

Dinamika Spasiotemporal Fragmentasi Lahan dan Pola Ekspansi Perkotaan di Kabupaten Bogor Pada Tahun 2004-2024

Shirhan Dafadhilah^{✉ 1}, Fendy Firmansyah²

¹Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

²Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

Diunggah: 29/01/2026 | Direview: 02/03/2026 | Diterima: 31/05/2026

✉ dafadhilahs@gmail.com

Abstrak: Fragmentasi lahan dan ekspansi perkotaan merupakan dampak dari perubahan tutupan lahan di suatu wilayah. Perluasan lahan terbangun sering memecah tutupan lain, membentuk fragmen-fragmen kecil yang tersebar dan terisolasi, sehingga mengganggu habitat dan menurunkan daya dukung lingkungan. Penelitian ini menggunakan citra satelit Landsat tahun 2004–2024 untuk mengklasifikasikan tutupan lahan dan menganalisis dinamika perubahan. Hasilnya menunjukkan peningkatan lahan terbangun secara konsisten, sementara lahan agrikultur dan terbuka mengalami perubahan dinamis. Sebaliknya, lahan hutan mengalami deforestasi signifikan yang memicu fragmentasi. Untuk menganalisis fenomena ini, digunakan pendekatan urban form metrics, Landscape Dynamics Typology (LDT), dan Landscape Expansion Index (LEI). Ditemukan bahwa fragmentasi lahan hutan terjadi merata, terutama di wilayah yang berbatasan dengan Metropolitan Jabodetabek. Pola ekspansi lahan terbangun di wilayah ini cenderung berupa edge expansion dan infilling (densifikasi), sedangkan wilayah non-Jabodetabek didominasi oleh edge expansion dan leap frogging, menunjukkan penyebaran pembangunan yang lebih acak.

Kata Kunci: Fragmentasi; Agregasi; Regenerasi Lahan; Ekspansi Kota; Klasifikasi Lahan

Spatiotemporal Dynamics of Land Fragmentation and Urban Expansion Patterns in Bogor Regency From 2004-2024

Abstract: Land fragmentation and urban expansion are consequences of land cover change within a region. The expansion of built-up areas often disrupts other land covers, resulting in small, scattered, and isolated fragments that disturb habitats and reduce environmental carrying capacity. This study utilizes Landsat satellite imagery from 2004 to 2024 to classify land cover and analyze land-use change dynamics. The results indicate a consistent increase in built-up areas, while agricultural and open lands exhibit dynamic changes. In contrast, forest areas have experienced significant deforestation, leading to increased land fragmentation. To examine these phenomena, this study applies urban form metrics, the Landscape Dynamics Typology (LDT), and the Landscape Expansion Index (LEI). The findings reveal that forest fragmentation is spatially widespread, particularly in areas adjacent to the Jabodetabek Metropolitan Region. Built-up land expansion in this region is predominantly characterized by edge expansion and infilling (densification), whereas non-Jabodetabek areas are dominated by edge expansion and leapfrogging patterns, indicating a more dispersed and uncoordinated development process.

Keywords: Fragmentation; Aggregation; Land Regeneration; Urban Expansion; Land Cover Classification

1. Latar Belakang

Kota merupakan suatu sistem ruang yang berfungsi sebagai pusat kegiatan ekonomi, sosial, budaya, dan pemerintahan [1]. Seiring dengan meningkatnya urbanisasi dan jumlah penduduk, kawasan perkotaan terus mengalami perkembangan untuk mengakomodasi aktivitas masyarakat yang semakin kompleks. Perkembangan tersebut umumnya tercermin melalui perubahan penggunaan dan tutupan lahan yang berlangsung secara spasial dari waktu ke waktu [2]. Dalam konteks tersebut, urbanisasi tidak hanya berkaitan dengan perpindahan penduduk dari wilayah perdesaan ke perkotaan, tetapi juga berkaitan dengan meningkatnya tekanan terhadap kebutuhan ruang, infrastruktur, dan lahan terbangun. Oleh karena itu, perubahan tutupan lahan menjadi salah satu indikator penting untuk memahami dinamika pertumbuhan kawasan perkotaan [3].

Indonesia sebagai negara dengan jumlah penduduk terbesar keempat di dunia mengalami peningkatan penduduk yang cukup signifikan dalam satu dekade terakhir. Berdasarkan Sensus Penduduk 2020, jumlah penduduk Indonesia bertambah sebesar 44,83 juta jiwa selama periode 2010–2020, dengan rata-rata peningkatan sekitar 2,3 juta jiwa setiap enam bulan dan kepadatan penduduk mencapai 141 jiwa/km² [4]. Secara global, United Nations juga memproyeksikan bahwa lebih dari 68% penduduk dunia akan tinggal di wilayah perkotaan pada tahun 2050 [5]. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa tekanan demografis terhadap kawasan perkotaan akan semakin besar pada masa mendatang. Pertumbuhan perkotaan pada umumnya berlangsung melalui dua mekanisme utama, yaitu densifikasi pada kawasan kota eksisting dan ekspansi spasial ke wilayah sekitarnya [6].

Ekspansi spasial kawasan perkotaan dapat berlangsung melalui beberapa pola, antara lain *infilling*, *edge expansion*, dan *leapfrogging*. Pola-pola ekspansi tersebut penting untuk dianalisis karena dapat menunjukkan arah, intensitas, dan karakter pertumbuhan lahan terbangun. Dalam kondisi tertentu, ekspansi perkotaan yang berlangsung secara tidak terkendali berpotensi mendorong terbentuknya *urban sprawl*, yaitu pertumbuhan kota yang menyebar, tidak kompak, dan kurang terintegrasi dengan struktur ruang yang ada. Fenomena ini juga dapat berkaitan dengan fragmentasi lanskap, terutama ketika pertumbuhan lahan terbangun memecah tutupan lahan non-terbangun menjadi bagian-bagian yang lebih kecil dan terisolasi [7]. Dengan demikian, analisis terhadap pola ekspansi dan fragmentasi lahan menjadi penting untuk memahami keberlanjutan perkembangan kawasan perkotaan.

Kabupaten Bogor merupakan salah satu wilayah penyangga utama dalam sistem Metropolitan Jabodetabek yang mengalami tekanan perkembangan perkotaan cukup besar. Sebagai bagian dari kawasan metropolitan, Kabupaten Bogor memiliki keterkaitan fungsional yang kuat dengan pusat-pusat aktivitas di Jabodetabek, termasuk melalui pergerakan penduduk ulang-alik. Kabupaten Bogor tercatat menyumbang 483.053 penduduk ulang-alik ke wilayah pusat Jakarta, dengan 57% di antaranya bergerak menuju kawasan *peri-urban* dan sisanya menuju kawasan inti Kota Jakarta [8]. Selain itu, Kabupaten Bogor merupakan salah satu kabupaten dengan jumlah penduduk terbesar di Indonesia, yaitu lebih dari 5,6 juta jiwa [9]. Posisi administratif Kabupaten Bogor yang berbatasan dengan banyak kota/kabupaten dalam sistem mega-urban Jabodetabek juga memperkuat potensinya sebagai wilayah penerima tekanan ekspansi perkotaan dari berbagai pusat pertumbuhan di sekitarnya.

Peningkatan jumlah penduduk dan intensitas aktivitas metropolitan berpotensi meningkatkan kebutuhan terhadap lahan terbangun di Kabupaten Bogor. Fenomena tersebut telah terlihat pada kawasan perbatasan antara Kota Bogor dan Kabupaten Bogor, yang mengalami peningkatan tutupan lahan terbangun sebesar 3.182 ha selama periode 2010–2020 [10]. Kondisi ini mengindikasikan adanya dinamika penjarangan kawasan perkotaan yang perlu dikaji secara lebih mendalam, terutama dalam kaitannya dengan pola ekspansi dan perubahan struktur lanskap. Jika tidak dikendalikan, ekspansi lahan terbangun yang menyebar berpotensi meningkatkan risiko fragmentasi lahan, penurunan konektivitas ekologis, perubahan habitat, serta degradasi lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan analisis spasial-temporal mengenai dinamika perubahan tutupan lahan, fragmentasi lanskap, dan pola ekspansi perkotaan di Kabupaten Bogor sebagai dasar untuk merumuskan strategi pengelolaan lahan dan arahan perkembangan perkotaan yang lebih berkelanjutan.

Penelitian ini menjadi relevan karena Kabupaten Bogor tidak hanya mengalami pertumbuhan lahan terbangun, tetapi juga berada dalam tekanan fungsional kawasan metropolitan yang kompleks. Penggunaan *spatial metrics*, *Landscape Division Tool* (LDT), dan *Landscape Expansion Index* (LEI) dapat membantu menjelaskan perubahan struktur lanskap, tingkat fragmentasi, serta pola ekspansi lahan terbangun secara lebih terukur. Melalui pendekatan tersebut, dinamika pertumbuhan Kabupaten Bogor dapat dianalisis tidak hanya berdasarkan besaran perubahan tutupan lahan, tetapi juga berdasarkan bentuk, konfigurasi, dan karakter ekspansinya. Hasil analisis ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap perencanaan dan pengendalian pemanfaatan ruang, terutama dalam mengantisipasi ekspansi lahan terbangun yang tidak terkendali, melindungi lahan non-terbangun strategis, serta menjaga keberlanjutan struktur ekologis wilayah.

