



Analisis Sebaran Spasial dan Profil Pemancar Radio Menggunakan Algoritma K-Means dan DBSCAN

Budi Ramdhani*, Handoyo Widi Nugroho

Fakultas Ilmu Komputer, Institut Informatika Dan Bisnis Darmajaya, Bandar Lampung, Indonesia

Email: ^{1,*}budi.2421211024p@mail.darmajaya.ac.id, ²handoyo.wn@darmajaya.ac.id

Email Penulis Korespondensi: budi.2421211024p@mail.darmajaya.ac.id

Abstrak—Tingginya pertumbuhan pemancar radio memicu kerapatan spektrum frekuensi dan tingginya angka penolakan izin di kawasan perkotaan, sementara evaluasi perizinan konvensional yang bersifat manual dan berfokus kriteria tunggal sulit memetakan akumulasi interferensi serta lokasi terisolasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sebaran spasial dan profil pemancar radio menggunakan algoritma K-Means dan *Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise* (DBSCAN). *Dataset* komprehensif sebanyak 38.779 rekaman perizinan stasiun radio diolah berdasarkan atribut spasial (koordinat geografis) dan parameter teknis (frekuensi kerja, *Effective Radiated Power*, tinggi antenna, dan *bandwidth*) yang ditransformasikan menggunakan standardisasi *Z-score*. Pemodelan K-Means tahap awal ($k=4$) mengelompokkan empat profil makro: Klaster 0 merepresentasikan *backhaul* gelombang mikro perkotaan frekuensi tinggi (rerata frekuensi 14,72 GHz) dengan kelayakan izin terendah (22,28%); Klaster 1 mencakup layanan seluler bergerak frekuensi rendah (rerata frekuensi 1,95 GHz) dengan kelayakan tertinggi (83,79%); serta Klaster 2 dan Klaster 3 masing-masing mencakup *backhaul* daratan timur (rerata frekuensi 9,22 GHz, kelayakan 26,69%) dan pegunungan barat (rerata frekuensi 9,94 GHz, kelayakan 25,03%). Selanjutnya, analisis kerapatan spasial DBSCAN tahap kedua dengan radius Haversine 3 km berhasil mengidentifikasi 221 *hotspot* kepadatan lokal (*mega-hotspot* utama mencakup 14.864 pemancar) serta mendeteksi 1.581 titik *noise* terisolasi (4,08%) di lokasi terpencil. Penggabungan K-Means dan DBSCAN terbukti efektif mengungkap pola teknis tersembunyi dan kerapatan geografis guna mendukung zonasi berbasis data untuk otomatisasi evaluasi perizinan spektrum frekuensi radio.

Kata Kunci: DBSCAN; Algoritma K-Means; Perizinan Spektrum; Pemancar Radio; Sebaran Spasial

Abstract—The rapid growth of radio transmitters has caused frequency spectrum congestion and high license rejection rates in urban areas, while conventional manual licensing evaluation focused on single-criterion analysis struggles to map potential interference accumulation and detect isolated locations. This research aims to analyze the spatial distribution and technical profile of radio transmitters using K-Means and *Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise* (DBSCAN) algorithms. A comprehensive dataset comprising 38,776 radio station license records was processed using Z-score standardized spatial attributes (geographic coordinates) and technical parameters (operating frequency, Effective Radiated Power, antenna height, and bandwidth). First-stage K-Means modeling ($k=4$) segmented four macro profiles: Cluster 0 represents urban high-frequency microwave backhauls (mean frequency 14.72 GHz) with the lowest licensing approval rate (22.28%); Cluster 1 encompasses low-frequency mobile cellular infrastructure (mean frequency 1.95 GHz) with the highest approval rate (83.79%); while Cluster 2 and Cluster 3 cover eastern terrain backhauls (mean frequency 9.22 GHz, approval rate 26.69%) and western mountainous link networks (mean frequency 9.94 GHz, approval rate 25.03%). Furthermore, second-stage spatial clustering using DBSCAN with a 3 km Haversine search radius identified 221 local high-density hotspots (primary mega-hotspot encompassing 14,864 transmitters) and isolated 1,581 noise points (4.08%) representing remote locations. The integration of K-Means and DBSCAN effectively reveals hidden technical patterns and geographic density variations, providing a data-driven zoning framework for automated radio frequency spectrum licensing evaluation.

Keywords: DBSCAN; K-Means Algorithm; Radio Spectrum Licensing; Radio Transmitter; Spatial Distribution

1. PENDAHULUAN

Penggunaan spektrum frekuensi radio mengalami peningkatan yang sangat pesat seiring dengan melonjaknya kebutuhan layanan telekomunikasi bergerak, jaringan seluler pita lebar (*broadband*), serta transmisi titik-ke-titik (*point-to-point*). Keterbatasan alokasi pita frekuensi yang tersedia menuntut tata kelola yang efisien dan presisi guna meminimalkan risiko interferensi sinyal antar pemancar radio yang berdekatan secara geografis [1]. Penentuan kelayakan izin stasiun radio membutuhkan evaluasi komprehensif terhadap berbagai parameter teknis transmisi, seperti frekuensi kerja, daya pancar efektif (*Effective Radiated Power* / ERP), tinggi antenna, *bandwidth*, serta lokasi koordinat geografis pemancar [2], [3]. Pengelolaan pangkalan data spektrum frekuensi yang tertata secara akurat menjadi kebutuhan krusial bagi instansi pembina dan pengawas [4]. Kendati demikian, volume data perizinan stasiun radio yang mencapai puluhan ribu rekaman kerap kali menyulitkan proses analisis manual bagi regulator dalam memetakan zona kepadatan pemancar maupun mendeteksi potensi ketidaksesuaian spesifikasi teknis di lapangan.

