

KLASIFIKASI TINGKAT KERAWANAN BENCANA WITEL 3 MENGUNAKAN METODE CLUSTERING UNTUK Mendukung STRATEGI EKSPANSI INFRASTRUKTUR TELEKOMUNIKASI

Adrian Kesuma^{a*}, Famila Dwi Winati^a

^a Program Studi Teknik Industri, Telkom University, Jl. DI Panjaitan No.128, Karangreja, Purwokerto Kidul, Kec. Purwokerto Sel., Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah 53147

* Corresponding author: adrianhas@student.telkomuniversity.ac.id

ABSTRAK

Pengembangan infrastruktur telekomunikasi di Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta membutuhkan pemetaan risiko bencana yang komprehensif untuk memastikan operasional berkelanjutan dan investasi yang optimal. Penelitian ini bertujuan mengklasifikasikan tingkat kerawanan bencana pada 10 wilayah kerja PT Telkom Witel Yogyakarta (Witel 3) menggunakan metode clustering berbasis data historis kejadian banjir, gempa bumi, angin kencang, tanah longsor, dan kebakaran periode 2023-2024. Proses normalisasi diterapkan agar skala variabel setara, dilanjutkan penerapan algoritma K-Means untuk menghasilkan kelompok daerah berdasarkan kemiripan karakteristik risiko. Hasil penelitian mengidentifikasi tiga cluster utama: (1) wilayah risiko rendah yang sangat layak untuk ekspansi tower reguler, (2) wilayah risiko sedang dengan rekomendasi mitigasi tambahan, dan (3) wilayah risiko tinggi yang memerlukan pendekatan alternatif seperti Cell on Wheels (COW) atau komunikasi satelit. Implementasi hasil penelitian menyediakan data risiko bencana dan sarana pendukung keputusan berbasis data, sehingga pihak Telkom dapat memprioritaskan investasi di lokasi aman, mengurangi kerugian operasional, dan meningkatkan ketahanan layanan telekomunikasi. Dengan demikian, metode clustering terbukti efektif untuk mendukung strategi ekspansi infrastruktur telekomunikasi yang aman, efisien, dan berkelanjutan.

Kata Kunci : Clustering, Kerawanan Bencana, Infrastruktur Telekomunikasi, Implementasi, Pendukung Keputusan

ABSTRACT

The development of telecommunication infrastructure in Central Java and the Special Region of Yogyakarta requires comprehensive disaster risk mapping to ensure sustainable operations and optimal investment. This study aims to classify the disaster vulnerability level across 10 operational areas of PT Telkom Witel Yogyakarta (Witel 3) using a clustering method based on historical data of flood, earthquake, strong wind, landslide, and fire events from 2023 to 2024. A normalization process is applied to ensure equal variable scales, followed by the application of the K-Means algorithm to categorize regions based on similar risk characteristics. The research identifies three main clusters: (1) low-risk areas that are highly suitable for standard tower expansion, (2) moderate-risk areas with additional mitigation recommendations, and (3) high-risk areas requiring alternative approaches, such as Cell on Wheels (COW) or satellite communications. The implementation of these findings provides disaster risk data and a data-based decision support tool, enabling Telkom to prioritize investment in safe locations, reduce operational losses, and enhance the resilience of telecommunication services. Therefore, the clustering method has proven effective in supporting a safe, efficient, and sustainable telecommunication infrastructure expansion strategy.

Keywords: Clustering, Disaster Vulnerability, Telecommunication Infrastructure, Implementation, Decision Support tool

1. Pendahuluan

Pengelolaan data yang baik dapat membantu dalam menganalisis pola, mengidentifikasi potensi risiko, serta memberikan rekomendasi kebijakan yang lebih tepat sasaran [1], [2]. Dalam konteks bencana alam, data historis kejadian seperti banjir, tanah longsor, gempa bumi, kebakaran, dan angin kencang menjadi sumber informasi penting untuk mendukung upaya mitigasi risiko dan perencanaan pembangunan yang berkelanjutan. Metode clustering telah terbukti efektif dalam mengidentifikasi pola tersembunyi dalam data spasial maupun temporal untuk membentuk zonasi risiko bencana, sehingga membantu pengambilan keputusan berbasis data dalam manajemen risiko bencana [3], [4]. Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta termasuk wilayah yang memiliki tingkat risiko bencana tinggi, karena karakteristik geologis dan topografisnya yang kompleks. Menurut data historis, beberapa kabupaten di Yogyakarta berada dalam kategori rawan terhadap bencana hidrometeorologi dan geologi, seperti gempa bumi, tanah longsor, dan erupsi vulkanik [5]. Gempa bumi Yogyakarta tahun 2006 misalnya, menyebabkan kerusakan masif dengan kerugian diperkirakan mencapai Rp 29,1 triliun (USD 3,1 miliar), di mana sebagian besar kerusakan terjadi pada infrastruktur privat seperti perumahan dan bangunan tanpa penguatan struktur yang memadai [6]. Kondisi ini menuntut adanya pendekatan berbasis data yang mampu mengidentifikasi daerah berisiko tinggi secara objektif dan sistematis agar mendukung kebijakan pembangunan infrastruktur yang lebih aman dan berkelanjutan [7].