2. Metode Penelitian

2.1. Jenis Penelitian

Jenis penelitian ini adalah penelitian kuantitatif deskriptif yang bertujuan untuk menjelaskan dinamika perubahan tutupan lahan, pola ekspansi perkotaan, perubahan bentuk kota, dan fragmentasi lanskap di Kabupaten Bogor pada periode 2004–2024. Pendekatan kuantitatif digunakan karena penelitian ini bertumpu pada data spasial terukur, hasil klasifikasi citra satelit, serta perhitungan indeks dan metrik spasial. Sementara itu, sifat deskriptif digunakan untuk menggambarkan kondisi aktual wilayah studi berdasarkan perubahan luasan, distribusi, konfigurasi, dan pola spasial lahan terbangun. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menyajikan perubahan spasial dalam bentuk peta, tetapi juga menyajikan hasil analisis secara statistik untuk menjelaskan kecenderungan perkembangan kawasan perkotaan di Kabupaten Bogor.

2.2. Pendekatan Penelitian

Pendekatan penelitian ini menggunakan paradigma positivisme karena fenomena perubahan spasial dianalisis berdasarkan data empiris, prosedur pengukuran yang terstandar, dan metode analisis yang dapat direplikasi. Paradigma positivisme digunakan untuk memahami perubahan tutupan lahan, ekspansi perkotaan, dan fragmentasi lanskap sebagai fenomena yang dapat diamati, diukur, dan dibandingkan secara objektif [11]. Dalam penelitian ini, data penginderaan jauh dan data spasial digunakan sebagai dasar utama untuk menjelaskan dinamika perkembangan wilayah secara kuantitatif. Posisi peneliti ditempatkan sebagai pengamat yang tidak terlibat secara subjektif dalam pembentukan data, tetapi berfokus pada pengumpulan, pengolahan, dan analisis data yang valid dan reliabel.

Ciri utama pendekatan ini adalah penggunaan instrumen analisis yang terukur, prosedur klasifikasi yang sistematis, serta metode penghitungan spasial yang memungkinkan replikasi dan verifikasi. Melalui pendekatan tersebut, perubahan lahan terbangun dapat dianalisis berdasarkan besaran perubahan, pola distribusi, tingkat fragmentasi, dan karakter ekspansi spasial. Pendekatan ini relevan dengan tujuan penelitian karena hasil yang diharapkan tidak hanya berupa deskripsi visual, tetapi juga pengukuran kuantitatif terhadap perubahan struktur ruang. Oleh karena itu, paradigma positivisme digunakan sebagai dasar untuk menjelaskan fenomena pertumbuhan perkotaan Kabupaten Bogor secara objektif dan berbasis data.

2.3. Variabel Penelitian

Variabel penelitian dipilih berdasarkan beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penggunaan pola spasial yang dihitung dengan parameter *spatial metric* yang berkorelasi. Terdapat beberapa syarat dalam pemilihan parameter *spatial metric* yang digunakan dalam pengukuran suatu pola spasial, dijelaskan bahwa syarat antar *metric* harus memiliki hubungan linear secara statistik, tidak *redundant*, memiliki sifat *universal*, kuat, dan konsisten pada wilayah yang dengan karakteristik yang berbeda [12]. Lebih jauh lagi dijelaskan bahwa *metric* yang digunakan harus bersifat heterogen, tidak memiliki nilai multikolinear pada uji statistik, dan dapat digunakan pada skala wilayah yang berbeda. Selain itu terdapat pengembangan perhitungan spasial skala mikro juga mendukung penelitian ini. Oleh karena itu, pengambilan parameter perhitungan terhadap variabel yang digunakan berdasar pada penelitian terdahulu yang disampaikan pada beberapa sumber berikut [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29]. Berdasarkan kajian dari berbagai

sumber tersebut maka, dirumsukan berbagai pola spasial dan variable yang berpengaruh pada penelitian ini. Berikut merupakan berbagai variabel yang digunakan.

Tabel 1. Definisi Operasional Berdasarkan Variabel yang Digunakan

Variabel	Parameter	Definisi Operasional
Density	<i>Patch Density (PD)</i>	<i>PD</i> Menunjukkan kerapatan persebaran <i>patch</i> dalam satu <i>landscape</i>
	<i>Number of Patch (NP)</i>	Jumlah <i>patch</i> yang tergabung di dalam satu <i>class</i> yang salama, tidak memiliki satuan, dan mewakili jumlah luas dari masing masing sub pengelompokan penggunaan lahan
	<i>Percentage of Landscape (PLAND)</i>	Metrik <i>PLAND</i> merepresentasikan total luas area dalam suatu <i>class</i> tertentu dibandingkan dengan luas keseluruhan wilayah/ <i>landscape</i> yang dianalisis, kemudian direpresentasikan dalam bentuk presentase
Connectivity	<i>Patch Cohesion Index (COHESION)</i>	Metrik <i>COHESION</i> mengukur keterhubungan fisik pada suatu <i>class</i> yang dianalisis, nilai <i>COHESION</i> semakin meningkat seiring dengan semakin mengelompoknya persebaran <i>patch-patch</i> dalam satu jenis <i>class</i> yang sama.
Aggregation	<i>Percentage of Like Adjacency (PLADJ)</i>	Metrik <i>PLADJ</i> adalah alat pengukuran perbandingan antara total luas setiap <i>patch</i> dalam setiap lansekap terhadap luas lansekap secara keseluruhan
Domination	<i>Largest Patch Index (LPI)</i>	Metrik <i>LPI</i> merupakan alat pengukuran perbandingan antara ukuran <i>patch</i> terbesar dalam suatu lansekap terhadap luas lansekap-nya
Fragmentation	<i>Splitting Index (SPLIT)</i>	Metrik <i>SPLIT</i> merupakan alat pengukurang untuk menghitung perbandingan keliling pada setiap <i>patch</i> dan jarak antar <i>patch</i> dengan keliling total <i>patch</i> pada lansekap tersebut
Dinamika Topologi Lansekap Tutupan Lahan	<i>Landscape Dynamic Typology Classification</i>	<i>Landscape Dynamic Typology</i> merupakan alat pengukuran pola pertumbuhan kota semi mikro dengan membandingkan peningkatan/penurunan pada luas lahan dengan peningkatan/penurunan pada jumlah <i>patch</i>
Dinamika Pola Ekspansi Perkotaan	<i>Landscape Expansion Index (LEI)</i>	<i>Landscape Expansion Index</i> adalah alat pengukuran ekspansi perkotaan berdasarkan <i>buffer</i> dari setiap <i>patch</i> untuk mengetahui pola ekspansi perkotaan yang terjadi

2.4. Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui pengumpulan data sekunder dan data primer. Data sekunder merupakan data utama yang digunakan dalam proses analisis, sedangkan data primer digunakan untuk mendukung validasi hasil klasifikasi tutupan lahan. Data sekunder terdiri atas citra satelit Landsat, batas administrasi Kabupaten Bogor, serta dokumen Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten Bogor. Citra satelit digunakan sebagai dasar klasifikasi tutupan lahan multiwaktu, batas administrasi digunakan untuk membatasi wilayah analisis, sedangkan dokumen RTRW digunakan sebagai bahan komparasi antara hasil analisis spasial dan arah kebijakan penataan ruang yang berlaku.

Citra satelit diperoleh melalui platform *Google Earth Engine* untuk tahun pengamatan 2004, 2009, 2014, 2019, dan 2024. Pemilihan tahun tersebut dilakukan dengan interval lima tahunan agar perubahan tutupan lahan dapat diamati secara periodik dan konsisten. Data citra yang digunakan disesuaikan dengan ketersediaan sensor Landsat pada setiap tahun pengamatan, yaitu Landsat 5 TM untuk periode awal, Landsat 7 ETM+ apabila digunakan sebagai pelengkap, serta Landsat 8 OLI/TIRS dan/atau Landsat 9 OLI-2/TIRS-2 untuk periode terbaru. Pemilihan citra mempertimbangkan tingkat tutupan awan yang rendah, kesesuaian periode perekaman, dan ketersediaan data yang representatif untuk wilayah Kabupaten Bogor.

Tahapan pengumpulan dan prapengolahan citra meliputi pemilihan koleksi citra, pembatasan area studi, penyaringan berdasarkan tahun pengamatan, penyaringan berdasarkan persentase tutupan awan, proses *cloud*

masking, serta penyusunan komposit citra. Proses *cloud masking* dilakukan untuk menghilangkan piksel awan dan bayangan awan yang dapat memengaruhi hasil klasifikasi tutupan lahan. Citra hasil komposit kemudian digunakan sebagai masukan dalam proses klasifikasi tutupan lahan menggunakan pendekatan *supervised classification*. Algoritma klasifikasi, jumlah sampel latih, jumlah sampel validasi, serta kelas tutupan lahan yang digunakan perlu dijelaskan secara rinci agar proses klasifikasi dapat direplikasi dan dievaluasi secara ilmiah.

Data primer dikumpulkan melalui kegiatan pengecekan lapangan atau *ground checking* untuk mendukung validasi hasil klasifikasi tutupan lahan. Titik *ground checking* dipilih dengan mempertimbangkan keterwakilan setiap kelas tutupan lahan, homogenitas kenampakan objek, dan sebaran spasial di wilayah penelitian. Selain pengecekan lapangan, validasi juga dapat diperkuat melalui interpretasi visual terhadap citra resolusi tinggi, seperti Google Earth atau sumber citra lain yang relevan. Hasil validasi digunakan untuk menyusun *confusion matrix* dan menghitung nilai *overall accuracy*, *producer's accuracy*, *user's accuracy*, serta koefisien Kappa. Dengan demikian, hasil klasifikasi tutupan lahan yang digunakan dalam analisis perubahan spasial memiliki dasar validasi yang jelas dan dapat dipertanggungjawabkan.

