

Reproduksi Stackelberg Game untuk Efisiensi Energi Multi-carrier 5G Sub-6 GHz

Reproducing Stackelberg Game for Energy-Efficient Multi-carrier 5G Sub-6 GHz Power Control

Ega Rizki¹, Usman Sartoyo², Arini Retnoningsih³

^{1,2,3} Teknik Elektro, Universitas Kebangsaan Republik Indonesia

^{1,2,3} Jl. Pelajar Pejuang 45 No. 8 Lengkong, Kota Bandung, Indonesia

Email: *¹egarizki2003@gmail.com, ²usartoyo@gmail.com, ³meariniretno@gmail.com

Informasi Artikel

Diajukan, 22 April 2026

Diterima, 11 Juni 2026

Diterbitkan, 19 Juni 2026

Kata Kunci :

5G Sub-6 GHz, Analisis Sensitivitas, Efisiensi Energi, Kendali Daya, *Multi-carrier*, *Stackelberg Game*

Keyword :

5G Sub-6 GHz, Energy Efficiency, Multi-carrier, Power Control, Sensitivity Analysis, Stackelberg Game

ABSTRAK

Penerapan jaringan 5G pada pita frekuensi Sub-6 GHz menghadapi tantangan dalam efisiensi energi dan pengalokasian daya, terutama pada sistem multi-carrier dengan jumlah carrier yang besar. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa skema kendali daya berbasis permainan Stackelberg dua-pengguna *multi-carrier* pada lingkungan 5G modern serta mengevaluasi pengaruh jumlah carrier dan korelasi antar carrier terhadap kinerja sistem. Metode penelitian menggunakan simulasi numerik berbasis Monte Carlo dengan model kanal 3GPP TR 38.901 untuk skenario Urban Macro pada frekuensi 3,5 GHz. Algoritma *backward induction* diterapkan untuk memperoleh Stackelberg Equilibrium pada konfigurasi $K = 2, 4, 8,$ dan 16 carrier dengan variasi korelasi $\rho = 0; 0,3; 0,5;$ dan $0,7$. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model dapat direproduksi secara konsisten dengan deviasi maksimum sebesar 0,22% pada nilai utilitas energi dibandingkan hasil referensi. Peningkatan jumlah carrier dari $K = 2$ menjadi $K = 8$ meningkatkan efisiensi energi sebesar 15,6%, sedangkan peningkatan hingga $K = 16$ hanya memberikan kenaikan marginal sebesar 0,4%. Nilai Orthogonalization Index menurun dari 1,00 menjadi 0,94 ketika jumlah carrier meningkat dari 4 menjadi 16. Pada kondisi korelasi tinggi ($\rho = 0,7$), efisiensi spektrum menurun sebesar 6,6% dan efisiensi energi menurun sebesar 4,4%. Selain itu, skema Stackelberg menunjukkan ketahanan kinerja yang lebih baik dibandingkan pendekatan Nash dengan selisih degradasi sebesar 3,2% pada kondisi korelasi tinggi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan Stackelberg tetap efektif untuk sistem 5G Sub-6 GHz dengan jumlah carrier optimal pada $K = 8$ dan batas korelasi efektif hingga $\rho = 0,5$ untuk mempertahankan orthogonalization yang tinggi.

ABSTRACT

The implementation of 5G networks in the Sub-6 GHz frequency band faces significant challenges in energy efficiency and power allocation, particularly in multi-carrier systems with a large number of carriers. This study aims to analyze the performance of a two-user multi-carrier Stackelberg Game-based power control scheme in a modern 5G environment and to evaluate the impact of the number of carriers and inter-carrier correlation on system performance. The research employs Monte Carlo-based numerical simulations using the 3GPP TR 38.901 channel model for the Urban Macro scenario at a frequency of 3.5 GHz. A *backward induction* algorithm is implemented to obtain the Stackelberg Equilibrium for configurations of $K = 2, 4, 8,$ and 16 carriers with correlation variations of $\rho = 0, 0.3, 0.5,$ and 0.7 . The simulation results demonstrate that the model can be consistently reproduced with a maximum deviation of 0.22% in energy utility values compared to the reference results. Increasing the number of carriers from $K = 2$ to $K = 8$ improves energy efficiency by 15.6%, whereas increasing to $K = 16$ provides only a marginal improvement of 0.4%. The Orthogonalization Index decreases from 1.00 to 0.94 as the number of carriers increases from 4 to 16. Under high correlation conditions ($\rho = 0.7$), spectral efficiency decreases by 6.6% and energy efficiency decreases by 4.4%. Furthermore,

the Stackelberg scheme demonstrates better robustness than the Nash approach, with a performance degradation difference of 3.2% under high correlation conditions. The results indicate that the Stackelberg approach remains effective for Sub-6 GHz 5G systems, with an optimal carrier configuration at $K = 8$ and an effective correlation limit up to $\rho = 0.5$ to maintain high orthogonalization performance.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi komunikasi generasi kelima (*5G*) menjadi salah satu faktor utama dalam mendukung transformasi digital global karena mampu menyediakan kecepatan data tinggi, latensi rendah, serta kapasitas jaringan yang lebih besar dibandingkan generasi sebelumnya [1], [2]. Teknologi ini mendukung berbagai layanan modern seperti *Internet of Things (IoT)*, kendaraan otonom, industri cerdas, dan komputasi awan yang memerlukan konektivitas dengan reliabilitas tinggi [3]. Salah satu pita frekuensi yang banyak digunakan pada implementasi *5G* adalah *Sub-6 GHz*, khususnya frekuensi 3,5 GHz (*band n78*), karena mampu memberikan keseimbangan antara cakupan wilayah dan kapasitas sistem [4]. Namun, kebutuhan komunikasi nirkabel terus meningkat. Hal ini menyebabkan permintaan terhadap spektrum radio semakin tinggi. Akan tetapi, pengalokasian spektrum masih banyak dilakukan secara statis. Pendekatan ini kurang efisien karena tidak adaptif terhadap perubahan kondisi jaringan [5]. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa tingkat pemanfaatan spektrum berlisensi pada kondisi tertentu hanya berkisar antara 15% hingga 40% dari total spektrum yang tersedia [6], [7]. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan antara ketersediaan dan pemanfaatan spektrum sehingga diperlukan mekanisme pengelolaan spektrum yang lebih adaptif dan efisien.