Dalam perkembangan teknologi dan pesatnya pembangunan infrastruktur telekomunikasi, kebutuhan akan jaringan komunikasi yang andal menjadi semakin penting, khususnya bagi operator besar seperti PT Telkom Indonesia Witel Yogyakarta (Witel 3). Infrastruktur telekomunikasi berperan krusial dalam mendukung konektivitas dan layanan darurat, terutama pada kondisi pasca-bencana [8]. Perusahaan ini berencana melakukan ekspansi pembangunan tower telekomunikasi untuk meningkatkan jangkauan dan kualitas layanan di wilayah operasinya. Namun, ekspansi tersebut harus mempertimbangkan faktor risiko bencana, karena pembangunan tower pada daerah rawan dapat mengancam keselamatan, mengganggu layanan, serta menimbulkan kerugian investasi yang signifikan [9]. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian berjudul "Klasifikasi Tingkat Kerawanan Bencana Witel 3 Menggunakan Metode Clustering PT Telkom Witel Yogyakarta" ini dilakukan guna mengelompokkan wilayah berdasarkan tingkat risiko bencana secara *data-driven* dan sistematis. Metode clustering dipilih karena kemampuannya dalam mengidentifikasi pola tersembunyi di dalam data multidimensional tanpa memerlukan label awal (*unsupervised learning*). Pendekatan ini telah diterapkan secara luas dalam penelitian mitigasi bencana untuk membentuk zonasi risiko dan membantu pengambilan keputusan berbasis data [2]. Studi terdahulu menunjukkan bahwa perbandingan metode clustering seperti K-means dan hierarchical clustering memberikan hasil yang efektif dalam mengelompokkan daerah berdasarkan karakteristik bencana dengan tingkat akurasi yang dapat divalidasi menggunakan metrik seperti Silhouette Score, Dunn Index, dan Connectivity [3]. Melalui penerapan metode clustering untuk klasifikasi tingkat kerawanan bencana di wilayah kerja PT Telkom Witel Yogyakarta, diharapkan hasil penelitian ini dapat mendukung strategi pembangunan tower yang lebih aman, efisien, dan berorientasi pada mitigasi risiko. Integrasi analisis kerawanan bencana ke dalam perencanaan infrastruktur telekomunikasi merupakan langkah proaktif untuk membangun sistem yang resilient terhadap bencana dan mampu

mempertahankan layanan penting dalam kondisi darurat [7]. Selain itu, hasil klasifikasi ini dapat menjadi dasar pengambilan keputusan strategis dalam perencanaan ekspansi infrastruktur telekomunikasi yang berkelanjutan, tangguh terhadap bencana, dan berkontribusi terhadap pembangunan regional yang berkelanjutan [5].

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk menerapkan metode clustering dalam pengelompokan daerah rawan bencana di wilayah Witel 3 secara data-driven dan sistematis. Melalui pendekatan ini, penelitian bertujuan mengidentifikasi dan mengklasifikasikan daerah berdasarkan tingkat kerawanan bencana alam untuk membentuk zonasi risiko yang informatif, sekaligus menyediakan data dan informasi pendukung bagi strategi mitigasi serta pengendalian risiko bencana dalam pembangunan infrastruktur telekomunikasi sebagai dasar pertimbangan ekspansi pembangunan tower telekomunikasi secara optimal.

2. Tinjauan Pustaka

Dalam konteks manajemen risiko bencana, penggunaan metode clustering telah mendapatkan perhatian yang cukup luas karena kemampuannya dalam mengidentifikasi pola tersembunyi dari data spasial dan temporal secara sistematis. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Tocchi et al. (2025), metode clustering dapat digunakan untuk mengelompokkan wilayah berdasarkan tingkat kerawanan bencana sehingga dapat memperlihatkan zonasi risiko yang lebih akurat dan informatif. Pendekatan ini sangat berguna dalam perencanaan mitigasi risiko, pengalokasian sumber daya, serta pengambilan keputusan strategis yang berbasis data (data-driven)[1]. Kinerja metode clustering seperti K-means dan hierarkis sering dibandingkan untuk memastikan hasil pengelompokan yang optimal, yang kemudian divalidasi menggunakan metrik seperti Silhouette Score dan Dunn Index.

K-Means adalah algoritma clustering partitional yang mengelompokkan data berdasarkan nilai rata-rata (mean) dari objek dalam setiap cluster. Proses K-Means dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. **Inisialisasi:** Tentukan jumlah cluster k dan pilih k centroid awal secara random dari dataset
2. **Assignment:** Alokasikan setiap data point ke cluster dengan centroid terdekat berdasarkan jarak Euclidean
3. **Update:** Hitung ulang centroid setiap cluster sebagai rata-rata dari semua data point dalam cluster tersebut
4. **Iterasi:** Ulangi langkah 2 dan 3 hingga centroid tidak berubah atau mencapai iterasi maksimum Fungsi objektif yang diminimalkan dalam K-Means adalah :

$$J = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \|x_i - c_j\|^2$$

dimana x_i adalah data point, c_j adalah centroid cluster j , dan $\|x_i - c_j\|$ adalah jarak Euclidean antara data point dan centroid.

Hierarchical clustering adalah metode clustering yang membangun hierarki cluster dalam bentuk dendrogram [10]. Terdapat dua pendekatan utama: agglomerative (bottom-up) dan divisive (top-down). Pendekatan agglomerative dimulai dengan setiap data point sebagai cluster individual, kemudian secara iteratif menggabungkan cluster yang paling

mirip hingga semua data point berada dalam satu cluster atau kriteria penghentian tercapai [10].

