = 0\%$ at a minimum protection distance of only 32 meters. The recommended allocation design uses TDD mode on band n41 for optimal 190 MHz bandwidth utilization or FDD mode on band n7 with a guard band to ensure FSS coexistence. The novelty of this research lies in integrating real occupancy data from Bali's monitoring station with contextualized SEAMCAT simulations for the 2600 MHz band, producing specific protection distance parameters and block allocation schemes for three operators. This output serves as a technical reference for regulators and operators to accelerate 5G deployment efficiently.

Kata Kunci:

Koeksistensi; Probabilitas interferensi; Jarak proteksi; ITU-R; FSS.

Abstrak

Implementasi 5G di Bali menghadapi keterbatasan spektrum, sementara pita 2600 MHz belum dirilis karena kekhawatiran interferensi dengan layanan Fixed Satellite Service (FSS) dan belum adanya kajian teknis berbasis data riil. Penelitian ini bertujuan merumuskan desain teknis pemanfaatan pita 2600 MHz untuk mendukung kebutuhan data tinggi di kawasan pariwisata Bali serta mewujudkan visi smart island. Metode penelitian meliputi observasi monitoring spektrum langsung di lapangan menggunakan standar ITU-R SM.1880-2 untuk menganalisis okupansi riil, kemudian simulasi koeksistensi antara sistem 5G NR dan FSS menggunakan perangkat lunak SEAMCAT dengan metode Monte Carlo untuk memprediksi probabilitas interferensi dan menentukan parameter mitigasi. Hasil penelitian menunjukkan pita 2600 MHz di Bali teridentifikasi belum terduduki (clear). Pada skenario co-channel, diperlukan jarak proteksi 18 km untuk mencapai probabilitas interferensi (PI) 0%, sehingga secara teknis tidak layak. Sebaliknya, pada skenario kanal bersebelahan dengan guard band 20 MHz,

koeksistensi layak dilakukan tanpa interferensi ($PI=0\%$) pada jarak proteksi minimum 32 meter. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi data okupansi riil dari stasiun monitor Bali dengan simulasi SEAMCAT yang kontekstual untuk pita 2600 MHz, menghasilkan parameter jarak proteksi spesifik dan skema alokasi blok untuk tiga operator. Luaran penelitian ini berupa desain alokasi yang direkomendasikan menggunakan mode TDD pada band n41 untuk pemanfaatan bandwidth optimal 190 MHz, atau mode FDD pada band n7 dengan guard band untuk menjamin koeksistensi dengan layanan satelit, yang siap menjadi acuan teknis bagi regulator dan operator.

PENDAHULUAN

Spektrum frekuensi radio merupakan sumber daya terbatas yang memainkan peran penting dalam komunikasi modern. Dalam era digital yang serba cepat ini, pemanfaatan spektrum frekuensi radio yang optimal bukan hanya sebuah kebutuhan, tetapi juga sebuah keharusan untuk mendukung perkembangan teknologi dan konektivitas global. Dari telekomunikasi seluler, penyiaran, hingga Internet of Things (IoT), hampir setiap aspek kehidupan bergantung pada penggunaan frekuensi radio (D. J. I. Digital, 2025; Hary, 2021). Sebagai generasi kelima dari jaringan telekomunikasi seluler, 5G tidak hanya merupakan evolusi dari pendahulunya 4G, tetapi juga revolusi yang membuka jalan bagi transformasi digital di berbagai sektor dengan kecepatan, kapasitas, dan latensi yang sangat ditingkatkan (Sugiyatno et al., 2023).

GSMA menekankan bahwa 5G akan membutuhkan jumlah spektrum yang jauh lebih besar dibandingkan generasi sebelumnya, dan alokasi spektrum yang selaras di berbagai negara akan menciptakan skala ekonomi serta menurunkan biaya perangkat (GSMA, 2020). Konferensi Radio Komunikasi Dunia 2023 (WRC-23) mengidentifikasi pita 2,6 GHz untuk High-Altitude Platform Stations (HIPS) sebagai stasiun basis IMT yang dapat memperluas konektivitas broadband di daerah terpencil (Union, 2024). Di Bali, kebutuhan para penyelenggara seluler untuk segera mengimplementasikan layanan 5G cukup tinggi, baik untuk Enhanced Mobile Broadband (eMBB) maupun layanan IoT dan Smart City. Saat ini beberapa operator telah menyelenggarakan layanan 5G namun masih pada pita frekuensi eksisting (1800, 2100, dan 2300 MHz) dengan coverage dan kapasitas yang sangat terbatas karena masih berbagi spektrum dengan layanan 2G dan 4G (Al-Jumaily et al., 2023; ITU-R, 2017; Nur et al., 2023; Seen et al., 2024).

Namun, upaya optimalisasi menuju pemanfaatan penuh pita 2600 MHz sebagai backbone utama 5G di Bali masih menghadapi beberapa tantangan krusial (Bengawan et al., 2020; ITU-R, 2015, 2021; Union, 2023). Hingga saat ini belum ada kajian teknis komprehensif mengenai pemanfaatan pita 2600 MHz untuk 5G yang didasarkan pada data okupansi spektrum frekuensi radio (SFR) riil di Bali (Gede, 2021; Union, 2015a). Aspek koeksistensi antara jaringan 5G yang akan datang dengan layanan Fixed Satellite Service (FSS) yang masih beroperasi pada pita adjacent (2520–2670 MHz) oleh PT Media Citra Indostar belum pernah disimulasikan secara mendetail dalam konteks Indonesia khususnya Bali (3GPP, 2013; International, 2024; Space, 2024; Union, 2025). Ancaman hukum adanya gugatan dari pengguna eksisting BSS di Pengadilan Tata Usaha Negara (PTUN) menambah dimensi kompleksitas yang tidak ditemukan dalam studi pada pita frekuensi lainnya (Jakarta, 2024).

Penelitian-penelitian terkait koeksistensi 5G dan satelit telah dilakukan, namun sebagian besar berfokus pada pita C-Band (3,5 GHz). Menghitung separation distance minimum antara stasiun bumi FSS dan sel 5G pada C-Band, menyimpulkan bahwa saturasi pada LNB FSS dapat dihindari dengan mengurangi daya pancar BTS 5G (Lagunas et al., 2020; Setiyo et al., 2020). Software SEAMCAT dengan model propagasi ITU-R P.452 untuk menganalisis koeksistensi 5G dan satelit pada frekuensi 3,5 GHz, merekomendasikan guard band minimal 20 MHz dan mengkonfirmasi bahwa jaringan 5G dan FSS pada pita 3,4–3,8 GHz dapat beroperasi secara koeksisten dengan penataan ulang (refarming) C-Band (Astawa et al., 2021; Hikmaturokhman et al., 2024; Novia, 2021).

Di wilayah Bali telah melakukan studi pemanfaatan pita 700 MHz untuk 5G dan secara eksplisit merekomendasikan perlunya studi lanjutan pada pita menengah seperti 2,6 GHz. Penelitian untuk menganalisis karakteristik propagasi sinyal LTE pada frekuensi 2,6 GHz di lingkungan urban dan suburban Denpasar, menemukan bahwa model path loss standar tidak memberikan akurasi yang memadai sehingga diperlukan kalibrasi lokal (Alfin et al., 2022; Kurniawan et al., 2022; Susila & Wirayudi, 2023). Evaluasi spektrum untuk pita 2600 MHz, 3500 MHz, 26 GHz, dan 28 GHz di Indonesia, memberikan fondasi teknokonomi untuk desain alokasi blok frekuensi (Therdpong et al., 2023). Thailand menunjukkan bahwa pita 2600 MHz berhasil diimplementasikan dengan sangat baik di kawasan wisata ikonik seperti The Grand Palace dan Wat Arun, membuktikan bahwa karakteristik mid-band 2600 MHz cocok untuk destinasi pariwisata dunia dengan karakteristik serupa Bali (Huang et al., 2019).

