

BAGAIMANA KOMPLEKSITAS METROPOLITAN DI INDONESIA? SEBUAH PENGENALAN AWAL DIMENSI FRAKTAL

Firman Afrianto¹, M. Sani Roychansyah², Yori Herwangi³

Email: firmanafrianto@mail.ugm.ac.id¹, saniroy@ugm.ac.id², yherwangi@ugm.ac.id³

¹ Program Doktor Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknik,
Universitas Gadjah Mada

^{2,3} Dosen Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknik,
Universitas Gadjah Mada

Abstract

Urban complexity is a major challenge in today's urban era. Simplification models are needed to simplify the level of complexity of urban problems around the world. This research aims to understand urban complexity in various metropolitan areas through a combination of road intersection analysis and fractal analysis. Intersection data from metropolitan areas, according to the RTRWN 2017, was collected and analyzed to assess the distribution and connectivity of roads. The box-counting method in fractal analysis was applied to measure the fractal dimension, providing insights into the structural and functional complexity of the road networks. The results show significant variation in fractal dimensions among regions, with Jabodetabek having the highest fractal dimension. This study also used K-Means cluster analysis to group metropolitan areas based on their road network complexity. These findings are useful in urban planning, providing a basis for resource allocation and designing strategies tailored to the unique characteristics of each area. Further research is suggested to integrate demographic, economic, and environmental data for a more comprehensive understanding of urban dynamics.

Keywords: : Complexity, Street Intersection, Fractal Dimension, Cluster

Abstrak

Kompleksitas perkotaan merupakan tantangan besar pada era perkotaan saat ini. Model simplifikasi dibutuhkan untuk menyederhanakan tingkat kompleksitas permasalahan perkotaan di dunia. Penelitian ini bertujuan untuk memahami kompleksitas perkotaan di berbagai wilayah metropolitan melalui kombinasi analisis persimpangan jalan dan analisis fraktal. Data persimpangan dari wilayah metropolitan menurut RTRWN 2017 dikumpulkan dan dianalisis untuk menilai distribusi dan keterhubungan jalan. Metode box-counting dalam analisis fraktal diterapkan untuk mengukur dimensi fraktal, yang memberikan wawasan tentang kompleksitas struktural dan fungsional jaringan jalan. Hasil penelitian menunjukkan variasi signifikan dalam dimensi fraktal antar wilayah, dengan Jabodetabek memiliki dimensi fraktal tertinggi. Penelitian ini juga menggunakan analisis kluster K-Means untuk mengelompokkan wilayah metropolitan berdasarkan kompleksitas jaringan jalannya. Temuan ini bermanfaat dalam perencanaan perkotaan, memberikan dasar dalam mengalokasikan sumber daya dan merancang strategi yang sesuai dengan karakteristik unik setiap wilayah. Penelitian lanjutan disarankan untuk menggabungkan data demografi, ekonomi, dan lingkungan untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif tentang dinamika perkotaan.

Kata kunci: Kompleksitas, Persimpangan Jalan, Dimensi Fraktal, Kluster

1. Pendahuluan

Indonesia, sebagai negara kepulauan dengan populasi yang besar dan beragam, menghadapi berbagai tantangan unik dalam pengembangan dan pengelolaan kota-kotanya. Dalam dekade terakhir, urbanisasi telah mengubah wajah kota-kota besar seperti Jakarta, Surabaya, dan Bandung, memunculkan pertanyaan penting tentang bagaimana kompleksitas ini dapat dipahami dan dikelola secara efektif (Buchori et al., 2017; Chaniago & Hanri, 2021; Mardiansjah et al., 2019; Marwasta, 2019). Penelitian tentang kompleksitas kota metropolitan tidak hanya penting untuk perencanaan dan pengelolaan kota yang lebih efisien, tetapi juga vital untuk memahami dampak sosial, ekonomi, dan lingkungan dari urbanisasi yang pesat ini (Alberti et al., 2018; Batty et al., 2014; Boeing, 2018; Derrible, 2017; Portugali, 2021).

Penggunaan dimensi fraktal dalam penelitian urban menawarkan perspektif baru dalam memahami struktur dan dinamika perkotaan. Konsep fraktal, yang dijelaskan oleh Mandelbrot (1982), menggambarkan bagaimana struktur yang kompleks dapat terdiri dari pola yang lebih kecil dan serupa, memberikan alat yang kuat untuk menganalisis pola yang tidak teratur namun memiliki organisasi internal (Mandelbrot, 2004). Dalam konteks perkotaan, ini bisa membantu dalam memahami bagaimana struktur fisik dan organisasi sosial kota berkembang dan berinteraksi (Batty & Longley, 1987; Chen & Feng, 2012; Yamu & van Nes, 2020). Para ahli mengandalkan berbagai metodologi untuk memahami dinamika perkotaan. Metode analisis statistik dan kuantitatif, terutama melalui penggunaan data demografis dan indikator ekonomi, telah menjadi alat penting untuk mempelajari pola pertumbuhan penduduk dan aspek ekonomi kota (Batty & Longley, 1986; Benguigui et al., 2000; Mandelbrot, 2004). Sistem Informasi Geografis (GIS) dan teknik pemetaan lainnya digunakan untuk menganalisis data spasial, membantu dalam mengidentifikasi penggunaan lahan dan distribusi fasilitas perkotaan (Rahman et al., 2022; Vít et al., 2011; Wang, 2014). Selain itu, penelitian kualitatif melalui wawancara dan studi kasus memberikan wawasan mendalam tentang pengalaman hidup di kota dan tantangan yang dihadapi oleh penduduk (Jacobs, 1961).

Sebelum adopsi pendekatan fraktal, para ahli menggunakan berbagai metodologi untuk mengidentifikasi kompleksitas dalam kota metropolitan seperti yang disebutkan sebelumnya, namun dengan keterbatasan tertentu. Metode statistik dan kuantitatif efektif dalam menyoroti tren dan pola demografis dan ekonomi, namun sering kali kurang dalam menangkap dinamika kompleks dan multi-dimensi perkotaan. Analisis spasial dan pemetaan melalui teknik GIS berhasil dalam mengilustrasikan distribusi lahan dan infrastruktur, namun ini terkadang gagal mengungkap interaksi sosial, ekonomi, dan lingkungan yang kompleks di perkotaan. Sementara itu, studi kasus dan pendekatan kualitatif memberikan wawasan mendalam tentang pengalaman sosial dan budaya, tetapi cenderung bersifat subjektif dan sulit untuk digeneralisasi. Walaupun metodologi ini memberikan pemahaman tentang beberapa aspek kompleksitas urban, mereka sering terbatas dalam menggambarkan keseluruhan gambaran kompleksitas kota yang berubah-ubah dan saling terkait. Pendekatan fraktal kemudian muncul sebagai cara baru untuk mengatasi keterbatasan ini, memberikan perspektif yang lebih holistik dan terintegrasi dalam memahami kompleksitas perkotaan.

Selain itu, perkembangan urban di Indonesia sering kali tidak terencana dengan baik, menyebabkan berbagai masalah seperti kemacetan lalu lintas, polusi, dan ketidaksetaraan dalam akses terhadap sumber daya dan layanan. Urbanisasi yang cepat dan sering kali tidak terkendali ini menimbulkan tantangan signifikan dalam mencapai pembangunan yang berkelanjutan (Mardiansjah et al., 2019; Marwasta, 2019; Mc Gee, 2009; Mc Gee &

Shaharudin, 2016; Surya et al., 2020). Kajian tentang kompleksitas kota metropolitan menggunakan pendekatan fraktal dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang pola dan proses perkembangan urban, membantu perencanaan kota yang lebih efektif dan adil.