2.5. Metode Analisis Data

2.5.1. Menganalisis Perubahan Tutupan Lahan Kabupaten Bogor Pada Rentang Tahun 2004-2024

Pada proses menganalisis perubahan tutupan lahan di Kabupaten Bogor menggunakan metode *supervised classification* dengan membagi klasifikasi menjadi 5 kelas tutupan lahan yang terdiri dari lahan terbangun, lahan terbuka, agrikultur, badan air, dan lahan hutan. Untuk menghindari hasil klasifikasi yang tidak akurat, maka digunakan *tools sieve* pada QGIS untuk menghilangkan jenis tutupan lahan di bawah 5 piksel, hal ini dilakukan untuk menghilangkan suatu persebaran jenis tutupan lahan yang berukuran sangat kecil

2.5.2. Perhitungan Dinamika Pola Ekspansi Kota dan Dinamika Fragmentasi Lahan yang Terjadi Pada Wilayah Kabupaten Bogor

Untuk mengetahui bagaimana dinamika fragmentasi lahan dan ekspansi perkotaan yang terjadi pada wilayah Kabupaten Bogor, maka digunakan beberapa formula indeks *spatial metric* yang menghitung dinamika perubahan *urban form* pada wilayah Kabupaten Bogor. Indeks *spatial metric* yang digunakan untuk mengukur dinamika *urban form* yang terjadi dibagi menjadi beberapa pola spasial seperti *density* yang dihitung menggunakan indeks *Percentage of Landscape* (PLAND), *Number of Patch* (NP), dan *Patch Density* (PD). Berdasarkan perhitungan dengan ketiga indeks tersebut maka dapat menunjukkan kepadatan tutupan lahan pada daerah Kabupaten Bogor. Pola spasial kedua yang digunakan adalah *connectivity* yang bertujuan untuk mengukur tingkat konektivitas antar *patch* yang ada pada suatu lansekap, pola spasial ini akan dihitung menggunakan *metric Patch Cohesion Index* (COHESION). Semakin tinggi nilai COHESION maka semakin tinggi pula tingkat koneksi antar *patch* dalam suatu lansekap. Pola spasial ketiga yang digunakan adalah *aggregation* yang ditujukan untuk mengukur tingkat agregasi yang terjadi pada suatu lansekap, pola spasial ini dihitung dengan *Percentage of Like Adjacency* yang digunakan sebagai indikator dalam perhitungan agregasi pada suatu wilayah.

Pola spasial keempat yang digunakan adalah *domination* yang berfungsi untuk mengukur tingkat dominasi *patch* terbesar dalam suatu lansekap, untuk perhitungan ini maka digunakan *Largest Patch Index* (LPI). Pola spasial terakhir yang digunakan adalah *fragmentation* yang menunjukkan tingkat ketersebaran *patch* dalam suatu lansekap yang mengartikan bahwa semakin tinggi nilai indeks yang digunakan akan semakin menunjukkan bahwa daerah tersebut terjadi fragmentasi kuat, indeks yang digunakan adalah *Splitting Index* (SPLIT). Berikut merupakan interpretasi dari formula indeks yang digunakan.

$$PD = \frac{Ni}{A} (10.000)(100) \quad (1)$$

$$NP = Ni \quad (2)$$

$$PLAND = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} (100) \quad (3)$$

$$PLADJ = \left(\frac{\sum_{i=1}^m (g_{ii})}{\sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^m (g_{ii})} \right) (100) \quad (4)$$

$$COHESION = \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^n P_{ij}}{\sum_{j=1}^n P_{ij} \sqrt{a_{ij}}} \right) \left(1 - \frac{1}{\sqrt{z}} \right) (100) \quad (5)$$

$$LPI = \frac{A_{max}}{A} (100) \quad (6)$$

$$SPLIT = \frac{A^2}{\sum_{j=1}^n a_{ij}^2} \quad (7)$$

2.5.3. Perhitungan Dinamika Pola Ekspansi Kota dan Dinamika Fragmentasi Lahan yang Terjadi Pada Wilayah Kabupaten Bogor

Setelah melakukan perhitungan dengan *spatial metric*, maka dilanjutkan dengan menghitung distribusi nilai yang ada pada masing masing pola spasial dengan mengelompokkan menjadi beberapa kelas. Perhitungan distribusi nilai ini menggunakan perhitungan kuartil 1,2, dan 3 untuk mengetahui daerah mana yang memiliki kekuatan pola spasial tertentu. Penggunaan interpretasi statistik dengan menggunakan distribusi nilai dengan menggunakan mean, median, dan modus diperbolehkan dalam interpretasi *spatial metric* [30]. Selain itu, penggunaan fungsi regresi juga digunakan dalam membantu menjelaskan hasil dari *spatial metric* yang telah diperoleh [31]. Rentang nilai minimum hingga nilai kuartil 1 disebut sebagai daerah klaster I, rentang kuartil 1 hingga 2 akan disebut sebagai daerah klaster II, dan begitu seterusnya. Dengan begitu, maka dapat diketahui daerah mana yang memiliki *form* lahan *clustered* (terjadi apabila lahan terbuka, lahan agrikultur, dan lahan hutan berada pada rentang kuartil 3 hingga nilai maksimal) atau *dispersed* (terjadi apabila lahan terbuka, lahan agrikultur dan lahan hutan berada pada rentang nilai minimum hingga kuartil 1).

Sedangkan untuk lahan terbangun akan diketahui lahan perkotaan yang *compact* (terjadi apabila lahan terbangun berada pada rentang nilai kuartil 3 hingga nilai maksimal) atau sebaliknya yaitu *sprawling* (terjadi apabila lahan terbangun berada pada rentang nilai minimum hingga nilai kuartil 1). Satuan spasial yang akan digunakan dalam memperkirakan *urban form based* pada Kabupaten Bogor adalah per kecamatan untuk melihat jenis bentuk perkotaan dan fenomena perubahan bentuk kota yang terjadi.

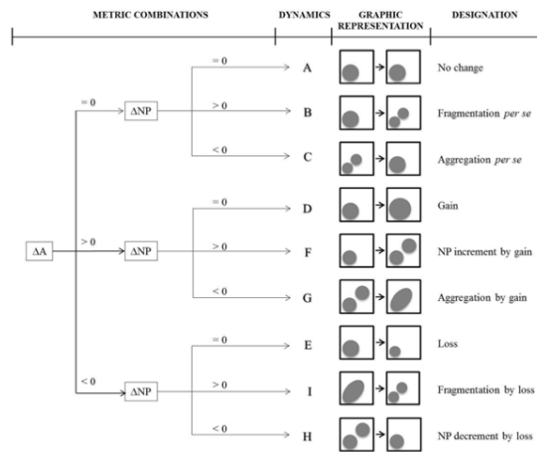
$$Q1 = (N + 1)/4 \quad (8)$$

$$Q2 = (N + 1)/2 \quad (9)$$

$$Q3 = 3(N + 1)/4 \quad (10)$$

2.5.4. Identifikasi Dinamika Lansekap dengan Landscape Dynamic Typology (LDT)

Perhitungan dengan menggunakan *spatial metric* hanya menunjukan bentuk perkotaan tertentu pada wilayah Kabupaten Bogor secara indikatif dan interpretasi dari angka yang ada. Sehingga, perhitungan dengan *urban form based* akan didasarkan untuk melihat fenomena tertentu per setiap kecamatan di Kabupaten Bogor. Oleh karena itu, analisis dilanjutkan dengan menggunakan *Landscape Dynamics Typology (LDT)* yang merupakan suatu alat analisis yang dapat menggambarkan fenomena fragmentasi dan agregasi lahan secara lebih detail melalui *grid* yang dikehendaki [24]. Perhitungan dengan menggunakan LDT hanya membutuhkan indeks *NP* dan *Total Area* pada setiap jenis lahan yang telah diklasifikasikan pada proses pengkalsifikasian tutupan lahan. Berikut merupakan visualisasi dari penggunaan LDT.



Gambar 1. Keterangan Gambar
Sumber: (Machado et al., 2017)

Berdasarkan visualisasi pada **Gambar 1.** yang menunjukkan beberapa kemungkinan dinamika lansekap yang terjadi dengan grid tertentu, proses perhitungan LDT ini juga memerlukan 2 tutupan lahan dengan periode yang berbeda untuk dapat melihat dinamika lansekap yang terjadi antar periode waktu. Pada penelitian ini, grid yang akan digunakan adalah 1x1 km yang membagi wilayah Kabupaten Bogor menjadi 3.231 grid. Interpretasi dari penggunaan LDT adalah melakukan perbandingan antara *total area* (ΔA) dengan NP (ΔNP) yang akan menghasilkan *Type of Dynamics* (ToD) tertentu yang mewakili dinamika lansekap yang terjadi pada grid 1x1 km di Kabupaten Bogor. Contoh interpretasi dari ToD ini adalah apabila ΔA tetap sedangkan ΔNP juga tetap maka dinamika lansekap yang terjadi adalah *no change*. Selanjutnya, apabila ΔA tetap dan ΔNP naik maka terjadi *fragmentation per se*, dan apabila ΔA tetap dan ΔNP menurun maka terjadi ToD *aggregation per se*. Untuk melihat fragmentasi yang terjadi maka ToD yang mendukung adalah Fragmentation by Loss yang merupakan kondisi ketika ΔA menurun dan ΔNP meningkat.