Dalam perkembangannya, pendekatan pemodelan berbasis *supervised machine learning* telah banyak digunakan untuk memprediksi status kelayakan perizinan maupun menganalisis karakteristik sinyal nirkabel [5]. Namun, teknik pemodelan *supervised* membutuhkan label target awal dan cenderung berfokus pada prediksi kelas tunggal, sehingga kurang optimal dalam mengartikulasi struktur data multidimensi serta menemukan pola tersembunyi (*unsupervised pattern discovery*) dari interaksi kompleks antara lokasi spasial dan parameter teknis transmisi. Oleh karena itu, pengelompokan data tanpa pengawasan (*unsupervised clustering*) menjadi instrumen analisis yang sangat krusial untuk melakukan pemetaan segmen pemancar berdasarkan kemiripan spesifikasi teknis dan kedekatan lokasi geografis.

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengkaji pemanfaatan algoritma *clustering* dan pembelajaran mesin dalam domain sistem telekomunikasi serta pengawasan frekuensi radio. Patil et al. [6] melakukan tinjauan komprehensif mengenai teknik pemanfaatan spektrum bersama pada jaringan cerdas nirkabel guna mengidentifikasi peluang efisiensi spektrum. Geis et al. [7] menerapkan kecerdasan buatan untuk membantu perencanaan jaringan privat dan skema operator



bersama. Selanjutnya, Li et al. [8] mengembangkan metode pemilihan lokasi stasiun pemancar BTS berdasarkan algoritma optimasi, sementara Chen et al. [9] mengombinasikan pengelompokan wilayah dengan optimasi non-linear untuk alokasi stasiun pemancar. Di sisi lain, Kumari et al. [10] menerapkan algoritma clustering untuk menganalisis data lalu lintas infrastruktur perkotaan, dan Zhao et al. [11] mengembangkan metode pembelajaran mesin untuk mitigasi interferensi frekuensi radio pada data arsip survei skala besar.

Meskipun penelitian-penelitian terdahulu memberikan kontribusi penting, sebagian besar kajian tersebut masih terfokus pada analisis kriteria tunggal, seperti segmentasi koordinat spasial semata, atau pengujian teknis sinyal secara terpisah, tanpa mengintegrasikan kedua dimensi tersebut secara utuh. Selain itu, penggunaan algoritma *K-Means* secara mandiri memiliki keterbatasan karena sensitif terhadap penentuan jumlah kluster awal (k) dan mengasumsikan bentuk kluster simetris (*spherical*) [12]. Keterbatasan ini menyulitkan identifikasi batas-batas kepadatan wilayah yang memiliki bentuk tak beraturan (*arbitrary shape*) serta mengabaikan keberadaan pemancar terisolasi. Di sisi lain, algoritma berbasis kepadatan seperti *Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise* (DBSCAN) [13], [14] memiliki keunggulan dalam mendeteksi kluster spasial *arbitrary* dan tangguh dalam mengisolasi data penciran (*noise/outlier*) [15]. Penggabungan kedua algoritma ini belum banyak dieksplorasi secara sistematis pada skala dataset perizinan riil yang masif.

Guna mengisi kesenjangan penelitian (*gap analysis*) tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menerapkan pemodelan spasial-teknis dua tahap (*two-stage spatial-technical clustering*) yang menggabungkan algoritma *K-Means* dan DBSCAN berbasis formula Haversine. Algoritma *K-Means* digunakan pada tahap awal untuk melakukan segmentasi makro terhadap parameter transmisi frekuensi, daya, tinggi antena, dan *bandwidth*, sedangkan DBSCAN diterapkan pada tahap kedua untuk mengekstrak struktur kepadatan spasial mikro serta mengidentifikasi stasiun pemancar yang terisolasi sebagai data penciran. Kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada pengintegrasian parameter teknis radio dan koordinat geografis presisi pada skala dataset komprehensif sebanyak 38.779 rekaman perizinan bersih dari total 38.954 data transaksi. Evaluasi kualitas kluster dilakukan secara kuantitatif mengukur tingkat pemisahan kluster menggunakan *Silhouette Coefficient* [16].

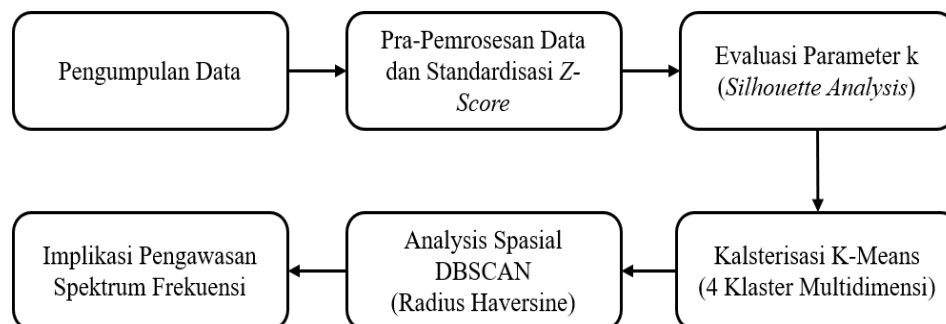
Secara praktis dan metodologis, hasil pemodelan dua tahap ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam memodernisasi tata kelola spektrum frekuensi radio. Bagi regulator telekomunikasi dan pengelola jaringan, penelitian ini menyediakan kerangka acuan berbasis data (*data-driven frequency zoning*) untuk memetakan zona kepadatan tinggi, mengidentifikasi potensi *spectrum bottleneck*, mengoptimalkan proses verifikasi perizinan, serta memitigasi risiko interferensi sinyal.