Metode linkage yang umum digunakan dalam hierarchical clustering meliputi: (1) Single linkage - jarak minimum antar cluster, (2) Complete linkage - jarak maksimum antar cluster, (3) Average linkage - jarak rata-rata antar cluster, dan (4) Ward's method - minimalisasi varians dalam cluster [10].

Normalisasi data adalah proses preprocessing yang mengubah skala nilai atribut ke dalam rentang tertentu untuk memastikan bahwa setiap atribut memiliki bobot yang setara dalam perhitungan jarak

Dalatu & Midi (2020) mengidentifikasi bahwa penggunaan metrik jarak seperti Euclidean distance

tanpa normalisasi dapat menghasilkan bias, karena atribut dengan magnitud besar akan mendominasi perhitungan jarak [11].

Metode normalisasi yang umum digunakan meliputi:

Min-Max Normalization: Mentransformasi nilai ke dalam rentang [0,1]

$$v'_i = \frac{v_i - \min_j}{\max_j - \min_j}$$

1. Decimal Scaling: Menggeser titik desimal berdasarkan nilai absolut maksimum

$$v'_i = \frac{v_i}{10^j}$$

dimana j adalah integer terkecil sehingga

2. Z-Score Normalization (Standardization): Mentransformasi data memiliki mean 0 dan standard deviation 1:

$$v'_i = \frac{v_i - \mu}{\sigma}$$

Penerapan normalisasi sebelum clustering K-Means secara signifikan meningkatkan akurasi hasil clustering dan mengurangi kompleksitas komputasi.

Metode Elbow adalah teknik heuristik yang digunakan untuk menentukan jumlah cluster optimal (k) dalam algoritma K-Means dengan mengidentifikasi titik "siku" (elbow) pada grafik. Metode ini bekerja dengan menghitung Within-Cluster Sum of Squares (WCSS) untuk berbagai nilai k , kemudian memplot nilai k pada sumbu x dan WCSS pada sumbu y [12].

$$WCSS = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} \text{distance}(x_j^{(i)}, c_i)^2$$

3. METODOLOGI PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini digambarkan pada Gambar berikut, yang menunjukkan alur penelitian secara keseluruhan. Penelitian ini melibatkan empat tahapan yaitu identifikasi masalah, pengumpulan data, pengolahan data, visualisasi data.



Gambar 3.1 Alur Kegiatan

Tahapan pertama adalah Identifikasi Masalah, dimana peneliti menganalisis permasalahan yang dihadapi terkait kebutuhan klasifikasi daerah rawan bencana untuk mendukung strategi ekspansi tower telekomunikasi di wilayah Witel 3. Tahap kedua adalah Pengumpulan Data, yang melibatkan proses pengumpulan data historis kejadian bencana dari berbagai sumber terpercaya. Data yang dikumpulkan mencakup lima jenis bencana utama yaitu banjir, longsor, angin kencang, kebakaran, dan gempa untuk sepuluh daerah dalam wilayah penelitian. Setelah data terkumpul, dilanjutkan dengan Pengolahan Data sebagai tahap ketiga, dimana data mentah ditransformasi melalui proses normalisasi, standardisasi, dan penerapan algoritma clustering K-Means untuk mengelompokkan daerah berdasarkan tingkat risiko bencananya. Tahap terakhir adalah Visualisasi Data, yang bertujuan menyajikan hasil clustering dalam bentuk grafik dan chart yang mudah dipahami. Visualisasi ini meliputi scatter plot, heatmap, dan grafik elbow method yang membantu dalam interpretasi hasil dan pengambilan keputusan strategis. Keempat tahapan ini membentuk siklus penelitian yang sistematis dan terstruktur untuk menghasilkan klasifikasi daerah rawan bencana yang akurat dan dapat digunakan sebagai dasar perencanaan ekspansi infrastruktur telekomunikasi.

3. Hasil dan Pembahasan

Tabel 3.1 Data Jumlah Setiap Bencana

Daerah	Banjir	Longsor	Angin Kencang	Kebakaran	Gempa
BANJARNEGARA	4	60	15	26	2
BANTUL	12	117	760	45	1559
CILACAP	7	33	43	7	0
GUNUNG KIDUL	48	304	1044	67	2103
INNER - YOGYA JATENG SELATAN	5	27	162	20	0
MAGELANG	3	91	50	41	1
PURWOKERTO	4	33	13	12	1
PURWOREJO	0	4	16	0	1
SLEMAN	4	88	438	69	28
WONOSOBO	3	27	19	15	1

Data kejadian bencana alam di sepuluh daerah wilayah penelitian yang mencakup lima jenis bencana yaitu banjir, longsor, angin kencang, kebakaran, dan

gempa. Data ini menjadi dasar untuk analisis clustering tingkat risiko bencana dalam mendukung perencanaan ekspansi tower telekomunikasi Witel 3. Gunung Kidul menunjukkan angka kejadian bencana tertinggi dengan 2103 kejadian gempa, 1044 kejadian angin kencang, 304 kejadian longsor, 67 kejadian kebakaran, dan 48 kejadian banjir. Bantul berada di posisi kedua dengan dominasi pada gempa sebanyak 1559 kejadian dan angin kencang 760 kejadian. Sleman memiliki karakteristik unik dengan kejadian kebakaran tertinggi sebanyak 69 kejadian dan angin kencang 438 kejadian. Daerah-daerah seperti Banjarnegara, Magelang, dan Inner-Yogya Jateng Selatan menunjukkan tingkat risiko menengah dengan variasi kejadian bencana yang moderat. Sementara itu, Cilacap, Purwokerto, Wonosobo, dan Purworejo memiliki angka kejadian bencana yang relatif rendah dengan Purworejo sebagai daerah paling aman yang hanya mencatat 21 total kejadian bencana. Perbedaan yang sangat signifikan antara daerah berisiko tinggi seperti Gunung Kidul dan daerah berisiko rendah seperti Purworejo menunjukkan perlunya pengelompokan daerah berdasarkan tingkat risiko untuk strategi pembangunan infrastruktur yang tepat sasaran.