2.5.5. Menghitung Pola Ekspansi Perkotaan di Kabupaten Bogor

Setelah melihat dinamika fragmentasi yang terjadi, maka selanjutnya dilanjutkan dengan perhitungan pola ekspansi perkotaan yang terjadi di Kabupaten Bogor. Pada penelitian ini digunakan *Landscape Expansion Index* (LEI) yang mengandalkan perubahan tutupan lahan terbangun pada masa yang akan datang, Oleh karena itu, indeks ini membutuhkan dua data seri tutupan lahan yaitu tutupan lahan awal dan tutupan lahan setelahnya [25]. Indeks ini membandingkan jarak antar lahan awal dengan mengimplementasikan *euclidian distance* dengan *buffer* sejauh 30 meter pada *patch* di lahan setelahnya. Penggunaan LEI ini dapat menghitung 3 tipe pola ekspansi kota yang terdiri dari *infilling*, *edge expansion*, dan *outlying* atau *leap frogging*. Penggunaan index ini didasarkan pada *buffer* dari selisih tutupan lahan terbangun antara tutupan lahan di dua rentang waktu yang berbeda. Formula dalam penggunaan LEI dijelaskan sebagai berikut

$$LEI = (100) \frac{A_o}{A_o + A_v} \quad (11)$$

Interpretasi A_o diartikan sebagai irisan antara buffer penignkatan tutupan lahan terbangun dengan lahan terbangun di periode sebelumnya, sedangkan A_v adalah irisan antara buffer tutupan lahan terbangun saat ini dengan lahan terbangun di saat ini pula. Perbandingan ini akan menghasilkan suatu nilai persentase yang menunjukkan 3 kemungkinan pola ekspansi yaitu *edge expansion* apabila nilai $0 \leq LEI \leq 50$, menunjukan pola *infilling* apabila $50 < LEI \leq 100$, dan menunjukan pola *leap frogging* apabila nilai LEI adalah 0 [25].

3. Hasil dan Pembahasan

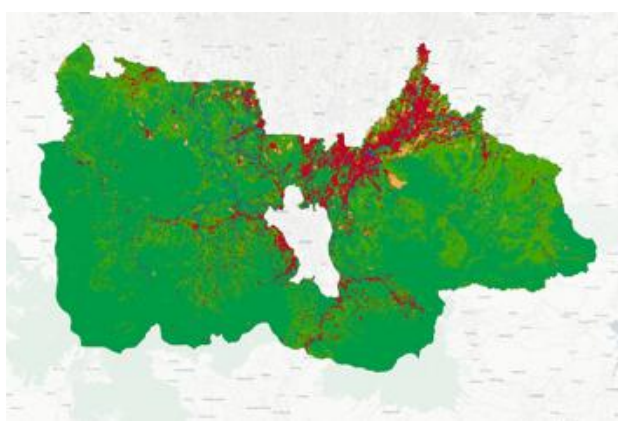
3.1. Dinamika Perubahan Tutupan Lahan Kabupaten Bogor Pada Rentang 2004-2024

Selama 20 tahun terakhir, Kabupaten Bogor mengalami dinamika tutupan lahan fluktuatif di setiap kecamatannya. Tutupan lahan terbangun merupakan jenis kelas tutupan lahan yang terus meningkat dari tahun ke tahun, jumlah peningkatan yang terjadi menyentuh angka ± 47.906 hektar, peningkatan ini berpengaruh sebesar 1,6 persen dari luas total keseluruhan wilayah Kabupaten Bogor.

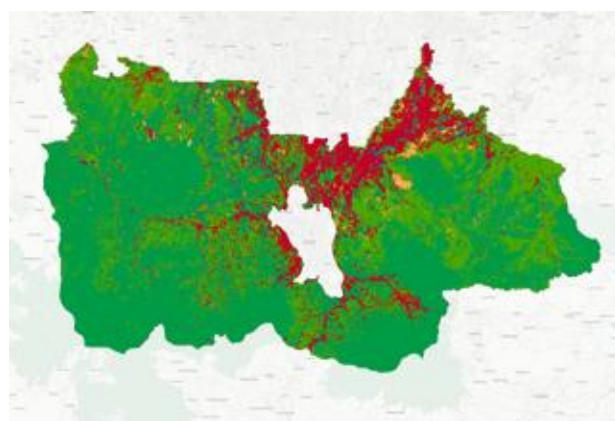
Tabel 2. Jumlah Luas Tutupan Lahan Per Klasifikasi Lahan Setiap Periode Waktu

Jenis Lahan	2004 (Ha)	2009 (Ha)	2014 (Ha)	2019 (Ha)	2024 (Ha)
Lahan Terbangun	23.599	35.639	44.758	56.627	71.505
Lahan Terbuka	3.799	3.941	3.980	6.090	9.153
Agrikultur	72.500	82.008	106.186	102.664	91.817
Badan Air	5.949	5.949	5.944	5.941	5.943
Lahan Hutan	192.264	170.743	137.411	126.958	119.867

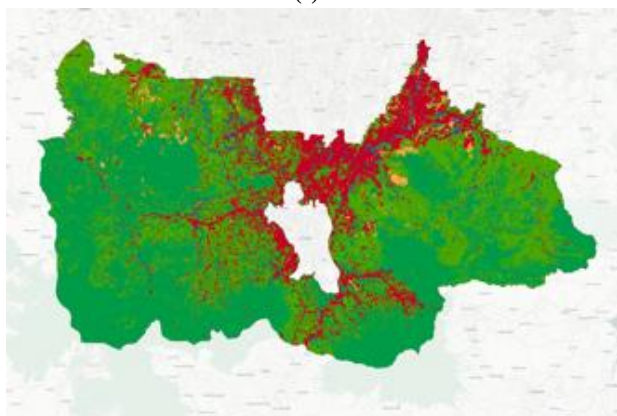
Berbeda dengan pertumbuhan lahan agrikultur di Kabupaten Bogor yang mengalami peningkatan yang fluktuatif selama dalam 20 tahun terakhir, beberapa kecamatan di perbatasan dengan Megaurban Jabodetabek utama mengalami penurunan tutupan lahan agrikultur, hal ini berimbang dengan kondisi peningkatan tutupan lahan terbangun yang terjadi cukup signifikan di kecamatan tersebut. Penurunan lahan agrikultur ini terjadi di daerah utara terutama Kecamatan Gunungputri, Cileungsi, Tajurhalang, Cibinong dan Bojonggede. Peningkatan lahan agrikultur yang terbesar terjadi di daerah Sukamakmur yang merupakan daerah dengan rencana perkembangan lahan pertanian di Kabupaten Bogor



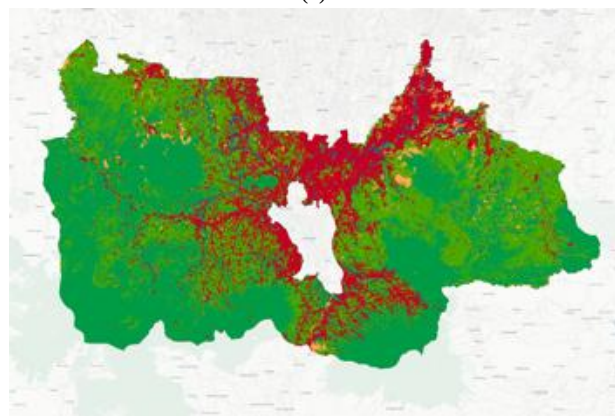
(a)



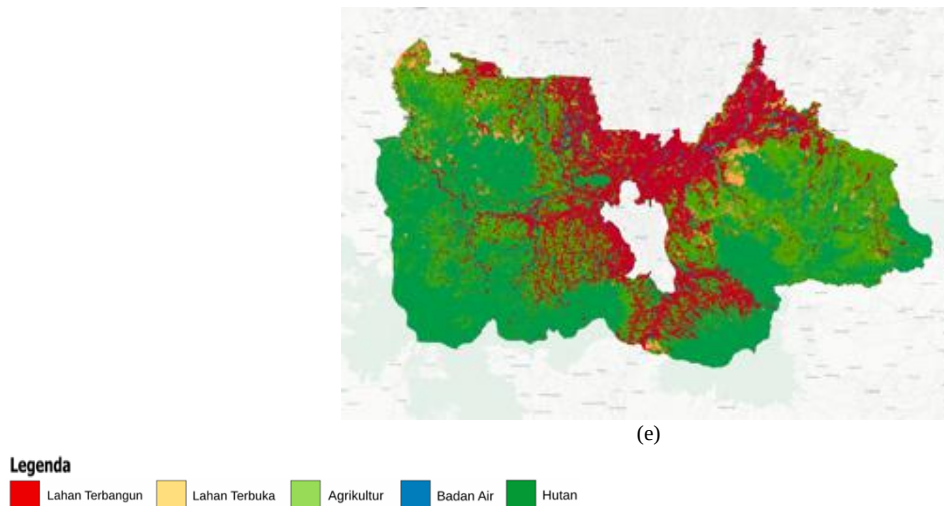
(b)



(c)



(d)



Gambar 2. Hasil Klasifikasi Tutupan Lahan Kabupaten Bogor (a) Tutupan Lahan Tahun 2004; (b) Tutupan Lahan Tahun 2009; (c) Tutupan Lahan Tahun 2014; (d) Tutupan Lahan Tahun 2019; (e) Tutupan Lahan Tahun 2024

Pertumbuhan lahan agrikultur selaras dengan degradasi lahan hutan yang terjadi di Kabupaten Bogor, pertumbuhan lahan hutan terjadi dengan secara signifikan pada daerah yang memiliki pertumbuhan lahan agrikultur yang tinggi pula. Hal ini digambarkan pada dua kecamatan dengan tingkat degradasi hutan terbesar yaitu Kecamatan Rumpin dan Kecamatan Sukamakmur yang mengalami penurunan lahan hutan hingga ± 5.000 hektar selama 20 tahun. Pertumbuhan yang terjadi di daerah Kecamatan Rumpin perlu diwaspadai, dikarenakan perubahan yang terjadi sudah melebihi dari perubahan yang dibatasi oleh dokumen RTRW sebagai lahan perkebunan. Pada daerah utara wilayah Kabupaten Bogor, degradasi hutan yang terjadi jauh lebih kecil, tingkat degradasi yang rendah di daerah utara ini merupakan hasil dari perubahan tutupan lahan terbangun dan agrikultur yang masif dan ketidakadanya ruang pertumbuhan lahan hutan lagi sejak tahun 2009-2024.