Kerumitan dalam dinamika perkotaan di Indonesia juga dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti perubahan iklim, migrasi, dan perkembangan teknologi. Perubahan iklim, misalnya, mempengaruhi pola cuaca dan menyebabkan masalah seperti banjir dan peningkatan suhu, yang selanjutnya mempengaruhi kualitas hidup dan infrastruktur perkotaan (Derrible, 2017). Migrasi dari pedesaan ke perkotaan menambah kerumitan ini dengan mempercepat pertumbuhan penduduk dan menuntut sumber daya yang terbatas. Di sisi lain, perkembangan teknologi, seperti penggunaan big data dan sistem informasi geografis, menawarkan peluang baru untuk menganalisis dan memahami pola perkotaan dengan cara yang lebih efisien dan akurat (Boeing, 2021). Dalam konteks ini, penggunaan pendekatan fraktal dalam penelitian perkotaan di Indonesia menjadi semakin relevan. Pendekatan fraktal memungkinkan analisis struktur dan pola perkotaan secara lebih holistik, tidak hanya berfokus pada aspek fisik tetapi juga aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan. Dengan memahami kompleksitas perkotaan melalui lensa fraktal, kita dapat mengembangkan strategi yang lebih efektif untuk mengatasi berbagai tantangan perkotaan yang saling terkait ini. Penelitian ini berusaha mengisi celah dalam literatur dengan memberikan wawasan baru tentang kompleksitas perkotaan di Indonesia dan kontribusinya terhadap diskursus global mengenai pembangunan perkotaan yang berkelanjutan dan inklusif.

Unsur penting yang digunakan dalam menelaah kompleksitas perkotaan dalam penelitian ini adalah persimpangan jalan. Persimpangan jalan dalam konteks perkotaan tidak hanya berfungsi sebagai titik pertemuan rute transportasi, tetapi juga sebagai simbol perkembangan dan kompleksitas kota. Persimpangan ini seringkali mencerminkan sejarah, pertumbuhan, dan pola interaksi sosial dalam ruang perkotaan. Mereka merupakan titik kunci yang menghubungkan berbagai bagian kota, mempengaruhi aliran lalu lintas, aksesibilitas, dan bahkan perkembangan ekonomi dan sosial di sekitarnya (Afrianto, 2023). Dalam analisis perkotaan, persimpangan jalan dapat dipandang sebagai nodal penting yang mempengaruhi struktur dan fungsi kota. Penggunaan analisis fraktal pada persimpangan jalan menawarkan cara untuk menyederhanakan dan memahami kompleksitas ini. Dimensi fraktal membantu mengungkap pola yang tersembunyi dalam struktur perkotaan yang tampaknya acak atau tidak teratur. Melalui analisis fraktal, dapat dianalisis bagaimana persimpangan jalan berkontribusi pada struktur keseluruhan kota, termasuk bagaimana mereka memfasilitasi atau menghambat konektivitas, bagaimana mereka mencerminkan pertumbuhan historis kota, dan bagaimana mereka mempengaruhi dinamika kota (Batty, 2009a, 2009b; Batty & Longley, 1994). Pendekatan ini memungkinkan peneliti dan perencana kota untuk lebih memahami dan merencanakan interaksi kompleks yang terjadi di sekitar persimpangan jalan, membantu dalam merancang solusi yang lebih efektif dan berkelanjutan untuk perkotaan yang terus berkembang.

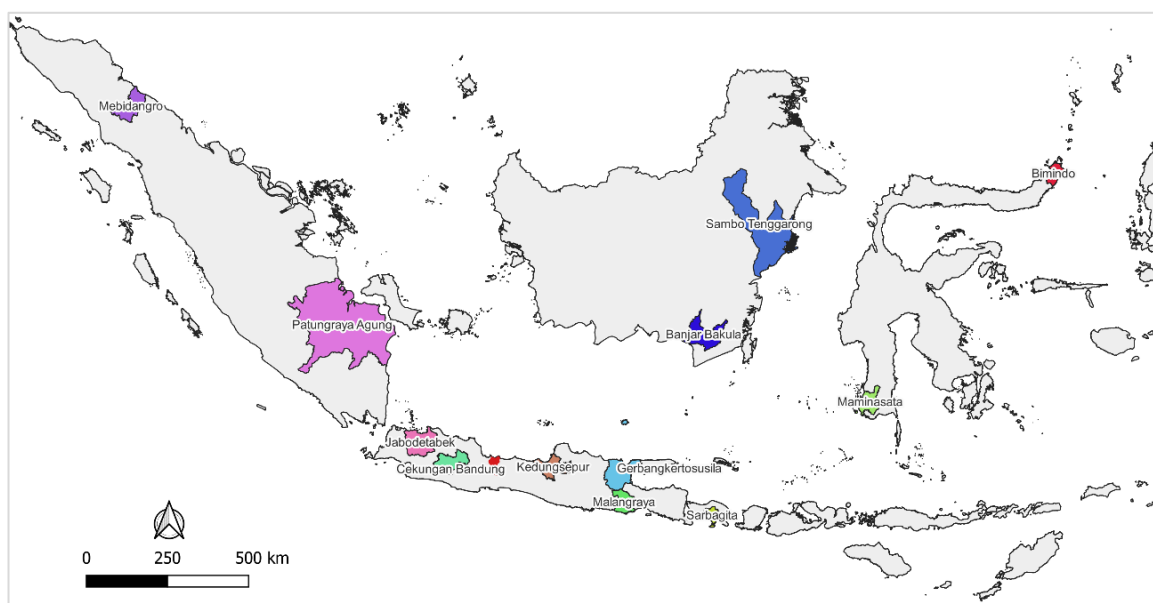
Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengeksplorasi dan memahami kompleksitas perkotaan melalui penerapan analisis fraktal pada persimpangan jalan di kota metropolitan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi tingkat kompleksitas pada setiap wilayah metropolitan di Indonesia. Dengan menganalisis persimpangan jalan melalui lensa fraktal, studi ini bertujuan untuk mengungkap pola tersembunyi dan struktur dalam jaringan perkotaan yang tampak acak, memberikan wawasan baru tentang konektivitas, aksesibilitas, dan interaksi dalam ruang perkotaan. Selain itu, penelitian ini

juga bermaksud untuk menilai potensi aplikasi analisis fraktal dalam perencanaan perkotaan yang lebih efektif dan berkelanjutan, dengan fokus khusus pada pengembangan strategi untuk mengatasi tantangan kompleksitas perkotaan.

2. Metode Penelitian

2.1 Wilayah Studi

Wilayah studi dalam telaah kompleksitas ini menggunakan wilayah perkotaan metropolitan, hal ini di Indonesia terakomodasi dalam dokumen Rencana Tata Ruang Wilayah Nasional tahun 2017 – 2037. Dokumen tersebut memasukkan kawasan metropolitan dalam kawasan strategis nasional (lihat gambar 1). Terdapat 11 Kawasan Perkotaan Metropolitan di mana 6 perkotaan besar terdapat di Pulau Jawa-Bali, 2 kawasan perkotaan metropolitan di Pulau Sumatra, 2 di Pulau Kalimantan dan 2 di Pulau Sulawesi. Kawasan Metropolitan yang dimaksud adalah Banjar Bakula, Cekungan Bandung, Gerbangkertosusila, Jabodetabek, Kedungsepur, Malangraya, Maminasata, Mebidangro, Patungraya Agung, IKN, dan Sarbagita. Wilayah yang termasuk di dalamnya dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 1. Delineasi Kawasan Perkotaan Metropolitan Menurut RTRWN 2017
Sumber : RTRWN, Diolah 2023

2.2 Data Penelitian

Dalam penelitian ini, kami menggunakan dua sumber data utama untuk mendukung analisis fraktal pada persimpangan jalan di kota metropolitan: *Global Administrative Areas (GADM)* untuk data wilayah administrasi dan *OpenStreetMap (OSM)* untuk jaringan jalan. GADM menyediakan data geospasial terperinci tentang batas administratif di berbagai tingkatan, mulai dari level nasional hingga lokal, yang penting untuk memahami konteks administratif dan geografis dari area penelitian. Data ini memungkinkan peneliti untuk memetakan dan menganalisis persimpangan jalan dalam hubungannya dengan pembagian administratif kota, memberikan lapisan penting informasi tentang perencanaan dan kebijakan perkotaan. Di sisi lain, *OpenStreetMap*, sebagai sumber data kolaboratif dan

terbuka, menawarkan informasi yang kaya dan terkini tentang jaringan jalan, termasuk lokasi persimpangan, jenis jalan, dan atribut lainnya. Penggunaan OSM memungkinkan analisis mendalam tentang pola dan struktur jaringan jalan, yang krusial dalam memahami dinamika transportasi dan konektivitas dalam konteks perkotaan. Kombinasi data dari GADM dan OSM ini memberikan dasar yang komprehensif untuk melakukan analisis fraktal, memungkinkan penelitian yang lebih terintegrasi dan holistik tentang kompleksitas perkotaan.

