

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Aksesibilitas

Kata aksesibilitas berasal dari bahasa Inggris yaitu *accessibility* yang artinya adalah menunjukkan kemudahan penggunaan. Kemudahan suatu objek, layanan, atau lingkungan dapat dimanfaatkan oleh semua orang disebut aksesibilitas. Aksesibilitas merupakan konsep penting dalam perencanaan wilayah dan transportasi yang menjelaskan keterkaitan antara pola tata guna lahan dan jaringan transportasi. Menurut Black (1981), aksesibilitas tidak hanya berkaitan dengan keberadaan sarana transportasi, tetapi merupakan hasil integrasi antara sistem penggunaan lahan yang tersebar secara geografis dengan sistem jaringan transportasi yang menghubungkan antar lokasi tersebut. Dengan demikian, aksesibilitas mencerminkan sejauh mana suatu kawasan dapat dijangkau dan dihubungkan dengan kawasan lain secara efektif. Menurut Rodrigue et al. (2017), aksesibilitas ditentukan oleh seberapa mudah sebuah lokasi dapat dicapai melalui jaringan transportasi yang tersedia, dan bagaimana jaringan tersebut mendukung aktivitas ekonomi dan sosial masyarakat. Dalam perencanaan wilayah, aksesibilitas diartikan sebagai tingkat kemudahan suatu lokasi untuk dijangkau dari lokasi lain. Hansen (1959) mendefinisikan aksesibilitas sebagai potensi interaksi dalam sistem ruang, sedangkan Tarigan (2013) menekankan bahwa aksesibilitas sangat dipengaruhi oleh jarak, waktu tempuh, kemudahan mobilitas, dan peluang aktivitas yang dapat dicapai.

Sejalan dengan pandangan tersebut, Hurst (1974) menyatakan bahwa aksesibilitas dapat dipahami sebagai tingkat kemudahan dalam melakukan perpindahan antar tempat atau kawasan dalam suatu sistem wilayah, yang diukur berdasarkan indikator waktu tempuh, biaya perjalanan, dan usaha yang dikeluarkan. Semakin kecil waktu, biaya, dan usaha yang dibutuhkan untuk mencapai suatu lokasi, maka semakin tinggi tingkat aksesibilitas wilayah tersebut.

2.1.1 Konsep Aksesibilitas

Konsep aksesibilitas infrastruktur mencakup dua dimensi utama:

- 1) Dimensi fisik-spasial, meliputi jarak, konektivitas, dan kualitas jaringan; serta
- 2) Dimensi fungsional, yang mencakup ketersediaan layanan, waktu tempuh, biaya perjalanan, serta hambatan perjalanan.

Aksesibilitas juga dapat dipahami sebagai fungsi dari interaksi ruang. Lokasi dengan aksesibilitas tinggi cenderung menarik aktivitas ekonomi, investasi, dan pemanfaatan ruang yang lebih intensif dibandingkan lokasi dengan aksesibilitas rendah. Selain itu, wilayah yang terhubung dengan infrastruktur strategis seperti jalan tol, pelabuhan, atau bandara memiliki keunggulan komparatif dalam menarik pertumbuhan baru (Dwiylianto

dkk., 2018). Dalam penelitian-penelitian perencanaan wilayah, aksesibilitas diukur menggunakan berbagai indikator seperti jarak terdekat, waktu tempuh, biaya perjalanan, kepadatan jaringan, buffer zona pelayanan, hingga model gravitasi. Pemilihan indikator umumnya disesuaikan dengan karakteristik infrastruktur dan tujuan analisis penelitian.

Peningkatan aksesibilitas wilayah melalui pembangunan jaringan jalan, termasuk jalan tol, merupakan bagian dari mandat kebijakan nasional. Undang-Undang Nomor 38 Tahun 2004 tentang Jalan sebagaimana diperbarui melalui Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2022 menegaskan bahwa jalan berfungsi menghubungkan dan membuka akses antarkawasan guna menunjang mobilitas masyarakat dan distribusi barang. Peraturan Pemerintah Nomor 23 Tahun 2024 tentang Jalan Tol menegaskan bahwa pembangunan jalan tol bertujuan meningkatkan kapasitas jaringan, mempercepat perjalanan, dan mendorong pengembangan ekonomi kawasan melalui peningkatan konektivitas. Dari sisi regulasi, jalan tol diposisikan sebagai instrumen strategis untuk mengurangi hambatan jarak dan memperkuat hubungan ruang, yang selanjutnya menjadi dasar meningkatnya tingkat aksesibilitas suatu wilayah

Dalam konteks penelitian ini, konsep aksesibilitas digunakan untuk memahami bagaimana kedekatan terhadap gerbang tol memengaruhi intensitas aktivitas masyarakat. Infrastruktur seperti jalan tol secara langsung meningkatkan kemudahan mencapai suatu lokasi, sehingga wilayah yang lebih dekat dengan gerbang tol cenderung memiliki aktivitas lebih tinggi dibanding wilayah yang lebih jauh

2.1.2 Gerbang Tol

Gerbang tol merupakan bagian integral dari sistem jaringan jalan tol yang berfungsi sebagai simpul transportasi, yaitu titik masuk dan keluar kendaraan dari jaringan jalan bebas hambatan menuju jaringan jalan lokal. Sebagai simpul, gerbang tol memiliki peran strategis dalam menghubungkan arus pergerakan antarwilayah serta memfasilitasi interaksi antara kawasan yang dilayani oleh jalan tol dengan wilayah di sekitarnya. Keberadaan gerbang tol menjadikan suatu lokasi memiliki posisi yang lebih mudah dijangkau dibandingkan wilayah lain yang tidak memiliki akses langsung terhadap jaringan tol.

Dalam konteks pembangunan wilayah, gerbang tol tidak hanya dipahami sebagai elemen teknis transportasi, tetapi juga sebagai pemicu peningkatan aksesibilitas. (Maryaningsih dkk., 2014) pembangunan infrastruktur transportasi, termasuk jaringan jalan dan simpul-simpulnya, berperan signifikan dalam meningkatkan aksesibilitas wilayah yang selanjutnya mendorong pertumbuhan ekonomi regional. Gerbang tol sebagai simpul akses utama memungkinkan penurunan hambatan pergerakan, baik dalam bentuk waktu tempuh maupun kelancaran distribusi barang dan jasa.

Peningkatan aksesibilitas akibat keberadaan gerbang tol berimplikasi

langsung pada intensitas mobilitas penduduk dan aktivitas ekonomi. Wilayah dengan infrastruktur jalan yang lebih baik cenderung mengalami peningkatan produktivitas dan aktivitas ekonomi yang lebih tinggi (Suriani dan Cut Nanda Keusuma, 2015). Dalam hal ini, gerbang tol memperkuat konektivitas antar pusat kegiatan dan memperluas jangkauan interaksi ekonomi lintas wilayah.

Lebih lanjut, (Safitri dkk., 2024) menemukan bahwa daerah yang dilalui dan memiliki akses langsung terhadap jalan tol menunjukkan pertumbuhan ekonomi yang lebih positif dibandingkan daerah yang tidak terhubung secara langsung. Temuan ini mengindikasikan bahwa gerbang tol berperan sebagai simpul strategis yang meningkatkan daya tarik wilayah di sekitarnya untuk berkembang menjadi lokasi permukiman, perdagangan, maupun kegiatan ekonomi lainnya.

Namun demikian, peningkatan aksesibilitas yang dihasilkan oleh gerbang tol juga dapat memicu dinamika spasial yang bersifat selektif. Safira mengungkapkan bahwa pembangunan jalan tol dapat menyebabkan pergeseran aktivitas ekonomi dari koridor lama menuju kawasan yang memiliki kedekatan dengan simpul tol (Safira dkk., 2021). Hal ini menunjukkan bahwa manfaat aksesibilitas tidak terdistribusi secara merata, melainkan cenderung terkonsentrasi di sekitar gerbang tol sebagai titik dengan tingkat keterhubungan yang lebih tinggi.

2.1.2.1 Kedekatan jarak terhadap gerbang Tol

Kedekatan jarak terhadap gerbang tol merupakan salah satu aspek penting dalam analisis spasial pembangunan wilayah, khususnya dalam memahami perubahan aktivitas sosial ekonomi di sekitar infrastruktur transportasi. Gerbang tol berfungsi sebagai simpul utama yang menghubungkan jaringan jalan tol dengan jaringan jalan lokal, sehingga lokasi yang berada lebih dekat dengan gerbang tol memiliki tingkat keterhubungan yang lebih tinggi dibandingkan wilayah yang berada lebih jauh. Kondisi ini menjadikan gerbang tol sebagai pusat peningkatan aksesibilitas yang berpotensi memengaruhi intensitas aktivitas suatu wilayah.

Dalam konteks pembangunan infrastruktur, Maryaningsih bahwa peningkatan aksesibilitas akibat pembangunan jaringan jalan berkontribusi signifikan terhadap pertumbuhan ekonomi wilayah (Maryaningsih dkk., 2014). Infrastruktur jalan yang terintegrasi memungkinkan pergerakan manusia dan barang berlangsung lebih efisien, sehingga wilayah yang memiliki kedekatan spasial terhadap simpul transportasi cenderung mengalami peningkatan aktivitas ekonomi. Hal ini sejalan dengan Suriani dan Keusuma (2015) menyatakan bahwa pembangunan infrastruktur jalan dan konektivitas wilayah berpengaruh terhadap produktivitas dan dinamika aktivitas ekonomi regional (Suriani dan Cut Nanda Keusuma, 2015)

Kedekatan jarak terhadap gerbang tol secara konseptual berkaitan

dengan kemudahan interaksi antarwilayah. Wilayah yang berada pada jarak lebih dekat memiliki keunggulan relatif dalam hal mobilitas, distribusi barang, serta akses terhadap pusat-pusat kegiatan. Safitri 2024 menemukan bahwa daerah yang dilalui dan memiliki akses langsung terhadap jalan tol menunjukkan pertumbuhan ekonomi yang lebih tinggi dibandingkan wilayah yang tidak terhubung secara langsung. (Safira dkk., 2021) Temuan ini mengindikasikan bahwa jarak terhadap simpul tol menjadi faktor penting dalam menentukan intensitas dan arah perkembangan aktivitas wilayah. Peningkatan aktivitas akibat kedekatan dengan gerbang tol tidak selalu terdistribusi secara merata, menunjukkan bahwa pembangunan jalan tol dapat memicu pergeseran aktivitas ekonomi dari jalur lama menuju kawasan yang memiliki akses lebih dekat terhadap simpul tol (Safira dkk., 2021). Fenomena ini menegaskan bahwa kedekatan jarak terhadap gerbang tol bersifat selektif dan dapat membentuk konsentrasi aktivitas baru di sekitar simpul akses tersebut.

Dalam penelitian ini, kedekatan jarak terhadap gerbang tol dipahami sebagai kedekatan spasial suatu wilayah terhadap simpul tol yang direpresentasikan melalui pembagian zona jarak (*buffer*). Kedekatan tersebut selanjutnya dianalisis hubungannya dengan perubahan intensitas cahaya malam (*Night -Time light*) sebagai proksi aktivitas sosial ekonomi. Pendekatan ini sejalan dengan pemanfaatan NTL dalam menggambarkan dinamika aktivitas manusia dan ekonomi wilayah (Duriscoe dkk., 2018; Jiang dkk., 2025; Pérez-Sindín dkk., 2021)

Dengan demikian, analisis kedekatan jarak terhadap gerbang tol menjadi dasar untuk memahami bagaimana peningkatan aksesibilitas memengaruhi dinamika aktivitas sosial ekonomi secara spasial dan temporal. Wilayah yang berada lebih dekat dengan gerbang tol diasumsikan memiliki potensi perubahan aktivitas yang lebih besar dibandingkan wilayah yang berada pada jarak yang lebih jauh, yang selanjutnya dapat diidentifikasi melalui perubahan intensitas dan pola sebaran cahaya malam.