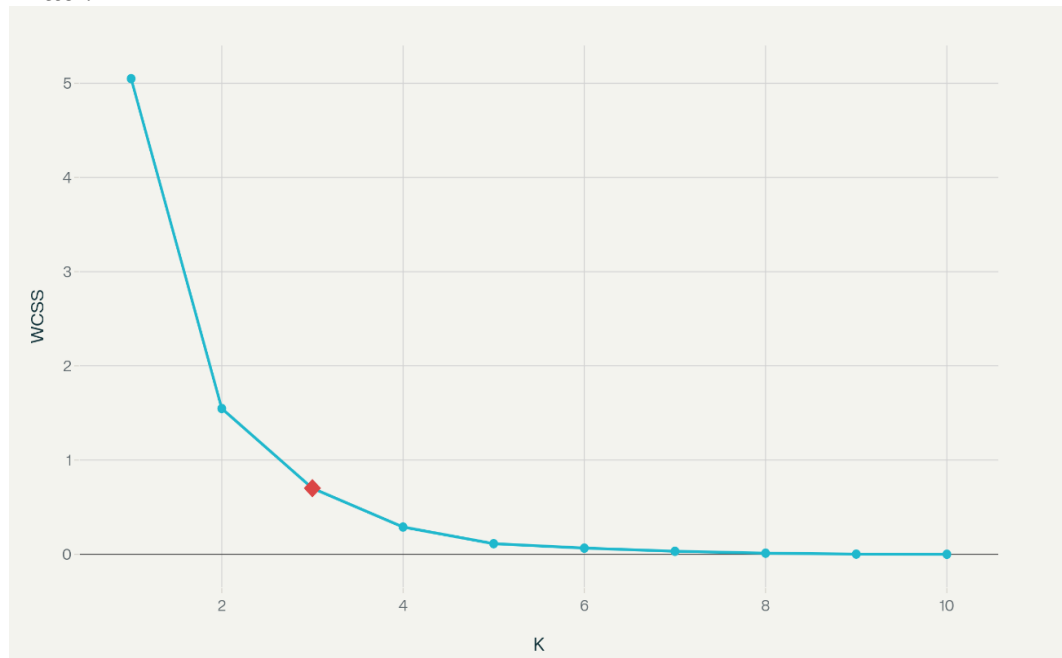
Tabel 3.2 Hasil Normalisasi Data Bencana

Daerah	Banji r	Longso r	Angin Kencan g	Kebakara n	Gemp a	Total_Risk_Nor m
BANJARNEGARA	0,08	0,19	0,00	0,38	0,00	0,13
BANTUL	0,25	0,38	0,72	0,65	0,74	0,55
CILACAP	0,15	0,10	0,03	0,10	0,00	0,07
GUNUNG KIDUL	1,00	1,00	1,00	0,97	1,00	0,99
INNER - YOGYA JATENG SELATAN	0,10	0,08	0,14	0,29	0,00	0,12
MAGELANG	0,06	0,29	0,04	0,59	0,00	0,20
PURWOKERTO	0,08	0,10	0,00	0,17	0,00	0,07
PURWOREJO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLEMAN	0,08	0,28	0,41	1,00	0,01	0,36
WONOSOBO	0,06	0,08	0,01	0,22	0,00	0,07

hasil normalisasi menampilkan tingkat risiko bencana untuk 10 daerah yang telah dikonversi ke skala 0-1 menggunakan metode Min-Max Scaling. Hasil menunjukkan bahwa Gunung Kidul menonjol sebagai daerah dengan risiko tertinggi (Total Risk: 0.99) dengan nilai maksimum pada hampir semua jenis bencana termasuk gempa, longsor, dan angin kencang.