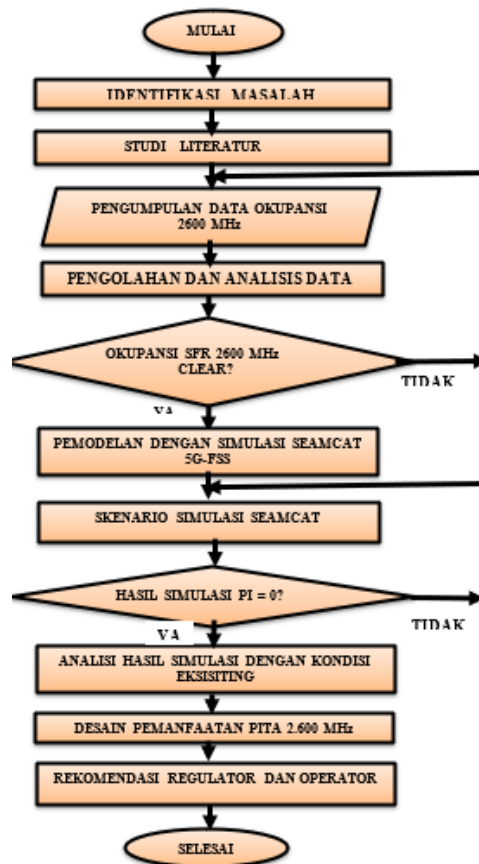
Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi data okupansi spektrum riil dari stasiun monitor Bali (Balmon Denpasar) dengan simulasi koeksistensi 5G-FSS menggunakan SEAMCAT yang kontekstual untuk wilayah Bali. Penelitian ini adalah yang pertama untuk pita 2600 MHz di Indonesia yang menggunakan data okupansi aktual (bukan asumsi teoritis) sebagai dasar analisis. Selain itu, penelitian ini secara eksplisit membandingkan dua skenario koeksistensi (co-channel dan adjacent channel) dan dua mode duplex (TDD n41 dan FDD n7) untuk menghasilkan rekomendasi alokasi blok frekuensi bagi tiga operator yang beroperasi di Bali. Luaran penelitian ini berupa parameter jarak proteksi spesifik dan skema alokasi blok yang siap menjadi acuan teknis bagi regulator (Kementerian Kominfo/Digital) dan operator seluler.

Berdasarkan uraian tersebut, terdapat kesenjangan penelitian (research gap) berupa belum adanya kajian teknis pemanfaatan pita 2600 MHz untuk 5G di Bali yang mengintegrasikan data okupansi spektrum riil hasil monitoring lapangan dengan simulasi koeksistensi 5G-FSS menggunakan SEAMCAT yang kontekstual untuk wilayah Bali. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi tingkat okupansi pita 2600 MHz di Bali berdasarkan data monitoring spektrum, menganalisis probabilitas interferensi antara sistem 5G dan FSS pada skenario co-channel dan adjacent channel menggunakan simulasi Monte Carlo dengan SEAMCAT, dan menghasilkan desain teknis alokasi blok frekuensi 2600 MHz yang optimal untuk implementasi 5G di Bali yang memenuhi persyaratan IMT-2020.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dirancang untuk merumuskan desain teknis pemanfaatan pita frekuensi 2600 MHz untuk implementasi 5G di Bali berdasarkan data okupansi spektrum riil dan simulasi koeksistensi menggunakan SEAMCAT. Metodologi yang digunakan bersifat kuantitatif

dengan pendekatan deskriptif-analitis, mengacu pada standar ITU-R dan 3GPP. Secara keseluruhan, penelitian ini dilaksanakan melalui lima tahapan utama yang saling terkait, seperti diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

A. Tahap I: Identifikasi Masalah dan Studi Literatur

Tahap pertama penelitian ini dimulai dengan identifikasi permasalahan utama berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan. Permasalahan utama yang diidentifikasi meliputi: (1) pita frekuensi 2600 MHz belum dimanfaatkan secara optimal untuk implementasi 5G di Bali meskipun memiliki potensi bandwidth hingga 190 MHz; (2) belum adanya kajian teknis koeksistensi antara sistem 5G NR dan layanan Fixed Satellite Service (FSS) yang berbasis data okupansi spektrum riil di wilayah Bali; (3) adanya ketidakpastian regulasi akibat gugatan hukum dari pengguna eksisting BSS (PT Media Citra Indostar) di Pengadilan Tata Usaha Negara Jakarta yang meminta perpanjangan penggunaan pita 2520–2670 MHz hingga 31 Desember 2028 (PTUN, 2024); serta (4) keterbatasan kapasitas layanan 5G eksisting yang masih berbagi spektrum dengan teknologi 2G dan 4G pada pita 1800 MHz, 2100 MHz, dan 2300 MHz.

Setelah identifikasi masalah, dilakukan studi literatur yang komprehensif untuk memperoleh landasan teori, regulasi, standar teknis, dan penelitian terdahulu yang relevan. Studi literatur mencakup tiga aspek utama. Aspek regulasi meliputi kajian terhadap Peraturan Menteri Kominfo Nomor 12 Tahun 2022 tentang Tabel Alokasi Spektrum Frekuensi Radio Indonesia, Final Acts WRC-23, serta dokumen-dokumen kebijakan spektrum nasional dan

internasional. Aspek standar teknis meliputi kajian terhadap rekomendasi ITU-R dan spesifikasi 3GPP. Aspek penelitian terdahulu meliputi kajian terhadap 19 penelitian sejenis yang telah dipublikasikan, baik dari dalam maupun luar negeri, yang membahas tentang koeksistensi 5G dengan satelit, pemanfaatan pita mid-band untuk 5G, serta simulasi menggunakan SEAMCAT.

Hasil dari tahap studi literatur ini menjadi dasar perumusan tiga pertanyaan penelitian yang akan dijawab, yaitu: (1) bagaimana karakteristik okupansi dan ketersediaan pita 2600 MHz di Bali berdasarkan data monitoring spektrum; (2) bagaimana model koeksistensi antara sistem 5G dan FSS pada pita 2600 MHz dapat dirumuskan melalui simulasi Monte Carlo menggunakan SEAMCAT; dan (3) bagaimana rancangan teknis alokasi blok frekuensi 2600 MHz untuk implementasi 5G di Bali yang memenuhi persyaratan IMT-2020.

B. Tahap II: Pengumpulan dan Analisis Data Okupansi Spektrum

Tahap kedua merupakan pengumpulan data okupansi spektrum frekuensi radio untuk alokasi pita seluler, khususnya pita 2600 MHz (2500–2690 MHz), di wilayah Provinsi Bali. Pengumpulan data dilakukan melalui observasi monitoring spektrum secara langsung di lapangan oleh Balai Monitor Spektrum Frekuensi Radio Kelas I Denpasar, yang merupakan Unit Pelaksana Teknis Monitoring di bawah Direktorat Jenderal Sumber Daya dan Perangkat Pos dan Informatika (DJID), Kementerian Komunikasi dan Digital.