Tabel 1. Data Penelitian

Data	Sumber	Keterangan
Batas administrasi	<i>Global Administrative Areas (GADM)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Batas administrasi level 1 (Provinsi) dan level 2 (Kabupaten) ▪ Data diakses 25 Oktober 2023, diunduh pada https://gadm.org/download_country_v.html
Jaringan Jalan	<i>OpenStreetMap</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diakses lewat QuickOSM dalam QGIS 3.28 ▪ Data diakses 25 Oktober 2023

Sumber : Analisis Penulis, 2023

2.3 Analisis Persimpangan

Analisis ekstraksi persimpangan jalan menggunakan algoritma degree of centrality dalam kerangka space syntax adalah pendekatan kunci dalam penelitian ini untuk melakukan eliminasi titik yang bukan persimpangan. Space syntax, sebuah teori yang menggambarkan hubungan antara ruang dan masyarakat, memfokuskan pada bagaimana individu dan kelompok menggunakan ruang dan bagaimana ruang tersebut terstruktur (Hillier & Hanson, 1984). Dalam konteks ini, algoritma degree of centrality digunakan untuk mengukur seberapa terhubung atau penting sebuah persimpangan dalam jaringan jalan kota. Pertama-tama, data jaringan jalan dari OpenStreetMap diekstraksi untuk mendapatkan representasi digital dari jaringan jalan perkotaan. Kemudian, algoritma degree of centrality diterapkan pada setiap persimpangan dalam jaringan. Degree of centrality di sini mengukur jumlah jalur yang terhubung langsung ke sebuah persimpangan, memberikan indikator kepentingan relatifnya dalam jaringan. Persimpangan dengan degree of centrality yang tinggi biasanya merupakan titik-titik kritis yang menghubungkan banyak rute dan sering memiliki tingkat lalu lintas yang tinggi, menjadi pusat kegiatan, atau memiliki nilai strategis dalam hal aksesibilitas. Dalam konteks ini, jalan yang memiliki nilai degree of centrality 1, yang berarti jalan tersebut hanya terhubung dengan satu persimpangan lain, sering kali merupakan jalur buntu atau jalan yang kurang terintegrasi dengan jaringan jalan utama kota. Nilai 1 kemudian dihilangkan dalam data karena bupan merupakan persimpangan. Analisis ini memungkinkan kita untuk mengidentifikasi dan mengeliminasi titik-titik ini dari analisis lebih lanjut, memfokuskan pada bagian jaringan yang lebih terhubung dan secara strategis lebih penting.

2.4 Analisis Fraktal

Analisis fraktal titik persimpangan jalan menggunakan metode box-counting adalah pendekatan penting dalam memahami struktur dan pola kompleksitas perkotaan. Metode box-counting adalah teknik umum dalam analisis fraktal yang digunakan untuk mengukur dimensi fraktal sebuah objek atau pola. Dalam konteks penelitian ini, metode ini diterapkan pada jaringan jalan perkotaan, khususnya pada titik-titik persimpangan.

Prosesnya dimulai dengan pemetaan jaringan jalan kota menggunakan data dari OpenStreetMap. Setelah jaringan jalan dan persimpangan teridentifikasi dan terfilter dari analisis persimpangan, area penelitian dibagi menjadi kotak-kotak atau 'boxes' berukuran seragam. Ukuran kotak ini sistematis dikurangi, dan pada setiap skala, jumlah kotak yang berisi bagian dari jaringan jalan atau persimpangan dihitung. Ide utamanya adalah mengamati bagaimana jumlah kotak yang diperlukan untuk menutupi semua persimpangan berubah seiring dengan perubahan ukuran kotak. Dimensi fraktal, yang dihitung berdasarkan logaritma jumlah kotak terhadap invers dari ukuran kotak, memberikan ukuran kuantitatif tentang bagaimana kompleksitas jaringan jalan berubah pada berbagai skala. Nilai dimensi fraktal ini mengungkapkan tingkat kompleksitas atau kepadatan jaringan jalan. Sebuah jaringan dengan dimensi fraktal yang lebih tinggi menunjukkan pola yang lebih kompleks, yang mungkin mencerminkan keterhubungan yang lebih tinggi dan heterogenitas dalam tata letak perkotaan.

Melalui metode box-counting, penelitian ini mampu mengkuantifikasi dan memvisualisasikan kompleksitas geometris dari jaringan jalan perkotaan. Hasil analisis ini memberikan wawasan tentang bagaimana persimpangan jalan terdistribusi di seluruh area perkotaan dan bagaimana pola ini berhubungan dengan faktor-faktor seperti perencanaan kota, mobilitas, dan aksesibilitas.

2.5 Analisis Klaster

Metode Elbow dan K-Means adalah dua teknik yang sering digunakan dalam analisis klaster, terutama dalam bidang data science dan statistik. Kedua metode ini membantu dalam mengidentifikasi kelompok atau klaster dalam kumpulan data.

Metode Elbow digunakan untuk menentukan jumlah klaster yang optimal dalam sebuah kumpulan data. Tujuannya adalah untuk mengidentifikasi titik di mana penambahan klaster tambahan tidak memberikan peningkatan signifikan dalam menjelaskan variabilitas dalam data.

Cara kerja Metode Elbow adalah sebagai berikut:

- Algoritma K-Means dijalankan pada data untuk berbagai jumlah klaster (misalnya, dari 1 hingga 10).
- Untuk setiap jumlah klaster, distorsi atau inerti dihitung. Inerti adalah ukuran seberapa jauh titik data berada dari centroid klaster mereka.
- Distorsi ini kemudian digambarkan sebagai fungsi dari jumlah klaster.
- Titik di mana peningkatan jumlah klaster tidak lagi menghasilkan penurunan distorsi yang signifikan disebut sebagai 'titik siku'. Ini dianggap sebagai jumlah klaster yang optimal.

K-Means adalah algoritma klustering yang bertujuan untuk membagi n pengamatan menjadi k klaster dimana setiap pengamatan termasuk dalam klaster dengan rata-rata terdekat (centroid klaster).

Cara kerja K-Means adalah sebagai berikut:

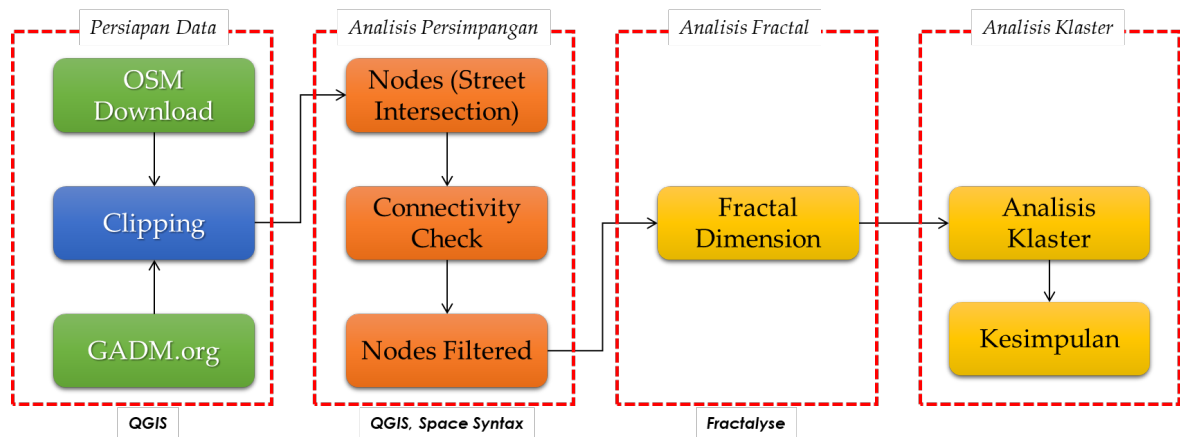
- Pilih secara acak k titik data sebagai centroid awal.
- Tetapkan setiap titik data ke centroid terdekat, membentuk k klaster.
- Hitung ulang centroid setiap klaster berdasarkan titik-titik data yang telah ditetapkan ke klaster tersebut.
- Ulangi langkah 2 dan 3 sampai posisi centroid tidak berubah secara signifikan atau jumlah iterasi maksimum tercapai.