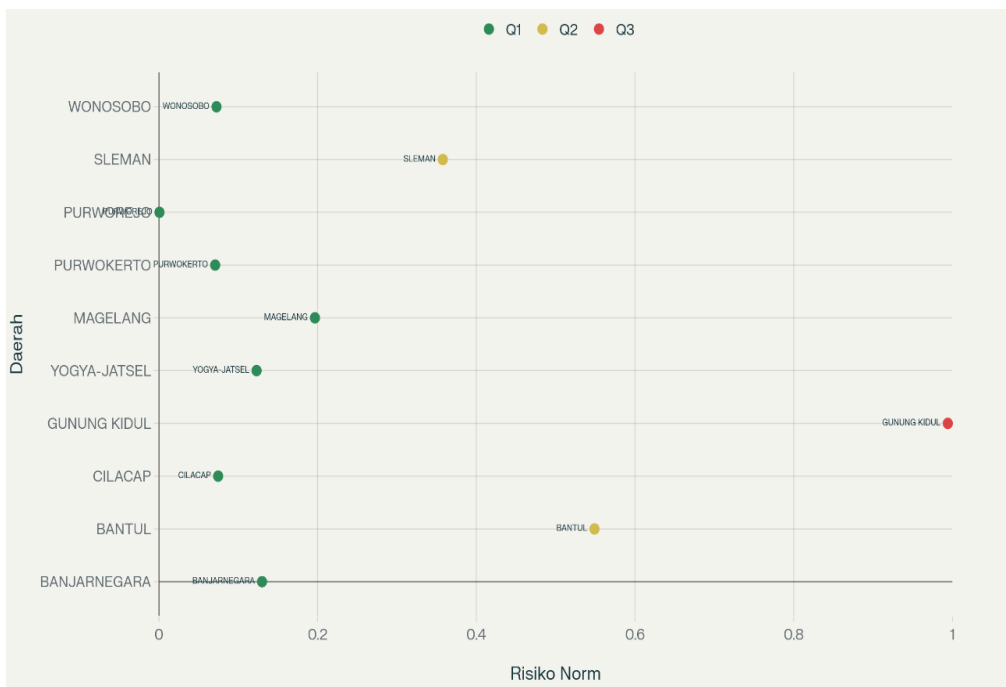
Bantul dan Sleman berada pada kategori risiko sedang dengan nilai total masing-masing 0.55 dan 0.36, dimana Bantul memiliki risiko tinggi pada gempa dan angin kencang, sedangkan Sleman didominasi oleh risiko kebakaran maksimum. Tujuh daerah lainnya yakni Magelang, Banjarnegara, Inner-Yogya Jateng Selatan, Cilacap, Wonosobo, Purwokerto, dan Purworejo menunjukkan profil risiko rendah dengan nilai total berkisar antara 0.001 hingga 0.20. Pola normalisasi ini menghasilkan pengelompokan alamiah yang jelas antara daerah berisiko tinggi, sedang, dan rendah. Purworejo mencatat risiko terendah dengan nilai mendekati nol pada semua kategori bencana, sementara sebagian besar daerah lainnya memiliki profil risiko yang relatif aman untuk pembangunan infrastruktur telekomunikasi. Data ternormalisasi ini

memberikan dasar objektif untuk strategi mitigasi yang disesuaikan dengan karakteristik risiko spesifik masing-masing wilayah dalam rencana ekspansi tower telekomunikasi.



Gambar3.3 Hasil Elbow Method

Grafik menunjukkan penurunan WCSS yang sangat drastis dari $K=1$ (nilai ~ 5.0) ke $K=2$ (nilai ~ 1.5), kemudian penurunan yang masih signifikan dari $K=2$ ke $K=3$ (nilai ~ 0.7). Setelah $K=3$, kurva mulai mendatar dengan penurunan yang sangat kecil hingga mendekati 0 pada $K=10$. Titik elbow ditandai dengan diamond merah pada $K=3$, menunjukkan bahwa 3 cluster merupakan jumlah optimal. Hal ini diperkuat oleh perubahan gradien yang signifikan di titik tersebut, dimana setelah $K=3$ manfaat penambahan cluster menjadi minimal.