Hasil uji akurasi klasifikasi tutupan lahan Kabupaten Bogor tahun 2004–2024 menunjukkan bahwa seluruh peta tutupan lahan memiliki tingkat akurasi yang sangat baik. Nilai *overall accuracy* berada pada rentang 92,72% hingga 96,69%, dengan nilai tertinggi terdapat pada hasil klasifikasi tahun 2014 sebesar 96,69% dan nilai terendah pada tahun 2024 sebesar 92,72%. Sementara itu, nilai *Kappa coefficient* berada pada rentang 88,32% hingga 93,6%, yang menunjukkan tingkat kesepakatan klasifikasi yang kuat hingga sangat kuat antara hasil klasifikasi dan data validasi. Berdasarkan nilai tersebut, hasil klasifikasi tutupan lahan pada seluruh tahun pengamatan dapat dinilai layak digunakan sebagai dasar analisis perubahan tutupan lahan, *spatial metrics*, LDT, dan LEI karena telah memiliki tingkat ketelitian klasifikasi yang memadai.

3.2. Dinamika Fragmentasi Lahan dan Pola Ekspansi Kota Pada Kabupaten Bogor

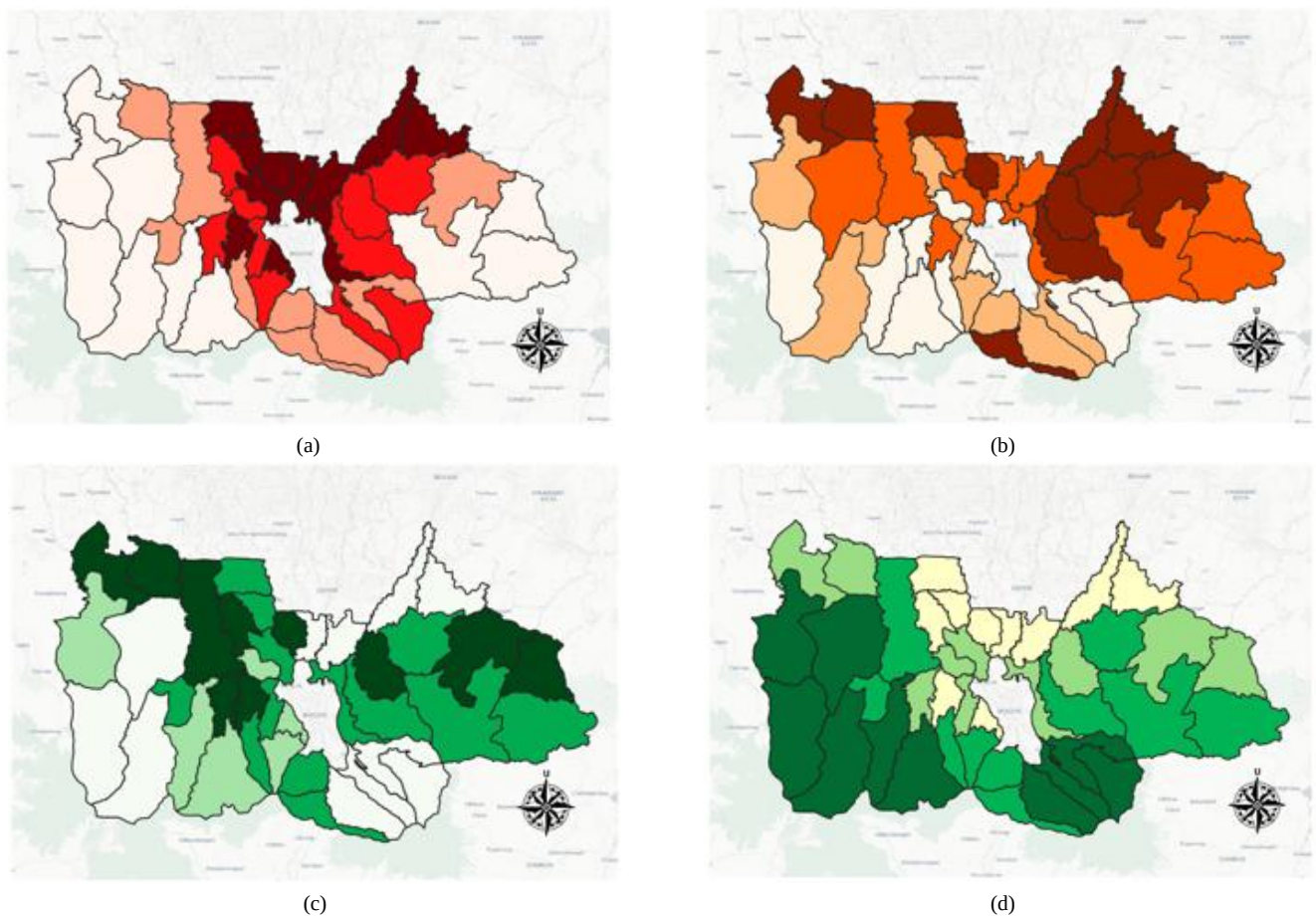
Pada proses perhitungan fragmentasi lahan maka dibutuhkan 3 indikator perhitungan. Pertama, mengidentifikasi karakteristik *urban form* pada Kabupaten Bogor. Kedua, perhitungan dinamika fragmentasi lahan dengan yang berdasar pada jumlah *ToD Fragmentation by Loss*. Ketiga, perhitungan dinamika pola spasial lahan terbangun yang terjadi pada daerah Kabupaten Bogor.

3.2.1. Mengidentifikasi Karakteristik Urban Form Pada Kabupaten Bogor

Proses identifikasi tutupan *urban form* dihitung dengan menggunakan 4 jenis tutupan lahan yang telah diperoleh yang terdiri dari lahan terbangun, lahan terbuka, lahan agrikultur, dan lahan hutan. Penggunaan jenis tutupan lahan ini didasarkan pada kondisi perubahan tutupan lahan yang sangat dinamis antar periode. Perhitungan *urban form* ini melalui proses kuantifikasi dengan menggunakan beberapa metrik yang telah disusun pada bagian sebelumnya, setelah itu dilakukan pembagian kelas dengan menggunakan kuartil untuk menciptakan kluster yang berkorelasi dengan bentuk *urban form* dari masing masing tutupan lahan yang digunakan.

Klaster I pada setiap jenis tutupan lahan adalah daerah yang memiliki kepadatan spasial tutupan lahan tersebut yang lebih rapat dibandingkan dengan klaster lainnya. Sedangkan klaster IV menunjukkan kecamatan yang memiliki persentase tutupan lahan yang paling kecil dibandingkan dengan klaster lainnya. Untuk klaster II dan III berperan sebagai lahan peralihan yang dapat berubah di masa yang akan datang menuju klaster I atau turun menjadi klaster IV.

Untuk lahan terbangun, persebaran daerah dengan *form* yang lebih *compact* berada pada daerah perbatasan antara Kabupaten Bogor dengan daerah lainnya yang berperan sebagai penyangga Metropolitan Jabodetabek. Terutama pada daerah bagian utara pada WP Tengah Kabupaten Bogor yang mayoritas memiliki daerah dengan kepadatan spasial lahan terbangun yang sangat tinggi. Berdasarkan perhitungan dengan menggunakan *urban form based metric* ini maka disimpulkan bahwa keberadaan Jabodetabek mendorong adanya tren menuju lahan terbangun yang lebih *compact* dan berlaku sebaliknya bahwa, pengaruh Kabupaten Bogor pada daerah perbatasan Non-Jabodetabek membentuk sebuah fenomena *sprawl* pada lahan terbangun.



Gambar 3. Karakteristik Urban Form Setiap Kecamatan di Kabupaten Bogor (Klaster I Gelap-Klaster IV Terang); (a) Klaster I-IV Lahan Terbangun; (b) Klaster I-IV Lahan Terbuka; (c) Klaster I-IV Lahan Agrikultur; (d) Klaster I-IV Lahan Hutan

Pada lahan terbuka, berdasarkan nilai SPLIT yang sangat tinggi pada setiap kecamatan di Kabupaten Bogor, tingkat persebaran *patch* yang terjadi sangat tinggi. Hal ini diartikan bahwa jarak antar *patch* pada suatu kecamatan saling berjauhan. Berdasarkan perhitungan dan interpretasi fenomena yang terjadi maka, terindikasi bahwa fenomena fragmentasi lahan yang terjadi pada tutupan lahan terbuka paling tinggi dibandingkan dengan tutupan lahan lainnya seperti lahan hutan dan agrikultur. Selanjutnya, berbeda dibandingkan dengan lahan terbangun, faktor kedekatan dengan Jabodetabek tidak mempengaruhi perubahan lahan terbuka yang sangat dinamis di setiap kecamatan yang ada.