B.1 Instrumen Monitoring

Perangkat yang digunakan dalam kegiatan monitoring spektrum meliputi (Rohde & Schwarz, 2026):

1. Receiver dan Spectrum Analyzer merk Rohde & Schwarz tipe DDF 205 dan DDF 255, yang memiliki kemampuan analisis spektrum real-time dengan rentang frekuensi hingga 6 GHz.
2. Antena monitoring tipe ADD 295 yang merupakan antena log-periodik dengan rentang frekuensi 20 MHz – 3 GHz dan pola radiasi omnidirectional.
3. Software Argus sebagai antarmuka pengguna untuk konfigurasi alat ukur, visualisasi spektrum, dan penyimpanan data hasil pengukuran .

B.2 Prosedur Pengukuran

Prosedur pengukuran okupansi spektrum mengacu pada Spectrum Monitoring Handbook yang diterbitkan oleh ITU-R serta Standar Operasional Prosedur (SOP) internal Balmon Denpasar. Parameter pengukuran untuk pita IMT ditetapkan berdasarkan target Perjanjian Kinerja (PK) observasi monitoring tahun 2026, seperti dirangkum dalam Tabel I (DJID, 2026).

Tabel 1. Parameter Okupansi Spektrum Untuk Pita Imt

No	Subservice	Pita FR (MHz)	Stepwidth R&S	Durasi
9	Trunking *INS14, Downlink Seluler 800 *INS15	806 - 880	100 kHz	30 Menit
10	Downlink Seluler 900 *INS16	925 - 960		
11	International Mobile Telecommunications (IMT) *INS17A	1427 - 1518		
12	Downlink Seluler 1800 *INS19	1805 - 1880	100 kHz	30 Menit
13	Downlink Seluler 2100 *INS21A	2110 - 2170		
14	International Mobile Telecommunications (IMT) *INS22	2170 - 2200		
15	Seluler, Broadband 2.3 GHz *INS24	2300 - 2400		
16	International Mobile Telecommunications (IMT) *INS26	2500 - 2690		

B.3 Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian untuk monitoring spektrum adalah Stasiun Monitor Bangli yang merupakan salah satu stasiun monitoring tetap di bawah pengelolaan Balmon Kelas I Denpasar. Stasiun ini dipilih karena lokasinya yang strategis di ketinggian ± 400 meter di atas permukaan laut, memungkinkan penerimaan sinyal lebih maksimal. Penelitian dilaksanakan dalam kurun waktu Maret 2026.

B.4 Pengolahan Data Okupansi

Data hasil pengukuran dari perangkat Rohde & Schwarz diolah menggunakan aplikasi *report online* (ROL) pada alamat <https://rol.postel.go.id/>. Aplikasi ini secara otomatis menghitung tingkat okupansi setiap pita frekuensi berdasarkan ambang batas yang telah ditentukan, serta menampilkan visualisasi spektrum dalam bentuk grafik daya terhadap frekuensi. Hasil pengolahan kemudian direkapitulasi untuk mengetahui pita mana yang sudah terduduki (*occupied*), yang masih kosong (*vacant*), atau yang digunakan secara *sharing* oleh beberapa teknologi (ITU-R, 2017).

Kriteria keputusan yang digunakan adalah:

1. Terisi penuh: Seluruh atau hampir seluruh rentang frekuensi dalam pita menunjukkan level daya di atas ambang batas.
2. Sharing: Terdapat beberapa kanal yang terisi secara bergantian atau dengan pola tertentu.
3. Clear (kosong): Tidak ada sinyal dengan level daya di atas ambang batas di seluruh rentang frekuensi pita.

C. Tahap III: Pemodelan dan Simulasi dengan SEAMCAT

Tahap ketiga merupakan inti dari analisis teknis penelitian ini, yaitu pemodelan dan simulasi koeksistensi antara sistem 5G NR sebagai *victim system* dan layanan Fixed Satellite Service (FSS) sebagai *interfering system* pada pita frekuensi 2600 MHz. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak SEAMCAT versi 5.4.0 (*Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool*) yang merupakan *open source software* direkomendasikan oleh ITU-R untuk studi kompatibilitas spektrum seperti pada tabel II.

Tabel 2 Nilai Parameter Perhitungan Seamcat

No.	Parameter	5G NR		FSS	
		Nilai	Sumber	Nilai	Sumber
1	Frequency Range (MHz)	2500-2690	(ITU-R, 2023)	2500-2690	(ITU-R, 2023)
2	Frequency (MHz)	2595/2530	(ITU-R, 2023)	2595	(ITU-R, 2023)
3	Bandwidth (MHz)	30	(3GPP, 2025)	27	(ITU, 2025)
4	Tx Power (dBm)	46	(3GPP, 2026)	53 (200 watt)	(Space, 2024)
5	Refsen (dBm)	-95	(3GPP, 2025)		
6	Tx Antenna Type (dBi)	18	(ITU-R, 2013)	61	(ITU-R, 2010)
7	Rx Antenna Type (dBi)	1	(ITU-R, 2024)		
8	Tinggi Tx Antenna (m)	35	(DJID, 2026)	5	(DJID, 2026)
9	Tinggi Rx Antenna (m)	1,5	(ITU-R, 2024)		
10	Sevice radius (Km)	1,5	(DJID, 2026)		
11	Propagation Model	P.452-16	(ITU-R, 2024)	P.452-16	(ITU-R, 2024)
12	SIR (dB)	65	(3GPP, 2024)		
13	ACIR (dB)	-31,54	(3GPP, 2025)		

Penelitian ini menjalankan dua skenario simulasi utama untuk mengevaluasi potensi interferensi yaitu

1. Co-Channel : sistem 5G NR dan FSS menggunakan frekuensi radio yang sama, yaitu 2595 MHz. Tidak ada *guard band* yang diberikan di antara kedua sistem. Tujuan skenario ini adalah untuk mengetahui jarak proteksi minimum yang diperlukan agar kedua sistem dapat beroperasi tanpa saling mengganggu.
2. Adjacent Channel : sistem 5G NR dan FSS dipisahkan dengan *guard band* sebesar 20 MHz. Sistem 5G NR beroperasi pada pita 2500–2560 MHz (uplink) dan 2630–2690 MHz (downlink) sesuai dengan band n7, sementara sistem FSS beroperasi pada pita 2530–2660 MHz. Tujuan skenario ini adalah untuk mengevaluasi apakah pemberian *guard band* dapat mengurangi probabilitas interferensi secara signifikan tanpa memerlukan jarak proteksi yang besar

D. Tahap IV: Analisis Hasil dan Pemetaan Spasial

Setelah simulasi SEAMCAT selesai dijalankan, hasil yang diperoleh dianalisis untuk menjawab pertanyaan penelitian. Analisis dilakukan dalam dua sub-tahap.

D.1 Analisis Probabilitas Interferensi

Hasil simulasi berupa nilai C/I (dalam dB) dan probabilitas interferensi (PI dalam %) untuk setiap variasi jarak antara gNodeB 5G dan stasiun bumi FSS. Nilai $PI = 0\%$ menunjukkan bahwa tidak ada interferensi merugikan pada seluruh *snapshot* yang disimulasikan, sehingga jarak tersebut dianggap aman. Nilai $PI > 0\%$ menunjukkan bahwa pada beberapa *snapshot* terjadi interferensi, sehingga jarak tersebut tidak direkomendasikan.