Dalam konteks analisis data, kombinasi metode Elbow dan K-Means membantu dalam menentukan jumlah kluster yang paling masuk akal untuk kumpulan data tertentu dan kemudian mengelompokkan data ke dalam kluster-kluster tersebut. Pada penelitian ini jumlah kluster kompleksitas perkotaan ditentukan oleh perhitungan Elbow sedangkan pengelompokannya diatur dengan K-Means.

2.6 Kerangka Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kompleksitas perkotaan melalui ekstraksi dan analisis fraktal persimpangan jalan, menggunakan data dari Global Administrative Areas (GADM) dan OpenStreetMap (OSM). Kerangka penelitian ini terdiri dari beberapa tahap utama, mulai dari persiapan data hingga kesimpulan. Pada tahap persiapan data, penelitian ini dimulai dengan pengumpulan data wilayah administrasi dari GADM, yang memberikan batas-batas administratif yang diperlukan untuk mendefinisikan ruang lingkup geografis penelitian. Data ini sangat penting untuk memastikan bahwa analisis terfokus pada area yang relevan dan spesifik. Selanjutnya, data jaringan jalan diakses dari OpenStreetMap, yang menyediakan informasi terperinci tentang jalan dan persimpangan di area yang diteliti. Informasi ini menjadi dasar untuk analisis struktur jaringan jalan dan identifikasi persimpangan. Setelah data terkumpul, tahap selanjutnya adalah ekstraksi persimpangan. Menggunakan data dari OSM, penelitian ini mengidentifikasi titik-titik di mana dua atau lebih jalan bertemu, yang dianggap sebagai persimpangan. Selanjutnya, algoritma degree of centrality diterapkan untuk menilai pentingnya setiap persimpangan dalam konteks jaringan jalan secara keseluruhan. Ini membantu dalam memahami bagaimana persimpangan berkontribusi terhadap aliran dan distribusi lalu lintas di kota. Tahap berikutnya adalah analisis dimensi fraktal menggunakan metode box-counting. Dalam tahap ini, area penelitian dibagi menjadi kotak-kotak berukuran seragam, dan jumlah kotak yang berisi sebagian dari jaringan jalan atau persimpangan dihitung pada berbagai skala ukuran. Ini memungkinkan untuk menghitung dimensi fraktal, yang memberikan ukuran kuantitatif tentang kompleksitas jaringan jalan. Tahap diskusi melibatkan analisis dan interpretasi hasil dari analisis fraktal. Ini mencakup diskusi tentang bagaimana nilai dimensi fraktal mencerminkan kompleksitas dan keterhubungan jaringan jalan, serta implikasinya terhadap perencanaan perkotaan, mobilitas, dan aksesibilitas. Di tahap ini, penelitian juga mengeksplorasi bagaimana pengelompokan penanganan dengan melakukan analisis kluster.

Akhirnya, tahap kesimpulan menyajikan ringkasan dari temuan utama, membahas implikasi praktis dari penelitian, dan memberikan saran untuk penelitian lanjutan. Kesimpulan ini bertujuan untuk memberikan wawasan bagi perencana kota dan pembuat kebijakan dalam merancang dan mengelola perkembangan perkotaan yang lebih efektif dan berkelanjutan, serta membuka peluang untuk penelitian lebih lanjut dalam bidang analisis fraktal dan perencanaan perkotaan. Secara detail alur penelitian ini dijelaskan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kerangka Penelitian
Sumber : Hasil Analisis, 2023

3. Pembahasan

3.1 Ekstraksi Persimpangan

Data ekstraksi persimpangan jalan di berbagai wilayah metropolitan mengungkap perbedaan signifikan dalam jumlah nodes, baik sebelum maupun setelah proses penyaringan, serta dalam proporsi nodes yang disaring. Perbedaan ini memberikan wawasan tentang struktur dan kompleksitas jaringan jalan di tiap wilayah metropolitan. Wilayah metropolitan dengan jumlah nodes tertinggi sebelum penyaringan adalah Gerbangkertosusila, yang memiliki 831.885 nodes. Setelah proses penyaringan, jumlah ini berkurang menjadi 624.473 nodes, dengan proporsi nodes yang disaring sekitar 75%. Angka ini menunjukkan bahwa Gerbangkertosusila memiliki jaringan jalan yang sangat kompleks dan terhubung dengan baik, dengan sebagian besar nodesnya memainkan peran penting dalam konektivitas keseluruhan jaringan. Ini menandakan adanya kepadatan perkotaan yang tinggi dan mungkin juga menunjukkan pola perkembangan perkotaan yang telah lama dan berkembang. Di sisi lain, wilayah metropolitan dengan jumlah nodes terendah baik sebelum maupun setelah penyaringan adalah Bimindo. Wilayah ini memiliki 46.400 nodes awal yang berkurang menjadi 33.355 setelah penyaringan, dengan proporsi nodes yang disaring sekitar 72%. Walaupun jumlah nodesnya lebih sedikit, proporsi nodes yang disaring menunjukkan bahwa sebagian besar dari nodes ini cukup penting untuk struktur jaringan jalan di wilayah ini. Hal ini bisa mengindikasikan bahwa Bimindo memiliki jaringan jalan yang lebih sederhana atau kurang kompleks dibandingkan dengan wilayah metropolitan lainnya, atau mungkin bahwa perkembangan kota di wilayah ini lebih terfokus dan terkonsentrasi.

Analisis statistik deskriptif dari data ekstraksi persimpangan jalan di berbagai wilayah metropolitan memberikan dasar yang penting untuk persiapan analisis fraktal, yang bertujuan untuk memahami kompleksitas perkotaan. Dalam konteks ini, perbedaan dalam jumlah nodes dan proporsi nodes yang disaring antara wilayah-wilayah seperti Gerbangkertosusila dan Bimindo tidak hanya mencerminkan kekhasan struktural jaringan jalan mereka, tetapi juga menetapkan parameter kunci untuk analisis fraktal.

Dalam wilayah seperti Gerbangkertosusila, dengan jumlah nodes tertinggi dan proporsi nodes yang disaring yang signifikan, kompleksitas jaringan jalan yang tinggi mengindikasikan adanya struktur perkotaan yang sangat terhubung dan mungkin berbentuk fraktal. Jaringan jalan yang kompleks ini ideal untuk analisis fraktal, yang akan mengeksplorasi bagaimana pola dan konektivitas pada skala yang berbeda membentuk

struktur keseluruhan kota. Di sisi lain, Bimindo, dengan jumlah nodes yang lebih sedikit dan struktur jaringan yang lebih sederhana, mungkin akan menunjukkan karakteristik fraktal yang berbeda. Analisis di wilayah seperti ini dapat memberikan insight tentang bagaimana jaringan jalan yang lebih sederhana mempengaruhi pola perkotaan dan mobilitas.