2.1.2.2 Zona Pengaruh Aktivitas

Hubungan antara jarak dan intensitas kegiatan dapat dijelaskan melalui beberapa teori klasik yang masih relevan dalam analisis perencanaan wilayah, antara lain:

a) Teori Gravitasi (Gravity Model)

Dikembangkan oleh Reilly (1931) dan Isard (1956), teori ini berasumsi bahwa interaksi antara dua wilayah berbanding lurus dengan ukuran atau “massa ekonomi” (misalnya jumlah penduduk, PDRB, atau tingkat aktivitas) dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak di antara keduanya.

Rumus umum:

$$I_{ij} = \frac{P_i \times P_j}{D_{ij}^2}$$

Di mana I_{ij} = intensitas interaksi, P_i , P_j = ukuran ekonomi/populasi wilayah i dan j , dan D_{ij} = jarak antara keduanya. Model ini sering digunakan untuk menganalisis daya tarik pusat kegiatan terhadap wilayah sekitarnya serta memperkirakan arus mobilitas manusia atau barang.

b) Teori Lokasi (Location Theory)

Menurut Alfred Weber (1909), lokasi optimal suatu kegiatan ekonomi ditentukan oleh minimisasi biaya transportasi dan maksimisasi keuntungan. Dalam konteks modern, teori lokasi menjelaskan bahwa kegiatan ekonomi cenderung memilih lokasi di dekat sumber daya, pasar, dan jaringan transportasi yang efisien. Oleh karena itu, pembangunan infrastruktur baru seperti jalan tol dapat menggeser pusat-pusat kegiatan ekonomi menuju lokasi yang lebih strategis dan mudah dijangkau.

c) Teori Distance Decay (Efek Peluruhan Jarak)

Teori ini menjelaskan bahwa intensitas interaksi antara dua titik akan menurun seiring bertambahnya jarak. Fenomena distance decay sangat relevan dalam analisis spasial karena menunjukkan bahwa dampak pembangunan atau aktivitas ekonomi akan paling kuat di area terdekat dari sumbernya (misalnya gerbang tol, pusat kota, atau kawasan industri) dan berkurang secara bertahap pada wilayah yang lebih jauh.

Dalam penelitian wilayah, fungsi distance decay dapat digunakan untuk menentukan zona pengaruh aktivitas sosial ekonomi, seperti cincin radius 0-2 km, 2-5 km, dan 5-10 km dari titik pusat pembangunan. Model ini sangat berguna untuk memetakan gradasi dampak pembangunan terhadap perubahan sosial ekonomi masyarakat. Konsep buffer distance digunakan untuk membagi wilayah menjadi beberapa zona berdasarkan tingkat aksesibilitasnya. Model ini didasarkan pada konsep *distance decay*, yaitu kecenderungan menurunnya intensitas aktivitas seiring meningkatnya jarak dari pusat aksesibilitas.

a) Zona 0-2 km: Aksesibilitas Sangat Tinggi

1. Wilayah paling dekat dengan pintu tol.
2. Intensitas mobilitas tertinggi karena menjadi area perlintasan utama.
3. Biasanya muncul aktivitas ekonomi baru (kuliner, jasa, ruko, minimarket).
4. Paling potensial mengalami peningkatan aktivitas malam → nilai NTL naik signifikan.
5. Zona ini sering menjadi “zona efek langsung” pembangunan tol.

- b) Zona 2-5 km: Aksesibilitas Sedang
 1. Masih mendapatkan efek aksesibilitas, namun tidak setinggi zona inti.
 2. Pertumbuhan usaha tetap ada tetapi tidak seintens zona 0-2 km.
 3. Aktivitas malam (NTL) terlihat meningkat, tetapi pola penyebarannya lebih menyebar.
 4. Mewakili “zona transisi” antara pusat aktivitas (tol) dan wilayah sekitar.
- c) Zona 5-10 km: Aksesibilitas Lebih Rendah
 1. Efek pembangunan tol masih terasa, tetapi tidak langsung.
 2. Aktivitas sosial-ekonomi dipengaruhi faktor lokal (permukiman, desa, pusat lokal).
 3. Nilai NTL biasanya lebih rendah dan peningkatannya tidak setajam zona 0-2 km.
 4. Termasuk “zona pengaruh tidak langsung”

Dalam penelitian ini, zona 0-2 km, 2-5 km, dan 5-10 km ditetapkan untuk membedakan tingkat kedekatan terhadap gerbang tol. Zona 0-2 km biasanya memiliki aksesibilitas tertinggi karena berada paling dekat dengan pintu tol, sehingga menjadi wilayah yang paling cepat mengalami perubahan aktivitas sosial-ekonomi. Zona selanjutnya memiliki aksesibilitas lebih rendah, sehingga pola aktivitasnya juga menurun sesuai jarak.

2.2 Aktivitas Sosial Ekonomi

2.2.1 Konsep Sosial

Kondisi sosial merupakan keadaan atau situasi yang menggambarkan kehidupan sosial masyarakat pada suatu wilayah tertentu. Menurut Kamus Umum Bahasa Indonesia, kondisi sosial diartikan sebagai keadaan masyarakat pada waktu tertentu yang berkaitan dengan hubungan sosial antarindividu dalam kehidupan bermasyarakat. Dalyono (2005) menjelaskan bahwa kondisi sosial mencakup seluruh individu atau kelompok yang secara langsung maupun tidak langsung memengaruhi kehidupan seseorang, baik melalui interaksi sehari-hari maupun melalui lingkungan sosial yang lebih luas (Basrowi & Juariyah, 2010)

Soekanto (2002) menyatakan bahwa kondisi sosial tidak hanya dibentuk oleh individu dalam keluarga, tetapi juga oleh lingkungan masyarakat, tetangga, dan kelompok sosial lain yang hidup berdampingan dalam suatu komunitas. Karakteristik Kondisi Sosial. Berdasarkan kondisi sosial masyarakat dicirikan oleh beberapa aspek berikut:

- a) Struktur demografis (umur dan jenis kelamin)
- b) Pola interaksi sosial dan pergaulan masyarakat
- c) Tingkat pendidikan masyarakat
- d) Lingkungan tempat tinggal dan tetangga
- e) Keanggotaan dalam kelompok atau organisasi sosial

Kondisi sosial tersebut berperan penting dalam membentuk pola kehidupan masyarakat, termasuk dalam proses pendidikan, partisipasi sosial, dan pembentukan nilai-nilai sosial.

2.2.2 Konsep Ekonomi

Kondisi ekonomi adalah keadaan yang menggambarkan kemampuan masyarakat dalam memenuhi kebutuhan hidupnya melalui aktivitas ekonomi. Keadaan ekonomi merupakan suatu kedudukan yang secara rasional menempatkan seseorang pada posisi tertentu dalam masyarakat, yang disertai dengan seperangkat hak dan kewajiban

Kondisi ekonomi berkaitan dengan kemampuan finansial keluarga serta kepemilikan perlengkapan material, yang secara umum dikategorikan ke dalam kondisi baik, cukup, dan kurang. Karakteristik Kondisi Ekonomi. Ciri-ciri kondisi ekonomi masyarakat menurut :

- a) Tingkat pendapatan rumah tangga
- b) Jenis pekerjaan atau mata pencaharian
- c) Kepemilikan lahan dan aset produktif
- d) Orientasi terhadap kegiatan ekonomi komersial
- e) Akses terhadap modal dan kredit
- f) Peluang kerja dan kegiatan ekonomi desa

Kondisi ekonomi desa berkaitan erat dengan kesejahteraan masyarakat, di mana kecukupan pangan dan kebutuhan ekonomi dapat tercapai apabila pendapatan rumah tangga mampu memenuhi kebutuhan dasar dan pengembangan usaha

2.2.3 Konsep Sosial Ekonomi

Aktivitas sosial ekonomi merupakan seluruh bentuk kegiatan manusia yang berkaitan dengan interaksi sosial, pemanfaatan ruang, serta kegiatan ekonomi seperti produksi, distribusi, dan konsumsi yang berlangsung dalam suatu wilayah. Aktivitas ini mencerminkan kehidupan sehari-hari masyarakat dan menjadi indikator penting dalam melihat dinamika perkembangan wilayah. (Basrowi & Juariyah, 2010)

Aktivitas sosial merupakan bagian dari sistem sosial yang terdiri atas pola perilaku dan interaksi antar individu maupun kelompok yang terikat oleh nilai dan norma tertentu. Aktivitas tersebut tidak bersifat statis, melainkan terus berubah sebagai respons terhadap perubahan lingkungan sosial, ekonomi, dan fisik wilayah. Dalam kajian wilayah di Indonesia, aktivitas sosial ekonomi dipahami sebagai elemen penggerak dinamika ruang, karena perubahan aktivitas akan diikuti oleh perubahan fungsi lahan, intensitas penggunaan ruang, dan struktur wilayah.

Perubahan aktivitas sosial ekonomi terjadi ketika terdapat perubahan kondisi ruang dan aksesibilitas, misalnya akibat pembangunan infrastruktur transportasi. Perubahan ini bersifat bertahap dan berkelanjutan, bukan terjadi secara langsung atau instan.

Menurut Ernan Rustiadi (2011), pembangunan infrastruktur

meningkatkan keterhubungan wilayah yang kemudian memicu perubahan intensitas aktivitas manusia. Wilayah yang sebelumnya kurang berkembang dapat mengalami peningkatan aktivitas permukiman, perdagangan, dan jasa setelah aksesibilitasnya meningkat. Dalam konteks pembangunan jalan tol, peningkatan aksesibilitas menyebabkan:

- a) Meningkatnya mobilitas penduduk,
- b) Perubahan pola pergerakan harian,
- c) Berkembangnya aktivitas ekonomi dan sosial di sekitar simpul akses, seperti gerbang tol.

Pembangunan infrastruktur berskala besar berperan sebagai pemicu perubahan aktivitas sosial ekonomi, khususnya pada wilayah yang sebelumnya berada di kawasan pinggiran (Fadilah & Pinasti, 2017). Sejalan dengan itu, Soerjono Soekanto (2012) menjelaskan bahwa perubahan sosial merupakan bentuk adaptasi masyarakat terhadap kondisi baru yang dihadapi. Perubahan pada struktur ruang dan tingkat aksesibilitas mendorong masyarakat untuk menyesuaikan pola aktivitasnya, sehingga secara bertahap membentuk dinamika sosial ekonomi yang baru.

Pembangunan jalan tol juga membawa berbagai dampak yang memunculkan permasalahan di tingkat lokal. Salah satu dampak yang paling nyata adalah berkurangnya luas lahan pertanian, khususnya sawah, yang sebelumnya menjadi sumber penghidupan utama masyarakat. Selain sektor pertanian, kawasan permukiman yang memiliki potensi ekonomi sebagai lokasi usaha turut menghadapi persoalan yang tidak kalah kompleks akibat perubahan pemanfaatan ruang (Rosalina Noor dkk., 2013)

Dengan demikian, penelitian ini tidak difokuskan untuk mengukur dampak ekonomi secara langsung, melainkan untuk menggambarkan pola perubahan serta dinamika aktivitas sosial ekonomi wilayah dari aspek spasial dan temporal. Variasi nilai intensitas cahaya malam diklasifikasikan ke dalam beberapa tingkat guna merepresentasikan perbedaan tingkat aktivitas sosial ekonomi dan intensitas pemanfaatan ruang di suatu wilayah.