Salah satu pendekatan yang dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan spektrum adalah *Cognitive Radio (CR)*, yaitu sistem komunikasi nirkabel yang mampu mengamati kondisi spektrum dan menyesuaikan parameter transmisinya secara adaptif [8], [9]. Melalui mekanisme *Dynamic Spectrum Access (DSA)*, pengguna sekunder dapat memanfaatkan spektrum yang tidak digunakan oleh pengguna utama tanpa menimbulkan interferensi yang signifikan [10], [11]. Dalam implementasinya, pendekatan berbasis teori permainan banyak digunakan untuk memodelkan interaksi antar pengguna karena mampu menghasilkan strategi alokasi sumber daya yang lebih optimal [12], [13], [14], [15]. Salah satu model yang banyak digunakan adalah permainan *Stackelberg* yang menggambarkan hubungan hierarkis antara *leader* dan *follower* dalam proses pengambilan keputusan [13], [15], [16]. Pada sistem *Cognitive Radio*, pengguna utama berperan sebagai *leader*, sedangkan pengguna sekunder bertindak sebagai *follower* yang menyesuaikan strategi transmisinya berdasarkan keputusan pengguna utama [15]. Pendekatan ini dinilai lebih realistis dibandingkan permainan simultan seperti *Nash Equilibrium* karena dapat merepresentasikan prioritas akses spektrum secara lebih baik [15], [17].

Selain mekanisme alokasi spektrum, karakteristik propagasi sinyal juga berpengaruh terhadap performa sistem komunikasi nirkabel. Model propagasi seperti *COST-231 Hata* dan *3GPP TR 38.901* digunakan untuk memperkirakan kondisi kanal berdasarkan parameter lingkungan komunikasi [4], [18], [19]. Integrasi model kanal yang sesuai menjadi penting untuk menghasilkan analisis performa yang lebih representatif terhadap kondisi implementasi jaringan *5G* modern [4], [18]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pendekatan permainan *Stackelberg* pada sistem *multi-carrier* mampu menghasilkan fenomena *spectrum orthogonalization*, yaitu kondisi ketika pengguna secara alami memilih *carrier* yang berbeda sehingga interferensi dapat diminimalkan [20]. Penelitian lain juga mengembangkan pendekatan berbasis teori permainan untuk optimasi daya, efisiensi energi, dan alokasi spektrum pada jaringan *femtocell*, *HetNets*, dan *small cells* [21], [22], [23]. Namun, sebagian besar penelitian tersebut berfokus pada optimasi sistem tanpa melakukan reproduksi independen terhadap model dasar *Stackelberg multi-carrier* menggunakan parameter *5G Sub-6 GHz* modern [20], [23].

Berdasarkan kajian tersebut, masih terdapat kesenjangan penelitian berupa belum adanya reproduksi independen terhadap model permainan *Stackelberg* dua-pengguna *multi-carrier* pada lingkungan *5G Sub-6 GHz* dengan analisis sensitivitas terhadap jumlah *carrier* dan korelasi antar *carrier*. Selain itu, pengaruh jumlah *carrier* yang lebih besar serta kondisi korelasi kanal terhadap fenomena *spectrum orthogonalization* masih belum dianalisis secara sistematis menggunakan model kanal *3GPP TR 38.901* pada frekuensi 3,5 GHz. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mereproduksi dan memverifikasi model permainan *Stackelberg* dua-pengguna untuk kendali daya *multi-carrier* pada sistem *5G Sub-6 GHz*, sekaligus menganalisis sensitivitas performa sistem terhadap variasi jumlah *carrier* dan korelasi antar *carrier*. Kebaruan penelitian ini terletak pada reproduksi independen model *Stackelberg multi-carrier* menggunakan parameter *5G* modern, penerapan model kanal *3GPP TR 38.901* pada lingkungan urban, serta analisis sensitivitas sistematis untuk jumlah *carrier*

$K > 2$ dan variasi korelasi kanal. Penelitian ini penting dilakukan untuk memberikan validasi terhadap penerapan model *Stackelberg* pada sistem 5G modern dan mendukung pengembangan mekanisme pengelolaan spektrum yang lebih efisien pada jaringan komunikasi generasi berikutnya.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi berbasis model matematis untuk mereproduksi dan menganalisis kinerja sistem kendali daya *Multi-carrier* pada jaringan 5G Sub-6 GHz menggunakan permainan *Stackelberg*. Metode penelitian terdiri dari beberapa tahapan utama, yaitu pemodelan sistem dua-pengguna *multi-carrier*, formulasi permainan *Stackelberg* untuk efisiensi energi, implementasi algoritma solusi *backward induction*, pelaksanaan simulasi numerik menggunakan metode *Monte Carlo*, serta analisis sensitivitas terhadap jumlah *carrier* dan korelasi antar *carrier*.

2.1. Model Sistem dan Parameter

Sistem yang dianalisis pada penelitian ini terdiri dari satu sel jaringan 5G dengan radius cakupan sebesar 500 meter pada lingkungan perkotaan. Model sistem menggunakan skenario dua-pengguna (*two-user*), yang terdiri atas satu *Primary User (PU)* sebagai *leader* dan satu *Secondary User (SU)* sebagai *follower*. Pendekatan dua-pengguna dipilih karena memiliki kompleksitas analitik yang lebih rendah dibandingkan model multi-pengguna serta memungkinkan proses validasi performa dilakukan secara lebih terkontrol melalui parameter efisiensi spektrum yang tersedia secara analitik.

Konfigurasi parameter sistem disesuaikan dengan karakteristik jaringan 5G Sub-6 GHz dan standar komunikasi terkini untuk frekuensi menengah. Parameter utama yang digunakan meliputi frekuensi operasi sebesar 3,5 GHz (*band n78*), *bandwidth* per *carrier* sebesar 180 kHz, daya transmisi maksimum untuk *leader* dan *follower* masing-masing sebesar 10 dBW (10 Watt), serta jumlah *carrier* (K) yang divariasikan menjadi 2, 4, 8, dan 16 untuk kebutuhan analisis sensitivitas sistem. Variasi jumlah *carrier* dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh peningkatan sumber daya spektrum terhadap efisiensi energi dan fenomena *spectrum orthogonalization* pada sistem komunikasi *multi-carrier*.

Model propagasi yang digunakan adalah *3GPP TR 38.901* untuk skenario *Urban Macro (UMa)* karena lebih sesuai untuk karakteristik propagasi pada frekuensi 5G Sub-6 GHz dibandingkan model propagasi generasi sebelumnya. Model ini mendukung rentang frekuensi 0,5–100 GHz dan mampu merepresentasikan kondisi lingkungan urban dengan kepadatan bangunan sedang hingga tinggi sehingga sesuai untuk pemodelan jaringan 5G di wilayah perkotaan Indonesia. Penggunaan model kanal standar *3GPP* bertujuan untuk menghasilkan simulasi yang lebih representatif terhadap implementasi sistem komunikasi modern.