Tabel 2. Ekstraksi Persimpangan

Metropolitan	Jumlah Nodes	Jumlah Nodes Setelah di Filter	Prosentase Setelah di Filter terhadap jumlah Nodes
Banjar Bakula	57.635	41.875	72,66%
Bimindo	46.400	33.355	71,89%
Cekungan Bandung	207.534	143.273	69,04%
Gerbangkertosusila	299.001	224.239	75,00%
IKN	120.183	81.104	67,48%
Jabodetabek	831.885	624.473	75,07%
Malang Raya	146.113	99.307	67,97%
Kedungsepur	201.406	152.449	75,69%
Mamminasata	83.670	60.800	72,67%
Mebidangro	173.601	117.588	67,73%
Patungraya Agung	158.551	114.533	72,24%
Sarbagita	130.656	81.918	62,70%

Sumber : Hasil Analisis, 2023

3.2 Analisis Persimpangan

Analisis data dan statistik deskriptif dari karakteristik jaringan jalan di beberapa wilayah metropolitan mengungkapkan gambaran yang menarik tentang struktur dan kompleksitas perkotaan. Dari data yang dikumpulkan, terlihat bahwa terdapat variasi yang signifikan dalam jumlah ruas jalan, panjang total jalan, rata-rata panjang ruas jalan, dan jumlah persimpangan di antara wilayah-wilayah metropolitan yang berbeda. Rata-rata jumlah ruas jalan di wilayah metropolitan yang diteliti berkisar sekitar 292.241 unit, dengan wilayah yang paling padat mencapai lebih dari satu juta unit. Variasi ini mengindikasikan tingkat perkembangan infrastruktur dan urbanisasi yang berbeda-beda di setiap wilayah, menunjukkan pola pembangunan yang unik dan kompleksitas yang beragam. Dalam hal panjang jalan, rata-rata total panjang jalan di wilayah-wilayah ini adalah sekitar 25.085 km, dengan standar deviasi yang cukup tinggi, yaitu 18.444 km. Hal ini menunjukkan adanya perbedaan yang cukup signifikan dalam skala dan luas jaringan jalan di antara wilayah-wilayah metropolitan. Wilayah dengan jaringan jalan terpanjang mencerminkan kompleksitas dan kepadatan yang lebih tinggi, serta kemungkinan menyediakan lebih banyak akses dan konektivitas di dalam kota. Rata-rata panjang ruas jalan di wilayah metropolitan yang diteliti menunjukkan variasi yang berbeda, dengan rata-rata sekitar 108 meter dan rentang dari sekitar 48 meter hingga lebih dari 200 meter. Panjang ruas jalan yang lebih pendek biasanya mengindikasikan area perkotaan yang lebih padat, dengan jaringan jalan yang lebih kompleks dan seringkali lebih banyak persimpangan. Sebaliknya, ruas jalan yang lebih panjang bisa menunjukkan area perkotaan yang lebih luas dan tersebar, dengan ruang yang lebih terbuka. Jumlah persimpangan, dengan rata-rata sekitar 147.909 persimpangan di wilayah metropolitan yang diteliti, juga menunjukkan perbedaan

yang mencolok. Variasi dari sekitar 33.355 hingga 624.473 persimpangan menegaskan kembali keanekaragaman dalam struktur perkotaan. Persimpangan yang lebih banyak dalam suatu wilayah menandakan tingkat interkoneksi yang lebih tinggi, yang penting untuk mobilitas dan aksesibilitas perkotaan. Wilayah dengan persimpangan yang lebih sedikit mungkin menggambarkan pola perkotaan yang lebih baru atau kurang berkembang, dengan potensi untuk pertumbuhan dan pengembangan lebih lanjut.

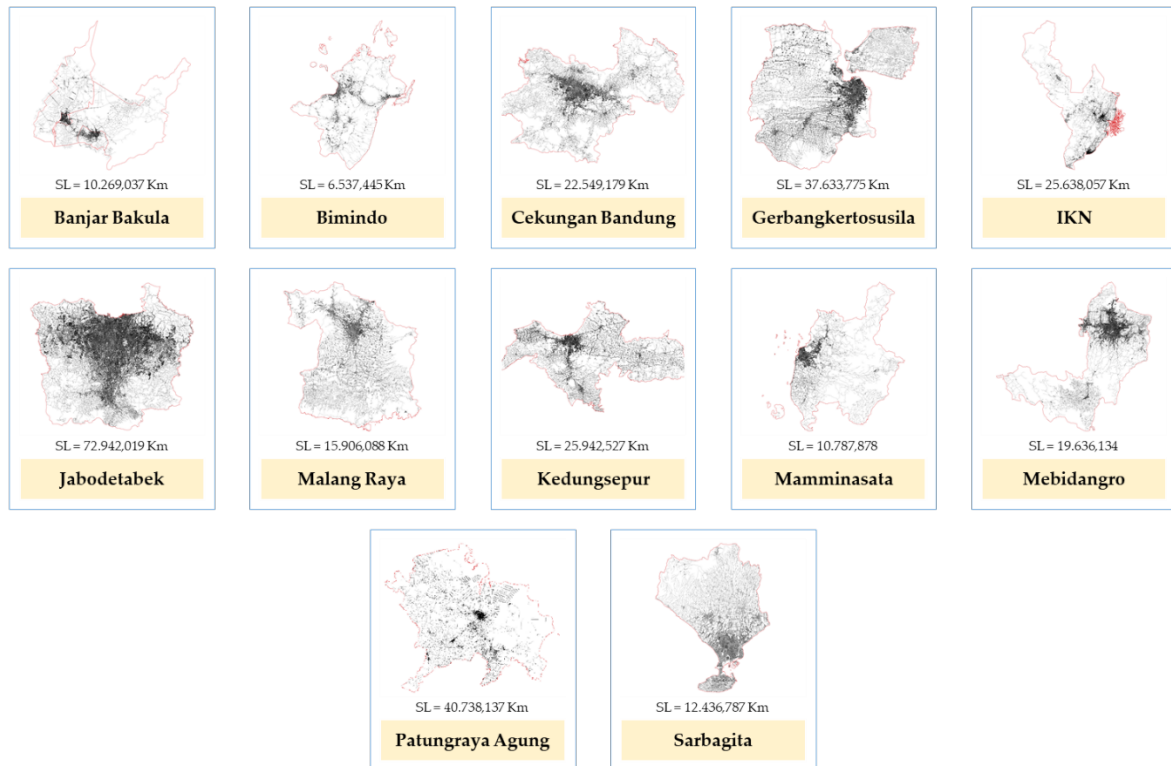
Tabel 3. Karakteristik Jalan dan Persimpangan

Metropolitan	Jumlah Ruas Jalan (unit)	Panjang Jalan (Km)	Rata-rata Panjang Ruas Jalan (m)	Jumlah persimpangan (unit)
Banjar Bakula	72.798	10.269,04	141,06	41.875
Bimindo	59.358	6.537,45	110,14	33.355
Cekungan Bandung	253.935	22.549,18	88,08	143.273
Gerbangkertosusila	787.998	37.633,78	47,76	224.239
IKN	145.424	25.638,06	176,30	81.104
Jabodetabek	1.079.380	72.942,02	67,58	624.473
Malang Raya	177.042	15.906,09	89,84	99.307
Kedungsepur	262.351	25.942,53	98,88	152.449
Mamminasata	106.219	10.787,88	101,56	60.800
Mebidangro	210.415	19.636,13	93,32	117.588
Patungraya Agung	201.360	40.738,14	202,31	114.533
Sarbagita	150.609	12.436,79	82,58	81.918

Sumber : Hasil Analisis, 2023

Perbandingan antar wilayah metropolitan dalam konteks karakteristik jaringan jalan mengungkapkan perbedaan mencolok yang mencerminkan tingkat perkembangan, urbanisasi, dan perencanaan kota yang berbeda. Setiap wilayah metropolitan memiliki ciri khasnya sendiri dalam hal infrastruktur jalan dan pola perkotaan, yang tercermin dalam data yang dianalisis. **Pertama**, jika kita melihat jumlah ruas jalan, terdapat perbedaan signifikan antar wilayah. Wilayah seperti Gerbangkertosusila, dengan jumlah ruas jalan yang sangat tinggi, menunjukkan keterhubungan yang luas dan kemungkinan kepadatan perkotaan yang tinggi. Di sisi lain, wilayah dengan jumlah ruas jalan yang lebih sedikit, seperti Bimindo, mungkin menandakan perkembangan yang lebih terkonsentrasi atau terbatas pada beberapa area utama. Jumlah ruas jalan yang lebih tinggi juga bisa mengindikasikan sejarah perkotaan yang lebih panjang dengan banyak ekspansi dan pembangunan ulang seiring waktu. **Kedua**, panjang total jalan dalam sebuah wilayah memberikan wawasan tentang skala dan luasnya jaringan transportasi. Wilayah dengan panjang jalan total yang lebih panjang, seperti Gerbangkertosusila, menunjukkan keterluasan geografis yang lebih besar, yang mungkin mencakup berbagai jenis area urban, mulai dari pusat kota hingga pinggiran kota. Panjang jalan yang lebih pendek di wilayah lain mungkin mengindikasikan area perkotaan yang lebih terkonsentrasi atau lebih sedikit perkembangan infrastruktur. **Ketiga**, rata-rata panjang ruas jalan bisa menjadi indikator kepadatan dan tata letak perkotaan. Wilayah dengan rata-rata panjang ruas jalan yang lebih pendek, seperti di Gerbangkertosusila, mungkin memiliki tata letak yang lebih padat dengan jalan-jalan yang lebih sering berbelok atau bertemu. Sebaliknya, wilayah dengan

rata-rata panjang ruas jalan yang lebih panjang, seperti IKN, mungkin memiliki tata letak yang lebih terbuka, dengan jarak yang lebih jauh antara persimpangan. **Keempat**, jumlah persimpangan memberikan indikasi tingkat konektivitas dalam jaringan jalan. Wilayah dengan jumlah persimpangan yang tinggi, seperti Gerbangkertosusila, memiliki tingkat interkoneksi yang tinggi, yang penting untuk mobilitas perkotaan. Jumlah persimpangan yang lebih rendah mungkin menunjukkan pola jalan yang lebih sederhana atau kurang berkembang.