Guna memberikan gambaran alur pemikiran yang terstruktur, sisa dari naskah artikel ini disusun ke dalam beberapa bagian utama. Bagian 2 (Metodologi Penelitian) memaparkan secara rinci kerangka kerja CRISP-DM [17], tahapan pra-pemrosesan data perizinan, prosedur normalisasi *Z-score*, serta perumusan matematis *K-Means* dan DBSCAN dengan radius Haversine. Bagian 3 (Hasil dan Pembahasan) menyajikan analisis evaluasi *Silhouette Score*, pembagian segmen teknis *K-Means*, pemetaan peta kepadatan dan penciran DBSCAN, serta evaluasi korelasi terhadap tingkat kelayakan perizinan. Akhirnya, Bagian 4 (Kesimpulan) merangkum temuan-temuan utama penelitian dan merumuskan rekomendasi kebijakan strategis bagi tata kelola spektrum frekuensi radio.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan mengacu pada kerangka kerja *Cross-Industry Standard Process for Data Mining* (CRISP-DM) [17]. Tahapan penelitian disusun secara sistematis untuk menggambarkan urutan pelaksanaan, penerapan metode dua tahap, hingga pengujian model guna memperoleh hasil evaluasi perizinan yang akurat. Alur tahapan penelitian secara komprehensif disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur Metodologi Penelitian Spasial Teknis Pemancar Radio

Secara garis besar, tahapan diawali dari pengumpulan data perizinan, pra-pemrosesan data dengan standardisasi *Z-score*, penentuan nilai k optimal melalui *Silhouette Analysis*, pemodelan *K-Means* untuk pengelompokan makro, analisis kerapatan spasial mikro DBSCAN menggunakan formula Haversine, hingga perumusan implikasi kebijakan pengawasan spektrum frekuensi radio.



2.2 Pengumpulan Data dan Pra-Pemrosesan (Standardisasi Z-Score)

Data yang digunakan merupakan data transaksi perizinan stasiun radio sebanyak 38.779 rekaman bersih dari pangkalan data regulator telekomunikasi [4]. Dataset ini mencakup atribut spasial berupa koordinat geografis serta parameter teknis transmisi. Enam atribut utama yang dipilih sebagai masukan pemodelan multidimensi disajikan pada tabel 1.

Tabel 1. Atribut dalam Pemodelan Multidimensi

Nama Atribut	Tipe Data	Satuan	Deskripsi Parameter
SID_LAT	Kontinu	Derajat Desimal (°)	Koordinat garis lintang (<i>latitude</i>) pemancar radio
SID_LONG	Kontinu	Derajat Desimal (°)	Koordinat garis bujur (<i>longitude</i>) pemancar radio
FREQ	Kontinu	Megahertz (MHz)	Frekuensi kerja operasional pemancar
ERP_PWR_DBM	Kontinu	Decibel-milliwatts (dBm)	Daya pancar efektif (<i>Effective Radiated Power</i>)
HGT_ANT	Kontinu	Meter (m)	Ketinggian antena pemancar dari permukaan tanah
BWIDTH	Kontinu	Kilohertz (kHz)	Lebar pita frekuensi (<i>bandwidth</i>) kanal transmisi

Karena atribut numerik pada Tabel 1 memiliki rentang skala dan satuan yang beraneka ragam, dilakukan transformasi standardisasi *Z-score* guna mencegah dominasi variabel berskala besar terhadap variabel berskala kecil pada perhitungan jarak metrik [18]. Formula standardisasi *Z-score* ditunjukkan pada persamaan (1):

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

di mana z menyatakan nilai atribut terstandarisasi, x adalah nilai asli variabel, μ menyatakan rata-rata sampel, dan σ menyatakan standar deviasi dari atribut bersangkutan.

2.3 Evaluasi Parameter k (*Silhouette Analysis*)

Tahap pengujian kriteria pengelompokan algoritma K-Means diawali dengan evaluasi jumlah kluster (k) optimal menggunakan metrik *Silhouette Analysis* [19], [16]. Pengujian dilakukan pada rentang $k = 2$ hingga $k = 6$ untuk mengukur tingkat kerapatan internal (*cohesion*) dan pemisahan antar kluster (*separation*) secara kuantitatif. Nilai *Silhouette Coefficient* (S) dihitung menggunakan Persamaan (2):

$$S(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max(a(i), b(i))} \quad (2)$$

di mana $a(i)$ menyatakan rata-rata jarak sampel i ke sampel lain dalam kluster yang sama, dan $b(i)$ menyatakan rata-rata jarak terdekat sampel i ke sampel pada kluster tetangga terdekat. Nilai $S(i)$ yang mendekati +1 mengindikasikan bahwa struktur pengelompokan terpisah secara tegas.

2.4 Klasterisasi Makro K-Means

Setelah nilai k optimal ditentukan ($k = 4$), algoritma K-Means diterapkan untuk mengekstrak segmen profil teknis dan sebaran wilayah pemancar secara makro [12]. K-Means membagi N data ke dalam k kluster berdasarkan meminimalkan nilai *Sum of Squared Errors* (SSE) berbasis jarak Euclidean, sebagaimana dirumuskan pada Persamaan (3):

$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \|x_{ij} - \mu_j\|^2 \quad (3)$$

di mana x_{ij} merupakan vektor fitur terstandarisasi dari data ke- i pada kluster j , dan μ_j menyatakan titik pusat (*centroid*) kluster ke- j .

2.5 Analisis Kepadatan Spasial Mikro DBSCAN (Radius Haversine)

Tahap berikutnya adalah ekstraksi struktur kerapatan spasial mikro dan deteksi pemancar terisolasi menggunakan algoritma *Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise* (DBSCAN) [13], [14]. DBSCAN memetakan area berkepadatan tinggi berdasarkan dua parameter, yaitu radius ketetanggaan (ϵ) dan jumlah titik minimum (*MinPts*). Mengingat data lokasi berbasis koordinat bola bumi, perhitungan jarak spasial menggunakan formula Haversine [20], seperti dirumuskan pada Persamaan (4):

$$d = 2R \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) + \cos(\phi_1) \cos(\phi_2) \sin^2 \left(\frac{\Delta\lambda}{2} \right)} \right) \quad (4)$$

di mana $R = 6.371$ km menyatakan jari-jari rata-rata bumi, ϕ menyatakan garis lintang, dan λ menyatakan garis bujur dua titik pemancar dalam satuan radian. Titik data yang berada dalam kawasan ketetanggaan kurang dari *MinPts* dikategorikan sebagai *noise* (pemancar terisolasi) [15]. Parameter yang ditetapkan pada analisis spasial ini adalah $\epsilon = 3$ km dan *MinPts* = 15.