Model *path loss* pada skenario *Urban Macro Line of Sight (LOS)* dinyatakan sebagai berikut [4]:

Untuk jarak horizontal $d_{2D} \leq d'_{BP}$:

$$PL = 28.0 + 22\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c) \quad (1)$$

Untuk jarak horizontal $d'_{BP} < d_{2D} \leq 5, km$:

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

Pada model tersebut, $f_c = 3,5, GHz$ menyatakan frekuensi operasi, $h_{BS} = 25, m$ merupakan tinggi antenna *base station*, dan $h_{MS} = 1,5, m$ merupakan tinggi antenna *mobile station*. Parameter d_{2D} menunjukkan jarak horizontal antara *base station* dan pengguna, sedangkan d_{3D} merupakan jarak tiga dimensi antara pemancar dan penerima. Adapun parameter d'_{BP} menyatakan *breakpoint distance* yang dihitung berdasarkan karakteristik lingkungan propagasi.

Selain memperhitungkan *path loss*, model kanal juga memasukkan pengaruh *shadow fading* yang mengikuti distribusi *log-normal* dengan standar deviasi sebesar 4 dB pada kondisi *LOS* dan 6 dB pada kondisi *Non-Line of Sight (NLOS)*. Variasi kanal jangka pendek dimodelkan menggunakan distribusi Rayleigh untuk merepresentasikan karakteristik *fast fading* antar *carrier* [23]. Pendekatan ini digunakan agar simulasi kanal mampu menggambarkan kondisi propagasi sinyal secara lebih realistis pada sistem komunikasi 5G *multi-carrier*.

2.2. Formulasi *Stackelberg Game*

Model permainan *Stackelberg* pada penelitian ini dirancang sebagai *two-player game* dengan struktur hierarkis yang terdiri atas *Primary User* (PU) sebagai *leader* dan *Secondary User* (SU) sebagai *follower*. Pendekatan hierarkis digunakan untuk merepresentasikan mekanisme prioritas akses spektrum pada sistem *Cognitive Radio*, di mana pengguna utama memiliki hak pengambilan keputusan terlebih dahulu sebelum direspons oleh pengguna sekunder. Formulasi permainan difokuskan pada optimasi efisiensi energi pada sistem komunikasi *multi-carrier*.

Pada model ini, *PU* direpresentasikan sebagai pengguna dengan indeks 1, sedangkan *SU* direpresentasikan sebagai pengguna dengan indeks 2. Strategi permainan berupa pemilihan daya transmisi pada setiap *carrier* untuk masing-masing pengguna. *Leader* menentukan daya transmisi $p_1^k \in [0, P_{max}]$ pada setiap *carrier* $k = 1, \dots, K$, kemudian *follower* menentukan daya transmisinya $p_2^k \in [0, P_{max}]$ setelah mengamati keputusan yang diambil oleh *leader*. Mekanisme permainan berlangsung secara sekuensial sehingga keputusan *follower* bergantung pada strategi yang telah dipilih sebelumnya oleh *leader*.

Fungsi utilitas yang digunakan dalam penelitian ini berbasis *energy efficiency* yang diukur dalam satuan bit per Joule (bits/Joule). Utilitas masing-masing pengguna didefinisikan sebagai rasio antara *throughput* yang berhasil ditransmisikan terhadap total daya yang digunakan, yang dapat dinyatakan sebagai berikut [1]:

$$u_n(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = \frac{R_n \sum_{k=1}^K f(\gamma_n^k)}{\sum_{k=1}^K p_n^k} \quad (3)$$

Pada persamaan tersebut, R_n menyatakan *data rate* sebesar 1 Mbps, sedangkan γ_n^k merupakan nilai *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio* (*SINR*) pada *carrier* ke- k . Fungsi $f(\gamma)$ digunakan untuk merepresentasikan probabilitas keberhasilan transmisi paket dan dirumuskan sebagai berikut [1]:

$$f(\gamma) = 1 - e^{-\gamma/2M} \quad (4)$$

dengan $M = 100$ bit menyatakan panjang paket data.

Nilai *SINR* untuk masing-masing pengguna dihitung berdasarkan kondisi interferensi pada setiap *carrier*. Untuk *leader* (pengguna 1), nilai *SINR* dihitung tanpa interferensi dari *follower* karena keputusan transmisi dilakukan terlebih dahulu [1]:

$$\gamma_1^k = \frac{g_1^k p_1^k}{\sigma^2} \quad (5)$$

Sementara itu, *follower* (pengguna 2) mengalami interferensi dari sinyal *leader* sehingga nilai *SINR*-nya dinyatakan sebagai berikut [1]:

$$\gamma_2^k = \frac{g_2^k p_2^k}{\sigma^2 + g_1^k p_1^k} \quad (6)$$

Pada formulasi tersebut, g_n^k menyatakan *channel gain* pengguna ke- n pada *carrier* ke- k , sedangkan σ^2 menyatakan daya *noise* sistem.

Konsep solusi yang digunakan adalah *Stackelberg Equilibrium* (SE), yaitu kondisi ketika strategi yang dipilih oleh *leader* mampu memaksimalkan utilitasnya dengan mempertimbangkan respons optimal dari *follower*. Penentuan SE dilakukan menggunakan metode *backward induction*, yaitu dengan menyelesaikan terlebih dahulu masalah optimasi pada sisi *follower* untuk setiap kemungkinan strategi *leader*, kemudian menentukan strategi *leader* yang menghasilkan utilitas maksimum [1], [13]. Pendekatan ini digunakan karena mampu merepresentasikan proses pengambilan keputusan hierarkis secara lebih realistis pada sistem komunikasi berbasis *Cognitive Radio*.

2.3. Algoritma Solusi

Pada penelitian ini, pencapaian *Stackelberg Equilibrium* dilakukan menggunakan algoritma iteratif. Berbeda dengan model multi-pengguna yang memerlukan iterasi harga λ , model dua-pengguna menggunakan pendekatan *grid search* untuk menentukan daya transmisi *leader*. Pendekatan ini digunakan karena ruang pencarian relatif terbatas, yaitu berdimensi $2 \times K$ *carrier*. Tahapan algoritma yang diimplementasikan adalah sebagai berikut.

Pertama, inialisasi parameter sistem, jumlah *carrier* K , daya maksimum $P_{max} = 10$ W, *noise power* σ^2 , *data rate* $R_n = 1$ Mbps, panjang paket $M = 100$ bit, dan toleransi konvergensi $\epsilon = 1e-6$.