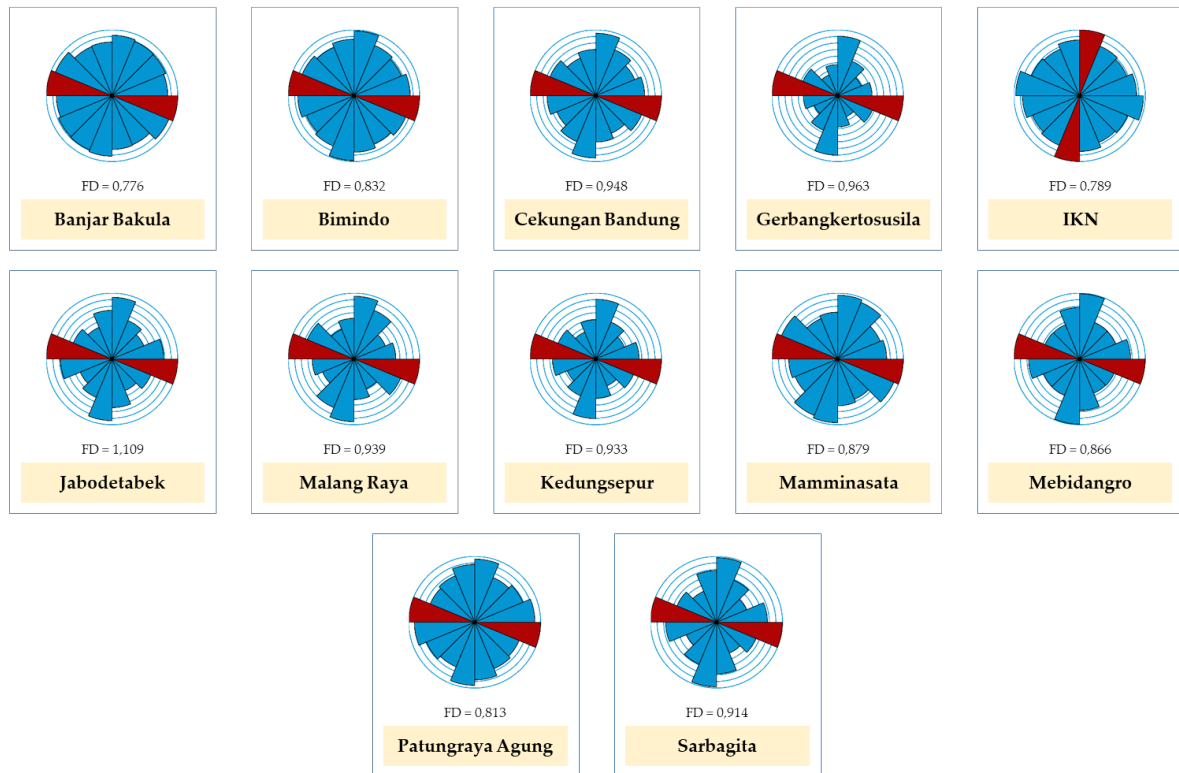
Gambar 3. Panjang Jalan Setiap Metropolitan di Indonesia
Sumber : Hasil Analisis, 2023

3.3 Analisis Fraktal

Analisis statistik deskriptif dari data dimensi fraktal untuk berbagai wilayah metropolitan mengungkapkan variasi dalam kompleksitas jaringan jalan perkotaan, sebagaimana diukur oleh dimensi fraktal. Dimensi fraktal adalah ukuran yang menggambarkan seberapa kompleks suatu pola dengan sifat self-similarity pada berbagai skala. Dalam konteks perkotaan, nilai dimensi fraktal yang lebih tinggi menunjukkan struktur jaringan jalan yang lebih kompleks dan terhubung. Dari data yang dianalisis, rata-rata dimensi fraktal untuk semua wilayah metropolitan adalah sekitar 0.897, dengan standar deviasi 0.093. Ini menunjukkan bahwa ada variasi yang signifikan dalam kompleksitas struktural jaringan jalan di berbagai wilayah, tetapi juga menunjukkan adanya kecenderungan umum menuju kompleksitas yang tinggi. Rentang nilai dimensi fraktal berkisar dari 0.776 hingga 1.109.

Wilayah metropolitan Jabodetabek memiliki dimensi fraktal tertinggi dengan nilai 1.109. Ini menandakan bahwa Jabodetabek memiliki tingkat kompleksitas dan keterhubungan yang sangat tinggi dalam jaringan jalannya. Nilai dimensi fraktal yang sangat tinggi ini mengindikasikan adanya kepadatan perkotaan, variasi yang signifikan dalam tata letak jalan, dan tingkat interaksi yang tinggi antara berbagai bagian kota. Kondisi ini mungkin mencerminkan pertumbuhan perkotaan yang intensif dan beragam,

dengan banyak area yang saling terkait melalui jaringan transportasi yang kompleks. Di sisi lain, seperti yang disebutkan sebelumnya, Banjar Bakula memiliki nilai dimensi fraktal terendah yaitu 0.776. Ini menunjukkan jaringan jalan yang lebih sederhana atau kurang terhubung dibandingkan dengan Jabodetabek, yang mungkin mencerminkan karakteristik perkotaan yang berbeda seperti perkembangan yang lebih terfokus atau tingkat urbanisasi yang lebih rendah.



Gambar 4. Dimensi Fraktal Setiap Metropolitan di Indonesia
Sumber : Hasil Analisis, 2023

Tabel 4. Analisis Fraktal

Metropolitan	Dimensi Fraktal
Banjar Bakula	0,78
Bimindo	0,83
Cekungan Bandung	0,95
Gerbangkertosusila	0,96
IKN	0,79
Jabodetabek	1,11
Malang Raya	0,94
Kedungsepur	0,93
Mamminasata	0,88
Mebidangro	0,87
Patungraya Agung	0,81
Sarbagita	0,91

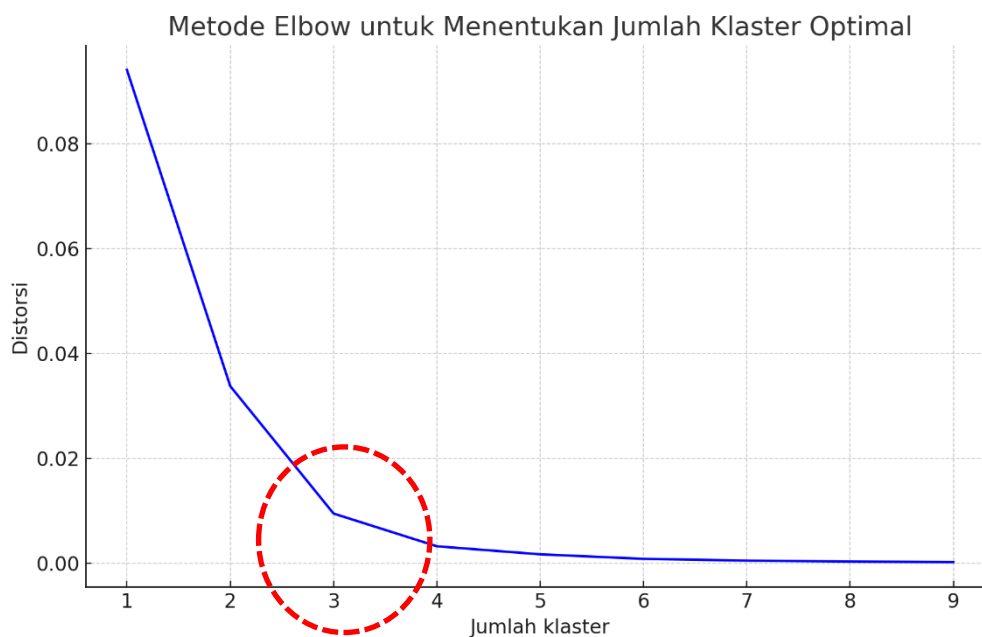
Sumber : Hasil Analisis, 2023

Dalam kesimpulannya, analisis fraktal dan karakter jumlah persimpangan ini memberikan pandangan yang krusial tentang bagaimana jaringan jalan dan persimpangan di berbagai wilayah metropolitan berkontribusi terhadap dinamika dan struktur perkotaan.