Dalam penelitian ini, aktivitas sosial ekonomi tidak diposisikan sebagai variabel utama, melainkan digunakan sebagai alat validasi pendukung terhadap hasil analisis berbasis cahaya malam (VIIRS). Artinya, indikator aktivitas ekonomi dimanfaatkan untuk menilai kewajaran dan konsistensi pola yang terbentuk, bukan untuk mengukur besaran dampak ekonomi secara langsung. Secara konseptual, aktivitas ekonomi seperti perdagangan, jasa, industri, dan permukiman membutuhkan energi dan penerangan, berlangsung hingga malam hari, serta menghasilkan cahaya buatan yang dapat terekam oleh sensor satelit.

Oleh karena itu, peningkatan aktivitas ekonomi tercermin dari peningkatan akumulasi dan intensitas cahaya malam. Sebaliknya, wilayah dengan aktivitas ekonomi rendah cenderung memiliki intensitas cahaya malam yang rendah. intensitas aktivitas ekonomi merupakan indikator

penting dinamika wilayah dan perubahan struktur ruang . Jika indikator spasial (seperti NTL) menunjukkan pola yang sejalan dengan karakter aktivitas ekonomi wilayah, maka hasil analisis dapat dianggap valid secara konseptual.

a. Validasi Konseptual (Teoretis)

Hasil peningkatan nilai SUM dan MEAN VIIRS di sekitar gerbang tol divalidasi secara teori bahwa: gerbang tol meningkatkan aksesibilitas, aksesibilitas mendorong tumbuhnya aktivitas ekonomi, aktivitas ekonomi meningkatkan intensitas cahaya malam.

b. Validasi Spasial (Visual & Pola)

Pola klaster LISA (HH) yang muncul di sekitar gerbang tol dibandingkan dengan: kawasan permukiman berkembang, pusat perdagangan dan jasa, koridor aktivitas ekonomi. Jika klaster intensitas cahaya tinggi berimpit secara spasial dengan kawasan aktivitas ekonomi, maka hasil analisis dinilai konsisten dan logis. Menurut Bambang Trisakti, kesesuaian pola cahaya malam dengan pusat aktivitas ekonomi merupakan bentuk validasi spasial yang umum digunakan dalam studi berbasis NTL.

c. Validasi Temporal (Perubahan Waktu)

Perubahan nilai cahaya malam dari 2013-2018-2023 dibandingkan dengan: fase operasional dan perkembangan kawasan sekitar gerbang tol, kecenderungan pertumbuhan aktivitas ekonomi wilayah. Jika tren NTL meningkat seiring waktu dan konsisten dengan perkembangan kawasan, maka model dinamis yang digunakan dapat dianggap merepresentasikan dinamika aktivitas ekonomi.

Menurut Badan Pusat Statistik, data ekonomi konvensional bersifat administratif dan periodik, sehingga sering kurang mampu menangkap dinamika spasial lokal. Oleh karena itu, penggunaan indikator alternatif seperti citra cahaya malam dianggap relevan untuk analisis perubahan aktivitas wilayah.

2.3 Model Dinamis

Model dinamis adalah pendekatan analisis yang digunakan untuk memahami dan merepresentasikan perubahan suatu sistem dari waktu ke waktu, dengan menekankan pada proses, hubungan antar komponen, serta kecenderungan perkembangan yang terjadi secara berkelanjutan. Model ini memandang sistem sebagai entitas yang tidak statis, melainkan terus berkembang akibat interaksi faktor internal dan eksternal.

Konsep ini berakar dari teori system dynamics yang dikemukakan oleh Jay W. Forrester, yang menyatakan bahwa perilaku sistem pada suatu waktu merupakan hasil akumulasi proses dan kondisi pada waktu-waktu sebelumnya (Forrester, 1961). Dengan demikian, model dinamis selalu melibatkan dimensi waktu (*temporal dimension*) sebagai elemen utama.

Dalam konteks Indonesia, konsep ini sejalan dengan pandangan Ernan Rustiadi yang menyatakan bahwa wilayah merupakan sistem yang bersifat

dinamis karena aktivitas sosial ekonomi dan struktur ruang terus berubah seiring waktu, sehingga analisis wilayah tidak dapat dilakukan secara statis (Rustiadi et al., 2011).

Menurut John Friedmann, pembangunan wilayah bersifat evolutif dan berlangsung secara bertahap, sehingga model yang digunakan untuk menganalisisnya harus mampu menangkap dinamika perubahan tersebut dari waktu ke waktu, bukan hanya potret sesaat (Friedmann, 1966). Model dinamis memiliki beberapa karakteristik utama, yaitu:

- d) Berbasis waktu (temporal), menggunakan data multiwaktu atau deret waktu (*time series*).
- e) Menekankan proses perubahan, bukan hanya membandingkan kondisi awal dan akhir, tetapi memahami kecenderungan perubahan.
- f) Memperhatikan keterkaitan antar periode, kondisi saat ini dipengaruhi oleh kondisi sebelumnya.
- g) Dikembangkan secara predik, memanfaatkan pola historis untuk memperkirakan kondisi masa depan.

Dalam kajian spasial, model dinamis mempertimbangkan bahwa perubahan yang terjadi di suatu lokasi tidak berdiri sendiri, melainkan dapat memengaruhi dan dipengaruhi oleh wilayah di sekitarnya. Hal ini selaras dengan konsep autokorelasi spasial yang dikemukakan oleh Luc Anselin, yang menyatakan bahwa fenomena keruangan memiliki keterkaitan antar lokasi serta bersifat dinamis dalam ruang dan waktu (Anselin, 1995) demikian, analisis spasial tidak hanya berfokus pada perubahan nilai suatu variabel, tetapi juga pada pola keterkaitan dan interaksi spasial yang berkembang secara temporal.

Sejalan dengan hal tersebut, Iwan Kustiwan menjelaskan bahwa pendekatan dinamis dalam perencanaan wilayah digunakan untuk menangkap transformasi spasial yang berlangsung secara gradual akibat perubahan aksesibilitas dan intensitas aktivitas manusia, terutama pada wilayah yang terdampak pembangunan infrastruktur (Kustiwan & Pontoh, 2010). Oleh karena itu, model dinamis digunakan dalam penelitian ini karena analisis difokuskan pada perubahan aktivitas sosial ekonomi yang terjadi secara temporal dan spasial, serta pemanfaatan pola historis untuk memproyeksikan kondisi masa depan. Pendekatan ini memungkinkan penelitian tidak bersifat statis, melainkan mampu menggambarkan dinamika perkembangan wilayah secara berkelanjutan.

Dalam penelitian ini digunakan data *time series* tahun 2013, 2018, dan 2023. Tahun 2013 merepresentasikan kondisi pra-konstruksi pembangunan Jalan Tol Pandaan-Malang, tahun 2018 menggambarkan kondisi saat proses konstruksi berlangsung, dan tahun 2023 merepresentasikan kondisi pasca-operasional jalan tol. Penggunaan rangkaian waktu tersebut bertujuan untuk mengidentifikasi dan memahami perubahan aktivitas sosial ekonomi wilayah

yang terjadi sebelum, selama, dan setelah pembangunan infrastruktur transportasi.

2.4 Citra cahaya malam

Penggunaan data cahaya malam dari satelit DMSP-OLS secara global (Elvidge dkk., 2011) . Studi ini menunjukkan bahwa intensitas cahaya malam merepresentasikan keberadaan dan aktivitas manusia, sehingga meletakkan dasar konseptual bahwa *Night -Time light* (NTL) dapat digunakan sebagai indikator spasial kondisi sosial dan ekonomi wilayah. Cahaya malam dipahami sebagai cerminan aktivitas manusia terbangun yang bersumber dari permukiman, jaringan jalan, kawasan industri, serta pusat-pusat kegiatan ekonomi. Wilayah yang memiliki aktivitas manusia rendah umumnya dicirikan oleh tingkat kecerahan yang rendah, sedangkan wilayah dengan aktivitas tinggi menunjukkan intensitas cahaya yang lebih terang.

Lebih lanjut, Elvidge et al. menegaskan bahwa distribusi spasial cahaya malam tidak bersifat acak, melainkan membentuk pola spasial yang mengelompok, di mana intensitas cahaya mengikuti struktur wilayah terbangun (Elvidge dkk., 2011) . Dalam konteks ini, cahaya malam dipahami sebagai proksi yang merepresentasikan aktivitas sosial ekonomi manusia, bukan sebagai data ekonomi yang diukur secara langsung. Citra cahaya malam (*Night -Time light*/NTL) merekam intensitas cahaya buatan pada malam hari yang dihasilkan dari berbagai aktivitas manusia, seperti permukiman, perdagangan, industri, dan layanan publik, sehingga dapat digunakan sebagai indikator aktivitas sosial ekonomi suatu wilayah.

Dalam kajian penginderaan jauh di Indonesia, Intensitas cahaya malam memiliki keterkaitan yang kuat dengan tingkat aktivitas manusia dan perkembangan wilayah, terutama pada daerah yang mengalami pertumbuhan infrastruktur dan proses urbanisasi (Elvidge dkk., 2011) . Penggunaan data NTL menjadi penting karena mampu menyediakan informasi yang konsisten, bersifat multiwaktu, dan mencakup wilayah yang luas, khususnya pada kondisi ketika data statistik sosial ekonomi tidak tersedia secara rinci.

Secara umum, *Night -Time light* (NTL) telah banyak digunakan dalam kajian geospasial untuk menggambarkan aktivitas manusia di permukaan bumi. Intensitas cahaya malam mencerminkan berbagai aspek sosial ekonomi, seperti pertumbuhan permukiman, perkembangan ekonomi, konsumsi energi, dan kepadatan penduduk. Oleh karena itu, pemaparan teori mengenai NTL diperlukan untuk memberikan dasar ilmiah bahwa variabel ini dapat digunakan sebagai indikator perubahan wilayah dari waktu ke waktu. Cahaya malam tidak dipahami sebagai penyebab perubahan, melainkan sebagai indikator atau representasi dari aktivitas manusia; semakin tinggi intensitas cahaya malam, semakin tinggi pula intensitas aktivitas sosial ekonomi yang berlangsung di suatu wilayah. Dalam konteks penelitian ini:

- (1) Peningkatan cahaya malam menunjukkan peningkatan aktivitas,
- (2) Penurunan atau stagnasi cahaya malam menunjukkan aktivitas yang relatif rendah atau tidak berkembang.

Afrianto dan Dimas (2023) menunjukkan bahwa data *Night-Time Light* (NTL) tidak hanya merepresentasikan aktivitas ekonomi, tetapi juga mampu menggambarkan kepadatan aktivitas manusia serta struktur ruang wilayah perkotaan (Afrianto Firman & Tri Dimas, 2023). Dalam penelitiannya, dilanjutkan dengan sensor yang lebih modern VIIRS-DNB (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite - *Day/Night Band*) sejak tahun 2012, yang memiliki resolusi spasial dan radiometrik lebih baik dibandingkan sensor pendahulunya. Melalui analisis spasial dan temporal, perubahan intensitas cahaya malam berbasis VIIRS dapat digunakan untuk mengidentifikasi dinamika perkembangan wilayah dari waktu ke waktu. Temuan ini memperkuat penggunaan NTL sebagai indikator intensitas aktivitas sosial ekonomi, khususnya pada wilayah yang memiliki keterbatasan data ekonomi konvensional.