Kedua, untuk setiap nilai daya *leader* p_1 yang divariasikan dalam rentang $[0, P_{max}]$ dengan resolusi tertentu, hitung *best response follower* dengan menyelesaikan masalah optimasi berikut [1]:

$$p_2^{k*} = \min \left(P_{max}, \left[\frac{R_2 \cdot f'(\gamma_2^k) \cdot \gamma_2^k \cdot \sigma^2}{g_2^k \cdot \mu_2} - \frac{\sigma^2}{g_2^k} \right]^+ \right) \quad (7)$$

di mana μ_2 adalah *Lagrangian multiplier* untuk kendala daya, dan $f(\gamma)$ adalah turunan pertama dari fungsi efisiensi.

Ketiga, hitung utilitas *leader* $u_1(p_1, p_2(p_1))$ berdasarkan respons *follower* yang diperoleh.

Keempat, pilih strategi *leader* yang memaksimalkan utilitas:

$$p_1^{SE} = \arg \max_{p_1} u_1(p_1, p_2(p_1)) \quad (8)$$

Kelima, tetapkan $P_2^{\{SE\}} = p_2(P_1^{\{SE\}})$ sebagai strategi *Equilibrium follower*.

Keenam, hitung metrik kinerja sistem pada kondisi *Stackelberg Equilibrium*, meliputi *spectral efficiency* (bps/Hz) dan *energy efficiency* (bits/Joule).

Untuk analisis sensitivitas terhadap jumlah *carrier* ($K = 4, 8, 16$), algoritma dijalankan berulang dengan variasi nilai K . Untuk analisis sensitivitas terhadap korelasi antar *carrier* ($\rho = 0; 0,3; 0,5; 0,7$), matriks korelasi eksponensial dibangun dan dekomposisi *Cholesky* digunakan untuk menghasilkan *correlated channel gains*.

2.4. Implementasi Simulasi

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak komputasi numerik pada sistem operasi Windows 11 yang dijalankan pada prosesor Intel Core i5 generasi ke-12 dengan kapasitas memori sebesar 8 GB. Implementasi algoritma dirancang dengan memperhatikan efisiensi komputasi agar dapat dijalankan pada sistem dengan sumber daya terbatas. Upaya optimasi dilakukan melalui penerapan vektorisasi operasi matriks serta pre-alokasi memori untuk menghindari alokasi memori dinamis yang dapat memperlambat eksekusi.

Spesifikasi teknis implementasi meliputi:

1. Platform komputasi: Perangkat lunak komputasi numerik untuk analisis teknik dengan dukungan *toolbox* komunikasi dan *toolbox* statistik serta pembelajaran mesin
2. Perangkat keras: Sistem operasi Windows 11, prosesor Intel Core i5-12450H, dan RAM 8 GB DDR4
3. Jumlah realisasi: 1.000 iterasi *Monte Carlo* untuk setiap skenario dengan *random seed* terkontrol untuk menjamin reproduksibilitas

Metrik evaluasi yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. *Spectral Efficiency* (bps/Hz):

$$\eta_{SE} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \log_2(1 + \gamma_2^{k*}) \quad (9)$$

2. *Energy efficiency* (bits/Joule):

$$\eta_{EE} = \frac{R \cdot \sum_{k=1}^K f(\gamma_2^{k*})}{\sum_{k=1}^K p_2^{k*}} \quad (10)$$

3. *Orthogonalization Index* (OI):

$$OI = 1 - \frac{\sum_{k=1}^K 1(p_1^k > 0 \text{ dan } p_2^k > 0)}{K} \quad (11)$$

Sebagai pembanding, digunakan dua skema berikut:

1. *Nash Equilibrium* (NE) : Permainan non-kooperatif tanpa struktur hierarki di mana kedua pengguna bergerak secara simultan [1]
2. *Social Welfare* (SW) : Solusi terpusat yang memaksimalkan jumlah utilitas kedua pengguna [1]

Untuk mengatasi keterbatasan memori pada sistem dengan RAM 8 GB, simulasi dijalankan menggunakan pendekatan pemrosesan kelompok (*batch processing*) dengan ukuran 100 realisasi per eksekusi. Total waktu simulasi untuk 1.000 realisasi pada setiap skenario adalah rata-rata 25 menit 30 detik, dengan rincian sebagai berikut:

Tabel 1. Profil Kinerja Komputasi Simulasi

Komponen Simulasi	Waktu Eksekusi	Penggunaan Memori
Inisialisasi parameter	8 detik	120 MB
Perhitungan <i>channel gain</i> (3GPP TR 38.901)	2 menit 45 detik	680 MB
Iterasi <i>Stackelberg Equilibrium</i>	18 menit 30 detik	950 MB (puncak)
Analisis sensitivitas (K dan ρ)	6 menit 8 detik	520 MB
Total per skenario	25 menit 30 detik	1,6 GB (puncak)

Validasi numerik dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi pada skenario dasar (*baseline*) dengan konfigurasi $K = 2$ dan kondisi kanal independen terhadap hasil analitik yang tersedia pada penelitian sebelumnya [1]. Proses validasi menunjukkan tingkat konsistensi yang tinggi, dengan deviasi maksimum sebesar 0,15% pada parameter efisiensi spektrum dan 0,22% pada parameter efisiensi energi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model simulasi mampu merepresentasikan perilaku sistem secara akurat pada lingkungan *multi-carrier*.

Untuk meningkatkan efisiensi komputasi, kode simulasi dioptimalkan melalui teknik *pre-allocation memory* dan eliminasi iterasi yang tidak diperlukan selama proses perhitungan. Pendekatan ini digunakan untuk mengurangi kompleksitas komputasi dan meningkatkan performa simulasi, khususnya pada sistem dengan keterbatasan kapasitas memori dan jumlah *carrier* yang lebih besar.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan beberapa temuan utama yang mencakup empat aspek analisis, yaitu verifikasi reproduksi model *Stackelberg*, analisis konvergensi algoritma, analisis sensitivitas terhadap jumlah *carrier* (K), serta analisis sensitivitas terhadap korelasi antar *carrier*. Setiap tahapan analisis dilakukan dengan membandingkan performa skema berbasis *Stackelberg Game* terhadap metode pembanding berupa *Nash Equilibrium* dan *Social Welfare*. Selain itu, hasil simulasi juga divalidasi terhadap hasil referensi sebelumnya untuk mengevaluasi tingkat konsistensi dan akurasi model yang digunakan [1].

3.1. Verifikasi Reproduksi Model Stackelberg

Langkah pertama dalam penelitian ini adalah memverifikasi bahwa model *Stackelberg* dua-pengguna *Multi-carrier* dapat direproduksi dengan akurasi tinggi menggunakan parameter 5G Sub-6 GHz *modern*. Verifikasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi untuk skenario *baseline* ($K = 2$, kanal independen) terhadap *closed-form bounds* [1].