Lahan agrikultur mengalami beberapa indikasi fenomena perubahan *urban form*. Berdasarkan nilai pola spasial *dominance* melalui LPI terindikasi bahwa pembukaan lahan agrikultur terjadi pada daerah konservasi dengan membentuk sebuah fragmen kecil dan berjauhan di daerah kecamatan dengan kepadatan spasial lahan hutan yang tinggi. Hal ini dapat menyebabkan adanya proses pemecahan tutupan lahan hutan yang membentuk fragment kecil atau disebut sebagai fragmentasi di kemudian hari. Berdasarkan perhitungan PLADJ pada pola spasial *aggregation* juga ditemukan bahwa terdapat adanya indikasi agregasi lahan agrikultur akibat pertumbuhan lahan yang menyebar di periode awal dan akhirnya terkoneksi di dekade terakhir.

Lahan hutan pada Kabupaten Bogor menjadi lahan yang selalu mengalami degradasi selama 2 dekade terakhir. Wilayah klaster IV yang merupakan daerah perkotaan pada Kabupaten Bogor memiliki *form* yang mengarah pada fragmentasi yang sangat tinggi seiring dengan persentase tutupan lahan hutan yang semakin menurun pula. Namun, secara keseluruhan klaster, seluruh lahan hutan mengalami proses fragmentasi yang meningkat antar periode yang menandakan ekstensifikasi pada jenis tutupan lainnya sangat berpengaruh pada proses keberlanjutan hutan di Kabupaten Bogor

3.2.2. Perhitungan Dinamika Fragmentasi Lahan di Kabupaten Bogor

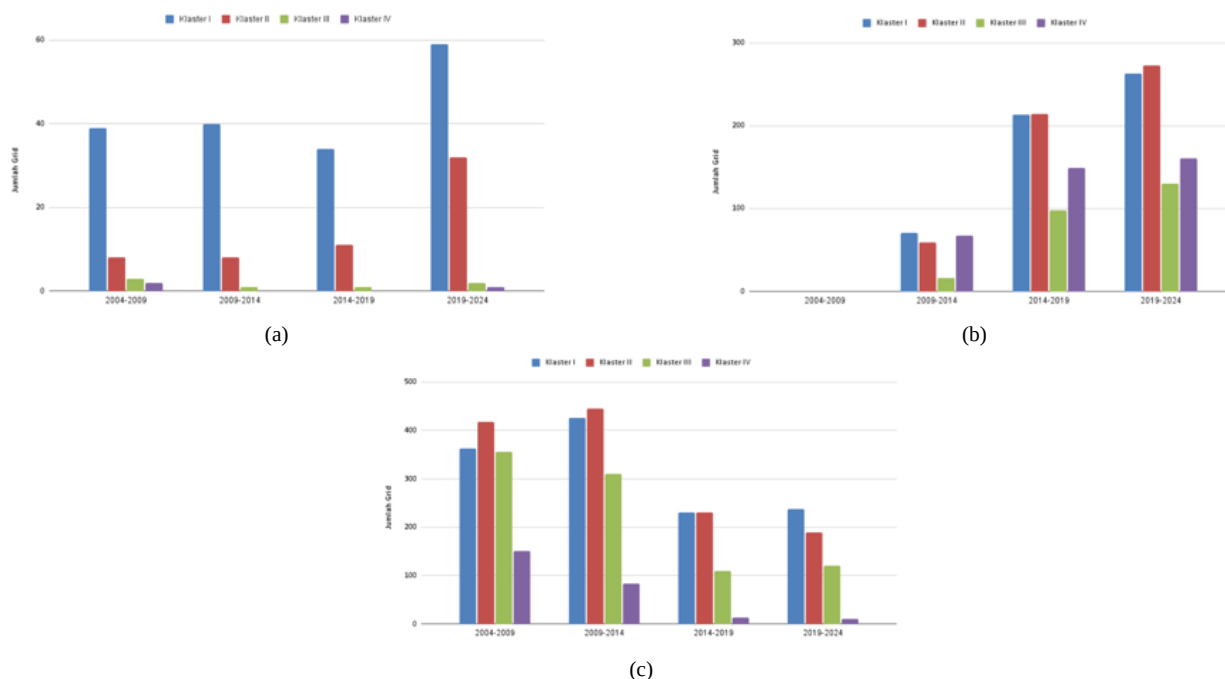
Perhitungan dinamika fragmentasi lahan di Kabupaten Bogor mengandalkan perhitungan dengan menggunakan LDt yang merupakan alat analisis berbasis grid yang dapat mengetahui dinamika lansekap yang terjadi di suatu wilayah dengan membandingkan NP dan *total area*. Pada lahan terbangun di Kabupaten Bogor, ditemukan bahwa tidak ada fragmentasi lahan yang terjadi. Hal ini disebabkan karena adanya pertumbuhan lahan yang secara konstan terjadi di setiap periode waktunya. Berdasarkan hasil perbandingan jumlah piksel pada setiap periode waktu, ditemukan bahwa Kabupaten Bogor mengalami pertumbuhan lahan terbangun secara *NP Increment by Gain* sebesar 20-25 persen pada setiap periode tahun. Hal ini menandakan bahwa terdapat pertumbuhan lahan terbangun baru secara acak di beberapa lokasi di Kabupaten Bogor dan membentuk simpul regenerasi tutupan lahan terbangun baru yang tersebar secara acak pula. Di sisi lain, terdapat pula sejumlah piksel yang memiliki nilai *no change* atau tidak ada perubahan antara antar periode. Kondisi ini disebabkan oleh banyaknya jumlah lahan hutan dan agrikultur yang ada di Kabupaten Bogor, sehingga ekspansi lahan terbangun belum sepenuhnya menjangkau wilayah tersebut.

Berdasarkan penilaian jumlah grid fragmentasi lahan terbuka per klaster yang telah dikelompokkan pada bagian sebelumnya, ditemukan bahwa terdapat pertumbuhan jumlah lahan terbuka yang terfragmentasi pada klaster I yang merupakan daerah yang bersifat *clustered*. Hal ini mendukung argumentasi yang telah terbentuk bahwa pertumbuhan lahan terbuka sangat dipengaruhi dan oleh pertumbuhan lahan terbangun di masa yang akan datang. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, terdapat pertumbuhan fragmentasi antar periode terutama pada daerah klaster I dan klaster II, sedangkan klaster III dan IV mengalami penurunan jumlah fragmentasi. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan pada Gambar 4, memberikan tanda bahwa pertumbuhan lahan terbuka pada klaster III dan IV didominasi oleh NP increment by gain yang mengartikan bahwa pertumbuhan bersifat membentuk fragmen kecil yang menyebar.

Berbeda dari lahan terbuka, lahan agrikultur mengalami fragmentasi yang terfokus pada klaster I dan II yang merupakan daerah kecamatan yang memiliki lahan agrikultur yang *clustered*. Fenomena yang berbeda juga terlihat pada daerah klaster IV yang mengalami pertumbuhan nilai fragmentasi dari periode ke periode. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa fragmentasi lahan terjadi pada setiap klaster dengan dominan pada klaster I, II, dan IV dan memiliki tren yang meningkat. Meningkatnya nilai fragmentasi yang terjadi pada klaster I dan II yang cukup signifikan memberikan indikasi bahwa pada lahan agrikultur di Kabupaten Bogor akan terus mengalami fragmentasi dan akan mencapai titik jenuhnya untuk terjadi adanya degradasi lahan secara perlahan. Hal ini terlihat pada Gambar 4.

Setelah melakukan penyesuaian antara hasil *fragmentation by loss* dengan klasterisasi lahan hutan yang telah disusun pada klasterisasi yang telah disajikan pada bagian sebelumnya menunjukkan bahwa fragmentasi lahan hutan terkekstrim terjadi di antara rentang waktu dekade pertama dan terfokus pada klaster I dan II yang merupakan wilayah kecamatan yang memiliki lahan hutan *clustered*. Sedangkan, pada klaster III dan IV terlihat bahwa fragmentasi yang terjadi memiliki pola progresif menurun, klaster III dan IV merupakan wilayah dengan lahan hutan yang *dispersed*. Pola ini menunjukkan bahwa daerah perkotaan Kabupaten Bogor sudah mengalami

NP decrement by loss pada dekade akhir sehingga proses fragmentasi mulai menurun. Dinamika ini dapat terlihat pada gambar berikut.