2.6 Implikasi Pengawasan Spektrum Frekuensi

Tahap akhir metodologi adalah melakukan sintesis korelasi antara segmen teknis K-Means, *hotspot* spasial DBSCAN, serta tingkat kelayakan perizinan (*granted rate*). Hasil pemodelan dua tahap ini dievaluasi untuk merumuskan kerangka



zonasi frekuensi berbasis data (*data-driven frequency zoning*) sebagai mekanisme otomatisasi verifikasi perizinan dan strategi mitigasi interferensi spektrum frekuensi radio di lapangan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Segmentasi Multidimensi Parameter Teknis dan Proses Algoritma K-Means

3.1.1 Pra-Pemrosesan Data dan Transformasi Standardisasi Z-Score

Pelaksanaan eksperimen pemodelan diawali dengan penyiapan data transaksi perizinan stasiun radio dari pangkalan data regulator telekomunikasi. Dataset awal yang berjumlah 38.954 rekaman mentah melalui tahapan pembersihan data (*data cleaning*), yang meliputi pembuangan rekaman dengan nilai hilang (*missing values*) serta pengeliminasian koordinat geografis di luar batasan wilayah analisis, sehingga diperoleh 38.779 rekaman data bersih yang valid. Sampel dari lima rekaman data terstandardisasi beserta status kelayakan perizinannya disajikan pada tabel 2.

Tabel 2. Sampel Dataset Perizinan Stasiun Radio Terstandardisasi

Nama Pemohon	Garis Lintang (°)	Garis Bujur (°)	Frekuensi (MHz)	ERP (dBm)	Tinggi Antena (m)	Bandwidth (kHz)	Status Kelayakan
TELEKOMUNIKASI SELULAR, PT.	-5,447222	105,270000	2127,500	57,5303	40,0	0,0	Granted
TELEKOMUNIKASI SELULAR, PT.	-5,447222	105,270000	2132,500	57,5303	70,0	0,0	Granted
SINAR LAUT LAMPUNG PERMAI, PT.	-5,440556	105,288889	408,025	36,9897	2,0	16,0	Granted
BUDI MEDIKA SEJAHTERA, PT.	-5,443639	105,279194	353,125	36,0206	2,0	16,0	Granted
BUDI PERMATA INDAH, PT.	-5,442694	105,280917	352,750	45,9794	10,0	16,0	Granted

Guna memperjelas proses komputasi pra-pemrosesan data sesuai persamaan (1), berikut diuraikan simulasi langkah demi langkah transformasi *Z-score* pada salah satu atribut numerik, yaitu frekuensi kerja (FREQ). Pada populasi dataset bersih ($N = 38.779$), diperoleh nilai rata-rata sampel $\mu_{\text{FREQ}} = 10.450,25$ MHz dan standar deviasi $\sigma_{\text{FREQ}} = 4.820,15$ MHz [18]. Untuk sampel baris pertama pada tabel 2 dengan nilai frekuensi asli $x = 2.127,50$ MHz, perhitungan skalar *Z-score* dilakukan sebagai berikut:

$$Z_{\text{FREQ}} = \frac{2.127,50 - 10.450,25}{4.820,15} = \frac{-8.322,75}{4.820,15} = -1,7266$$

Prosedur matematis yang sama diterapkan secara terintegrasi pada lima atribut numerik lainnya (SID_LAT, SID_LONG, ERP_PWR_DBM, HGT_ANT, dan BWIDTH), sehingga seluruh variabel berada pada skala terstandardisasi dengan rerata 0 dan varians 1 sebelum dimasukkan ke dalam algoritma clustering.

3.1.2 Evaluasi *Silhouette Analysis* dan Konvergensi Centroid K-Means

Proses segmentasi makro mengaplikasikan algoritma K-Means pada vektor fitur terstandardisasi. Tahapan algoritma K-Means dijalankan melalui prosedur sistematis sebagai berikut:

- Inisialisasi awal dengan menentukan jumlah k pusat kluster (*centroid*) secara acak dalam ruang vektor multidimensi.
- Perhitungan jarak Euclidean antara setiap titik data x_i dan seluruh *centroid* μ_j menggunakan rumus pada persamaan (5).

$$d(x_i, \mu_j) = \sqrt{\sum (x_i - \mu_j)^2} \quad (5)$$

- Pengalokasian setiap titik data ke kluster dengan jarak Euclidean terkecil.
- Pembaruan koordinat *centroid* μ_j dengan menghitung rata-rata posisi seluruh anggota dalam kluster tersebut.
- Iterasi berulang hingga tercapai kondisi konvergensi, yaitu saat tidak ada lagi perubahan alokasi titik data antar kluster atau perubahan nilai fungsi objektif J pada Persamaan (3) berada di bawah ambang batas toleransi $\Delta J < 10^{-5}$.

Guna menentukan nilai k paling optimal, pengujian dilakukan pada rentang $k = 2$ hingga $k = 6$ [19]. Kualitas pemisahan kluster dievaluasi secara kuantitatif menggunakan *Silhouette Analysis*. Ringkasan hasil evaluasi *Silhouette Score* disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Evaluasi *Silhouette Score* untuk Variasi Nilai k

Jumlah Kluster (k)	Nilai <i>Silhouette Score</i>	Evaluasi Kualitas Pemisahan Kluster
2	0,3484	Pengelompokan terpisah secara kasar antara frekuensi tinggi dan rendah



Jumlah Klaster (k)	Nilai <i>Silhouette</i> <i>Score</i>	Evaluasi Kualitas Pemisahan Klaster
3	0,2591	Terjadi tumpang tindih karakteristik spesifikasi teknis dan lokasi
4	0,2698	Pembagian spasial-teknis paling optimal dan kaya interpretasi domain
5	0,3307	Terjadi fragmentasi berlebih pada rentang atribut frekuensi kerja
6	0,3231	Terjadi redundansi profil antar klaster dan degradasi pemisahan wilayah

Meskipun $k = 2$ secara matematis menghasilkan skor 0,3484, struktur tersebut hanya membagi data secara dikotomi tanpa mampu membedakan variasi geografis dan spesifikasi antenna. Konfigurasi $k = 4$ dipilih sebagai struktur terbaik karena memberikan representasi segmen teknis dan persebaran wilayah yang paling seimbang serta kaya interpretasi operasional.