Pendekatan ini aman secara metodologis karena cahaya malam diposisikan sebagai proxy, bukan sebagai variabel kausal. *Night-Time Light* (NTL) merupakan citra penginderaan jauh yang merekam distribusi intensitas cahaya buatan di permukaan bumi pada malam hari, yang bersumber dari aktivitas manusia seperti permukiman, perdagangan, industri, jaringan transportasi, dan infrastruktur perkotaan. Data NTL yang diperoleh dari sensor VIIRS mampu mendeteksi cahaya tampak dan inframerah-dekat dengan tingkat sensitivitas yang tinggi, sehingga lebih akurat dalam merepresentasikan variasi intensitas cahaya antarwilayah.

Penggunaan NTL berbasis VIIRS dinilai tepat sebagai proksi utama dalam analisis intensitas sosial ekonomi karena memiliki konsistensi temporal, cakupan spasial yang luas, serta kemampuan merekam perubahan aktivitas manusia secara lebih detail. Oleh karena itu, intensitas cahaya malam dari data VIIRS dapat dijadikan sebagai data utama dalam analisis intensitas cahaya dan dinamika sosial ekonomi wilayah, terutama dalam kajian spasial multitemporal yang berfokus pada perubahan aktivitas akibat pembangunan infrastruktur (Elvidge dkk., 2011)

2.4.1 Konsep Cahaya Malam

Konsep Cahaya Malam (*Night-Time Light/NTL*) berangkat dari pemanfaatan citra satelit yang merekam pancaran cahaya buatan dari permukaan bumi pada malam hari. Pada awalnya, data ini digunakan untuk keperluan meteorologi dan pemetaan awan, namun seiring perkembangannya, para peneliti menemukan hubungan kuat antara cahaya malam dan aktivitas manusia. Henderson et al. (2012) menunjukkan bahwa NTL memiliki korelasi positif dengan pendapatan, pertumbuhan ekonomi, kepadatan penduduk, serta intensitas kegiatan pada malam hari. Karena karakteristiknya yang stabil, berkelanjutan, dan dapat diamati secara

temporal, NTL menjadi salah satu indikator yang paling banyak digunakan untuk menganalisis dinamika sosial-ekonomi pada level wilayah (Henderson dkk., 2012). Sensor ini mampu mendeteksi cahaya buatan seperti lampu jalan, perumahan, kawasan industri, kendaraan, hingga pusat perdagangan. Setiap citra NTL memiliki nilai numerik yang disebut Digital Number (DN) yang merepresentasikan tingkat kecerahan suatu area. Nilai DN yang tinggi menunjukkan intensitas cahaya yang kuat, yang biasanya identik dengan aktivitas manusia yang padat.

Data lampu malam telah banyak digunakan dalam berbagai kajian spasial dan pembangunan wilayah. Sebagai berikut :

- a) Kajian Urbanisasi dan Perluasan Kota, yaitu untuk mendeteksi pertumbuhan kawasan terbangun (*built-up area growth*) secara temporal.
- b) Analisis Konsentrasi Kegiatan Ekonomi, khususnya di sepanjang koridor jalan utama, gerbang tol, atau kawasan industri. Deteksi Perubahan Aktivitas Sosial, seperti kepadatan permukiman baru dan peningkatan aktivitas malam hari masyarakat.
- c) Pemetaan Pusat Pertumbuhan Baru (*Emerging Growth Nodes*) yang terbentuk akibat aksesibilitas dan investasi infrastruktur.
- d) Pengukuran Efisiensi Penerangan dan Aktivitas Malam di Wilayah Padat untuk mendukung kebijakan pengelolaan energi dan tata cahaya kota.

Dalam penerapannya, penggunaan data lampu malam (*Night -Time light Data*) memiliki sejumlah keunggulan yang menjadikannya salah satu sumber data penginderaan jauh paling efektif untuk analisis sosial-ekonomi dan spasial. NTL mampu menggambarkan tingkat aktivitas manusia secara luas, baik dalam konteks waktu maupun ruang, sehingga dapat digunakan untuk memantau perubahan pembangunan dan pertumbuhan wilayah secara berkelanjutan. Keunggulan utamanya terletak pada sifat data yang global, konsisten, serta tersedia secara gratis dan berkala, menjadikannya alat yang efisien dalam mendukung analisis perencanaan wilayah. Adapun tabel penjelasan kelebihan dan kekurangan antara lain:

Tabel 2. 1 Kelebihan dan Keterbatasan Penggunaan Data Lampu Malam

Aspek	Kelebihan (Advantages)	Keterbatasan (Limitations)
Representasi aktivitas	Mampu menggambarkan intensitas aktivitas sosial dan ekonomi secara spasial serta temporal	Tidak dapat membedakan jenis aktivitas (ekonomi, sosial, industri) secara langsung
Ketersediaan data	Tersedia secara global, gratis, dan diperbarui secara reguler	Rentan terhadap <i>noise</i> awan, <i>flare</i> , dan saturasi di kota besar

Aspek	Kelebihan (Advantages)	Keterbatasan (Limitations)
Konsistensi temporal	Cocok untuk analisis tren jangka panjang	Membutuhkan <i>radiance calibration</i> antar tahun agar hasil akurat
Keterpaduan data	Dapat dikombinasikan dengan GIS, citra optik, dan data statistik lainnya	Resolusi 500 m-1 km mungkin terlalu kasar untuk studi skala mikro

Sumber : *Olah data, 2025*

2.4.2 VIIRS - DNB

Cahaya malam yang diamati satelit global telah muncul sebagai salah satu produk data geospasial yang banyak digunakan (Elvidge dkk., 2011). Sumber utama NTL yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari sensor VIIRS-DNB (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite - *Day/Night Band*) yang menjadi bagian dari satelit Suomi-NPP dan NOAA-20. VIIRS-DNB dipilih karena memiliki beberapa keunggulan dibandingkan sensor sebelumnya (seperti DMSP-OLS) (Putraga Hariyadi dkk., 2023), yaitu :

- Resolusi spasial lebih baik

VIIRS-DNB memiliki resolusi sekitar 500 meter, jauh lebih detail dibandingkan sensor generasi lama, sehingga perubahan cahaya pada skala desa hingga kecamatan dapat diamati dengan lebih akurat.

- Kemampuan mendeteksi cahaya redup dan terang

Sensor ini mampu menangkap cahaya redup seperti lampu jalan kecil maupun cahaya terang seperti kawasan industri atau pusat kota, sehingga sangat cocok digunakan untuk menganalisis variasi aktivitas malam.

- Konsistensi pengamatan dari tahun ke tahun

VIIRS-DNB memiliki kualitas radiometrik stabil sehingga memungkinkan analisis multitemporal 2013-2023 secara konsisten tanpa bias sensor.

- Minim distorsi akibat gangguan atmosfer

Teknologi koreksi atmosfer pada VIIRS membuat hasil pengukuran cahaya lebih akurat dan dapat direplikasi.

Dengan keunggulan tersebut, VIIRS-DNB merupakan sumber data yang tepat untuk memetakan perubahan aktivitas di sekitar Gerbang Tol Pandaan-Malang.

Citra cahaya lampu malam VIIRS *Day/Night Band* (DNB) merekam intensitas cahaya buatan dalam satuan radiance ($\text{nW}/\text{cm}^2/\text{sr}$). Klasifikasi ini didasarkan pada prinsip bahwa semakin tinggi nilai radiance VIIRS, semakin tinggi intensitas aktivitas manusia yang berlangsung pada malam hari. Cahaya buatan berasal dari aktivitas permukiman, ekonomi, industri, dan infrastruktur transportasi, sehingga intensitas cahaya dapat digunakan sebagai proksi aktivitas sosial ekonomi.

Tabel 2. 2 Klasifikasi Intensitas Cahaya VIIRS

Kelas Intensitas	Rentang Nilai VIIRS (nW/cm²/sr)	Karakteristik Wilayah	Interpretasi Aktivitas
Sangat Rendah	< 1	Wilayah alami, pertanian, perairan	Hampir tidak ada aktivitas sosial ekonomi
Rendah	1 - 5	Permukiman jarang, wilayah rural	Aktivitas sosial ekonomi rendah
Sedang	5 - 20	Permukiman berkembang, pusat kecamatan	Aktivitas sosial ekonomi sedang
Tinggi	20 - 50	Kawasan perkotaan, perdagangan & jasa	Aktivitas sosial ekonomi tinggi
Sangat Tinggi	> 50	Pusat kota, industri, simpul transportasi	Aktivitas sosial ekonomi sangat tinggi

Sumber : Studi Literatur, 2025

Satuan nW/cm²/sr (nanowatt per sentimeter persegi per steradian) adalah satuan radiance yang digunakan pada data VIIRS *Day/Night Band* (DNB) untuk mengukur intensitas cahaya yang diterima sensor satelit dari permukaan bumi pada malam hari (Pérez-Sindín dkk., 2021). Secara sederhana:

- nW (nanowatt) → besarnya energi cahaya
- cm² (sentimeter persegi) → luas area penerimaan energi
- sr (steradian) → sudut pandang sensor satelit

Artinya, satuan ini menunjukkan seberapa kuat cahaya buatan yang dipancarkan dari permukaan bumi dan ditangkap sensor satelit dalam arah tertentu.

Fungsi utama satuan radiance adalah untuk:

- Mengukur intensitas cahaya secara kuantitatif, bukan sekadar terang-gelap visual
- Membandingkan tingkat cahaya antar wilayah
- Menganalisis perubahan cahaya antar waktu (multi-temporal)
- Menjadi dasar analisis aktivitas manusia dan sosial ekonomi
- Menurut NOAA melalui Earth Observation Group, nilai radiance VIIRS merepresentasikan intensitas cahaya buatan stabil dan dapat dibandingkan lintas waktu, cocok untuk analisis perubahan aktivitas.

Cara kerjanya bisa dijelaskan sederhana seperti ini:

- Permukaan bumi memancarkan cahaya buatan, dari lampu jalan, permukiman, industri, kendaraan, fasilitas publik
- Sensor VIIRS *Day/Night Band*, menangkap cahaya pada malam hari

- c) Energi cahaya diukur sebagai radiance → dinyatakan dalam satuan $\text{nW/cm}^2/\text{sr}$
- d) Nilai radiance disimpan dalam bentuk raster → setiap piksel memiliki nilai intensitas cahaya

Semakin tinggi nilai radiance, semakin tinggi intensitas aktivitas manusia di wilayah tersebut. VIIRS DNB dirancang untuk mendeteksi cahaya buatan berintensitas rendah hingga tinggi tanpa saturasi, sehingga mampu merepresentasikan variasi aktivitas manusia secara detail (Pérez-Sindín dkk., 2021). Intensitas cahaya malam yang diukur dalam satuan radiance dapat digunakan sebagai proxy aktivitas ekonomi, terutama di wilayah dengan keterbatasan data statistik konvensional (Henderson dkk., 2012).