Kriteria keputusan yang digunakan adalah:

1. $PI = 0\%$: Koeksistensi layak (feasible) pada jarak tersebut.
2. $PI > 0\%$: Koeksistensi tidak layak (infeasible) karena berisiko interferensi.
3. $PI = 100\%$: Interferensi total, sistem victim tidak dapat beroperasi.

D.2 Pemetaan Spasial dengan QGIS

Pemetaan spasial untuk mengetahui berapa banyak site 5G eksisting yang terdampak jika stasiun bumi FSS tetap beroperasi. Pemetaan dilakukan menggunakan perangkat lunak QGIS versi 3.28 dengan langkah-langkah [43]:

1. Import data lokasi site operator seluler (PT Telkomsel, PT Indosat, PT XLS Telecom Sejahtera) di Bali dalam format shapefile (.shp).
2. Import data lokasi stasiun bumi FSS milik Bank Rakyat Indonesia (BRI) yang berlokasi di Denpasar.
3. Buat buffer zone (zona penyangga) dengan radius tertentu ($PI=0\%$) dari stasiun bumi.
4. Hitung jumlah site di dalam buffer zone dengan fungsi "*Select by Location*".
5. Visualisasikan hasil dalam bentuk peta tematik.

E. Tahap V: Perumusan Desain Teknis Alokasi Blok Frekuensi

Tahap kelima merupakan tahap akhir penelitian yang menghasilkan luaran berupa desain teknis alokasi blok frekuensi 2600 MHz untuk implementasi 5G di Bali. Desain ini dirumuskan berdasarkan sintesis dari tiga hasil utama: (1) data okupansi pita 2600 MHz dalam kondisi *clear*; (2) hasil simulasi koeksistensi bahwa skenario co-channel dan adjacent channel dengan guard band 20 MHz; serta (3) kondisi eksisting tiga operator seluler yang beroperasi di Bali.

Desain alokasi mempertimbangkan dua skenario:

1. Skenario TDD (n41): Menggunakan seluruh bandwidth 190 MHz dengan mode TDD, yang memberikan kapasitas maksimum.
2. Skenario FDD (n7): Menggunakan bandwidth 120 MHz (2×60 MHz) dengan mode FDD dan guard band 20 MHz, yang memungkinkan koeksistensi dengan FSS.

Untuk masing-masing skenario, dilakukan pembagian blok frekuensi yang simetris kepada tiga operator dengan mempertimbangkan:

1. Kebutuhan bandwidth minimal untuk 5G NR (3 MHz per operator menurut 3GPP).
2. Efisiensi spektral dan kemampuan infrastruktur eksisting.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Okupansi Spektrum Frekuensi Radio Pita IMT di Bali

Berdasarkan kegiatan monitoring spektrum frekuensi radio yang dilaksanakan oleh Balai Monitor Spektrum Frekuensi Radio Kelas I Denpasar pada periode Maret 2026, diperoleh data okupansi untuk seluruh pita frekuensi alokasi International Mobile Telecommunications (IMT) di Provinsi Bali



Gambar 1: Hasil monitoring pita 806–880 MHz



Gambar 2: Hasil monitoring pita 925–960 MHz



Gambar 3: Hasil monitoring pita 1806–1880 MHz



Gambar 4: Hasil monitoring pita 2100–2170 MHz



Gambar 5: Hasil monitoring pita 2300–2400 MHz



Gambar 6: Hasil monitoring pita 2500–2690 MHz

Berdasarkan okupansi spektrum frekuensi radio pemanfaatan spektrum frekuensi radio pita frekuensi radio pada alokasi pita *low band* dan *mid band* sesuai data okupansi spektrum frekuensi radio seperti pada gambar 8 sampai 12 dapat direkapitulasi seperti pada Tabel IV

Tabel 3. rekapitulasi hasil okupansi dan pemanfaatan pita imt di bali

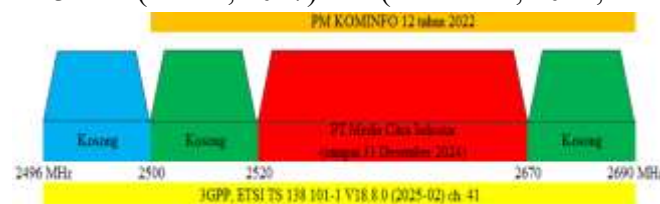
No.	Radio Frequency Band	PT. Telkomsel 2G	4G	5G	PT. Indosat 2G	4G	5G	PT. XLS Telecom Sejahtera 2G	4G	5G
1	800 MHz (FDD)	■	■	■		■	■	0	√	0
2	900 MHz (FDD)	√	0	√	0	√	0	√	√	0
3	1800 MHz (FDD)	√	√	0	√	√	0	√	√	0
4	2100 MHz (FDD)	0	√	0	0	√	√	0	√	0
5	2300 MHz (TDD)	0	√	√	■	■	■	0	√	√
6	2600 MHz	■	■	■	■	■	■		■	■

Berdasarkan Tabel 3, terlihat bahwa seluruh pita low band (800 MHz dan 900 MHz) dan mid-band lainnya (1800 MHz, 2100 MHz, 2300 MHz) sudah terisi penuh oleh layanan 2G,

4G, dan 5G. Meskipun pita 2100 MHz dan 2300 MHz sudah digunakan untuk layanan 5G, kapasitasnya masih sangat terbatas karena harus berbagi spektrum dengan teknologi 4G yang sudah ada. Hal ini menimbulkan urgensi yang tinggi untuk segera mengalokasikan pita 2600 MHz yang masih *clear* sebagai pita *backbone* utama untuk implementasi 5G di Bali, terutama untuk mendukung kebutuhan kapasitas data yang sangat tinggi di kawasan pariwisata seperti Kuta, Seminyak, Sanur, dan Nusa Dua (Institute, 2025; Sector, 2023) dan (D. P. I. Digital, 2026; Institute, 2024; Rohde-Schwarz, 2026; Union, 2010).

Hasil Simulasi Koeksistensi 5G dengan FSS Menggunakan SEAMCAT

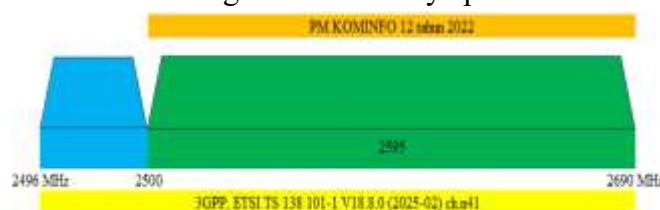
Simulasi koeksistensi antara sistem 5G NR dan layanan Fixed Satellite Service (FSS) pada pita frekuensi 2600 MHz dilakukan untuk mengevaluasi potensi interferensi serta menentukan parameter teknis yang aman bagi kedua layanan untuk beroperasi berdampingan. Simulasi ini menjadi sangat krusial mengingat adanya potensi perpanjangan penggunaan spektrum oleh layanan BSS (Broadcasting Satellite Service) milik PT Media Citra Indostar hingga tahun 2028 berdasarkan gugatan di PTUN Jakarta dengan nomor perkara 474/G/2024/PTUN.JKT (Institute, 2026). Gambar 7 menunjukkan kondisi eksisting alokasi pita frekuensi 2600 MHz di Indonesia berdasarkan Peraturan Menteri Kominfo Nomor 12 Tahun 2022 dan standar 3GPP (Union, 2017) dan (Indonesia, 2022; Widiyanti et al., 2023).