3.1.3 Profiling dan Karakteristik 4 Klaster K-Means

Pengelompokan K-Means dengan $k = 4$ menghasilkan empat profil utama pemancar radio. Rincian nilai rata-rata parameter teknis dan persentase kelayakan perizinan (*granted rate*) untuk setiap klaster dirangkum pada Tabel 4.

Tabel 4. Profil Rata-Rata Parameter Teknis dan Persentase Kelayakan Perizinan Tiap Klaster K-Means

Atribut / Parameter Teknis	Klaster 0 (Backhaul Perkotaan)	Klaster 1 (Layanan Seluler)	Klaster 2 (Backhaul Daratan Timur)	Klaster 3 (Jaringan Pegunungan Barat)
Jumlah Rekaman Data (N)	14.475	5.317	9.394	9.593
Proporsi Data (%)	37,33%	13,71%	24,22%	24,74%
Rata-Rata Garis Lintang ($^{\circ}$)	-5,34	-5,23	-4,48	-4,98
Rata-Rata Garis Bujur ($^{\circ}$)	105,34	105,22	105,36	104,64
Rata-Rata Frekuensi Kerja (MHz)	14.717,00	1.954,38	9.223,80	9.941,56
Mediana Frekuensi Kerja (MHz)	14.473,00	2.112,50	8.059,02	8.118,32
Rata-Rata Daya Pancar (ERP, dBm)	57,60	53,41	58,78	58,40
Rata-Rata Tinggi Antena (m)	43,05	28,45	48,95	51,83
Rata-Rata Bandwidth Kanal (kHz)	30.107,49	2.272,99	31.493,49	31.640,94
Persentase Kelayakan (<i>Granted Rate</i>) (%)	22,28%	83,79%	26,69%	25,03%

Berdasarkan data numerik pada Tabel 4, rincian analisis untuk masing-masing klaster dapat diuraikan sebagai berikut:

- Klaster 0 - Backhaul Gelombang Mikro Perkotaan Frekuensi Tinggi**
 - Spesifikasi Teknis Utama:** Klaster ini merupakan segmen terbesar yang mencakup 37,33% dari total *dataset* (14.475 pemancar). Segmen ini didominasi oleh *link* transmisi gelombang mikro (*microwave backhaul*) yang beroperasi pada frekuensi sangat tinggi dengan rata-rata 14,72 GHz dan *bandwidth* lebar rata-rata 30,11 MHz. Pemancar pada klaster ini umumnya terpasang pada ketinggian antenna rata-rata 43,05 meter dengan daya pancar rata-rata 57,60 dBm.
 - Distribusi Kelayakan dan Tantangan Kepadatan:** Klaster ini mencatatkan tingkat kelayakan perizinan paling rendah, yakni hanya sebesar 22,28% (77,72% permohonan ditolak). Tingginya angka penolakan perizinan pada segmen ini disebabkan oleh pemusatan pemancar di pusat-pusat perkotaan dan wilayah penyangga (koordinat rerata -5,34, 105,34). Kepadatan fisik stasiun yang sangat tinggi pada pita frekuensi 14 GHz memicu potensi interferensi antar kanal gelombang mikro yang berdekatan, sehingga mayoritas permohonan baru gagal memenuhi kriteria ambang batas *Carrier-to-Interference ratio* (*C/I ratio*).
- Klaster 1 - Infrastruktur Layanan Seluler Bergerak Frekuensi Rendah**
 - Spesifikasi Teknis Utama:** Klaster ini mencakup 13,71% data (5.317 pemancar) dengan karakteristik operasi pada pita frekuensi rendah (rata-rata 1,95 GHz atau 1.954,38 MHz) dan *bandwidth* relatif sempit (rata-rata 2,27 MHz). Tinggi antenna pada segmen ini relatif rendah dengan rata-rata 28,45 meter serta daya pancar rata-rata 53,41 dBm. Segmen ini merepresentasikan stasiun BTS seluler (GSM, UMTS, LTE) serta jaringan radio komunikasi privat.
 - Kebijakan Alokasi dan Kelayakan Tinggi:** Klaster ini memiliki persentase kelayakan perizinan tertinggi, mencapai 83,79%. Tingginya tingkat persetujuan perizinan pada segmen seluler ini disebabkan oleh mekanisme pengalokasian frekuensi yang telah diatur secara terstruktur oleh pemerintah melalui lisensi berbasis pita (*band-licensed auction*). Karena pita frekuensi seluler telah dialokasikan khusus kepada operator seluler pemenang lisensi, pengajuan izin stasiun seluler baru dalam pita teralokasi tersebut memiliki tingkat kepatuhan teknis yang sangat tinggi dan risiko interferensi antar operator yang terkendali.
- Klaster 2 - Jaringan Transmisi Backhaul Daratan Timur**
 - Spesifikasi Teknis Utama:** Klaster ini mencakup 24,22% dari total data (9.394 pemancar) yang tersebar di wilayah daratan timur (koordinat rerata -4,48, 105,36). Karakteristik transmisi didominasi oleh *link* gelombang mikro pita menengah dengan rata-rata frekuensi 9,22 GHz dan *bandwidth* 31,49 MHz. Tinggi antenna pada klaster ini mencapai rata-rata 48,95 meter dengan daya pancar 58,78 dBm.
 - Evaluasi Geografis:** Pemasangan antenna yang cukup tinggi dengan daya besar pada klaster ini bertujuan untuk menghubungkan transmisi *point-to-point* melintasi bentang daratan datar yang luas menuju pusat akumulasi data.