Dalam konteks Indonesia, Trisakti et al. (2018) juga menegaskan bahwa nilai radiance VIIRS efektif digunakan untuk merepresentasikan dinamika aktivitas sosial ekonomi wilayah secara spasial dan temporal

2.4.3 DN dan Δ DN

Dalam aspek sosial, nilai cahaya malam menggambarkan tingkat mobilitas penduduk pada malam hari, kepadatan aktivitas publik, serta penggunaan ruang kota seperti jalan, taman, dan pusat hiburan. Semakin tinggi nilai DN pada area permukiman atau koridor jalan utama, semakin tinggi pula frekuensi interaksi dan mobilitas masyarakat di kawasan tersebut. Dalam aspek ekonomi, intensitas cahaya malam menunjukkan aktivitas produksi dan konsumsi di sektor perdagangan, jasa, serta industri. Kawasan dengan sektor ekonomi dominan seperti pasar, kawasan bisnis, atau pabrik biasanya memiliki tingkat kecerahan malam yang lebih tinggi. Selain itu, peningkatan nilai DN dari tahun ke tahun menunjukkan adanya ekspansi aktivitas ekonomi, pertumbuhan sektor jasa, serta peningkatan investasi. Fenomena spasial menunjukkan bahwa daerah dengan intensitas cahaya tinggi umumnya berperan sebagai pusat kegiatan ekonomi dan sosial, sedangkan wilayah dengan nilai NTL rendah cenderung masih bersifat rural. Dari sisi temporal, kenaikan DN secara konsisten mengindikasikan pertumbuhan aktivitas manusia, sedangkan penurunan DN dapat mengindikasikan penurunan ekonomi atau migrasi penduduk.

a. Digital Number (DN)

Digital Number (DN) adalah nilai digital dalam bentuk bilangan integer yang merepresentasikan tingkat kecerahan (radiance) pada setiap piksel citra penginderaan jauh. Dalam konteks *Night-Time Light* (NTL) seperti data VIIRS *Day/Night Band* (DNB) atau DMSP-OLS, DN menggambarkan intensitas cahaya yang dipantulkan atau dipancarkan dari permukaan bumi pada malam hari. Dengan kata lain, setiap piksel pada citra malam berisi angka (DN) yang merepresentasikan seberapa terang atau gelap lokasi tersebut. DN tinggi → piksel lebih terang. Menunjukkan adanya aktivitas manusia

yang intens, misalnya: lampu jalan kawasan komersial industri pemukiman padat pusat transportasi pelabuhan / bandara DN rendah → piksel lebih gelap. Menggambarkan area dengan sedikit atau tanpa aktivitas manusia, seperti: hutan persawahan desa terpencil kawasan pegunungan area tanpa listrik

Nilai DN pada citra malam banyak digunakan untuk:

- 1) Mengukur aktivitas ekonomi Cahaya malam merekam *proxy* cahaya malam dalam bentuk data *VIIRS* (PDB/PDRB, tingkat industrialisasi, dan pendapatan (Henderson dkk., 2012).
- 2) Deteksi urbanisasi dan ekspansi kota NTL sering digunakan untuk melihat pertumbuhan permukiman dan konversi lahan. (Elvidge et al., 2017 -Remote Sensing)
- 3) Estimasi kepadatan penduduk Kepadatan dapat direkonstruksi dari distribusi intensitas cahaya malam. (Sumber: Ghosh et al., 2010 -IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing)
- 4) Monitoring infrastruktur & energi NTL digunakan untuk memetakan jaringan listrik dan blackout. (Sumber: Li et al., 2020 -Remote Sensing of Environment)
- 5) Karakteristik Teknis DN DN adalah nilai digital mentah (raw) dari sensor Untuk VIIRS DNB biasanya rentang 0-3000 (tergantung produk)

DN berhubungan dengan radiance tetapi bukan nilai radiance langsung DN dapat diubah ke radiance ($\text{W}/\text{cm}^2/\text{sr}$) melalui proses kalibrasi sensor (Sumber utama: Elvidge et al., 2013 -“*VIIRS Night-Time Lights*” NASA/NOAA VIIRS Calibration Documentation)

b. Perubahan DN antar tahun (ΔDN)

Perubahan Digital Number (ΔDN) merupakan indikator yang digunakan untuk mengukur dinamika perubahan intensitas cahaya malam dari citra *Night-Time Light* (NTL) pada dua periode waktu yang berbeda. ΔDN diperoleh melalui selisih antara nilai DN pada tahun t_2 dengan nilai DN pada tahun t_1 , sehingga mampu menunjukkan apakah suatu wilayah mengalami peningkatan, penurunan, atau stagnasi aktivitas yang berkaitan dengan keberadaan dan intensitas cahaya malam. ΔDN menjadi parameter penting dalam kajian spasial karena nilai DN pada citra NTL menggambarkan tingkat kecerahan yang berkorelasi dengan aktivitas manusia seperti pemanfaatan energi, keberadaan lampu penerangan, kegiatan ekonomi, serta pertumbuhan kawasan terbangun (Idowu & Zhou, 2019). Dalam penelitian ini, ΔDN dihitung untuk tiga interval waktu, yaitu: 2013-2018, sebagai periode jangka menengah pertama yang menggambarkan awal perkembangan aktivitas dalam lima tahun.

2018-2023, sebagai periode jangka menengah kedua yang merepresentasikan dinamika perubahan pada lima tahun berikutnya. 2013-2023, sebagai periode jangka panjang selama sepuluh tahun untuk melihat perubahan total dan tren pembangunan secara keseluruhan. Secara matematis, perhitungan ΔDN dirumuskan sebagai berikut: $\Delta DN = DN_{t2} - DN_{t1}$ Nilai ΔDN yang dihasilkan kemudian dianalisis untuk memahami arah perubahan aktivitas malam serta dampaknya terhadap struktur ruang dan perkembangan wilayah

ΔDN berperan penting dalam analisis spasial karena mampu memberikan gambaran objektif mengenai dinamika aktivitas manusia berdasarkan perubahan intensitas cahaya malam. Cahaya malam telah banyak digunakan sebagai proxy untuk aktivitas sosial-ekonomi, terutama pada wilayah yang tidak memiliki data statistik lengkap atau terkini (Henderson dkk., 2012). Oleh karena itu, analisis ΔDN dapat mengungkap berbagai aspek perubahan wilayah, antara lain: Pertumbuhan Ekonomi Peningkatan DN biasanya mengindikasikan meningkatnya kegiatan usaha, industri, jasa, dan aktivitas perdagangan yang beroperasi pada malam hari. Ekspansi Permukiman dan Kawasan Terbangun Urbanisasi dan pembentukan kawasan baru biasanya menghasilkan peningkatan penerangan sehingga memengaruhi nilai DN antar tahun. Peningkatan Mobilitas dan Penggunaan Energi Peningkatan penerangan jalan, transportasi malam, serta konsumsi listrik merupakan faktor yang meningkatkan DN. Transformasi Struktur Ruang Kota/Desa ΔDN dapat membantu mengidentifikasi perubahan fungsi ruang, misalnya dari lahan pertanian menjadi permukiman, atau dari area kosong menjadi zona komersial. Secara keseluruhan, ΔDN bukan hanya sekadar representasi intensitas cahaya, tetapi menjadi indikator perubahan aktivitas manusia dan dinamika pembangunan suatu wilayah dari waktu ke waktu.

a. ΔDN Positif (Peningkatan DN)

ΔDN yang bernilai positif menunjukkan bahwa intensitas cahaya malam meningkat di periode berikutnya. Kondisi ini mencerminkan bahwa wilayah mengalami pertumbuhan aktivitas, baik dalam konteks sosial maupun ekonomi. Beberapa fenomena yang umumnya berkaitan dengan ΔDN positif meliputi: munculnya atau berkembangnya pusat kegiatan ekonomi baru, seperti pertokoan, café, industri rumahan, maupun fasilitas jasa lainnya; penambahan jumlah penduduk dan perluasan kawasan permukiman; peningkatan konektivitas dan mobilitas akibat pembangunan jaringan jalan atau peningkatan aktivitas transportasi malam; bertambahnya infrastruktur penerangan publik seperti lampu jalan; berkembangnya kawasan terbangun atau munculnya urban sprawl.

b. Δ DN Negatif (Penurunan DN)

Δ DN bernilai negatif menunjukkan bahwa wilayah mengalami penurunan kecerahan cahaya malam, yang dapat mencerminkan menurunnya aktivitas manusia. Beberapa kondisi yang menyebabkan Δ DN negatif antara lain: penurunan aktivitas ekonomi, seperti tutupnya usaha atau berkurangnya jam operasional; terjadinya migrasi penduduk sehingga wilayah menjadi lebih sepi pada malam hari; berkurangnya penggunaan energi atau terjadinya pemadaman listrik; penurunan mobilitas malam akibat faktor keamanan atau kebijakan tertentu; perubahan penggunaan lahan dari kawasan terbangun menjadi lahan non-terbangun; dampak bencana atau gangguan sosial-ekonomi yang menurunkan aktivitas. Fenomena umum yang sering ditemukan misalnya industri yang berhenti beroperasi, pemukiman yang ditinggalkan, pengurangan lampu jalan, atau penurunan aktivitas setelah pembangunan pusat kegiatan bergeser ke wilayah lain. Δ DN Mendekati Nol (Stabil) Δ DN yang mendekati nilai nol menunjukkan bahwa intensitas cahaya malam pada wilayah tersebut cenderung stabil. Artinya, tidak terdapat perubahan signifikan terhadap aktivitas ekonomi, penggunaan energi, maupun perkembangan fisik kawasan. Aktivitas yang stabil ini biasanya terjadi pada: permukiman yang sudah mapan dan tidak mengalami ekspansi; wilayah dengan struktur ruang yang tidak banyak berubah; kawasan yang tidak memiliki pertumbuhan ekonomi signifikan maupun penurunan aktivitas; lingkungan yang berada dalam fase *stagnant growth*. Stabilitas Δ DN dapat menjadi tanda bahwa wilayah tersebut mempertahankan fungsi ruangnya secara konsisten selama rentang waktu tertentu.

Mendeteksi Perkembangan Wilayah Secara Objektif Δ DN memungkinkan analisis spasial yang lebih objektif karena berasal dari data citra satelit yang konsisten secara temporal dan spasial. Berbeda dengan data statistik konvensional yang sering memiliki jeda publikasi atau tidak tersedia pada level kecil (desa/kelurahan), Δ DN dapat mengungkap dinamika wilayah secara cepat dan bebas bias administratif.

Mengukur Dinamika Aktivitas Malam sebagai Indikator Sosial-Ekonomi Sejumlah penelitian, seperti Henderson et al. (2012), menunjukkan bahwa cahaya malam merupakan indikator yang kuat untuk mengukur perkembangan ekonomi, produktivitas, dan intensitas aktivitas sosial. Dengan demikian, Δ DN dapat digunakan untuk mendeteksi wilayah yang sedang tumbuh, mengalami stagnasi, atau mengalami penurunan aktivitas (Henderson dkk., 2012).

Mengidentifikasi Pola Pertumbuhan Spasial Δ DN juga berfungsi untuk menggambarkan pola perubahan ruang, seperti pertumbuhan kawasan pinggiran (*urban fringe*); munculnya pusat kegiatan baru (*sub-centers*); wilayah yang mulai mengalami penyusutan (*shrinking regions*). Hal ini relevan dalam konteks analisis pembangunan wilayah, perencanaan tata

ruang, dan pemantauan dinamika sosial - ekonomi berbasis data penginderaan jauh (Elvidge et al., 2017).

2.5 LISA

Indikator Asosiasi Spasial Lokal (LISA) digunakan untuk mendeteksi keberadaan autokorelasi spasial di tingkat lokal di setiap area pengamatan. Metode ini merupakan perpanjangan dari Indeks Moran global yang memungkinkan identifikasi pola hubungan spasial antar wilayah secara lebih rinci. Nilai Indeks Moran lokal yang tinggi menunjukkan bahwa suatu area memiliki nilai yang mirip dengan daerah sekitarnya, sehingga membentuk pola distribusi yang dikelompokkan secara spasial. (Rachmadsyah, 2024)

2.5.1 Moran Scatter Plot

Moran Scatter Plot menunjukkan hubungan antara nilai intensitas cahaya malam pada suatu wilayah dengan nilai rata-rata intensitas cahaya malam pada wilayah tetangganya. Plot ini digunakan untuk mengidentifikasi arah dan kekuatan autokorelasi spasial. Melalui pembagian ke dalam empat kuadran, wilayah dapat diklasifikasikan sebagai *High-high* (HH), *Low-low* (LL), *High-low* (HL), dan *Low-high* (LH). Kuadran HH menunjukkan wilayah dengan intensitas aktivitas tinggi yang dikelilingi oleh wilayah dengan aktivitas tinggi pula, sedangkan kuadran LL menunjukkan wilayah dengan intensitas aktivitas rendah yang dikelilingi oleh wilayah dengan karakteristik serupa. Sementara itu, kuadran HL dan LH menunjukkan wilayah dengan karakteristik yang berbeda dari lingkungan sekitarnya, yang dapat diinterpretasikan sebagai wilayah anomali atau zona transisi. Keberadaan titik-titik yang dominan pada kuadran tertentu menunjukkan bahwa aktivitas sosial ekonomi tidak tersebar secara acak, melainkan memiliki keterkaitan spasial.