Gambar 7: Alokasi pita 2600 MHz menurut Permen Kominfo No. 12/2022 dan standar 3GPP. Berdasarkan Gambar 7, standar 3GPP untuk band n7 mengalokasikan 2500–2570 MHz untuk uplink dan 2620–2690 MHz untuk downlink dengan total bandwidth 140 MHz. Sementara itu, kondisi eksisting di Indonesia menunjukkan bahwa pita 2500–2520 MHz (uplink) dan 2670–2690 MHz (downlink) dengan total bandwidth 40 MHz masih kosong. Perbedaan nilai bandwidth ini kurang ideal untuk penerapan teknologi 5G NR yang optimal, sehingga diperlukan analisis koeksistensi untuk menentukan skenario terbaik.

G.1 Skenario Co-Channel (Frekuensi Sama)

Pada skenario co-channel, sistem 5G NR dan FSS menggunakan frekuensi radio yang sama yaitu 2595 MHz. Tidak ada *guard band* yang diberikan di antara kedua sistem. Parameter simulasi untuk skenario ini telah dirangkum sebelumnya pada Tabel III di bagian Metodologi.



Gambar 8: Ilustrasi skenario co-channel dengan frekuensi 2595 MHz

Simulasi dijalankan untuk variasi jarak antara gNodeB 5G (victim receiver) dan stasiun bumi FSS (interfering transmitter) dari 10 meter hingga 19.000 meter (19 km). Setiap variasi

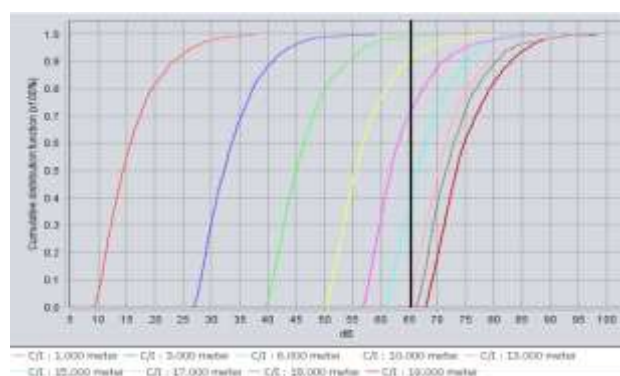
jarak disimulasikan dengan 1.000 *snapshot* menggunakan metode Monte Carlo. Tabel V menyajikan hasil simulasi untuk skenario co-channel

Tabel 4 hasil simulasi seamcat untuk skenario co-channel

No	Jarak FSS ke 5G (m)	dRSS (dBm)	iRss (dBm)	C/I (dB)	PI (%)
1	10	-36,62	-7,88	-28,74	100
2	1000	-37,15	-44,49	7,34	100
3	3000	-37,12	-70,63	33,51	100
4	6000	-36,9	-83,32	46,42	99,1
5	10000	-36,93	-93,98	57,05	91,1
6	13000	-37,1	-100,5	63,42	70,4
7	15000	-36,98	-104,6	67,63	37,5
8	17000	-36,73	-108,3	71,57	2,4
9	18000	-37	-109,9	72,94	0
10	19000	-36,65	-111,5	74,89	0

Berdasarkan Tabel 4, pada jarak 10 meter (skenario terburuk di mana stasiun bumi FSS berada sangat dekat dengan gNodeB 5G), nilai iRSS mencapai -7,88 dBm yang sangat tinggi sehingga C/I bernilai negatif (-28,74 dB) dan PI = 100% (interferensi total). Sistem 5G tidak dapat beroperasi sama sekali pada jarak ini.

Pada jarak 15.000 meter (15 km), C/I mencapai 67,63 dB yang secara numerik sudah melebihi kriteria 65 dB. Namun, nilai PI masih menunjukkan angka 37,5%. Hal ini terjadi karena PI adalah hasil dari simulasi Monte Carlo yang menjalankan ribuan *snapshot* dengan variasi posisi perangkat, arah antenna, dan kondisi propagasi. Meskipun secara rata-rata C/I sudah baik, masih ada 37,5% *snapshot* di mana nilai C/I jatuh di bawah 65 dB akibat kondisi propagasi yang tidak menguntungkan (misalnya terjadi *ducting* atmosferik yang memperkuat sinyal interferensi). Pada jarak 18.000 meter (18 km), nilai PI mencapai 0% untuk pertama kalinya. Ini berarti bahwa dari 1.000 *snapshot* yang disimulasikan, tidak satupun yang mengalami interferensi merugikan. Jarak 18 km ini merupakan jarak proteksi minimum untuk skenario co-channel.

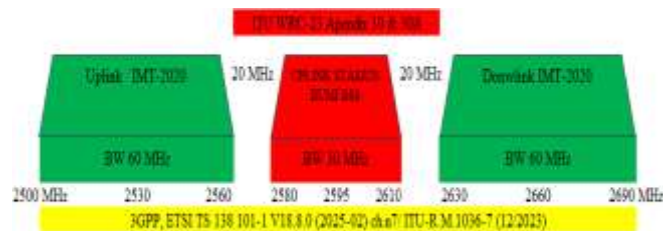


Gambar 9 Grafik C/I terhadap Cumulative Distribution Function (CDF)

Pada Gambar 15, kurva berwarna biru (jarak 3 km) menunjukkan distribusi C/I yang hampir seluruhnya berada di bawah 40 dB. Kurva berwarna hijau (jarak 15 km) menunjukkan perbaikan signifikan, namun masih terdapat ekor distribusi (*tail distribution*) yang berada di bawah 65 dB. Kurva berwarna merah (jarak 18 km) menunjukkan seluruh distribusi C/I berada di atas 65 dB, yang mengkonfirmasi PI = 0%.

G.2 Skenario Adjacent Channel

Pada skenario adjacent channel, sistem 5G NR dan FSS dipisahkan dengan guard band sebesar 20 MHz. Sistem 5G NR beroperasi pada pita 2500–2560 MHz (uplink) dan 2630–2690 MHz (downlink) sesuai dengan band n7, sementara sistem FSS beroperasi pada pita 2530–2660 MHz. Parameter ACIR yang digunakan adalah -31,54 dB berdasarkan standar 3GPP. Gambar 16 mengilustrasikan skenario simulasi adjacent channel (Administrations, 2016).



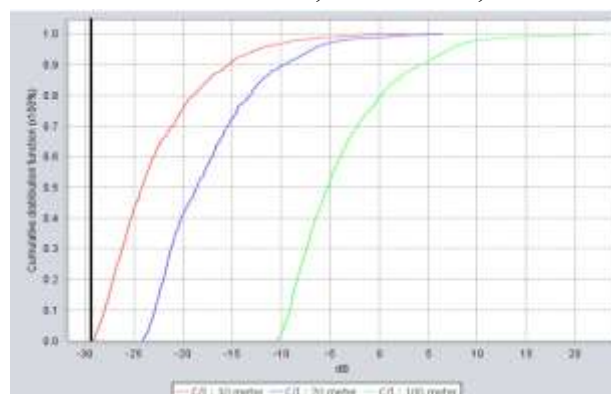
Gambar 10: Ilustrasi skenario adjacent channel dengan guard band 20 MHz

Simulasi dijalankan untuk variasi jarak dari 10 meter hingga 100 meter. Tabel VII menyajikan hasil simulasi untuk skenario adjacent channel.