Tingkat kelayakan perizinan pada segmen ini berada pada angka 26,69%, yang mencerminkan tingkat kejenuhan sedang pada koridor transmisi timur.

d. **Klaster 3 - Jaringan Link Wilayah Pegunungan Barat**

1. **Spesifikasi Teknis Utama:** Klaster ini mencakup 24,74% data (9.593 pemancar) yang berlokasi di kawasan barat yang memiliki topografi berbukit dan bergunung (koordinat rerata -4,98, 104,64). Klaster ini ditandai dengan pengoperasian pada frekuensi menengah (rata-rata 9,94 GHz), daya pancar tinggi (rata-rata 58,40 dBm), dan rata-rata tinggi antenna tertinggi dibanding klaster lainnya, yaitu mencapai 51,83 meter.
2. **Penanganan Penghalang Topografi:** Penggunaan antena yang sangat tinggi dan daya pancar maksimal pada klaster ini diperlukan untuk mengatasi hambatan bentang alam serta menjaga kondisi saluran pandang bebas (*line-of-sight obstruction*) antar menara pemancar di daerah pegunungan. Tingkat kelayakan perizinan pada segmen ini tercatat sebesar 25,03%.

3.2 Implementasi dan Pengujian Kepadatan Spasial DBSCAN

3.2.1 Perhitungan Jarak Haversine dan Tahapan Klasifikasi Titik DBSCAN

Tahap kedua menerapkan algoritma DBSCAN untuk mengekstrak struktur kerapatan spasial mikro dan mengisolasi pemancar terpencil. Prosedur eksekusi algoritma DBSCAN berbasis jarak Haversine dijalankan melalui tahapan berikut:

- a. Pembentukan matriks jarak spasial antar seluruh koordinat geografis pemancar menggunakan Persamaan (4) dengan jari-jari bumi $R = 6.371$ km.
- b. Identifikasi *Core Point*, yaitu titik yang memiliki jumlah tetangga $\geq \text{MinPts}$ (15 pemancar) dalam radius ϵ (3 km).
- c. Pembentukan klaster spasial dengan menghubungkan *Core Points* yang saling berdekatan (*density-reachable*).
- d. Identifikasi *Border Point*, yaitu titik yang berada dalam radius ϵ dari *Core Point* tetapi memiliki tetangga kurang dari *MinPts*.
- e. Penglabelan *Noise*, yaitu titik pemancar yang tidak memenuhi kriteria *Core Point* maupun *Border Point* (terisolasi melebihi radius 3 km).

Guna memperjelas perhitungan jarak Haversine sesuai persamaan (4), diberikan contoh simulasi jarak antara titik pemancar A (lat: -5,447222°, long: 105,270000°) dan titik B (lat: -5,440556°, long: 105,288889°). Konversi koordinat ke satuan radian

$$\begin{aligned}\phi_1 &= -5,447222^\circ \times \frac{\pi}{180} = -0,0950719 \text{ rad} \quad \phi_2 = -5,440556^\circ \times \frac{\pi}{180} = -0,0949555 \text{ rad} \\ \Delta\phi &= (-5,440556 - (-5,447222)) \times \frac{\pi}{180} = 0,0001163 \text{ rad} \\ \Delta\lambda &= (105,288889 - 105,270000) \times \frac{\pi}{180} = 0,0003296 \text{ rad}\end{aligned}$$

Substitusi ke dalam rumus Haversine pada Persamaan (4):

$$\begin{aligned}d &= 2 \times 6.371 \times \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{0,0001163}{2} \right) + \cos(-0,0950719) \cos(-0,0949555) \sin^2 \left(\frac{0,0003296}{2} \right)} \right) \\ d &= 12.742 \times \arcsin \left(\sqrt{3,38 \times 10^{-9} + 0,99098 \times 2,71 \times 10^{-8}} \right) \approx 2,21 \text{ km}\end{aligned}$$

Karena jarak $d = 2,21$ km $\leq \epsilon(3$ km), maka titik A dan titik B terklasifikasi sebagai tetangga langsung dalam ruang metrik spasial DBSCAN.

3.2.2 Pemetaan Hotspot Kepadatan Lokal dan Deteksi Pemancar Terisolasi

Eksekusi DBSCAN dengan parameter $\epsilon = 3$ km dan $\text{MinPts} = 15$ berhasil mengidentifikasi 221 *hotspot* kepadatan lokal serta mendeteksi 1.581 titik *noise* (4,08%) [14]. Rincian lima klaster spasial terbesar hasil pemodelan DBSCAN disajikan pada tabel 5.

Tabel 5. Rincian Lima Klaster Spasial Terbesar Hasil Algoritma DBSCAN

ID Klaster DBSCAN	Wilayah Administratif Utama	Kecamatan Dominan	Jumlah Pemancar (N)	Jenis Layanan Dominan	Persentase Kelayakan (%)
0	Pusat Kota dan Penyangga	Natar / Bandar Lampung	14.864	Fixed Service (Microwave)	32,7%
139	Kawasan Tanggamus	Kota Agung	1.560	Fixed Service (Microwave)	34,0%
22	Kawasan Lampung Timur	Sekampung Udik	1.502	Fixed Service (Microwave)	35,4%
76	Kawasan Lampung Utara	Kotabumi Selatan	1.197	Fixed Service (Microwave)	26,6%
17	Kawasan Lampung Selatan	Kalianda	1.118	Fixed Service (Microwave)	32,7%



Sebagaimana tertera pada tabel 5, Klaster 0 DBSCAN merepresentasikan *mega-hotspot* spasial yang sangat ekstrem dengan mencakup 14.864 pemancar (38,33% dari seluruh stasiun radio). Klaster ini memusat di wilayah perkotaan Bandar Lampung dan koridor Natar. Tingginya akumulasi stasiun radio pada kawasan ini menjadi penyebab utama terjadinya saturasi spektrum frekuensi, yang berbanding lurus dengan rendahnya tingkat kelayakan perizinan stasiun baru.

Selain memetakan *hotspot*, DBSCAN berhasil mengisolasi 1.581 titik *noise* (4,08%) yang merupakan pemancar terisolasi dengan jarak ke tetangga terdekat melebihi 3 km. Pemancar ini umumnya berupa stasiun navigasi maritim pesisir, stasiun pulau terpencil, atau pemancar pertambangan. Pemancar terisolasi ini memerlukan pengawasan khusus karena rawan mengalami pergeseran frekuensi (*frequency drift*) atau dioperasikan dengan daya berlebih tanpa terdeteksi oleh pemantauan rutin.