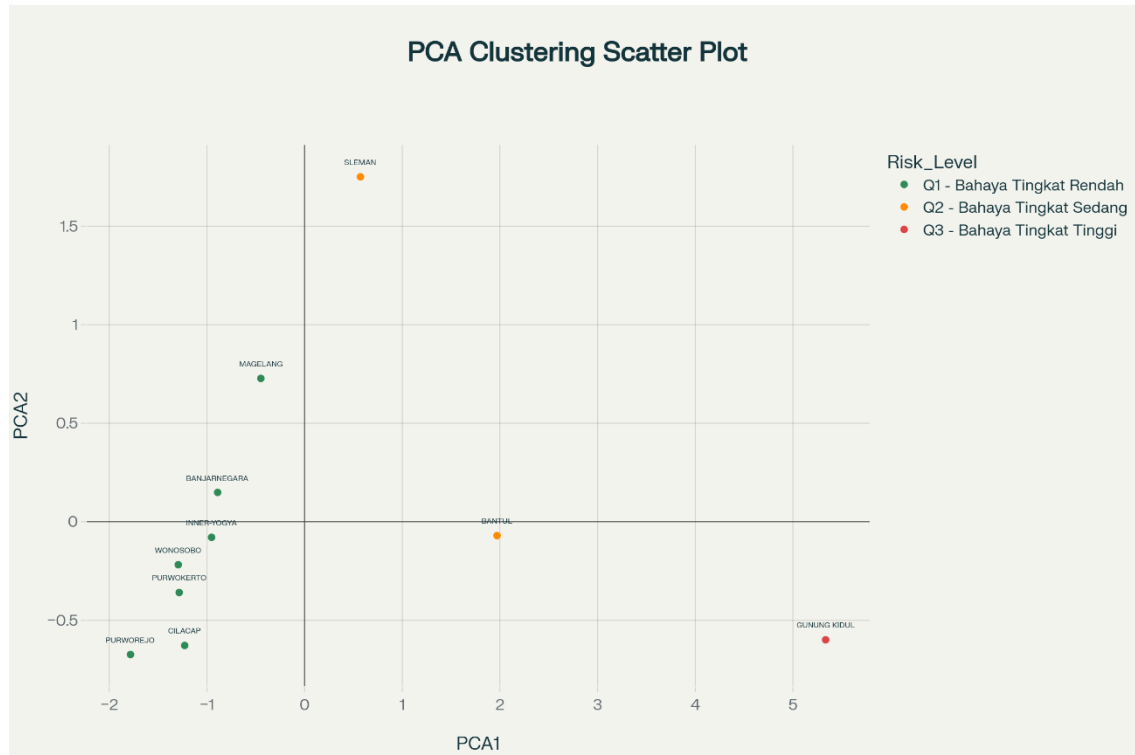


Gambar 3.4 Hasil Clustering Tingkat Bencana

Hasil visualisasi clustering daerah rawan bencana setelah proses normalisasi data, yang disajikan dalam bentuk scatter plot horizontal. Grafik ini menggunakan sumbu horizontal untuk menampilkan nilai risiko ternormalisasi dengan skala 0 hingga 1, sementara sumbu vertikal mencantumkan nama-nama sepuluh daerah yang menjadi objek penelitian. Sistem pewarnaan pada grafik ini menggunakan tiga kategori warna yang berbeda untuk membedakan tingkat bahaya bencana. Titik-titik berwarna hijau mewakili daerah-daerah dengan kategori Q1 atau bahaya tingkat rendah, titik berwarna kuning/orange menunjukkan daerah kategori Q2 atau bahaya tingkat sedang, sedangkan titik berwarna merah mengindikasikan daerah kategori Q3 atau bahaya tingkat tinggi.

Distribusi data pada grafik menunjukkan adanya pengelompokan yang jelas dan terpisah antar cluster. Sebagian besar titik hijau terkonsentrasi di sisi kiri grafik dengan nilai risiko ternormalisasi yang sangat rendah, berkisar antara 0.0 hingga 0.2. Daerah-daerah seperti Wonosobo, Purworejo, Purwokerto, Magelang, Yogya-Jatsel, Cilacap, dan Banjarnegara semuanya berada dalam kelompok ini, menunjukkan kondisi risiko bencana yang relatif aman. Di bagian tengah grafik terdapat dua titik kuning yang mewakili Sleman dan Bantul, dengan posisi Sleman berada pada nilai sekitar 0.35 dan Bantul pada nilai sekitar 0.55. Kedua daerah ini menunjukkan adanya peningkatan risiko yang cukup signifikan dibandingkan dengan kelompok daerah berisiko rendah, namun masih dalam batas yang dapat dikelola dengan mitigasi yang tepat. Paling mencolok dalam visualisasi ini adalah keberadaan satu titik merah yang terpisah jauh di sisi kanan grafik, yaitu Gunung Kidul dengan nilai risiko ternormalisasi mendekati 1.0. Posisi yang sangat terpisah ini mengindikasikan bahwa Gunung Kidul memiliki profil risiko bencana yang luar biasa tinggi dibandingkan dengan sembilan daerah lainnya, sehingga membentuk cluster tersendiri dalam kategori bahaya tingkat tinggi. Pemisahan visual yang jelas antara ketiga kelompok cluster ini menunjukkan bahwa

proses clustering telah berhasil mengidentifikasi pola-pola risiko yang berbeda secara signifikan.



Gambar 3.5 Hasil Clustering Tingkat Bencana

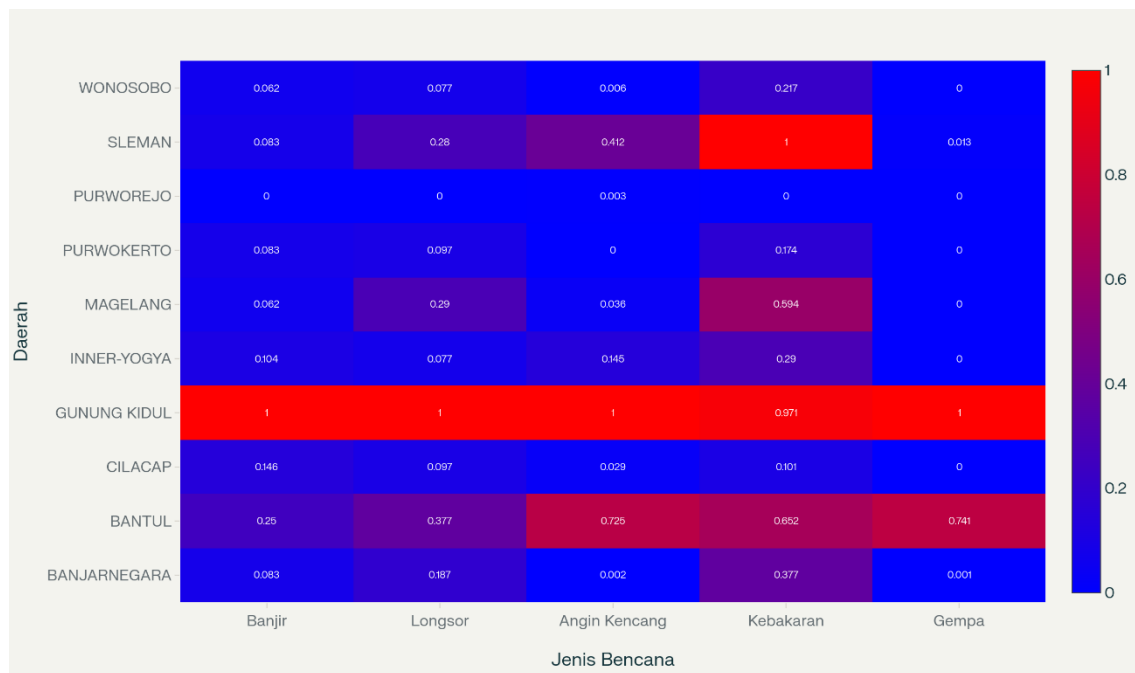
Scatter plot ini menunjukkan hasil clustering dalam ruang Principal Component Analysis (PCA) dengan dua dimensi. PC1 (sumbu X) menjelaskan sekitar 85% varians data, sedangkan PC2 (sumbu Y) menjelaskan sekitar 10% varians. Visualisasi ini memperlihatkan pemisahan cluster yang sangat jelas:

Titik Hijau (Q1): Daerah risiko rendah berkelompok di sebelah kiri, menunjukkan karakteristik risiko yang serupa.

Titik Orange (Q2): Bantul dan Sleman berada di posisi tengah dengan separasi yang jelas dari cluster lain.

Titik Merah (Q3): Gunung Kidul terpisah jauh di sebelah kanan sebagai outlier dengan risiko ekstrem.

Pemisahan visual yang tegas ini mengkonfirmasi validitas hasil clustering dan menunjukkan bahwa ketiga kelompok memiliki karakteristik risiko yang berbeda secara signifikan.



Gambar 3.6 Heat Map Risiko Bencana

Heatmap ini menampilkan intensitas risiko untuk setiap jenis bencana di masing-masing daerah menggunakan skala warna dari biru (risiko rendah, nilai 0) hingga merah (risiko tinggi, nilai 1). Pola yang terlihat:

- Gunung Kidul: Menunjukkan warna merah intens pada hampir semua jenis bencana, terutama Gempa, Longsor, dan Angin Kencang.
- Bantul: Memiliki risiko tinggi pada Gempa dan Angin Kencang (warna orange-merah).
- Sleman: Dominan pada Kebakaran dengan warna merah, dan Angin Kencang dengan warna orange.
- Daerah Q1: Umumnya berwarna biru hingga biru muda, menunjukkan risiko rendah pada semua jenis bencana.

Dari Hasil akhir diperoleh:

1. Q1 – Bahaya Tingkat Rendah

- Terdiri dari 7 daerah dengan Total_Risk_Norm rata-rata ≈ 0.13 , nilai rentang 0.00–0.21.
- Karakteristik: skor norm tiap jenis bencana sangat rendah (< 0.30), menunjukkan kondisi relatif aman.
- Kelayakan: Sangat layak untuk ekspansi tower dengan standar konstruksi reguler.

2. Q2 – Bahaya Tingkat Sedang

- Terdiri dari 2 daerah (Sleman & Bantul) dengan Total_Risk_Norm rata-rata ≈ 0.45 , nilai rentang 0.36–0.55.
- Karakteristik: risiko moderat pada angin kencang, kebakaran, dan gempa (skor norm 0.40–1.00).
- Kelayakan: Layak dengan penerapan mitigasi selektif (desain tahan gempa dan proteksi kebakaran).

3. Q3 – Bahaya Tingkat Tinggi

- Terdiri dari 1 daerah (Gunung Kidul) dengan $Total_Risk_Norm \approx 0.99$.
- Karakteristik: skor norm mendekati 1 untuk semua jenis bencana, menandakan risiko ekstrem.
- Kelayakan: Tidak layak untuk pembangunan konvensional; perlu penundaan atau alternatif komunikasi (COW/satelit) dengan mitigasi maksimal.

5. Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil mengklasifikasikan tingkat kerawanan bencana di wilayah kerja Witel 3 PT Telkom Yogyakarta menggunakan metode clustering untuk mendukung strategi ekspansi infrastruktur telekomunikasi yang aman dan berkelanjutan. Berdasarkan analisis data historis kejadian bencana periode 2023-2024 yang mencakup lima jenis bencana (banjir, longsor, angin kencang, kebakaran, dan gempa) di sepuluh daerah wilayah penelitian, penerapan metode Min-Max Normalization berhasil mengkonversi data dengan skala berbeda menjadi nilai ternormalisasi dalam rentang 0-1, dengan $Total_Risk_Norm$ berkisar dari 0.00 (Purworejo) hingga 0.99 (Gunung Kidul). Penentuan jumlah cluster optimal menggunakan metode Elbow mengidentifikasi $K=3$ sebagai solusi terbaik, dengan penurunan WCSS yang sangat drastis dari $K=1$ (≈ 5.0) ke $K=2$ (≈ 1.5) dan $K=3$ (≈ 0.7), diikuti kurva yang mendatar setelah $K=3$.

Implementasi algoritma K-Means Clustering menghasilkan tiga cluster dengan karakteristik berbeda: Cluster Q1 (Bahaya Tingkat Rendah) terdiri dari tujuh daerah dengan $Total_Risk_Norm$ rata-rata 0.13 (rentang 0.00-0.21), meliputi Purworejo, Wonosobo, Purwokerto, Cilacap, Inner-Yogya Jateng Selatan, Banjarnegara, dan Magelang yang menunjukkan tingkat kejadian bencana sangat rendah; Cluster Q2 (Bahaya Tingkat Sedang) terdiri dari Sleman dan Bantul dengan $Total_Risk_Norm$ rata-rata 0.45 (rentang 0.36-0.55), dimana Sleman didominasi risiko kebakaran (1.00) dan angin kencang (0.41) sedangkan Bantul memiliki risiko tinggi pada gempa (0.74) dan angin kencang (0.72); dan Cluster Q3 (Bahaya Tingkat Tinggi) berisi Gunung Kidul dengan $Total_Risk_Norm$ 0.99 yang mencatat 2103 gempa, 1044 angin kencang, 304 longsor, 67 kebakaran, dan 48 banjir, menjadikannya outlier dengan kondisi multi-hazard ekstrem.