Gambar 4. Perbandingan Jumlah Grid Fragmentasi Lahan pada Kabupaten Bogor (a) Perbandingan Jumlah Grid Fragmentasi Lahan Terbuka; (b) Perbandingan Jumlah Grid Fragmentasi Lahan Agrikultur; (c) Perbandingan Jumlah Grid Fragmentasi Lahan Hutan

3.2.3. Dinamika Pola Ekspansi Lahan Terbangun di Kabupaten Bogor

Pada rentang tahun 2004-2009, ditemukan bahwa Kabupaten Bogor mengalami pertumbuhan lahan terbangun sekitar ± 12.100 hektar yang terdiri dari pola ekspansi *edge expansion* yang mendominasi dengan ± 8.900 hektar (73,5%), diikuti dengan *leap frogging* dengan ± 2.100 hektar (17,3%), dan *infilling* dengan ± 1.000 hektar (9,2%). Berdasarkan hasil dari LEI ini ditemukan bahwa pada periode pertama, Kabupaten Bogor mengalami ekspansi lahan terbangun yang cukup masif dengan ± 90 persen dari *patch* baru merupakan sebuah pertumbuhan *edge expansion*. Berdasarkan perhitungan dengan penyesuaian klasterisasi yang telah dilakukan pada bagian sebelumnya, proses ekspansi *edge expansion* masih mendominasi pola perubahan lahan terbangun yang terjadi. Perbedaan yang berbeda terjadi pada klaster I yang merupakan wilayah yang lebih *compact* memiliki nilai *infilling* yang lebih tinggi dibandingkan klaster lainnya, sedangkan klaster IV yang lebih *dispersed* memiliki nilai *leapfrogging* yang lebih tinggi

Tabel 3. Hasil Perhitungan Persentase Pola Ekspansi Perkotaan Per Klaster Kabupaten Bogor Rentang Waktu 2004-2009

Klaster	Leapfrogging	Edge Expansion	Infilling
Klaster I	18,24%	59,27%	22,49%
Klaster II	16,02%	65,86%	18,12%
Klaster III	18,89%	67,14%	13,97%
Klaster IV	27,68%	61,93%	10,38%

Pada rentang 2009-2014, Kabupaten Bogor mengalami perubahan tutupan lahan terbangun sebesar ± 9.500 hektar yang terdiri dari ± 1.048 hektar (11%) merupakan *infilling*, ± 8.933 hektar (94%) merupakan *edge expansion*, dan ± 2.135 hektar (22%) adalah *leap frogging*. Berdasarkan nilai persentase pola ekspansinya, Kecamatan Tanjungsari menjadi daerah dengan nilai *leap frogging* terbesar dengan 40,33%, hal ini menggambarkan bahwa terdapat fenomena pola pertumbuhan yang lebih menyebar dan tidak terkonsolidasi.

Sedangkan, Kecamatan Jasinga menjadi daerah dengan nilai *edge expansion* terbesar dengan 74,10%, dan Kecamatan Gunungputri mengalami *infilling* terbesar dengan 45,01%. Pola ekspansi terjadi sama seperti pada periode sebelumnya dengan klaster I yang memiliki nilai *infilling* yang lebih tinggi dan klaster IV yang memiliki nilai *leapfrogging* yang lebih besar.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Persentase Pola Ekspansi Perkotaan Per Klaster Kabupaten Bogor Rentang Waktu 2009-2014

Klaster	Leapfrogging	Edge Expansion	Infilling
Klaster I	10,81%	60,20%	28,98%
Klaster II	16,78%	63,67%	19,54%
Klaster III	18,10%	65,55%	16,35%
Klaster IV	21,23%	65,15%	13,63%

Pada rentang tahun 2014-2019, daerah Kabupaten Bogor mengalami ekspansi lahan terbangun sebesar ± 12.286 hektar yang terdiri dari ± 1.461 hektar (11,9%) merupakan ekspansi *infilling*, ± 9.017 hektar (73,4%) merupakan ekspansi *edge expansion*, dan ± 1.807 hektar (14,7%) yang merupakan ekspansi secara *leapfrogging*. Kecamatan Cariu tercatat pada periode ini mengalami *leapfrogging* sebesar 32,78%, hal ini menandakan bahwa daerah tersebut mengalami *dispersed* terparah apabila dibandingkan dengan daerah lainnya pada rentang waktu yang sama. Fenomena *dispersed* ini juga menggambarkan karakteristik pengemabngan *urban sprawl* di masa yang akan datang [32]. Kecamatan Jasinga tetap menjadi kecamatan dengan persentase pola ekspansi *edge expansion* terbesar dengan 78,09%, mengindikasikan bahwa daerah Kecamatan Jasinga mengalami perambatan lateral yang berkelanjutan dari tahun ke tahun. Terdapat perheseran pertumbuhan nilai *infilling* pada klaster I, II, dan III yang mulai meningkat meninggalkan klaster IV yang masih memiliki nilai *leapfrogging* terbesar.

Tabel 5. Hasil Perhitungan Persentase Pola Ekspansi Perkotaan Per Klaster Kabupaten Bogor Rentang Waktu 2014-2019

Klaster	Leapfrogging	Edge Expansion	Infilling
Klaster I	7,85%	58,54%	33,61%
Klaster II	10,15%	65,21%	24,64%
Klaster III	15,79%	66,52%	17,69%
Klaster IV	20,12%	67,24%	12,65%

Pada rentang tahun terakhir yaitu rentang 2019-2024, Kabupaten Bogor mengalami peningkatan lahan terbangun sebesar ± 15.531 yang terdiri dari perubahan pola ekspansi kota *infilling* sebesar ± 2.250 hektar (14,5%), *edge expansion* sebesar ± 11.451 hektar (73,7%), dan *leapfrogging* sebesar ± 1.830 hektar (11,8%). Secara spasial, daerah Kecamatan Tenjo mengalami persentase ekspansi perkotaan dengan pola *leapfrogging* terbesar apabila dibandingkan dengan daerah kecamatan lainnya dengan nilai 36,73%, tingginya nilai *leapfrogging* menandakan terjadinya fenomena *urban sprawl* [33].

Pertumbuhan *patch* secara *leapfrogging* cenderung akan memperparah fragmentasi lansekap, memicu inefisiensi infrastruktur, dan mempersulit pengelolaan ruang [34]. Pada rentang tahun terakhir terjadi pertumbuhan secara signifikan pada pola ekspansi *infilling* di klaster I, II, dan III yang menandakan bahwa terjadi adanya densifikasi lahan terbangun pada mayoritas daerah di Kabupaten Bogor, terutama pada beberapa daerah konservasi yang ada pada klaster IV. Hal ini dapat mengakibatkan adanya pemutusan habitat apabila densifikasi spasial ini terus terjadi pada daerah konservasi Gunung Halimun Salak dan Gunung Gede Pangrango.

Tabel 6. Hasil Perhitungan Persentase Pola Ekspansi Perkotaan Per Klaster Kabupaten Bogor Rentang Waktu 2019-2024

Klaster	Leapfrogging	Edge Expansion	Infilling
Klaster I	6,66%	55,84%	37,5%
Klaster II	10,71%	61,59%	27,7%

Klaster III	12,66%	65,26%	22,08%
Klaster IV	21,55%	64,15%	14,31%

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa Kabupaten Bogor mengalami perubahan tutupan lahan dan dinamika spasio-temporal yang signifikan selama periode 2004–2024. Lahan terbangun meningkat dari 23.599 ha pada tahun 2004 menjadi 71.505 ha pada tahun 2024, atau bertambah sebesar 47.906 ha selama dua dekade pengamatan. Peningkatan tersebut menunjukkan adanya ekspansi perkotaan yang berlangsung konsisten, terutama pada wilayah yang memiliki keterkaitan spasial dengan sistem Metropolitan Jabodetabek. Pada saat yang sama, perubahan tutupan lahan juga ditandai oleh penurunan lahan hutan dan dinamika lahan agrikultur, sehingga menunjukkan adanya tekanan terhadap lanskap non-terbangun di Kabupaten Bogor.

Hasil analisis *spatial metrics* menunjukkan bahwa dinamika bentuk perkotaan di Kabupaten Bogor tidak berlangsung secara seragam antarwilayah. Beberapa kecamatan yang berada pada klaster dengan karakter lahan terbangun lebih kompak menunjukkan kecenderungan peningkatan densifikasi, yang ditandai oleh meningkatnya pola *infilling* pada periode akhir pengamatan. Sebaliknya, kecamatan pada klaster dengan karakter lahan terbangun lebih tersebar masih menunjukkan kecenderungan ekspansi melalui *edge expansion* dan *leapfrogging*. Temuan ini mengindikasikan bahwa pertumbuhan lahan terbangun di Kabupaten Bogor tidak hanya terjadi melalui pemadatan kawasan eksisting, tetapi juga melalui perluasan lateral dan kemunculan patch terbangun baru yang berpotensi memperkuat gejala *urban sprawl*.

Analisis LDT menunjukkan bahwa fragmentasi lanskap terutama terjadi pada kelas lahan agrikultur dan hutan. Fragmentasi pada lahan agrikultur mengindikasikan adanya tekanan perubahan fungsi lahan yang dapat mengurangi kesinambungan ruang produksi pertanian. Fragmentasi pada lahan hutan juga perlu menjadi perhatian karena dapat menurunkan konektivitas ekologis dan meningkatkan keterpecahan lanskap alami. Namun, klaim mengenai ancaman langsung terhadap kawasan konservasi perlu dipahami sebagai indikasi spasial yang masih memerlukan pengujian lebih lanjut melalui analisis overlay dengan batas kawasan konservasi atau analisis kedekatan terhadap kawasan lindung.

Pola ekspansi perkotaan berdasarkan LEI menunjukkan bahwa *edge expansion* merupakan pola yang dominan pada hampir seluruh periode pengamatan. Pola ini menggambarkan bahwa pertumbuhan lahan terbangun banyak terjadi melalui perluasan dari kawasan terbangun eksisting. Sementara itu, peningkatan *infilling* pada klaster I, II, dan III menunjukkan adanya proses densifikasi pada kawasan yang telah berkembang lebih dahulu. Pola *leapfrogging* yang masih muncul pada klaster IV perlu diantisipasi karena dapat menghasilkan pertumbuhan yang lebih tersebar, kurang terkonsolidasi, dan berpotensi meningkatkan fragmentasi lanskap serta inefisiensi pelayanan infrastruktur.