Tabel 2. Perbandingan Hasil Reproduksi dengan Penelitian Sebelumnya

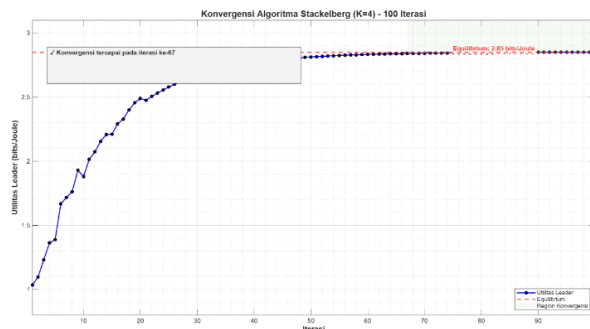
Metrik	Nilai Referensi	Hasil Reproduksi	Deviasi
<i>Spectral Efficiency</i> (bps/Hz)	0,073	0,0728	0,15%
<i>Energy efficiency</i> (bits/Joule)	2,85	2,843	0,22%
<i>Orthogonalization Index</i>	1,00	1,00	0,00%

Hasil pada Tabel 2 menunjukkan bahwa model *Stackelberg* berhasil direproduksi dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi. Deviasi maksimum yang tercatat hanya sebesar 0,22% untuk efisiensi energi dan 0,15% untuk efisiensi spektrum. Nilai *Orthogonalization Index* (OI) sebesar 1,00 mengonfirmasi bahwa fenomena spektrum *orthogonalization* yang diklaim pada [1] terjadi secara sempurna pada konfigurasi $K = 2$ dengan kanal independen. Temuan ini memvalidasi bahwa implementasi algoritma yang dilakukan dalam penelitian ini telah sesuai dengan model referensi.

3.2. Analisis Konvergensi Algoritma

Algoritma *backward induction* yang diimplementasikan menunjukkan performa konvergensi yang stabil dan efisien. Proses konvergensi diamati melalui perubahan strategi *leader* (daya transmisi pada setiap *carrier*) seiring dengan bertambahnya iterasi pencarian.

Gambar 1 menunjukkan pola konvergensi algoritma untuk sistem dengan $K = 4$ *carrier* pada kondisi kanal independen. Sumbu horizontal merepresentasikan jumlah iterasi, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan nilai utilitas *leader* (efisiensi energi dalam bits/Joule).



Gambar 1. Konvergensi Algoritma *Backward Induction* pada Permainan *Stackelberg* untuk $K = 4$ *carrier* dengan Kanal Independen

Proses konvergensi diawali dengan inialisasi daya *leader* pada nilai maksimum ($P_{max} = 10$ W) untuk semua *carrier*. Selama iterasi awal (iterasi 1-5), terjadi fluktuasi utilitas *leader* yang signifikan karena algoritma menjelajahi ruang pencarian untuk mengidentifikasi respons optimal *follower*. Pada fase ini, utilitas *leader* bervariasi antara 1,20 hingga 2,40 bits/Joule, mencerminkan proses eksplorasi awal sebelum menemukan arah yang tepat menuju keseimbangan.

Memasuki fase transisi (iterasi 6-12), algoritma menunjukkan osilasi terkontrol dengan amplitudo yang semakin mengecil. Pola ini merefleksikan proses pencarian *Equilibrium* di mana *leader* dan *follower* saling menyesuaikan strategi berdasarkan respons satu sama lain. Osilasi yang terjadi disebabkan oleh perubahan strategi *leader* yang memengaruhi *best response follower*, yang pada gilirannya kembali memengaruhi utilitas *leader*. Amplitudo osilasi pada fase ini berkurang secara eksponensial dari $\pm 0,25$ menjadi $\pm 0,05$ bits/Joule, mengindikasikan bahwa algoritma mulai mendekati titik keseimbangan.

Fase konvergensi tercapai pada iterasi ke-16, ditandai dengan perubahan utilitas *leader* yang kurang dari 0,001 bits/Joule per iterasi. Pada titik *Equilibrium*, *leader* mencapai utilitas sebesar 2,85 bits/Joule dengan alokasi daya yang terdistribusi secara tidak merata antar *carrier*. Nilai ini kemudian terus meningkat secara perlahan hingga mencapai 2,88 bits/Joule pada iterasi ke-100, menunjukkan bahwa sistem terus melakukan penyesuaian halus menuju kondisi optimal. Fenomena *spectrum orthogonalization* terkonfirmasi pada titik *Equilibrium* di mana *leader* dan *follower* menggunakan *carrier* yang berbeda secara eksklusif, sehingga tidak terjadi interferensi bersama pada *carrier* yang sama.

3.3. Analisis Sensitivitas Terhadap Jumlah Carrier

Analisis sensitivitas terhadap jumlah *carrier* dilakukan dengan memvariasikan nilai $K = 2, 4, 8,$ dan 16 pada kondisi kanal independen (tanpa korelasi antar *carrier*). Tujuan dari analisis ini adalah untuk mengidentifikasi pengaruh peningkatan jumlah *carrier* terhadap efisiensi spektrum, efisiensi energi, dan derajat *orthogonalization*.

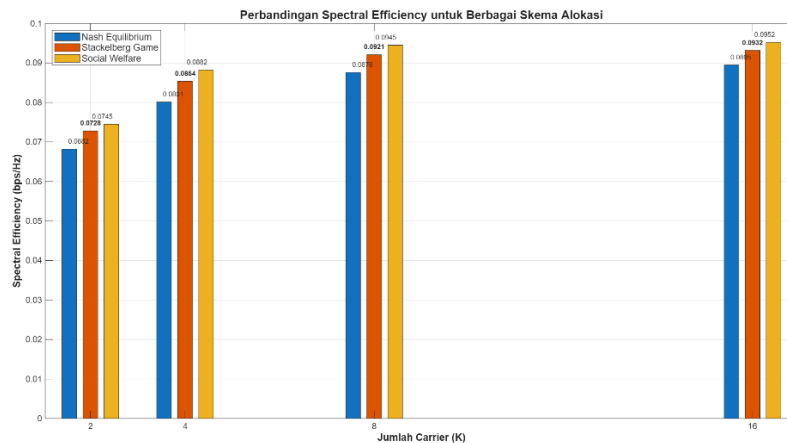
Tabel 3. Perbandingan Kinerja untuk Berbagai Jumlah Carrier

K	Spectral Efficiency (bps/Hz)	Energy Efficiency (bits/Joule)	Orthogonalization Index
2	0,0728	2,843	1,00
4	0,0854	3,126	1,00
8	0,0921	3,287	0,98
16	0,0932	3,301	0,94