Ini menunjukkan bahwa untuk wilayah dengan kompleksitas tinggi seperti Jabodetabek, diperlukan pendekatan yang lebih detail dan menyeluruh dalam perencanaan untuk mengelola kompleksitas perkotaan yang ada, sedangkan untuk wilayah seperti Banjar Bakula, strategi yang berfokus pada pengembangan dan integrasi jaringan jalan mungkin lebih relevan.

3.4 Analisis Kluster

Grafik Metode Elbow yang dihasilkan dari analisis kluster pada data dimensi fraktal menunjukkan perubahan distorsi terhadap jumlah kluster yang berbeda. Dalam grafik ini, 'titik siku' menunjukkan jumlah kluster optimal. Titik siku adalah titik di mana penambahan kluster tidak memberikan perubahan signifikan dalam penurunan distorsi, yang merupakan ukuran seberapa baik data diwakili oleh kluster. Dari grafik, tampaknya titik siku terletak sekitar 2 atau 3 kluster, yang menunjukkan bahwa dua atau tiga kluster mungkin merupakan jumlah yang optimal untuk pengelompokan data dimensi fraktal wilayah metropolitan ini. Pemilihan jumlah kluster yang tepat akan bergantung pada seberapa detail kita ingin mengklasifikasikan wilayah berdasarkan kompleksitas jaringan jalan mereka, yang diukur oleh nilai dimensi fraktal.

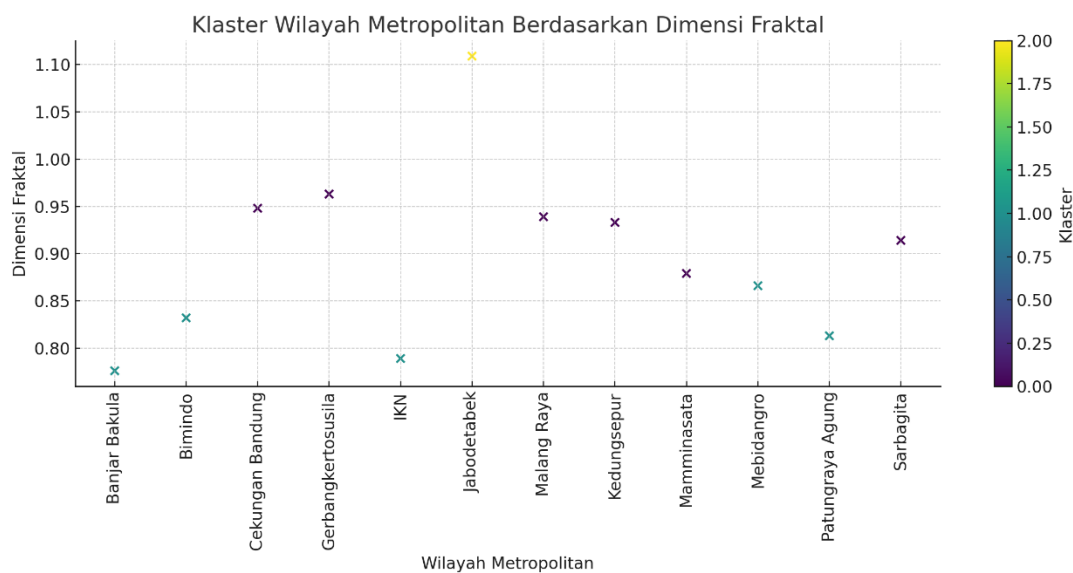


Gambar 5. Dimensi Fraktal Setiap Metropolitan di Indonesia
Sumber : Hasil Analisis, 2023

Langkah selanjutnya dalam analisis kluster adalah mengaplikasikan model K-Means dengan jumlah kluster yang telah ditentukan (dua atau tiga, berdasarkan interpretasi grafik) pada data dimensi fraktal, lalu menganalisis karakteristik masing-masing kluster untuk mendapatkan insight tentang bagaimana wilayah-wilayah tersebut dikelompokkan berdasarkan kompleksitas jaringan jalannya. Kluster-kluster ini akan membantu dalam mengidentifikasi wilayah dengan karakteristik perkotaan yang serupa dan membantu dalam pembuatan kebijakan dan strategi perencanaan perkotaan yang lebih tepat.

Berdasarkan analisis K-Means dengan tiga kluster, wilayah metropolitan telah dikelompokkan ke dalam tiga kelompok berdasarkan nilai dimensi fraktal mereka:

1. Kluster 0: Wilayah ini mencakup Cekungan Bandung, Gerbangkertosusila, Malang Raya, Kedungsepur, Mamminasata, dan Sarbagita. Kluster ini dicirikan oleh nilai dimensi fraktal yang tinggi, menunjukkan tingkat kompleksitas dan keterhubungan jaringan jalan yang tinggi. Ini menandakan area perkotaan yang sangat terintegrasi, dengan kepadatan dan keanekaragaman perkotaan yang signifikan.
2. Kluster 1: Termasuk Banjar Bakula, Bimindo, IKN, Mebidangro, dan Patungraya Agung. Kluster ini memiliki nilai dimensi fraktal yang lebih rendah dibandingkan kluster 0, menunjukkan jaringan jalan yang lebih sederhana atau kurang terhubung. Ini mungkin mencerminkan wilayah dengan perkembangan perkotaan yang lebih terkonsentrasi atau terfokus, atau mungkin kurangnya kepadatan dan kompleksitas perkotaan.
3. Kluster 2: Hanya terdiri dari Jabodetabek. Wilayah ini berdiri sendiri dalam kluster dengan nilai dimensi fraktal yang sangat tinggi (1.109), yang jauh melampaui wilayah metropolitan lainnya. Hal ini menandakan tingkat kompleksitas perkotaan yang luar biasa tinggi, dengan jaringan jalan yang sangat kompleks dan terintegrasi, mencerminkan kepadatan urban, variasi tata letak, dan interaksi perkotaan yang intens.



Gambar 5. Kluster Penanganan Kompleksitas Metropolitan di Indonesia
Sumber : Hasil Analisis, 2023

Klasifikasi ini memberikan pandangan yang bermakna tentang bagaimana wilayah metropolitan dapat dikelompokkan berdasarkan struktur dan kompleksitas jaringan jalannya. Kluster ini berguna dalam memahami karakteristik perkotaan yang berbeda dan dapat membantu dalam menyusun strategi perencanaan perkotaan dan pengembangan infrastruktur yang sesuai dengan kebutuhan dan tantangan masing-masing kelompok wilayah. Jabodetabek sebagai satu-satunya anggota kluster 2 menonjol dengan karakteristik uniknya, menunjukkan perlunya pendekatan khusus dalam penanganan kompleksitas urban yang tinggi di wilayah tersebut.