Tabel 5 hasil simulasi seamcat skenario adjacent channel

No	Jarak FSS ke 5G (m)	dRSS (dBm)	iRSS (dBm)	C/I (dB)	PI (%)
1	10	-36,87	-14,08	-22,79	0
2	20	-36,65	-19,27	-17,38	0
3	100	-36,73	-32,95	-3,78	0

Hasil pada Tabel 5 menunjukkan hal yang sangat berbeda dari skenario co-channel. Nilai C/I pada semua jarak masih negatif (antara -22,79 dB hingga -3,78 dB), nilai probabilitas interferensi (PI) tetap 0% pada seluruh variasi jarak yang diuji. Selama nilai C/I berada di atas ACIR (threshold), sistem dianggap aman. Dalam simulasi ini, nilai C/I terkecil sekalipun (-22,79 dB) masih memenuhi kriteria karena $-22,79 \text{ dB} > -31,54 \text{ dB}$.



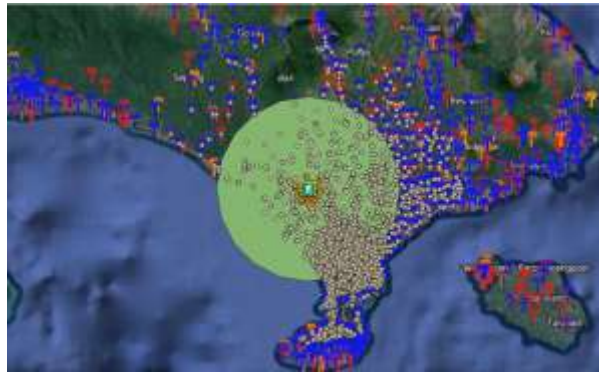
Gambar 11 menampilkan kurva CDF untuk skenario adjacent channel

Implikasi dari hasil ini adalah bahwa koeksistensi pada skenario adjacent channel dengan guard band 20 MHz sangat layak untuk diimplementasikan. Bahkan pada jarak terdekat sekalipun (10 meter antara gNodeB 5G dan stasiun bumi FSS), tidak terjadi interferensi

merugikan. Dalam praktiknya, jarak minimum antara site operator seluler eksisting dan stasiun bumi FSS di Bali adalah 32 meter sehingga kondisi ini sangat aman.

G.3 Pemetaan Dampak Interferensi dengan QGIS

Pada skenario co-channel yang menghasilkan jarak proteksi 18 km, dilakukan pemetaan spasial untuk mengetahui berapa banyak site 5G eksisting yang berpotensi terganggu jika stasiun bumi FSS tetap beroperasi. Pemetaan dilakukan menggunakan perangkat lunak QGIS versi 3.28 dengan data lokasi site operator seluler di Bali (PT Telkomsel, PT Indosat, PT XLS Telecom Sejahtera) dan lokasi stasiun bumi FSS milik Bank Rakyat Indonesia (BRI) yang berlokasi di Tabanan.



Gambar 12: Hasil pemetaan site operator seluler dalam radius 18 km dari stasiun bumi FSS BRI (Tabanan)

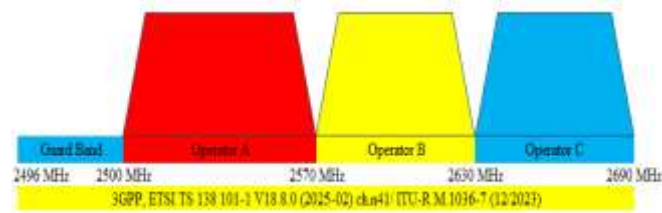
Berdasarkan Gambar 12, jumlah site yang berada di dalam *buffer zone* radius 18 km dari stasiun bumi FSS adalah 4.125 site. Site-site ini mencakup hampir seluruh wilayah perkotaan Denpasar, Badung, Gianyar, dan sebagian Tabanan. Jika koeksistensi co-channel dipaksakan, ribuan site tersebut harus direlokasi atau stasiun bumi FSS harus dipindahkan ke lokasi yang jauh dari pemukiman padat site operator, yang secara teknis dan ekonomis sangat tidak layak. Sebaliknya, pada skenario adjacent channel, tidak ada site yang terganggu karena jarak proteksi minimum (32 meter) jauh lebih kecil dibandingkan jarak aktual terdekat antara site operator dan stasiun bumi FSS.

H. Rancangan Teknis Alokasi Blok Frekuensi 2600 MHz 5G

Berdasarkan analisis data okupansi pita 2600 MHz (clear) dan hasil simulasi koeksistensi, dirumuskan dua alternatif desain teknis alokasi blok frekuensi 2600 MHz untuk implementasi 5G di Bali.

H.1 Mode TDD (Band n41) Tanpa Koeksistensi dengan FSS

Alternatif pertama menggunakan mode TDD (Time Division Duplex) pada band n41 dengan rentang frekuensi 2500–2690 MHz (total bandwidth 190 MHz). Skema ini memberikan kapasitas maksimum karena seluruh bandwidth dapat dimanfaatkan secara fleksibel untuk uplink dan downlink dengan rasio yang dapat diatur. Namun, kekurangannya adalah tidak dapat koeksistensi dengan layanan FSS karena menggunakan frekuensi yang tumpang tindih.



Gambar 13: Alokasi blok frekuensi 2600 MHz mode TDD untuk tiga operator.

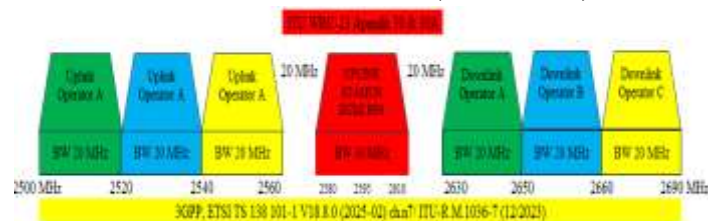
Pembagian blok frekuensi untuk tiga operator (PT Telkomsel, PT Indosat, PT XLS Telecom Sejahtera) adalah sebagai berikut:

1. Operator A: 2500–2570 MHz (bandwidth 70 MHz)
2. Operator B: 2570–2630 MHz (bandwidth 60 MHz)
3. Operator C: 2630–2690 MHz (bandwidth 60 MHz)

Total bandwidth yang teralokasi adalah 190 MHz. Skema ini ideal jika tidak ada lagi layanan FSS yang beroperasi di pita 2520–2670 MHz setelah tahun 2025. Namun, mengingat adanya gugatan PTUN yang berpotensi memperpanjang operasi FSS hingga 2028, alternatif ini memiliki risiko hukum yang tinggi.

H.2 Mode FDD (Band n7) Koeksistensi dengan FSS

Alternatif kedua menggunakan mode FDD (Frequency Division Duplex) pada band n7 dengan rentang frekuensi 2500–2560 MHz (uplink) dan 2630–2690 MHz (downlink), serta menyediakan guard band 20 MHz antara pita 5G dan pita FSS (2530–2660 MHz). Total bandwidth yang tersedia untuk 5G adalah 120 MHz (2×60 MHz).



Gambar 14: Alokasi blok frekuensi 2600 MHz mode FDD dengan guard band 20 MHz untuk tiga operator.