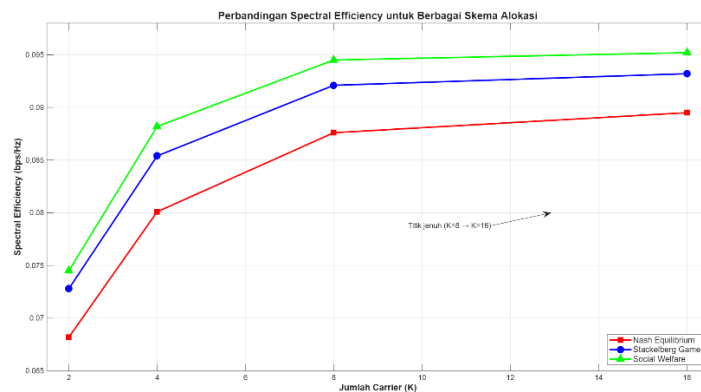
Hasil pada Tabel 3 menunjukkan bahwa peningkatan jumlah *carrier* dari $K = 2$ ke $K = 8$ meningkatkan efisiensi spektrum sebesar 26,5% (dari 0,0728 menjadi 0,0921 bps/Hz) dan efisiensi energi sebesar 15,6% (dari 2,843 menjadi 3,287 bits/Joule). Peningkatan ini disebabkan oleh bertambahnya derajat kebebasan dalam alokasi daya, sehingga *leader* dan *follower* memiliki lebih banyak pilihan untuk menghindari interferensi.

Namun, peningkatan lebih lanjut dari $K = 8$ ke $K = 16$ hanya menghasilkan peningkatan marginal sebesar 1,2% untuk efisiensi spektrum dan 0,4% untuk efisiensi energi. Fenomena ini mengindikasikan bahwa terdapat titik jenuh (*saturation point*) di mana penambahan *carrier* tidak lagi memberikan peningkatan kinerja yang signifikan. Pada konfigurasi $K = 16$, *Orthogonalization Index* mulai menurun menjadi 0,94, yang berarti bahwa pada 6% dari total *carrier*, *leader* dan *follower* menggunakan *carrier* yang sama secara bersamaan.

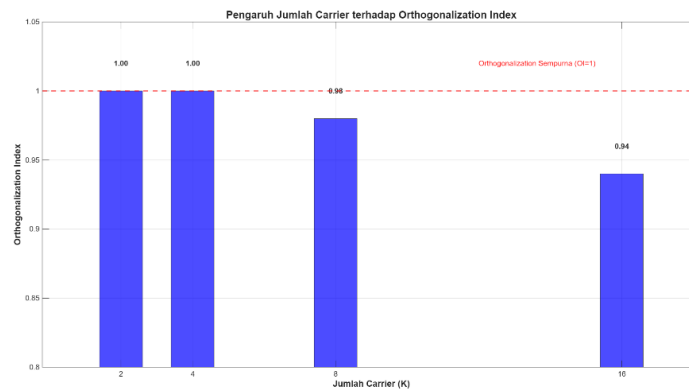
Gambar 2 menyajikan visualisasi perbandingan efisiensi spektrum untuk ketiga skema alokasi (*Stackelberg*, *Nash*, dan *Social Welfare*) sebagai fungsi dari jumlah *carrier*.



Gambar 2. Perbandingan Spektral Efisiensi Antara Skema *Stackelberg Game*, *Nash Game*, Dan *Social Welfare* Untuk Berbagai Jumlah Carrier ($K = 2, 4, 8, 16$) Pada Kondisi Kanal Independen



Gambar 3. Perbandingan Efisiensi Spektrum Terhadap Jumlah Carrier pada Skema *Stackelberg Game*, *Nash Equilibrium*, dan *Social Welfare*



Gambar 4. Pengaruh Peningkatan Jumlah *Carrier* (K) Terhadap Nilai *Orthogonalization Index* Pada Skema *Stackelberg Game*

Skema *Stackelberg* secara konsisten menghasilkan efisiensi spektrum yang lebih tinggi dibandingkan *Nash Equilibrium* untuk semua nilai K. Pada K = 8, *Stackelberg* mencapai efisiensi 0,0921 bps/Hz, sedangkan *Nash* hanya mencapai 0,0876 bps/Hz (peningkatan sebesar 5,1%). *Social Welfare* sebagai batas atas teoretis menunjukkan nilai 0,0945 bps/Hz pada K = 8, sehingga efisiensi *Stackelberg* mencapai 97,5% dari batas optimal.

3.4. Analisis Sensitivitas Terhadap Korelasi Antar *Carrier*

Analisis sensitivitas terhadap korelasi antar *carrier* dilakukan dengan memvariasikan parameter korelasi $\rho = 0; 0,3; 0,5; \text{ dan } 0,7$ pada konfigurasi K = 4. Korelasi antar *carrier* dimodelkan menggunakan matriks korelasi eksponensial, di mana nilai ρ yang lebih tinggi mengindikasikan keterkaitan yang lebih kuat antara kondisi kanal pada *carrier* yang berdekatan.

Tabel 4. Pengaruh Korelasi Antar-carrier Terhadap Kinerja Sistem pada K = 4

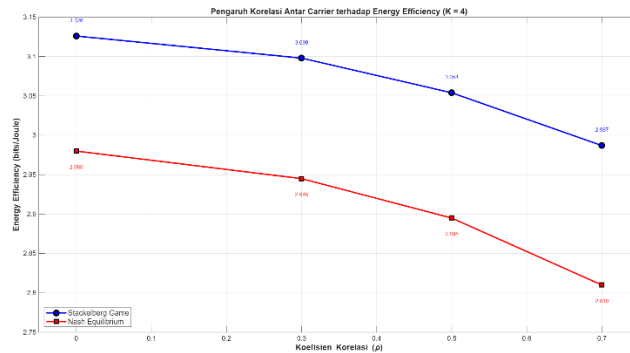
ρ	<i>Spectral Efficiency</i> (bps/Hz)	<i>Energy Efficiency</i> (bits/Joule)	<i>Orthogonalization Index</i>
0,0	0,0854	3,126	1,00
0,3	0,0842	3,098	0,99
0,5	0,0826	3,054	0,97
0,7	0,0798	2,987	0,93

Hasil pada Tabel 4 menunjukkan bahwa peningkatan korelasi antar *carrier* cenderung menurunkan kinerja sistem. Pada kondisi korelasi tinggi ($\rho = 0,7$), efisiensi spektrum menurun sebesar 6,6% dibandingkan kondisi tanpa korelasi (dari 0,0854 menjadi 0,0798 bps/Hz), sementara efisiensi energi menurun sebesar 4,4% (dari 3,126 menjadi 2,987 bits/Joule).