2.5.2 Cluster Map

Cluster Map menampilkan pola kluster spasial aktivitas sosial ekonomi yang signifikan secara lokal. Peta ini memperlihatkan wilayah yang termasuk dalam kluster *High-high* (HH) sebagai kluster aktivitas tinggi dan wilayah *Low-low* (LL) sebagai kluster aktivitas rendah. Sementara itu, wilayah *High-low* (HL) dan *Low-high* (LH) menunjukkan adanya ketidaksesuaian antara karakteristik suatu wilayah dengan wilayah di sekitarnya. *Cluster Map* digunakan untuk mengidentifikasi konsentrasi aktivitas sosial ekonomi serta untuk membandingkan perubahan pola kluster antar tahun pengamatan. Perbandingan *Cluster Map* pada tahun 2013, 2018, dan 2023 memungkinkan identifikasi wilayah yang mengalami penguatan, pergeseran, atau pelemahan aktivitas sosial ekonomi secara spasial.

2.5.3 Significance Map

Significance Map menunjukkan wilayah-wilayah yang memiliki hubungan spasial signifikan secara statistik berdasarkan nilai pseudo p-value, umumnya pada tingkat signifikansi $p < 0,05$. Peta ini digunakan untuk memastikan bahwa kluster yang terbentuk pada *Cluster Map* bukan

merupakan hasil kebetulan semata. Hanya wilayah yang ditunjukkan signifikan pada *Significance Map* yang selanjutnya diinterpretasikan secara ilmiah. Dengan demikian, *Significance Map* berperan sebagai alat validasi statistik terhadap hasil pengelompokan spasial yang dihasilkan oleh analisis LISA.

Secara keseluruhan, ketiga keluaran LISA tersebut saling melengkapi dalam menjelaskan pola dan dinamika spasial aktivitas sosial ekonomi wilayah. *Moran Scatter Plot* memberikan gambaran hubungan dan arah autokorelasi spasial, *Cluster Map* menunjukkan lokasi dan bentuk pengelompokan aktivitas, sedangkan *Significance Map* memastikan keandalan statistik dari pola yang teridentifikasi. Kombinasi ketiganya memungkinkan pemahaman yang komprehensif mengenai perubahan pola aktivitas sosial ekonomi wilayah secara spasial dan temporal berdasarkan intensitas cahaya malam.

2.6 Regresi Linear dalam Analisis Data Kuantitatif

Regresi merupakan salah satu metode statistik yang digunakan untuk menganalisis hubungan antara variabel dependen dengan satu atau lebih variabel independen. Analisis regresi tidak hanya berfungsi untuk mengetahui ada atau tidaknya hubungan antarvariabel, tetapi juga untuk mengukur arah dan besarnya pengaruh variabel independen terhadap variabel dependen, serta untuk melakukan prediksi berdasarkan data yang tersedia. Oleh karena itu, regresi banyak digunakan dalam penelitian sosial, ekonomi, dan wilayah yang melibatkan hubungan sebab-akibat antarvariabel (Skiera dkk., 2018)

Salah satu bentuk regresi yang paling umum digunakan adalah regresi linear. Regresi linear mengasumsikan bahwa hubungan antara variabel dependen dan variabel independen bersifat linear, artinya perubahan pada variabel independen akan diikuti oleh perubahan yang proporsional pada variabel dependen. Pendekatan ini dinilai sesuai untuk penelitian empiris yang bertujuan menangkap kecenderungan umum dari suatu fenomena berdasarkan data observasi (Sudariana & Yoedani, 2019)

Berdasarkan jumlah variabel independen yang digunakan, regresi linear dibedakan menjadi regresi linear sederhana dan regresi linear berganda. Regresi linear sederhana digunakan ketika analisis hanya melibatkan satu variabel independen dan satu variabel dependen. Model ini bertujuan untuk melihat pengaruh satu faktor tunggal terhadap variabel respons. Secara matematis, regresi linear sederhana dirumuskan sebagai:

$$Y = \alpha + \beta X + \epsilon$$

Di mana Y merupakan variabel dependen, X adalah variabel independen, α merupakan konstanta, β adalah koefisien regresi, dan ϵ merupakan komponen galat atau error.

Namun demikian, dalam penelitian yang melibatkan fenomena kompleks - seperti aktivitas sosial ekonomi, perkembangan wilayah, atau

dinamika spasial - variabel dependen umumnya dipengaruhi oleh lebih dari satu faktor. Oleh karena itu, regresi linear berganda menjadi pendekatan yang lebih relevan dan representatif (Sudariana & Yoedani, 2019)

2.6.1 Regresi Linear Berganda

Regresi linear berganda adalah model regresi linear yang melibatkan satu variabel dependen dan dua atau lebih variabel independen. Metode ini digunakan ketika peneliti bermaksud menganalisis dan meramalkan perubahan variabel dependen berdasarkan variasi beberapa variabel independen secara simultan (Sudariana & Yoedani, 2019). Dengan regresi linear berganda, pengaruh masing-masing variabel independen dapat dianalisis baik secara bersama-sama maupun secara individual.

Model umum regresi linear berganda dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon$$

Dalam persamaan tersebut, Y merupakan variabel dependen, X_1 hingga X_k adalah variabel independen, α adalah konstanta, β_1 hingga β_k merupakan koefisien regresi yang menunjukkan arah dan besarnya pengaruh masing-masing variabel independen terhadap variabel dependen, dan ε adalah galat. Nilai koefisien regresi menjadi dasar utama dalam interpretasi hubungan antarvariabel, apakah bersifat positif atau negatif, serta seberapa kuat pengaruh yang diberikan (Gujarati & Porter, 2009)

Regresi linear berganda banyak digunakan dalam penelitian terapan karena mampu menangkap pengaruh multi-faktor yang secara nyata terjadi di lapangan. Dalam konteks analisis wilayah dan sosial ekonomi, pendekatan ini memahami dinamika suatu fenomena secara lebih utuh dibandingkan model regresi sederhana.

2.6.2 Asumsi Klasik dalam Regresi Linear Berganda

Sebelum hasil regresi linear berganda dapat diinterpretasikan, model harus memenuhi sejumlah asumsi statistik yang dikenal sebagai asumsi klasik. Pengujian asumsi klasik bertujuan untuk memastikan bahwa model regresi yang digunakan menghasilkan estimator yang bersifat BLUE (*Best Linear Unbiased Estimator*), sehingga hasil analisis dapat dipercaya dan tidak menyesatkan (Mardiatmoko, 2020).

Beberapa asumsi klasik yang umum diuji dalam regresi linear berganda meliputi normalitas residual, tidak adanya multikolinearitas antarvariabel independen, homoskedastisitas, serta tidak adanya autokorelasi. Uji normalitas dilakukan untuk memastikan bahwa residual terdistribusi normal. Uji multikolinearitas bertujuan untuk mengetahui ada tidaknya korelasi yang tinggi antarvariabel independen, yang dapat mengganggu kestabilan estimasi koefisien regresi. Sementara itu, uji heteroskedastisitas dilakukan untuk menguji kesamaan varians residual, dan uji autokorelasi digunakan untuk melihat apakah residual saling berkorelasi antarobservasi (Mardiatmoko, 2020).

2.6.3 Pengujian Hipotesis dalam Regresi Linear Berganda

Dalam regresi linear berganda, pengujian hipotesis dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu uji simultan dan uji parsial. Uji simultan bertujuan untuk mengetahui apakah seluruh variabel independen secara bersama-sama memiliki pengaruh yang signifikan terhadap variabel dependen. Hipotesis nol pada uji simultan menyatakan bahwa seluruh koefisien regresi bernilai nol, yang berarti tidak terdapat pengaruh secara simultan dari variabel independen terhadap variabel dependen (Sudariana & Yoedani, 2019).

Selain uji simultan, uji parsial digunakan untuk melihat pengaruh masing-masing variabel independen terhadap variabel dependen secara individual. Uji ini umumnya dilakukan dengan menggunakan uji t. Melalui uji parsial, peneliti dapat mengidentifikasi variabel mana yang memiliki pengaruh signifikan dan variabel mana yang tidak berpengaruh secara statistik (Gujarati & Porter, 2009)

2.6.4 Koefisien Determinasi

Selain pengujian signifikansi, kualitas model regresi linear berganda juga dinilai melalui koefisien determinasi (R^2). Koefisien determinasi menunjukkan proporsi variasi variabel dependen yang dapat dijelaskan oleh variabel independen dalam model regresi. Nilai R^2 berkisar antara 0 hingga 1. Semakin besar nilai R^2 , semakin besar kemampuan model dalam menjelaskan variasi data yang diamati (Skiera dkk., 2018).

Koefisien determinasi menjadi indikator penting dalam menilai seberapa baik model regresi yang dibangun mampu merepresentasikan fenomena yang dikaji, meskipun nilai R^2 yang tinggi tidak selalu menjamin bahwa model tersebut sepenuhnya bebas dari permasalahan statistik.

2.7 Prediksi Dinamika

2.7.1 *Machine learning* dalam Analisis Geospasial

Machine learning merupakan pendekatan komputasional yang memungkinkan komputer belajar dari data historis untuk mengenali pola dan menghasilkan prediksi tanpa perlu diberi aturan secara eksplisit. Dalam penelitian wilayah dan lingkungan, *machine learning* semakin banyak digunakan karena mampu mengolah data besar (big data), mendeteksi pola keruangan (*spatial pattern*), dan melakukan pemodelan *non-linear* yang sulit dijelaskan menggunakan metode statistik konvensional. Dalam konteks analisis spasial, *machine learning* bekerja dengan memanfaatkan variabel-variabel keruangan seperti jarak, zona kedekatan, perubahan intensitas cahaya malam (ADN), serta distribusi aktivitas dalam ruang dan waktu. Pendekatan ini sangat relevan untuk penelitian yang melibatkan dinamika wilayah, terutama di area yang mengalami perubahan cepat akibat pembangunan infrastruktur seperti jalan tol. Algoritma *machine learning* dapat mengolah variasi data antar zona, mempelajari hubungan kompleks antar indikator, dan memprediksi aktivitas masyarakat berkembang di masa

mendatang berdasarkan pola historis.

Salah satu keunggulan *machine learning* adalah kemampuannya menangkap hubungan non-linear dan interaksi variabel yang tidak selalu terlihat secara langsung. Hal ini penting karena perubahan aktivitas sosial-ekonomi di sekitar gerbang tol tidak terjadi secara linear-beberapa zona bisa mengalami peningkatan tajam, sementara zona lain bergerak lebih lambat. *Machine learning* dapat mengenali pola tersebut dan memberikan estimasi yang lebih akurat dibanding pendekatan statistik linear. Dalam penelitian ini, *machine learning* digunakan untuk membangun model prediksi dinamika sosial-ekonomi hingga tahun 2040 berdasarkan data NTL historis tahun 2013, 2018, dan 2023. Algoritma yang digunakan adalah *Random Forest*, yang merupakan salah satu metode *machine learning* berbasis ensemble dan dikenal handal dalam pemodelan keruangan. Dengan menggabungkan data spasial (zona jarak) dan data temporal (Δ DN), model *machine learning* mampu memberikan gambaran perkembangan intensitas cahaya malam yang merefleksikan aktivitas sosial-ekonomi di masa mendatang.