Visualisasi hasil clustering melalui Principal Component Analysis (PCA) menunjukkan pemisahan cluster yang sangat jelas dengan PC1 menjelaskan 85% varians dan PC2 menjelaskan 10% varians (total 95%), dikonfirmasi oleh scatter plot horizontal dan heatmap intensitas risiko yang memperlihatkan Gunung Kidul dengan warna merah intens, Bantul-Sleman dengan gradasi orange-merah, dan daerah Q1 dengan dominasi warna biru. Berdasarkan hasil clustering, rekomendasi kelayakan pembangunan tower telekomunikasi adalah: daerah Q1 sangat layak dengan standar konstruksi reguler; daerah Q2 layak dengan mitigasi selektif (proteksi kebakaran dan tahan angin untuk Sleman, desain tahan gempa dan proteksi angin untuk Bantul); dan daerah Q3 tidak layak untuk pembangunan konvensional sehingga memerlukan alternatif seperti Cell on Wheels (COW) atau komunikasi satelit.

Penelitian ini membuktikan bahwa pendekatan berbasis data mining menggunakan clustering memberikan dasar analitis objektif dan sistematis untuk pengambilan keputusan strategis dalam perencanaan infrastruktur telekomunikasi di daerah rawan bencana, sejalan dengan Sendai Framework for Disaster Risk Reduction

2015-2030. Perbedaan sangat signifikan antara Gunung Kidul (0.99) dan Purworejo (0.00) menunjukkan heterogenitas karakteristik bencana yang tinggi.

Pustaka

- [1] G. Tocchi, M. Pittore, and M. Polese, "Identifying urban and rural settlement archetypes: clustering for enhanced risk-oriented exposure and vulnerability analysis," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 25, no. 9, pp. 3665–3692, Sep. 2025, doi: 10.5194/nhess-25-3665-2025.
- [2] Baromim Triwijaya, Setyoningsih Wibowo, and Nur Latifah Dwi Mutiara Sari, "Performance Comparison of K-Means Algorithm and BIRCH Algorithm in Clustering Earthquake Data in Indonesia with Web-Based Map Visualization," *JURNAL TEKNOLOGI DAN OPEN SOURCE*, vol. 8, no. 1, pp. 278–287, Jun. 2025, doi: 10.36378/jtos.v8i1.4400.
- [3] D. Setiawan and K. Oktafianto, "CLUSTERING OF NATURAL DISASTER-PRONE AREAS IN EAST JAVA PROVINCE USING FUZZY C-MEANS METHOD ARTICLE INFO ABSTRACT Article History," 2025, doi: 10.32665/james.v8i2.5170.
- [4] J. C. N. Bittencourt, D. G. Costa, P. Portugal, and F. Vasques, "A data-driven clustering approach for assessing spatiotemporal vulnerability to urban emergencies," *Sustain Cities Soc*, vol. 108, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.scs.2024.105477.
- [5] A. Nurjanah, N. Prawoto, R. Apriliani, and C. R. Nabilazka, "The Role of Stakeholders as Disaster Communicators at Disaster-Prone Tourist Attraction Objects," *Komunikator*, vol. 15, no. 2, pp. 247–258, Nov. 2023, doi: 10.18196/jkm.20158.
- [6] Bappenas, "Preliminary Damage and Loss Assessment: Yogyakarta and Central Java Natural Disaster," 2006.
- [7] S. J. Teuku *et al.*, "RESILIENT INFRASTRUCTURE IN INDONESIA: A WAY FORWARD," 2021, [Online]. Available: www.lpem.org
- [8] P. Jiang, J. Rowsell, and S. Schmidt, "Crisis-ready telecom: Global approaches to emergency management in telecommunications," *Telecomm Policy*, vol. 49, no. 4, May 2025, doi: 10.1016/j.telpol.2025.102914.
- [9] D. Setiawan and S. H. Sitompul, "Kajian Risiko Bencana Alam Pada Tower SUTT 150 kV Bandung Timur – Ujung Berung," *Cantilever: Jurnal Penelitian dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, vol. 14, no. 1, pp. 23–32, Jun. 2025, doi: 10.35139/cantilever.v14i1.398.
- [10] G. Ramadhan, P. Analisis Algoritma K-means, and Y. Astuti, "Perbandingan Kinerja Algoritma K-means dan Agglomerative Clustering Untuk Segmentasi Penjualan Online Pada Customer Retail," vol. 9, no. 1, 2024.
- [11] P. I. Dalatu and Midi, "MALAYSIAN JOURNAL OF MATHEMATICAL SCIENCES New Approaches to Normalization Techniques to Enhance K-Means Clustering Algorithm," 2020.
- [12] D. Virmani, S. Taneja, and G. Malhotra, "Normalization based K means Clustering Algorithm."