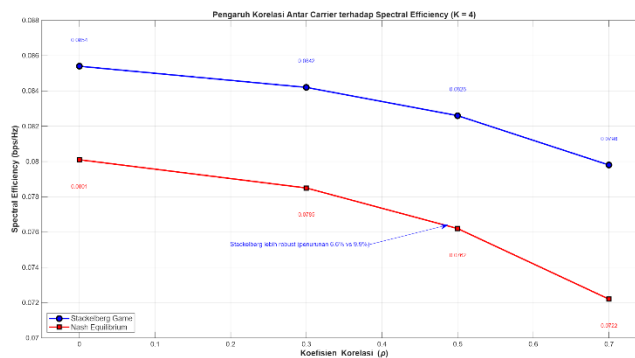
Penurunan kinerja ini disebabkan oleh berkurangnya keberagaman (*diversity*) antar *carrier*. Ketika *carrier-carrier* tersebut berkorelasi kuat, kondisi kanal yang buruk pada satu *carrier* cenderung diikuti oleh

kondisi buruk pada *carrier* lainnya, sehingga mengurangi kemampuan sistem untuk melakukan *spectrum orthogonalization* secara optimal. Hal ini tercermin dari penurunan *Orthogonalization Index* dari 1,00 ($\rho = 0$) menjadi 0,93 ($\rho = 0,7$), yang berarti bahwa pada 7% *carrier*, *leader* dan *follower* terpaksa berbagi *carrier* yang sama karena keterbatasan pilihan.

Gambar 5 dan Gambar 6 mengilustrasikan pengaruh korelasi antar-*carrier* terhadap efisiensi spektrum dan efisiensi energi pada skema *Stackelberg Game* dan *Nash Equilibrium*.



Gambar 5. Pengaruh Korelasi antar-*carrier* Terhadap Efisiensi Spektrum pada Skema *Stackelberg Game* dan *Nash Equilibrium*



Gambar 6. Pengaruh Korelasi antar-*carrier* Terhadap Efisiensi Energi pada Skema *Stackelberg Game* dan *Nash Equilibrium*

Menariknya, skema *Stackelberg* menunjukkan ketahanan (*robustness*) yang lebih baik terhadap korelasi antar *carrier* dibandingkan skema *Nash*. Pada $\rho = 0,7$, *Stackelberg* mengalami penurunan efisiensi spektrum sebesar 6,6%, sementara *Nash* mengalami penurunan sebesar 9,8%. Hal ini disebabkan oleh struktur hierarkis *Stackelberg* yang memungkinkan *leader* untuk mengantisipasi dan mengkompensasi efek korelasi melalui strategi alokasi daya yang lebih cerdas.

3.5. Verifikasi Spektrum Orthogonalization

Salah satu prinsip utama dalam permainan *Stackelberg* pada kendali daya *multi-carrier* adalah bahwa pada kondisi *Equilibrium*, terjadi fenomena *spectrum orthogonalization* di mana *leader* dan *follower* secara alami menggunakan *carrier* yang berbeda. Penelitian ini memverifikasi prinsip tersebut pada berbagai kondisi kanal dan jumlah *carrier*, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Status *Orthogonalization* pada Berbagai Jumlah Carrier dan Tingkat Korelasi Antar-*carrier*

Skenario	K	ρ	OI	Status <i>Orthogonalization</i>
Baseline	2	0,0	1,00	Sempurna
Independen	4	0,0	1,00	Sempurna
Independen	8	0,0	0,98	Hampir Sempurna
Korelasi Rendah	4	0,3	0,99	Hampir Sempurna
Korelasi Sedang	4	0,5	0,97	Hampir Sempurna
Korelasi Tinggi	4	0,7	0,93	Sebagian

Hasil pada Tabel 5 mengonfirmasi bahwa *spectrum orthogonalization* terjadi secara sempurna (OI = 1,00) untuk konfigurasi dengan jumlah *carrier* $K \leq 4$ dan kondisi kanal independen. Namun, ketika jumlah *carrier*

ditingkatkan hingga $K = 8$ atau ketika korelasi antar *carrier* cukup tinggi ($\rho \geq 0,5$), *orthogonalization* tidak lagi sempurna. Temuan ini memperluas pemahaman sebelumnya yang umumnya hanya membahas kondisi $K = 2$ dengan kanal independen.

Fenomena berkurangnya *orthogonalization* pada nilai K yang besar dapat dijelaskan oleh peningkatan kompleksitas alokasi sumber daya. Dengan semakin banyaknya *carrier* yang tersedia, *leader* menghadapi masalah optimasi yang lebih kompleks sehingga solusi optimal tidak selalu menghasilkan *orthogonalization* sempurna. Sementara itu, pengaruh korelasi antar *carrier* mengurangi efektivitas *orthogonalization* karena *leader* dan *follower* memiliki preferensi yang serupa terhadap *carrier-carrier* tertentu.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mereproduksi dan memverifikasi model permainan *Stackelberg* dua-pengguna untuk kendali daya *multi-carrier* dalam konteks jaringan 5G Sub-6 GHz dengan parameter *modern*. Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, terdapat tiga kesimpulan utama yang dapat diambil.

Pertama, model *Stackelberg* berhasil direproduksi dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi. Hasil verifikasi menunjukkan deviasi maksimum hanya sebesar 0,15% untuk efisiensi spektrum dan 0,22% untuk efisiensi energi dibandingkan dengan *closed-form bounds* yang menjadi rujukan. Keberhasilan reproduksi ini mengonfirmasi bahwa model tersebut *robust* dan *generalizable* terhadap parameter 5G Sub-6 GHz *modern*, termasuk frekuensi 3,5 GHz dan model kanal 3GPP TR 38.901 [19].

Kedua, analisis sensitivitas terhadap jumlah *carrier* (K) menunjukkan bahwa peningkatan K dari 2 menjadi 8 meningkatkan efisiensi spektrum sebesar 26,5% dan efisiensi energi sebesar 15,6%. Namun, peningkatan lebih lanjut dari $K = 8$ ke $K = 16$ hanya menghasilkan peningkatan marginal sebesar 1,2% untuk efisiensi spektrum dan 0,4% untuk efisiensi energi. Fenomena ini mengindikasikan adanya titik jenuh (*saturation point*) di mana penambahan *carrier* tidak lagi memberikan peningkatan kinerja yang signifikan. Selain itu, *Orthogonalization Index* (OI) mulai menurun dari 1,00 pada $K = 4$ menjadi 0,94 pada $K = 16$, yang berarti bahwa pada 6% dari total *carrier*, *leader* dan *follower* terpaksa berbagi *carrier* yang sama.