Pembagian blok frekuensi untuk tiga operator adalah sebagai berikut:

Uplink (2500–2560 MHz):

1. Operator A: 2500–2520 MHz (bandwidth 20 MHz)
2. Operator B: 2520–2540 MHz (bandwidth 20 MHz)
3. Operator C: 2540–2560 MHz (bandwidth 20 MHz)

Downlink (2630–2690 MHz):

1. Operator A: 2630–2650 MHz (bandwidth 20 MHz)
2. Operator B: 2650–2670 MHz (bandwidth 20 MHz)
3. Operator C: 2670–2690 MHz (bandwidth 20 MHz)

Guard Band (2560–2580 MHz dan 2610–2630 MHz): Masing-masing 20 MHz (total 40 MHz) untuk memisahkan pita 5G dari pita FSS (2580–2610 MHz).

Skema ini memiliki keunggulan utama berupa kemampuan koeksistensi dengan layanan FSS tanpa interferensi (PI = 0% pada jarak proteksi 32 meter) serta kepastian hukum karena

tidak melanggar hak penggunaan spektrum oleh pengguna eksisting selama masa transisi. Kekurangannya adalah bandwidth yang tersedia untuk setiap operator hanya 20 MHz (untuk uplink dan downlink masing-masing), lebih kecil dibandingkan alternatif TDD.

H.3 Rekomendasi dan Kesesuaian dengan Use Case IMT-2020

Berdasarkan analisis komparatif kedua alternatif, penelitian ini merekomendasikan untuk jangka pendek (2025–2028), selama masih ada ketidakpastian hukum terkait operasi FSS di pita 2520–2670 MHz, sebaiknya diterapkan Alternatif 2 (FDD n7 dengan guard band 20 MHz). Skema ini memberikan kepastian hukum dan teknis karena koeksistensi dengan FSS terbukti layak ($PI = 0\%$). Bandwidth 20 MHz per operator masih cukup untuk mendukung layanan eMBB dasar dengan kecepatan hingga 200–300 Mbps, serta layanan mMTC untuk IoT di kawasan wisata.

Untuk jangka panjang (setelah 2028 atau setelah FSS migrasi), direkomendasikan beralih ke Alternatif 1 (TDD n41 dengan bandwidth penuh 190 MHz). Skema ini akan memberikan kapasitas yang jauh lebih besar (hingga 1–2 Gbps per operator) dan sangat ideal untuk mendukung ketiga pilar 5G: eMBB untuk layanan multimedia berat (streaming 8K, VR/AR tourism), mMTC untuk smart city dan smart tourism, serta URLLC untuk aplikasi kritis seperti transportasi otonom dan telemedicine.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil monitoring spektrum frekuensi radio oleh Balai Monitor Spektrum Frekuensi Radio (Balmon) Kelas I Denpasar pada periode Januari 2024 hingga Maret 2026, pita frekuensi 2600 MHz (2500–2690 MHz) di Provinsi Bali teridentifikasi dalam kondisi belum terduduki (clear). Tidak terdeteksi adanya sinyal dengan level daya di atas ambang batas (noise floor) di seluruh rentang frekuensi 2500–2690 MHz. Kondisi ini sangat berbeda dengan pita frekuensi seluler lainnya (800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz, dan 2300 MHz) yang sudah terisi penuh oleh teknologi 2G, 4G, dan 5G secara sharing. Dengan demikian, pita 2600 MHz membuka peluang penuh bagi alokasi baru layanan IMT-2020 (5G) tanpa perlu melakukan refarming atau migrasi pengguna eksisting terlebih dahulu.

Pada co-channel kedua sistem menggunakan frekuensi yang sama (2595 MHz) tanpa guard band. Hasil simulasi menunjukkan bahwa jarak proteksi minimum yang diperlukan untuk mencapai probabilitas interferensi $PI = 0\%$ adalah 18 km. Pada jarak tersebut, nilai C/I mencapai 72,94 dB, melebihi kriteria interferensi 65 dB. Namun, jarak 18 km ini sangat sulit dipenuhi di Bali karena kepadatan site operator seluler yang tinggi. Pemetaan dengan QGIS menunjukkan bahwa dalam radius 18 km dari stasiun bumi FSS BRI Denpasar terdapat 4.125 site operator yang berpotensi terganggu. Dengan demikian, koeksistensi pada skenario co-channel secara teknis tidak layak untuk diimplementasikan sedangkan pada skenario adjacent channel kedua sistem dipisahkan dengan guard band sebesar 20 MHz. Sistem 5G NR beroperasi pada pita 2500–2560 MHz (uplink) dan 2630–2690 MHz (downlink) sesuai band n7, sementara FSS beroperasi pada pita 2580–2610 MHz. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada seluruh variasi jarak yang diuji (10 m, 20 m, 100 m), nilai probabilitas interferensi $PI = 0\%$. Bahkan pada jarak terdekat sekalipun (10 meter), tidak terjadi interferensi merugikan karena kriteria ACIR (-31,54 dB) terpenuhi. Dalam praktiknya, jarak minimum aktual antara site operator seluler eksisting dan stasiun bumi FSS di Bali adalah 32 meter, sehingga kondisi

ini sangat aman. Dengan demikian, koeksistensi pada skenario adjacent channel dengan guard band 20 MHz secara teknis sangat layak untuk diimplementasikan.

Skenario Alokasi: pembagian blok yang simetris atau sesuai kebutuhan untuk tiga operator seluler yang beroperasi di Bali (PT Telkomsel, PT Indosat, PT XLS Telecom Sejahtera) guna memaksimalkan efisiensi spektrum dan mendukung roadmap transformasi digital menuju smart island.

DAFTAR PUSTAKA

- 3GPP. (2013). *TR 37.840: Study of Radio Frequency (RF) and Electromagnetic Compatibility (EMC) requirements for Active Antenna System (AAS) base station (Technical Report version 2.0.0, Release 12)*. 3rd Generation Partnership Project.
- Administrations, E. C. of P. and T. (2016). *SEAMCAT handbook* (2nd ed.). Electronic Communications Committee (ECC).
- Al-Jumaily, A., Sali, A., Jiménez, V. P. G., Lagunas, E., Natrah, F. M. I., Fontán, F. P., Hussein, Y. S., Singh, M. J., Samat, F., & Aljumaily, H. (2023). Evaluation of 5G and fixed-satellite service earth station (FSS-ES) downlink interference based on artificial neural network learning models (ANN-LMS). *Sensors*, 23(13), 6175. <https://doi.org/10.3390/s23136175>
- Alfin, H., Kalamullah, R., & Muhammad, S. (2022). Indonesian spectrum valuation of 5G mobile technology at 2600 MHz, 3500 MHz, and 26 GHz and 28 GHz. *Journal of Communications*, 17(4).
- Americas, 5G. (2017). *5G services and use cases*. 5G Americas.
- Astawa, I. G. P., Widyantara, M. O., & Astawa, I. N. G. A. (2021). Path loss analysis for 2.6 GHz LTE network in urban and suburban areas of Denpasar, Bali. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 11(4), 3045–3054. <https://doi.org/10.11591/ijece.v11i4.pp3045-3054>
- Bengawan, A., Taufik, B., & Muhandanus. (2020). Analisa path loss radio jaringan 5G frekuensi high band 26 GHz dengan model 3GPP ETSI. *Jurnal Fokus Elektroda*, 5(1), 5–10.
- Digital, D. J. I. (2025). *Laporan kinerja Direktorat Jenderal Infrastruktur Digital Kementerian Komunikasi dan Digital tahun 2024*. Kementerian Komunikasi dan Digital Republik Indonesia.
- Digital, D. P. I. (2026). *Nota Dinas Nomor 224/DJID.6/PR.04.01/02/2026 tentang penyampaian perjanjian kinerja (PK) UPT bidang monitoring dan pengendalian spektrum frekuensi radio, perangkat digital dan kualitas layanan telekomunikasi tahun 2026*. Kementerian Komunikasi dan Digital.
- Electronics, S. (2015). *5G vision: Exploring the next generation of mobile communication*. Samsung Electronics. <https://www.samsung.com/global/business/networks/insights/white-papers/>
- Gede, U. L. (2021). *Radio frequency band 700 MHz utilization plan for 5G technology implementation in Bali Province*. <https://doi.org/10.1109/APWiMob51111.2021.9435224>
- GSMA. (2020). *5G spectrum: GSMA public policy position*. GSMA Public Policy.
- Hary, B. (2021). *Rencana strategis Badan Penelitian dan Pengembangan SDM 2020-2024*.