4. Simpulan

Penelitian ini berhasil menggabungkan analisis persimpangan dan analisis fraktal untuk menyederhanakan pemahaman tentang kompleksitas perkotaan di berbagai wilayah metropolitan. Melalui pengumpulan dan evaluasi data mengenai persimpangan jalan, penelitian ini memberikan wawasan tentang bagaimana distribusi dan keterhubungan jalan mempengaruhi dinamika perkotaan. Selanjutnya, penerapan analisis fraktal, khususnya melalui metode box-counting, memperkaya analisis ini dengan menyediakan ukuran kuantitatif yang menggambarkan kompleksitas struktural dan fungsional jaringan jalan. Pendekatan ini mengungkapkan variasi signifikan dalam dimensi fraktal antar wilayah, memperlihatkan bagaimana perbedaan dalam struktur jaringan jalan mencerminkan tingkat kompleksitas perkotaan yang beragam. Integrasi dari kedua jenis analisis ini membuka jalan bagi pemahaman yang lebih mendalam dan terstruktur tentang bagaimana jaringan jalan berkontribusi terhadap karakteristik unik dari setiap wilayah perkotaan, membantu dalam merumuskan pendekatan yang lebih tepat dalam perencanaan dan pengembangan perkotaan.

Melalui analisis kluster menggunakan K-Means, wilayah metropolitan dibagi menjadi kluster berdasarkan tingkat kompleksitas jaringan jalannya, yang memberikan gambaran jelas tentang kelompok wilayah dengan karakteristik perkotaan yang serupa. Kluster-kluster ini penting untuk memahami kebutuhan spesifik setiap wilayah dalam konteks perencanaan dan pengembangan perkotaan.

Penelitian ini memberikan manfaat yang signifikan dalam perencanaan perkotaan, terutama dalam menentukan prioritas pengembangan infrastruktur dan kebijakan transportasi. Dengan memahami kompleksitas jaringan jalan, perencana kota dan pembuat kebijakan dapat lebih efektif dalam mengalokasikan sumber daya dan merancang strategi yang sesuai dengan kebutuhan spesifik setiap wilayah. Misalnya, wilayah dengan dimensi fraktal yang tinggi mungkin memerlukan strategi yang berfokus pada penanganan kemacetan dan peningkatan mobilitas perkotaan, sedangkan wilayah dengan dimensi fraktal yang lebih rendah mungkin memerlukan peningkatan konektivitas dan pengembangan infrastruktur.

Untuk penelitian lanjutan, disarankan untuk menggabungkan analisis fraktal dengan data lain seperti demografi, aktivitas ekonomi, dan faktor lingkungan untuk mendapatkan pemahaman yang lebih komprehensif tentang dinamika perkotaan. Penelitian lebih lanjut juga dapat fokus pada pengembangan model prediktif yang dapat membantu dalam perencanaan perkotaan jangka panjang dan strategi pengembangan berkelanjutan. Pendekatan interdisipliner, yang menggabungkan analisis spasial, ekonomi perkotaan, dan studi sosial, akan menjadi langkah selanjutnya yang berharga untuk memahami sepenuhnya dan merespons tantangan yang dihadapi oleh wilayah metropolitan yang berbeda.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Civitas Akademika Program Doktor Perencanaan Wilayah dan Kota Universitas Gadjah Mada yang telah memberikan dorongan yang luar biasa terhadap penyelesaian Jurnal ini.

6. Daftar Pustaka

Afrianto, F. (2023). Fractal Dimensions Analysis of Urban Agglomeration at Road Intersections in Metropolitan Malang Raya. *IOP Conference Series: Earth and*

- Environmental Science*, 1186(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1186/1/012010>
- Alberti, M., McPhearson, T., & Gonzalez, A. (2018). Embracing Urban Complexity. In *Urban Planet* (pp. 45–67). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316647554.004>
- Batty, M. (2009a). Cities as Complex Systems: Scaling, Interaction, Networks, Dynamics and Urban Morphologies. In *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* (131; pp. 1041–1071). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30440-3_69
- Batty, M. (2009b). Complexity And Emergence In City Systems: Implications For Urban Planning. In *Malaysian Journal of Environmental Management* (Vol. 10, Issue 1).
- Batty, M., & Longley, paul. (1994). *Fractal Cities: A Geometry of Form and Function*. Academic Press Limited.
- Batty, M., & Longley, P. A. (1986). The fractal simulation of urban structure. In *Environment and Planning A* (Vol. 18).
- Batty, M., & Longley, P. A. (1987). Fractal-based description of urban form. *Environment and Planning*, 14, 123–134.
- Batty, M., Morphet, R., Masucci, P., & Stanilov, K. (2014). Entropy, complexity, and spatial information. *Journal of Geographical Systems*, 16(4), 363–385. <https://doi.org/10.1007/s10109-014-0202-2>
- Benguigui, L., Czamanski, D., Marinov, M., & Portugali, Y. (2000). When and where is a city fractal? *Environment and Planning B: Planning and Design*, 27(4), 507–519. <https://doi.org/10.1068/b2617>
- Boeing, G. (2018). Measuring the complexity of urban form and design. *Urban Design International*, 23(4), 281–292. <https://doi.org/10.1057/s41289-018-0072-1>
- Boeing, G. (2021). Spatial information and the legibility of urban form: Big data in urban morphology. *International Journal of Information Management*, 56. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.09.009>
- Buchori, I., Sugiri, A., Maryono, M., Pramitasari, A., & Pamungkas, I. T. D. (2017). Theorizing spatial dynamics of metropolitan regions: A preliminary study in Java and Madura Islands, Indonesia. *Sustainable Cities and Society*, 35, 468–482. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.022>
- Chaniago, E. D. A., & Hanri, M. (2021). Efek Aglomerasi di Indonesia : Komparasi Jawa dan Luar Jawa. *Jurnal Kebijakan Ekonomi*, 16(2), 9. <https://scholarhub.ui.ac.id/jke/vol16/iss2/9>
- Chen, Y., & Feng, J. (2012). Fractal-based exponential distribution of urban density and self-affine fractal forms of cities. *Chaos, Solitons and Fractals*, 45(11), 1404–1416. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2012.07.010>
- Derrible, S. (2017). Complexity in future cities: the rise of networked infrastructure. *International Journal of Urban Sciences*, 21(sup1), 68–86. <https://doi.org/10.1080/12265934.2016.1233075>
- Hillier, B., & Hanson, J. (1984). *The Social Logic of Space*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511597237>
- Jacobs, J. (1961). *The Death and Life of Great American Cities* (1st ed.). Random House.
- Mandelbrot, B. B. (2004). *Fractals and Chaos: Vol. C*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4017-2>
- Mardiansjah, F. H., Rahayu, P., & Rukmana, D. (2019). Urban Population Growth and the Growth of Towns and Cities in Indonesia. *55th ISOCARP World Planning Congress*.

- Marwasta, D. (2019). Spatial Trends of Urban Physical Growth of Cities in Java, Indonesia, 1975–2015. *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, 36(2). <https://doi.org/10.29037/ajstd.579>
- Mc Gee, T. G. (2009). *The Spatiality of Urbanization: The Policy Challenges of Mega-Urban and Desakota Regions of Southeast Asia* (161). <https://www.researchgate.net/publication/237521773>
- Mc Gee, T. G., & Shahrudin, I. (2016). *Reimagining the “Peri-Urban” in the Mega-Urban Regions of Southeast Asia* (pp. 499–516). https://doi.org/10.1007/978-3-319-28112-4_30
- Portugali, J. (2021). Cities, complexity and beyond. In *Handbook on Cities and Complexity*. Edward Elgar Publishing.
- Rahman, M. H., Islam, M. H., & Neema, M. N. (2022). GIS-based compactness measurement of urban form at neighborhood scale: The case of Dhaka, Bangladesh. *Journal of Urban Management*, 11(1), 6–22. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2021.08.005>
- Surya, B., Saleh, H., & . S. (2020). Spatial Integration and Urban Agglomeration in the Mamminasata Metropolitan Area. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 15(6), 1273–1288. <https://doi.org/10.36478/jeasci.2020.1273.1288>
- Vít, Lukáš, Pavel, & Tuček. (2011). *PERSPECTIVES OF FRACTAL GEOMETRY IN GIS ANALYSES*.
- Wang, F. (2014). *Quantitative Methods and Socio-Economic Applications in GIS* (Second Edition). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17967>
- Yamu, C., & van Nes, A. (2020). Fractals: a multiscale approach in regional and urban planning strategies. In *Handbook on Planning and Complexity*. Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781786439185.00021>