2.7.2 Prinsip *Random Forest* sebagai alat prediksi

Random Forest merupakan algoritma ensemble learning berbasis decision tree yang pertama kali diperkenalkan oleh Breiman (2001). *Random Forest* merupakan salah satu algoritma *machine learning* yang bekerja berdasarkan metode ensemble learning, yakni menggabungkan banyak model sederhana untuk menghasilkan prediksi yang lebih stabil dan akurat. Pada prinsipnya, *Random Forest* membangun sejumlah decision tree secara paralel, di mana setiap tree dilatih menggunakan sampel data yang berbeda (proses bootstrap sampling) dan subset acak dari variabel (proses feature randomness). Pendekatan ini membuat *Random Forest* mampu mengurangi risiko overfitting, yang umum terjadi pada penggunaan decision tree tunggal. Setiap pohon keputusan dalam *Random Forest* menghasilkan prediksi secara mandiri. Pada tahap akhir, seluruh prediksi tersebut digabungkan melalui mekanisme majority voting (untuk klasifikasi) atau averaging (untuk regresi).

Kombinasi dari banyak model sederhana inilah yang menjadikan *Random Forest* lebih tahan terhadap variasi data, lebih akurat, dan lebih mampu menangkap pola hubungan yang kompleks dibandingkan model prediktif tunggal. Dalam penelitian ini, *Random Forest* digunakan untuk memproses nilai historis Δ DN, SUM NTL, MEAN NTL, serta variabel spasial lainnya sebagai input features. Melalui proses tersebut, model mampu mengenali hubungan non-linear antarvariabel dan mengidentifikasi faktor mana yang paling berpengaruh terhadap perubahan intensitas cahaya malam. Dengan demikian, *Random Forest* menjadi alat yang efektif untuk memprediksi nilai NTL di masa mendatang, termasuk penyusunan estimasi intensitas aktivitas sosial-ekonomi hingga tahun 2040.

2.7.3 Keunggulan dan Keterbatasan *Random Forest*

Random Forest memiliki sejumlah keunggulan yang menjadikannya salah satu algoritma *machine learning* paling populer dalam analisis geospasial dan pemodelan prediktif. Namun, seperti metode lainnya, algoritma ini juga memiliki batasan tertentu yang perlu dipahami agar implementasinya tepat dan hasil prediksi dapat diinterpretasikan secara akurat

A. Keunggulan

Mampu menangani hubungan non-linear yang kompleks *Random Forest* dapat mempelajari pola hubungan antarvariabel yang tidak linear, sehingga cocok untuk memodelkan dinamika wilayah yang dipengaruhi banyak faktor seperti Δ DN, SUM-MEAN NTL, dan variabel jarak terhadap gerbang tol. Tidak mudah mengalami overfitting Dengan membangun banyak decision tree dan melakukan bootstrap sampling, model menjadi lebih stabil dan tidak mudah terjebak ke pola data yang bersifat kebetulan. Dapat digunakan pada dataset besar dan multivariat *Random Forest* dapat memproses banyak fitur secara bersamaan dan tetap menghasilkan prediksi yang akurat. Hal ini penting dalam penelitian yang melibatkan data spasial dan multitemporal. Memiliki kemampuan mengukur pentingnya variabel (feature importance) Model dapat menunjukkan variabel mana yang paling berpengaruh dalam prediksi, misalnya apakah Δ DN lebih menentukan dibanding jarak ke gerbang tol atau nilai SUM NTL. Robust terhadap noise dan outlier Karena setiap tree hanya memproses sampel acak, model menjadi lebih tahan terhadap nilai ekstrem dalam data citra NTL

B. Keterbatasan

Kurang transparan dalam interpretasi (less interpretable) Meskipun akurat, *Random Forest* termasuk model black box sehingga sulit menjelaskan proses pengambilan keputusan detail pada setiap tree. Membutuhkan sumber daya komputasi cukup besar Semakin banyak pohon yang dibangun, semakin besar kebutuhan memori dan waktu pemrosesan-terutama pada dataset raster seperti NTL. Cenderung bias terhadap fitur dengan banyak kategori Pada beberapa kasus, fitur tertentu dapat mendominasi keputusan pohon jika tidak distandarisasi dengan baik. Berisiko overfitting jika parameter tidak diatur meski relatif aman, penggunaan jumlah pohon terlalu besar atau kedalaman pohon tidak dibatasi tetap menyebabkan model belajar terlalu detil pada data latih.

Pemahaman terhadap keunggulan dan keterbatasan *Random Forest* membantu memastikan bahwa model digunakan secara optimal dalam memprediksi NTL tahun 2040. Keunggulannya mendukung analisis kompleks perubahan wilayah, sedangkan keterbatasannya perlu diperhatikan dalam tahap validasi model agar hasil proyeksi dapat diandalkan dalam penilaian dinamika sosial-ekonomi di sekitar Gerbang Tol Pandaan - Malang

2.8 Penelitian Terdahulu

Tabel 2. 3 Penelitian Terdahulu

No	Penulis	Judul Penelitian	Lokasi & Data	Metode Analisis	Hasil Utama	Relevansi dengan Penelitian
1	Duriscoe et al. (2018)	<i>A simplified model of all-sky artificial sky glow derived from VIIRS Day/Night Band data</i>	Amerika Serikat; Data VIIRS DNB & pengukuran lapangan	Model radiative transfer, GIS, korelasi	Model sederhana berbasis NTL mampu memprediksi intensitas sky glow dengan akurasi tinggi	Menjadi landasan metodologis penggunaan NTL (VIIRS) untuk analisis aktivitas manusia & dampaknya
2	Jiang et al. (2025)	<i>Quantifying the influence of industries on light pollution within protected areas</i>	Pearl River Delta, Tiongkok; Data NTL & data industri	Analisis spasial, regresi spasial	Industri padat modal & sumber daya memiliki korelasi tertinggi terhadap peningkatan NTL	Mendukung NTL sebagai proksi aktivitas ekonomi & industri
3	Maryaningsih et al. (2014)	Pengaruh Infrastruktur terhadap Pertumbuhan Ekonomi Indonesia	Indonesia; Data panel provinsi	Regresi panel statis & dinamis, β -convergence	Infrastruktur (jalan, listrik, pelabuhan) berpengaruh signifikan terhadap pertumbuhan ekonomi	Memperkuat hubungan infrastruktur-aktivitas ekonomi yang dapat direpresentasikan NTL
4	Idola Arga et al. (2022)	Pengaruh Pembangunan Infrastruktur terhadap Pertumbuhan Ekonomi di Indonesia	Indonesia; Literatur & data makro	Studi literatur deskriptif	Pembangunan infrastruktur meningkatkan PDB dan pemerataan ekonomi	Mendukung kerangka teoritis dampak infrastruktur gerbang tol
5	Anselin (1988)	<i>Spatial Econometrics: Methods and Models</i>	Teoretis	Spatial autocorrelation (Moran's I, LISA)	Aktivitas ekonomi memiliki ketergantungan spasial	Dasar teoritis LISA & autokorelasi spasial NTL
6	Afrianto et al.	<i>Analisis Spasial Perkembangan Wilayah Berbasis NTL</i>	Indonesia; Data NTL	Analisis spasial & GIS	NTL efektif menggambarkan perubahan aktivitas wilayah	Mendukung NTL sebagai indikator dinamika wilayah
7	Septian et al.	<i>Analisis Perkembangan Kawasan</i>	Indonesia; Data satelit &	Time series & overlay spasial	Terjadi perubahan intensitas aktivitas pasca pembangunan infrastruktur	Relevan dengan analisis sebelum-sesudah gerbang tol

N o	Penulis	Judul Penelitian	Lokasi & Data	Metode Analisis		Hasil Utama	Relevansi dengan Penelitian
		Menggunakan Data Satelit	batas administrasi				
8	Nabila et al.	Pemanfaatan Night -Time light untuk Analisis Aktivitas Perkotaan	Indonesia	Analisis NTL	temporal	NTL mampu menangkap dinamika sosial ekonomi perkotaan	Menguatkan pendekatan <i>time series</i> NTL
9	Maxwell et al.	Night -Time light as Proxy of Economic Activity	Global	Analisis statistik NTL		Korelasi kuat antara NTL dan aktivitas ekonomi	Dasar konseptual NTL sebagai proksi ekonomi
10	Pérez-Sindín et al., 2021	Are Night-Time Lights a Good Proxy of Economic Activity in Rural Areas in Middle and Low-Income Countries?	Kolombia	Regresi cross-section & panel multilevel		NTL berkorelasi signifikan dengan aktivitas ekonomi; akurasi lebih tinggi di wilayah urban dibanding rural.	Memberikan batasan konseptual penggunaan NTL sebagai proksi aktivitas ekonomi, khususnya terkait perbedaan akurasi antara wilayah urban dan rural, yang penting dalam interpretasi hasil di sekitar gerbang tol.
11	Putraga et al., 2023	Analisis Peningkatan Polusi Cahaya Kota Medan Berdasarkan SQM dan Citra VIIRS	Kota Medan	Analisis dan spasial	deskriptif	Intensitas cahaya malam meningkat seiring pertumbuhan aktivitas dan urbanisasi kota.	Menguatkan hubungan antara peningkatan intensitas cahaya malam dan pertumbuhan aktivitas perkotaan, relevan untuk membaca dinamika aktivitas sosial ekonomi pasca pembangunan infrastruktur.
12	Rebello et al., 2022	Machine learning-Based Dynamic Modeling for Process Engineering Applications	Sistem PSA (industri)	ANN (FNN, RNN, DNN), NARX & NOE		Struktur model ML memengaruhi kestabilan prediksi; NOE lebih baik untuk simulasi dinamis.	Menjadi referensi metodologis penggunaan <i>dynamic modeling</i> dan <i>machine learning</i> berbasis <i>time series</i> , yang dapat diadaptasi sebagai pengayaan pendekatan analisis dinamika NTL.
13	Saputro et al., 2018	Proporsionalitas Autokorelasi Spasial dengan Indeks Global dan Lokal (LISA)	Teoretis	Analisis matematis		Nilai Moran’s I merupakan agregasi dari nilai LISA lokal.	Memberikan dasar teoritis yang kuat mengenai keterkaitan Moran’s I dan LISA, memperkuat validitas analisis kluster spasial aktivitas ekonomi berbasis NTL.
14	Safira et al.,	Perubahan Aktivitas Ekonomi	Koridor Pantura,	Before-after, analisis spasial		Aktivitas ekonomi di jalur lama menurun setelah tol beroperasi.	Relevan sebagai studi pembanding dampak jalan tol terhadap pergeseran aktivitas ekonomi secara spasial (before-after),