3.3 Pembahasan

3.3.1 Sintesis Interaksi Parameter Teknis dan Kepadatan Spasial

Hasil pemodelan dua tahap mengonfirmasi adanya keterkaitan erat antara parameter teknis transmisi dan sebaran spasial geografis. Pemancar gelombang mikro frekuensi tinggi (14,72 GHz pada Klaster 0 K-Means) terkonsentrasi secara signifikan pada *mega-hotspot* perkotaan (Klaster 0 DBSCAN). Tingginya kebutuhan lalu lintas data di pusat kota mendorong penggunaan frekuensi tinggi pita lebar, namun konsentrasi masif ini menciptakan *spectrum bottleneck* yang menekan *granted rate* hingga 22,28%. Sebaliknya, jaringan seluler (Klaster 1 K-Means) yang beroperasi pada frekuensi rendah (1,95 GHz) mencatatkan *granted rate* 83,79%, yang membuktikan bahwa alokasi berbasis pita (*band-licensed*) sangat efektif mencegah hambatan perizinan dan mengendalikan interferensi.

3.3.2 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Temuan penelitian ini memperkuat dan memperluas hasil-hasil penelitian terdahulu. Tinjauan Patil et al. [6] dan Geis et al. [7] menegaskan pentingnya efisiensi spektrum dan perencanaan jaringan terintegrasi. Penelitian ini membuktikan keberhasilan penerapannya pada data transaksi perizinan riil berskala masif (38.779 rekaman). Kajian Li et al. [8] dan Chen et al. [9] menerapkan teknik pengelompokan untuk alokasi lokasi BTS, namun hanya berfokus pada dimensi spasial semata dan mengabaikan atribut teknis serta data pencilaan. Pendekatan dua tahap dalam penelitian ini terbukti lebih unggul karena mampu mengekstrak profil teknis sekaligus mengisolasi 1.581 titik pemancar terisolasi (4,08%) yang tidak terdeteksi pada penelitian terdahulu. Penelitian Kumari et al. [10] memanfaatkan klasterisasi spasial pada skala jaringan perkotaan. Penggunaan jarak Haversine pada DBSCAN dalam penelitian ini memberikan akurasi proyeksi spasial realistis sesuai kelengkungan permukaan bumi [20]. Sejalan dengan Zhao et al. [11] mengenai penggunaan pembelajaran mesin untuk mitigasi interferensi radio, hasil klasterisasi dua tahap ini menyediakan kerangka acuan objektif bagi regulator dalam menetapkan zonasi evaluasi perizinan berbasis data.

3.3.3 Implikasi Regulasi dan Kebijakan Tata Kelola Spektrum Frekuensi

Temuan pemodelan ini memberikan dua rekomendasi kebijakan strategis bagi regulator telekomunikasi. Pertama, Otomatisasi Evaluasi Perizinan (*Fast-Track vs Deep Evaluation*): Permohonan izin stasiun baru yang terklasifikasi ke dalam Klaster 1 K-Means (seluler frekuensi rendah) dapat diproses melalui mekanisme jalur cepat (*fast-track clearance*) karena memiliki tingkat kepatuhan teknis tinggi (83,79%). Sebaliknya, permohonan yang teralokasi pada Klaster 0 K-Means dan berada di dalam *mega-hotspot* Klaster 0 DBSCAN wajib diubah ke prosedur analisis teknis mendalam (*deep technical evaluation*) guna memitigasi risiko akumulasi interferensi. Kedua, Transisi ke *Data-Driven Frequency Zoning*: Penemuan 221 *hotspot* spasial mendorong perlunya transisi dari penetapan frekuensi statis konvensional menuju zonasi geografis dinamis. Dengan menerapkan kerangka ini, regulator dapat mengoptimalkan efisiensi pemanfaatan spektrum radio di daerah padat tanpa mengorbankan kualitas layanan telekomunikasi di masyarakat.

4. KESIMPULAN

Metode pengelompokan ganda yang memadukan atribut teknik transmisi dan koordinat spasial terbukti berhasil memecahkan kendala pemeriksaan perizinan manual yang kurang presisi dalam mengidentifikasi potensi tumpang-tindih sinyal nirkabel. Hasil analisis menunjukkan bahwa tautan radio gelombang mikro di area perkotaan yang bekerja pada spektrum tinggi (rata-rata 14,72 GHz) mengalami hambatan persetujuan terberat dengan tingkat kelolosan hanya 22,28% akibat pekatnya kerapatan kanal serta tingginya potensi akumulasi gangguan. Sebaliknya, infrastruktur seluler pada pita frekuensi rendah (rata-rata 1,95 GHz) mendominasi tingkat persetujuan tertinggi mencapai 83,79% berkat keteraturan alokasi lisensi kelompok oleh pihak berwenang. Pada tingkat pemetaan mikro, perhitungan metrik jarak bola bumi menemukan 221 titik konsentrasi tinggi dengan pusat akumulasi terbesar menampung 14.864 stasiun sekaligus menyaring 1.581 unit radio terpencil (4,08%) sebagai sampel terisolasi yang rawan mengalami pergeseran frekuensi maupun pengoperasian tanpa izin di lapangan. Seluruh temuan empiris ini secara tegas menjawab rumusan masalah mengenai pemetaan zonasi spektrum radio dan tingkat kerawanan akumulasi interferensi wilayah. Secara praktis, kontribusi penelitian ini menyediakan kerangka acuan berbasis data yang objektif bagi regulator telekomunikasi untuk memodernisasi tata kelola perizinan melalui skema verifikasi kilat bagi segmen berisiko rendah serta analisis teknis mendalam bagi pengajuan stasiun baru di pusat kepadatan. Sebagai rekomendasi perbaikan mendatang, pemodelan ini



perlu dikembangkan lebih lanjut dengan mengintegrasikan variasi kontur elevasi topografi tiga dimensi serta pemantauan spektrum dinamis secara *real-time*.