Berdasarkan temuan tersebut, pengendalian ruang di Kabupaten Bogor perlu diarahkan pada pengelolaan ekspansi lahan terbangun secara lebih selektif. Pertama, wilayah dengan dominasi *edge expansion* perlu diarahkan agar pertumbuhannya tetap mengikuti struktur ruang dan jaringan infrastruktur yang telah direncanakan. Kedua, wilayah dengan indikasi *leapfrogging* perlu dikendalikan melalui pembatasan pertumbuhan terbangun yang terpisah dari kawasan eksisting. Ketiga, lahan agrikultur dan hutan yang mengalami fragmentasi perlu dilindungi melalui penguatan zonasi, pengendalian alih fungsi lahan, dan peningkatan konektivitas lanskap. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar dalam merumuskan strategi pengendalian pemanfaatan ruang yang lebih adaptif terhadap dinamika ekspansi perkotaan dan keberlanjutan ekologis Kabupaten Bogor.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) atas dukungan pendanaan melalui program Bantuan Tugas Akhir Mahasiswa Dana ITS 2025, yang telah memberikan kontribusi dalam pelaksanaan dan penyelesaian penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] M. Sadyohutomo, *Manajemen Kota dan Wilayah: Realita dan Tantangan*, Jakarta: Jakarta bumi Aksara, 2009.
- [2] S. F. Kabupung, "Studi Citra Kota Maumere di Nusa Tenggara Timur," 2012.

- [3] F. R. Harahap, "Dampak Urbanisasi Bagi Perkembangan Kota di Indonesia," *Jurnal Society*, vol. 1, no. 1, pp. 35-45, 2013.
- [4] Badan Pusat Statistik, "Berita Resmi Statistik: Hasil Sensus Penduduk 2020," Badan Pusat Statistik, Jakarta, 2021.
- [5] United Nation, "World population projected to reach 9.8 billion in 2050 and 11.2 billion in 2100.," United Nation, 21 June 2021. [Online]. Available: <https://www.un.org/en/desa/world-population-projected-reach-98-billion-2050-and-112-billion-2100>. [Accessed 24 July 2025].
- [6] A. Schneider and C. E. Woodcock, "Compact, Dispersed, Fragmented, Extensive? A Comparison of urban Growth in Twenty Five Global Cities Using Remotely Sensed Data, Pattern Metrics, and Census Information," *UrbanStudies*, pp. 659-692, 2008.
- [7] T. Laidley, "The Problem of Urban Sprawl," *Contexts*, pp. 74-77, August 2016.
- [8] A. F. Aritenang, "Identifying Post - Suburbanization: The Case of the Jakarta Metropolitan Area," *Habitat International*, pp. 1-9, 2023.
- [9] Badan Pusat Statistik, "Jumlah Penduduk Kabupaten Bogor (jiwa), 2024," Badan Pusat Statistik, 12 June 2024. [Online]. Available: <https://bogorkab.bps.go.id/id/statistics-table/2/MzgwIzI=/jumlah-penduduk-kabupaten-bogor.html>. [Accessed 24 July 2025].
- [10] P. S. Mulya, M. Munif, A. E. Pravitasari, E. Rustiadi and W. , "Land Use and Spatial Planning in The Border Area of Bogor Regency and Bogor City, West Java Province, Indonesia," in *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2022.
- [11] A. Bryman, *Social Research Methods*, Oxford: Oxford University Press, 2016.
- [12] K. McGarigal and B. J. Marks, *Fragstat: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure*, Corvallis: United States Department Of Agriculture, 1995.
- [13] S. A. Cushman, K. McGarigal and C. Neal, "Parsimony in landscape metrics: Strength, universality, and consistency," *Ecological Indicator* 8, vol. 8, no. 5, pp. 691-703, 2008.
- [14] S. G. Plexida, A. I. Sfougaris, I. P. Ispikoudis and V. P. Papanastasis, "Selecting Landscape Metrics as Indicators of Spatial Heterogeneity-A Comparison Among Greek Landscapes," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 4, no. 2, pp. 129-143, 2014.
- [15] W. Ji, "Landscape Effects of Urban Sprawl: Spatial and Temporal Analyses Using Remote Sensing Images and Landscape Metrics," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pp. 1691-1694, 2008.
- [16] N. R. F. Hastari, E. R. Ningrum, P. Setyowati, H. Nadia, Q. I. Putra, S. Lutfiana, M. R. Akbar, M. F. Ramadhan, L. S. Budiman and E. Haryono, "Spatial Pattern Analysis of Land Cover Changes Using Fragstat in Kendal Delta, Kendal Regency, Central Java," *EDP Sciences*, pp. 1-8, 2021.
- [17] P. Divigalpitiya and N. Handayani, "Measuring the Urban Expansion Process of Yogyakarta City in Indonesia," *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*, pp. 18-32, 2015.
- [18] M. S. Nurdiana and S. R. Giyarsih, "Analisis Fragmentai Spasial Berbasis Citra Multitemporal Untuk Mengidentifikasi Fenomena Urban Sprawl di Surakarta," *Jurnal Bumi Indonesia*, 2016.
- [19] Q. Zhang, C. Chen, J. Wang, D. Yang, Y. Zhang, Z. Wang and M. Gao, "The Spatial Granulaty Effect, Changing Landscape Pattern, and Suitable Landscape Metric in The Three Gorges Reservoir Area 1995-2015," *Ecological Indicators*, pp. 1-15, 2020.
- [20] J. Magidi and F. Ahmed, "Assessing Urban Sparwal Using Remote Sensing and Landscape Metrics: A Case Study of City of Tshwane, South Africa (1984-2015)," *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, pp. 335-346, 2019.
- [21] A. Berila and F. Isufi, "Two Decades (2000-2020) Measuring Urban Sprawl Using GIS, RS and Landscape Metrics: a Case Study of Municipality of Prishtina (Kosovo)," *Journal of Ecological Engineering*, pp. 114-125, 2021.
- [22] A. Arora, M. Pandey, V. N. Mishra, R. Kumar, P. K. Rai, R. Costache, M. Punia and L. Di, "Comparative Evaluation of Geospatial Scenario Based Land Change Simulation Model Using Landscapae Metric," *Ecological Indicators*, pp. 1-19, 2021.
- [23] H. Kim, "Examining The Impact Of Spatial Development Patterns On Regional Heat Island Effect in Metropolitan Regions Of The United States," Office of Graduate Studies of Texas A&M University, Texas, 2013.
- [24] A. Jatayu, E. Rustiadi and D. O. Pribadi, "A Quantitative Approach to Characterizing the Shanges and Managing Urban Form for Sustaining the Suburb of a Mega-Urban Region: The Case of North Cianjur," *Sustainable*, pp. 1-21, 2020.
- [25] R. Machado, S. Godinho, J. Pirnat, N. Neves and P. Santos, "Landscape Dynamics Typology Tool (LDTtool) A new way to assess landscape dynamics," in *10th IALE World Congress - Nature and Society facing the Anthropocene Challenges and Perspectives for Landscape Ecology*, 2019.
- [26] X. Liu, X. Li, Y. Chen, Z. Tan, S. Li and B. Ai, "A New Landscape Index for Quantifying Urban Expansion using Multi Temporal Remotely Sensed Data," *Landscape Ecology*, pp. 671-682, 2010.
- [27] A. Al Kafy, M. Saha, A. Al Faisal, Z. A. Rahman, M. T. Rahman, D. Liu, M. A. Fattah, A. Al Rakib, A. E. Aldousari, S. N. Rahaman, M. Z. Hasan and M. A. K. Ahasan, "Predicting The Impacts of Land Use/Land Cover Changes on Seasonal Urban Thermal Charecteristics Using machine Learning Algorithms," *Buiilding and Environtment*, vol. 217, p. 2022, 2022.
- [28] J. R. Anderson, E. E. Hardy, J. T. Roach and R. E. Witmer, "A Land Use and Land Cover Classification System For Use With Remote Sensor Data," U.S Geological Survey, 1976.
- [29] S. A. Al Rifat and W. Liu, "Quantifying Spatiotemporal Patterns and Major Explanatory Factors of Urban Expansion in Miami Metropolitan Area During 1992–2016," *Remote Sensing*, pp. 1-29, 2019.
- [30] H. Rakuasa and Y. Pakniany, "Spatial Dynamics of Land Cover Change in Ternate Tengah District, Ternate City, Indonesia," *Forum Geografi*, pp. 126-135, 2022.
- [31] J. H. Lowry and M. B. Lowry, "Comparing Spatial Metric That Quantify Urban Form," *Computer, Environment, and Urban Form*, pp. 59-67, 2014.
- [32] G. Galster, R. Hansen, M. R. Ratcliffe, H. Wolman, S. Coleman and J. Freiharge, "Wrestling Sprawl to The Ground: Defining and Measuring an Elusive Concept," *Housing Policy Debate*, pp. 681-717, 2001.
- [33] B. Bhatta, *Analysis of Urban Grwoth and Sprawl From Remote Sensing Data*, Springer, 2010.
- [34] H. Wolman, G. Galster, R. Hanson, M. Rattcliffe, K. Furdell and A. Sarzynski, "The Fundamental Challenge in Measuring Sprawl: Whisch Land Should Be Considered," *Professional Geographer*, pp. 94-105, 2005.