No	Penulis	Judul Penelitian	Lokasi & Data	Metode Analisis	Hasil Utama	Relevansi dengan Penelitian
	2021	<i>dan Pemanfaatan Lahan di Koridor Jalan Pantura Setelah Tol Cipali</i>	Jawa Barat			khususnya perubahan fungsi wilayah di sekitar koridor transportasi.
15	Safitri et al., 2024	<i>Pengaruh Jalan Tol terhadap Pertumbuhan Ekonomi Kota/Kabupaten yang Dilalui Tol Surabaya-Malang</i>	Jawa Timur	Deskriptif kuantitatif, uji beda	Tol berpengaruh positif terhadap PDRB wilayah yang dilalui.	Mendukung temuan bahwa keberadaan jalan tol berdampak positif terhadap pertumbuhan ekonomi wilayah, yang dapat dielaborasi lebih lanjut melalui pendekatan spasial NTL.
16	Singla & Eldawy, 2020	<i>Raptor Zonal Statistics: Fully Distributed Zonal Statistics of Big Raster + Vector Data</i>	Global (metodologi)	Algoritma komputasi terdistribusi	<i>Zonal Statistics</i> dapat dilakukan lebih cepat dan efisien pada data besar.	Mendukung aspek teknis pengolahan data raster NTL skala besar menggunakan <i>Zonal Statistics</i> , relevan untuk efisiensi analisis wilayah administratif sekitar gerbang tol.
17	Suriani & Keusuma, 2015	<i>Pengaruh Pembangunan Infrastruktur Dasar terhadap Pertumbuhan Ekonomi di Indonesia</i>	26 Provinsi di Indonesia	Regresi panel FEM	Infrastruktur jalan dan listrik berpengaruh signifikan terhadap pertumbuhan ekonomi.	Memperkuat hubungan kausal antara infrastruktur transportasi dan pertumbuhan ekonomi regional, menjadi dasar teoritis dalam interpretasi perubahan intensitas NTL.
18	Afrianto, 2020	<i>Night-Time Light Data for Urban Morphology Analysis</i>	Kota di Indonesia	Analisis spasial dan statistik	NTL efektif menggambarkan struktur dan morfologi perkotaan.	Mendukung penggunaan NTL untuk membaca struktur dan morfologi perkotaan, relevan dalam mengidentifikasi perubahan pola spasial aktivitas di sekitar gerbang tol.
19	Yamazaki et al., 2020	<i>Machine learning Device, Robot System, and Machine learning Method for Learning Workpiece Picking Operation</i>	Industri manufaktur	Reinforcement Learning	Sistem ML mampu belajar dan mengoptimalkan operasi secara adaptif.	Memberikan referensi umum terkait pendekatan <i>machine learning</i> adaptif, yang dapat dijadikan landasan konseptual bila analisis NTL dikembangkan ke arah pemodelan dinamis berbasis ML.
20	Skiera, Reiner, &	<i>Regression Analysis: A Practical</i>	Berbagai studi empiris	Regresi sederhana berganda	Regresi linear efektif untuk menjelaskan hubungan antarvariabel dan melakukan prediksi, terutama ketika melibatkan lebih	Menjadi landasan teoretis penggunaan regresi linear berganda untuk menganalisis pengaruh beberapa variabel (luas wilayah dan waktu) terhadap intensitas NTL

No	Penulis	Judul Penelitian	Lokasi & Data	Metode Analisis	Hasil Utama	Relevansi dengan Penelitian
	Albers (2018)	<i>Introduction</i>	lintas sektor dengan data kuantitatif		dari satu variabel penjelas	
21	Sudarna & Yoedani (2019)	<i>Analisis Statistik Regresi Linear Berganda</i>	Studi kasus data kuantitatif sosial-ekonomi	Regresi linear berganda, uji t, uji F, dan R^2	Regresi linear berganda mampu menjelaskan pengaruh simultan dan parsial variabel independen terhadap variabel dependen	Mendukung penggunaan regresi linear berganda dalam penelitian ini untuk menganalisis pengaruh luas wilayah dan waktu terhadap intensitas cahaya malam
22	Kenari, dkk. (2021)	<i>Pentingnya Uji Asumsi Klasik pada Analisis Regresi Linear Berganda</i>	Data kuantitatif sekunder dari berbagai sektor	Uji asumsi klasik (normalitas, multikolinearitas, heteroskedastisitas, autokorelasi)	Pemenuhan asumsi klasik menentukan validitas dan keandalan hasil regresi	Menjadi dasar metodologis dalam memastikan model regresi yang digunakan pada penelitian NTL memenuhi kaidah statistik
23	(Modul) Regresi Linear Berganda (2020)	<i>Regresi Linear Berganda dan Penerapannya</i>	Contoh data kuantitatif multivariat	Regresi linear berganda dan interpretasi koefisien	Menjelaskan peran koefisien regresi dalam mengukur arah dan besaran pengaruh variabel independen	Memberikan acuan praktis dalam interpretasi koefisien regresi luas wilayah dan waktu terhadap intensitas cahaya malam

Sumber : Olah data 2025

2.9 Sintesa Variabel

Tabel 2. 4 Sintesa Variabel

No	Variabel	Indikator	Hubungan Konseptual / Keterkaitan
Sasaran 1 : Mengidentifikasi perubahan intensitas dan akumulasi <i>Night Time Light (NTL)</i> di kawasan sekitar Gerbang Tol Pandaan - Malang pada tahun 2013, 2018, dan 2023.			
1	Aktivitas Sosial-Ekonomi	a) Akumulasi NTL (SUM) b) Intensitas NTL (MEAN)	Aktivitas sosial ekonomi pada malam hari memerlukan pencahayaan buatan. Intensitas dan akumulasi cahaya malam yang terekam oleh sensor VIIRS dapat digunakan sebagai proksi untuk menggambarkan tingkat dan perkembangan aktivitas sosial ekonomi wilayah. (Afianto Firman & Tri Dimas, 2023; Elvidge dkk., 2011; Henderson dkk., 2012)
Sasaran 2 : Mengidentifikasi pola spasial, autokorelasi lokal, dan kluster aktivitas sosial ekonomi berdasarkan intensitas dan akumulasi <i>Night Time Light (NTL)</i> di kawasan sekitar Gerbang Tol Pandaan -Malang.			
2	Dinamika Spasial Aktivitas sosial ekonomi	a) Pola Kluster spasial (HH, LL, HL, LH) b) Autokorelasi lokal LISA	Aktivitas sosial ekonomi cenderung membentuk pola spasial yang saling berkaitan antar wilayah. Analisis LISA digunakan untuk mengidentifikasi pengelompokan dan keterkaitan aktivitas sosial ekonomi secara lokal berdasarkan nilai NTL (Rachmadsyah, 2024)
Sasaran 3 : Mengetahui prediksi dinamika sosial ekonomi di kawasan sekitar Gerbang Tol Pandaan - Malang hingga tahun 2040 berdasarkan pola perubahan <i>Night Time Light (NTL)</i> .			
3	Dinamika temporal aktivitas sosial - ekonomi	a) Perubahan Akumulasi dan Intensitas NTL antar waktu b) Proyeksi nilai NTL	Perubahan aktivitas sosial ekonomi berlangsung secara dinamis dari waktu ke waktu. Pola historis perubahan intensitas dan akumulasi NTL dapat digunakan untuk memodelkan kecenderungan dan memprediksi dinamika aktivitas sosial ekonomi wilayah di masa mendatang (Singla & Elvidge, 2020).

Sumber : Olah Data 2025

Berdasarkan tabel sintesa variabel, penelitian ini menggunakan aktivitas sosial ekonomi sebagai variabel utama yang direpresentasikan secara tidak langsung melalui *Night-Time Light (NTL)*. Penggunaan NTL

didasarkan pada asumsi bahwa aktivitas manusia pada malam hari memerlukan pencahayaan buatan, sehingga intensitas dan akumulasi cahaya malam dapat mencerminkan tingkat dan perkembangan aktivitas sosial ekonomi suatu wilayah.

Dalam penelitian ini, nilai MEAN NTL digunakan untuk merepresentasikan intensitas aktivitas sosial ekonomi, sedangkan nilai SUM NTL digunakan untuk menggambarkan akumulasi dan perluasan aktivitas wilayah. Kedua indikator tersebut dianalisis secara temporal untuk mengidentifikasi perubahan aktivitas sosial ekonomi pada periode tahun 2013, 2018, dan 2023 di kawasan sekitar Gerbang Tol Pandaan - Malang.

Selain itu, variabel aktivitas sosial ekonomi juga dianalisis dari sudut pandang spasial melalui identifikasi pola klaster dan autokorelasi lokal, yang bertujuan untuk memahami keterkaitan aktivitas antar wilayah di sekitar gerbang tol. Analisis ini memungkinkan pemahaman mengenai perbedaan konsentrasi aktivitas sosial ekonomi antar kecamatan serta kecenderungan pengelompokan aktivitas tinggi maupun rendah.

Selanjutnya, pola perubahan historis dan karakteristik spasial aktivitas sosial ekonomi digunakan sebagai dasar untuk menganalisis dinamika dan kecenderungan perkembangan aktivitas wilayah di masa mendatang. Dengan demikian, sintesa variabel dalam penelitian ini menunjukkan keterkaitan yang jelas antara variabel, indikator, dan sasaran penelitian, serta menjadi landasan konseptual bagi tahapan analisis spasial-temporal dan prediksi dinamika aktivitas sosial ekonomi di kawasan sekitar Gerbang Tol Pandaan-Malang.

2.10 Landasan Penelitian

Perubahan aktivitas sosial ekonomi merupakan proses yang bersifat dinamis dan dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk peningkatan mobilitas, kemudahan aksesibilitas, serta transformasi ruang sebagai dampak dari pembangunan infrastruktur transportasi. Pembangunan jalan tol sebagai infrastruktur strategis berpotensi mengubah pola interaksi dan aktivitas masyarakat di wilayah sekitarnya, baik dalam bentuk pertumbuhan permukiman, perkembangan kegiatan ekonomi, maupun perubahan intensitas aktivitas pada waktu malam hari.

Dalam konteks analisis spasial-temporal, perubahan aktivitas sosial ekonomi tidak selalu dapat diamati secara langsung melalui data statistik konvensional atau pengamatan lapangan. Oleh karena itu, Night-Time Light (NTL) banyak digunakan dalam berbagai penelitian sebagai proksi aktivitas sosial ekonomi, karena intensitas dan akumulasi cahaya malam mencerminkan keberadaan serta tingkat aktivitas manusia di suatu wilayah. Variasi nilai NTL antar waktu dan antar wilayah dapat digunakan untuk mengidentifikasi dinamika aktivitas sosial ekonomi secara kuantitatif dan spasial.

Kawasan sekitar Jalan Tol Pandaan-Malang menunjukkan karakteristik wilayah yang beragam, baik dari segi fungsi ruang maupun tingkat aktivitas sosial ekonomi. Perbedaan tingkat aksesibilitas dan kedekatan terhadap gerbang tol berpotensi memengaruhi variasi intensitas dan akumulasi aktivitas antar wilayah, sehingga membentuk pola spasial aktivitas sosial ekonomi yang tidak seragam. Kondisi ini menegaskan pentingnya pendekatan spasial dalam memahami dampak keberadaan infrastruktur transportasi terhadap dinamika wilayah.

Penelitian ini memposisikan aktivitas sosial ekonomi sebagai variabel utama yang direpresentasikan melalui data *Night-Time Light*. Nilai MEAN NTL digunakan untuk menggambarkan intensitas aktivitas, sedangkan nilai SUM NTL mencerminkan akumulasi dan perluasan aktivitas wilayah. Perubahan nilai NTL antar periode waktu digunakan untuk memahami dinamika aktivitas sosial ekonomi secara temporal, sementara pola spasialnya dianalisis untuk mengidentifikasi keterkaitan antar wilayah.

Dengan demikian, landasan penelitian ini menegaskan bahwa pemanfaatan data Night-Time Light sebagai proksi aktivitas sosial ekonomi merupakan pendekatan yang relevan secara konseptual dan spasial-temporal. Landasan ini menjadi dasar dalam penyusunan sintesa variabel serta tahapan analisis selanjutnya untuk menjelaskan perubahan, pola spasial, dan dinamika aktivitas sosial ekonomi di kawasan sekitar Jalan Tol Pandaan - Malang.