REFERENCES

- [1] A. L. Sheu, O. Olabisi, A. S. Adewumi, O. A. Aremu, and I. A. Azeez, "Assessment of radio frequency interference using key performance indicators for mobile telecommunications," *Discov. Electron.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–10, 2025, doi: 10.1007/s44291-025-00118-2.
- [2] M. Lashgari, F. Tonini, M. Capacchione, L. Wosinska, G. Rigamonti, and P. Monti, "Techno-economics of fiber versus microwave for mobile transport network deployments," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 15, no. 7, pp. C74–C87, 2023, doi: 10.1364/JOCN.482865.
- [3] R. I. K. A. Yuanita, S. A. Y. U. Wulandari, and T. R. Humaidi, "Design of a Naïve Bayes-Based Adaptive Modulation Model in a Time-Varying Channel Environment," *J. Teknol. Inf. Terap.*, vol. 13, no. 1, pp. 27–38, 2026, doi: 10.25047/jtit.v13i1.471.
- [4] S. Mondal, M. P. Dutta, and S. K. Chakraborty, "Dynamic Spectrum Management and Spectrum Sharing Techniques in 5G Networks: A Survey," *J. Mob. Multimed.*, vol. 20, no. 5, pp. 997–1038, 2024, doi: 10.13052/jmm1550-4646.2052.
- [5] A. Otto, S. Rananga, and M. Masonta, "Deep Learning vs. Traditional Learning for Radio Frequency Fingerprinting," *2024 IST-Africa Conf. IST-Africa 2024*, vol. 0, no. 1, pp. 1–8, 2024, doi: 10.23919/IST-Africa63983.2024.10569298.
- [6] A. Patil *et al.*, "A comprehensive survey on spectrum sharing techniques for 5G/B5G intelligent wireless networks: Opportunities, challenges and future research directions," *Comput. Networks*, vol. 253, pp. 1–31, 2024, doi: 10.1016/j.comnet.2024.110697.
- [7] M. Geis, C. Bektas, S. Boeker, and C. Wietfeld, "AI-Driven Planning of Private Networks for Shared Operator Models," *IEEE Work. Local Metrop. Area Networks*, no. July, pp. 45–51, 2024, doi: 10.1109/LANMAN61958.2024.10621883.
- [8] J. Li, H. Wang, S. Fang, Y. Fan, and S. Zhang, "Communication Base Station Site Selection Method Based on an Improved Genetic Algorithm," *Electron.*, vol. 14, no. 20, pp. 1–25, 2025, doi: 10.3390/electronics14203977.
- [9] J. Chen, Y. Shi, J. Sun, J. Li, and J. Xu, "Base Station Planning Based on Region Division and Mean Shift Clustering," *Mathematics*, vol. 11, no. 8, pp. 1–23, 2023, doi: 10.3390/math11081971.
- [10] P. M. K. Kumari, D. H. Manjaiah, and K. M. Ashwini, "Clustering Algorithms to Analyse Smart City Traffic Data," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 15, no. 8, pp. 101–107, 2024, doi: 10.14569/IJACSA.2024.0150811.
- [11] L.-L. Zhao *et al.*, "An Improved Machine Learning Approach for Radio Frequency Interference Mitigation in FAST-SETI Survey Archival Data," *Astron. J.*, vol. 171, no. 2, p. 86, 2026, doi: 10.3847/1538-3881/ae28ca.
- [12] M. Suyal and S. Sharma, "A Review on Analysis of K-Means Clustering Machine Learning Algorithm based on Unsupervised Learning," *J. Artif. Intell. Syst.*, vol. 6, no. 1, pp. 85–95, 2024, doi: 10.33969/ais.2024060106.
- [13] T. Zaki Abdulhameed, S. A. Yousif, V. W. Samawi, and H. Imad Al-Shaikhli, "SS-DBSCAN: Semi-Supervised Density-Based Spatial Clustering of Applications With Noise for Meaningful Clustering in Diverse Density Data," *IEEE Access*, vol. 12, no. August, pp. 131507–131520, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3457587.
- [14] S. Pitafi, T. Anwar, and Z. Sharif, "A Taxonomy of Machine Learning Clustering Algorithms, Challenges, and Future Realms," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 6, pp. 1–18, 2023, doi: 10.3390/app13063529.
- [15] T. S. Delwar *et al.*, "The Intersection of Machine Learning and Wireless Sensor Network Security for Cyber-Attack Detection: A Detailed Analysis," *Sensors*, vol. 24, no. 19, pp. 1–44, 2024, doi: 10.3390/s24196377.
- [16] D. Chicco, A. Campagner, A. Spagnolo, D. Ciucci, and G. Jurman, "The Silhouette coefficient and the Davies-Bouldin index are more informative than Dunn index, Calinski-Harabasz index, Shannon entropy, and Gap statistic for unsupervised clustering internal evaluation of two convex clusters," *PeerJ Comput. Sci.*, vol. 11, pp. 1–49, 2025, doi: 10.7717/peerj-cs.3309.
- [17] A. M. Shimaoka, R. C. Ferreira, and A. Goldman, "The evolution of CRISP-DM for Data Science: Methods, Processes and Frameworks," *SBC Rev. Comput. Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 28–43, 2024, doi: 10.5753/reviews.2024.3757.
- [18] J. Han, J. Pei, and H. Tong, *Data Mining: Concepts and Techniques*, 4th ed. Morgan Kaufmann Publishers (imprint Elsevier), 2023. doi: 10.1016/C2013-0-18660-6.
- [19] S. Kumar, R. Rani, S. K. Pippal, and R. Agrawal, "Customer segmentation in e-commerce: K-means vs hierarchical clustering," *Telkomnika (Telecommunication Comput. Electron. Control.)*, vol. 23, no. 1, pp. 119–128, 2025, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v23i1.26384.
- [20] D. Lee, D. Jang, and S. Yoo, "Development of a Multidimensional Analysis and Integrated Visualization Method for Maritime Traffic Behaviors Using DBSCAN-Based Dynamic Clustering," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 2, pp. 1–24, 2025, doi: 10.3390/app15020529.