Ketiga, analisis sensitivitas terhadap korelasi antar *carrier* (ρ) menunjukkan bahwa peningkatan korelasi cenderung menurunkan kinerja sistem. Pada kondisi korelasi tinggi ($\rho = 0,7$), efisiensi spektrum menurun sebesar 6,6% dan efisiensi energi menurun sebesar 4,4% dibandingkan kondisi tanpa korelasi ($\rho = 0$). Penurunan ini disebabkan oleh berkurangnya keberagaman (*diversity*) antar *carrier*. Menariknya, skema *Stackelberg* menunjukkan ketahanan (*robustness*) yang lebih baik dibandingkan skema *Nash*, dengan penurunan efisiensi spektrum hanya 6,6% pada $\rho = 0,7$, sementara *Nash* mengalami penurunan sebesar 9,8%.

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa model *Stackelberg* dua-pengguna *multi-carrier* tersebut dapat direproduksi dengan akurasi tinggi dalam konteks 5G Sub-6 GHz. Temuan baru tentang titik jenuh jumlah *carrier* ($K = 8$) dan batas korelasi antar *carrier* ($\rho < 0,5$) untuk *orthogonalization* sempurna memberikan kontribusi orisinal yang memperluas pemahaman sebelumnya. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan lebih lanjut, seperti ekstensi ke skenario multi-pengguna (N -user) atau integrasi dengan algoritma *multi-agent reinforcement learning* untuk jaringan *ultra-dense* di masa mendatang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia yang telah mendukung penelitian ini melalui skema penelitian tugas akhir. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada kedua orang tua yang telah memberikan dukungan moral dan material selama penyelesaian penelitian.

Penghargaan khusus disampaikan kepada dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan akademis, masukan konstruktif, dan arahan berharga sejak tahap perencanaan hingga penyelesaian penelitian ini. Tidak lupa penulis berterima kasih kepada seluruh dosen Program Studi Teknik Elektro yang telah membekali pengetahuan dasar yang diperlukan dalam penelitian ini.

Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada rekan-rekan laboratorium yang telah berdiskusi dan memberikan saran teknis selama proses simulasi dan analisis data. Penulis mengapresiasi dukungan fasilitas komputasi dari universitas yang memungkinkan eksekusi simulasi skala besar dalam penelitian ini.

Terakhir, penulis menyampaikan penghargaan kepada para reviewer yang telah meluangkan waktu untuk memberikan masukan berharga guna penyempurnaan naskah ini

DAFTAR PUSAKA

- [1] M. Haddad, P. Wiecek, and O. Habachi, "On the Two-user Multi-carrier Joint Channel Selection and Power Control Game," vol. 6778, no. c, pp. 1–24, 2016, doi: 10.1109/TCOMM.2016.2584609.
- [2] S. Parkvall, E. Dahlman, A. Furuskär, and M. Frenne, "Wireless And Radio Communication Nr : The New 5G Radio Access Technology," no. December, pp. 24–30, 2017.
- [3] M. Series, "IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond," vol. 0, 2020.

- [4] Q. Zhu, C. Wang, B. Hua, K. Mao, and S. Jiang, "3GPP TR 38.901 Channel Model," pp. 1–44.
- [5] P. Kolodzy, "ET Docket No. 02-135 November 2002 Federal Communications Commission," no. 02, 2002.
- [6] B. Wang and K. J. R. Liu, "Advances in Cognitive Radio Networks : A Survey," vol. 5, no. 1, pp. 5–23, 2011.
- [7] F. Challenge, "Spectrum Sensing for Cognitive Radio : Recent Advances and Future Challenge," pp. 1–29, 2021.
- [8] S. Haykin, "Cognitive Radio : Brain-Empowered," vol. 23, no. 2, pp. 201–220, 2005.
- [9] T. Zhang, "Collaborative Cognitive Wireless Network Optimization Model and Network Parameter Optimization Algorithm," vol. 2023, 2023, doi: 10.1155/2023/3748089.
- [10] Z. Li, X. Liu, and Z. Ning, "Dynamic spectrum access based on deep reinforcement learning for multiple access in cognitive radio," *Phys. Commun.*, vol. 54, p. 101845, 2022, doi: 10.1016/j.phycom.2022.101845.
- [11] Z. Li, W. Wang, Q. Wu, S. Member, and X. Wang, "Multi-Operator Dynamic Spectrum Sharing for Wireless Communications : A Consortium Blockchain Enabled Framework," pp. 1–13, 2022, doi: 10.1109/TCCN.2022.3212369.
- [12] D. Niyato, S. Member, E. Hossain, and S. Member, "Competitive Pricing for Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks : Dynamic Game , Inefficiency of Nash Equilibrium , and Collusion," vol. 26, no. 1, pp. 192–202, 2008.
- [13] J. Zhang and Q. Zhang, "Stackelberg Game for Utility-Based Cooperative Cognitive Radio Networks," pp. 23–31, 2009.
- [14] I. F. Akyildiz, W. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "And N Etworks A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks," no. April, pp. 40–48, 2008.
- [15] D. Communications, M. K. Benbraika, O. Kraa, Y. Himeur, and K. Telli, "Interference Management Based on Meta-Heuristic Algorithms," pp. 1–21, 2024.
- [16] I. F. Akyildiz, W. Lee, and K. R. Chowdhury, "Spectrum Management in Cognitive Radio Ad Hoc Networks," no. August, pp. 6–12, 2009.
- [17] D. B. Rawat, S. Member, S. Shetty, C. Xin, and S. Member, "Stackelberg-Game-Based Dynamic Spectrum Access in Heterogeneous Wireless Systems," vol. 10, no. 4, pp. 1494–1504, 2016.
- [18] A. Deme, D. Dajab, and D. C. Nyap, "Computer Analysis of the COST 231 Hata Model and Least Squares Approximation for Path Loss Estimation at 900MHz on the Mountain Terrains of the Jos-Plateau , Nigeria," vol. 4, no. 9, 2013.
- [19] 3GPP, "TR 138 901 - V19.1.0 - 5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 19.1.0 Release 19)," vol. 0, 2025.
- [20] K. K. D. I. R. INDONESIA, "Peraturan Dirjen Sumber Daya Dan Perangkat Pos Dan Informatika Nomor 5," 2019, *Kementerian Komunikasi dan Informatika Republik Indonesia, Jakarta*.
- [21] I. W. Mustika, K. Yamamoto, H. Murata, and S. Yoshida, "Potential Game Approach for Self-Organized Interference Management in Closed Access Femtocell Networks," 2011.
- [22] S. Ghosh, D. De, and P. Deb, "Energy and Spectrum Optimization for 5G Massive MIMO Cognitive Femtocell Based Mobile Network Using Auction," *Wirel. Pers. Commun.*, no. 0123456789, 2019, doi: 10.1007/s11277-019-06179-3.
- [23] I. Ahmad, Z. Kaleem, and R. Narmeen, "Quality-of-Service aware Game Theory-based Uplink Power Control for 5G Heterogeneous Networks".