BPSDM Kementerian Komunikasi dan Informatika.

- Hikmaturokhman, A., Cahyadi, E. F., Fitriana, G. F., Adriansyah, N. M., & Ariansyah, K. (2024). Spectrum management and interference mitigation between 5G and satellite services on extended C-band and mmWave: Enhancing national revenue. *Telecommunication Systems*, 88, 29. <https://doi.org/10.1007/s11235-025-01261-7>
- Huang, T., Yang, W., Wu, J., Ma, J., Zhang, X., & Zhang, D. (2019). A survey on green 6G network: Architecture and technologies. *IEEE Access*, 7, 175758–175768. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2957648>
- Indonesia, K. K. dan I. R. (2022). Peraturan Menteri Komunikasi dan Informatika Republik Indonesia Nomor 12 Tahun 2022 tentang Tabel Alokasi Spektrum Frekuensi Radio Indonesia. In *Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2022*.
- Institute, E. T. S. (2024). *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Radio Frequency (RF) system scenarios (3GPP TR 25.942 version 18.0.0 Release 18)*. ETSI.
- Institute, E. T. S. (2025). *5G; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 standalone (ETSI TS 138 101-1 V18.8.0)*. ETSI.
- Institute, E. T. S. (2026). *5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (ETSI TS 138 104 V19.3.0)*. ETSI.
- International, C. P. I. (2024). *Ka-Band outdoor travelling wave tube amplifiers (TWTA)*. Digisat. <https://www.digisat.org/cpi-satcom-ka-band-outdoor-twta/>
- ITU-R. (2015). *Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz (Recommendation ITU-R P.452-16)*. ITU.
- ITU-R. (2017). *Monte Carlo simulation methodology for the use in sharing and compatibility studies between different radio services or systems (Recommendation ITU-R SM.2028-2)*. ITU.
- ITU-R. (2021). *Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz (Recommendation ITU-R P.452-17)*. ITU.
- Jakarta, P. T. U. N. (2024). *Berkas perkara nomor 474/G/2024/PTUNJKT: PT Mediacitra Indostar (Penggugat) melawan Menteri Komunikasi dan Informatika Republik Indonesia dkk. (Tergugat)*. Pengadilan Tata Usaha Negara Jakarta.
- Kurniawan, A., Liawatimena, S., & Fahmi, A. (2022). Modified extended Hatta model for 5G NR 2.6 GHz propagation prediction in Indonesian urban environment. *IEEE Access*, 10, 45678–45691. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3174567>
- Lagunas, E., Tsinos, C. G., Sharma, S. K., & Chatzinotas, S. (2020). 5G cellular and fixed satellite service spectrum coexistence in C-band. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2985012>
- Novia, P. A. (2021). Analisis perancangan koeksistensi jaringan 5G dan satelit pada frekuensi radio 3,5 GHz. *Buletin Pos Dan Telekomunikasi*. <https://doi.org/10.17933/bpostel.2015.130201>
- Nur, I. A., Khoirun, N., & Alfin, H. (2023). Performance analysis of relay aided on device to device communications underlay 5G cellular network. *Buletin Pos Dan Telekomunikasi*. <https://doi.org/10.17933/bpostel.v21i1.361>
- Rohde-Schwarz. (2026). *R&S test and measurement product portfolio*. <https://www.rohde->

- schwarz.com/cz/products/test-and-measurement_229579.html
- Sector, I. T. U. R. (2023). *Frequency arrangements for terrestrial component of International Mobile Telecommunications (IMT)-2020 and beyond systems (Recommendation ITU-R M.1036-7)*. ITU.
- Seen, T. R. N., Zoheb, H., Rob, S., Vikram, R. A., & Vijay, K. S. (2024). *Context-aware spectrum coexistence of terrestrial beyond 5G networks in satellite bands*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.04447>
- Setiyo, B., Lukman, M. S., Freddy, A. S., Novia, P. A., & Fajar, R. (2020). *Coexistence analysis of 5G and satellite networks at 3.5 GHz frequency*. <https://doi.org/10.1109/Comnetsat50391.2020.9328989>
- Space, D. (2024). *Ground stations*. <https://www.dhruvaspace.com/ground-stations>
- Sugiyatno, Purnomo, S., & Ibrahim, F. E. (2023). Pengaruh teknologi 5G pada evolusi komunikasi: Sebuah kajian terhadap perkembangan dan implikasinya di bidang sains. *Nucleus*, 4(2). <https://doi.org/10.37010/nuc.v4i2.1448>
- Susila, I. M. D., & Wirayudi, P. (2023). Comparative analysis of propagation models for 2.6 GHz wireless communication in mountainous areas of Bali. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 29(1), 123–135. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v29.i1.pp123-135>
- Therdpong, D., Kasidis, A., & Patsita, S. (2023). *Exploring 5G data rates: An analysis of Thailand's iconic landmarks - The Grand Palace and Wat Arun*. <https://doi.org/10.1109/ICDATE58146.2023.10248488>
- Union, I. T. (2010). *Reference radiation pattern of earth station antennas in the fixed-satellite service for use in coordination and interference assessment in the frequency range from 2 to 31 GHz (Recommendation ITU-R S.465-6)*. ITU.
- Union, I. T. (2015a). *Handbook on national spectrum management*. ITU.
- Union, I. T. (2015b). *IMT vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond (Recommendation ITU-R M.2083-0)*. ITU.
- Union, I. T. (2017). *Spectrum occupancy measurement and evaluation (Recommendation ITU-R SM.1880-2)*. ITU.
- Union, I. T. (2023). *Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 100 MHz (Recommendation ITU-R P.452-18)*. ITU.
- Union, I. T. (2024). *Final acts of the World Radiocommunication Conference 2023 (WRC-23) (Document R-ACT-WRC.16-2024-PDF-E)*. Radiocommunication Sector, ITU. <https://www.itu.int/pub/R-ACT-WRC.16-2024>
- Union, I. T. (2025). Space plans overview (Appendices 30, 30A, 30B). *ITU Regional Radiocommunication Seminar (RRS-25-Africa)*.
- Widiyantari, A., Pribadi, W., & Wiratama, D. B. S. (2023). *Modul seri 2: Pemanfaatan aplikasi pengolah data berbasis open source panduan instalasi dan pengantar*.