

Monitoring dan Proyeksi Perkembangan Wilayah Perkotaan Menuju 2045 Berbasis Pemodelan Citra VIIRS *Night-Time Light* di Pulau Jawa

Irsyad Syahnur, Soni Darmawan

Program Studi Teknik Geodesi, Institut Teknologi Nasional, Bandung, Indonesia

Koresponden email: irsyadsyahnur@gmail.com, soni_darmawan@itenas.ac.id

Diterima: 23 Juni 2026

Disetujui: Juli 2026

Abstract

Urban development in Java Island has been growing rapidly due to increasing economic activities, population growth, and infrastructure expansion. Night-Time Light (NTL) data derived from the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) can represent human activities and built-up area development through nighttime illumination intensity, making it a valuable source for monitoring urban dynamics. This study aims to analyze NTL dynamics, urban area development, and predict urban growth in Java Island up to 2045 using VIIRS Day/Night Band (DNB) VCMSCFG data from 2014 to 2025. The research was conducted through VIIRS NTL data preprocessing, time-series analysis, linear regression modeling, urban extraction using a thresholding approach with a value of 5 nW/cm²/sr, and urban growth prediction for 2045 based on pixel-level linear regression. All analyses were performed using Google Earth Engine to process multi-temporal data and generate spatial information on urban development. The results indicate that NTL intensity in Java Island experienced an increasing trend with a slope of 0.132 nW/cm²/sr/year, an R² value of 0.72, and an RMSE of 0.286 nW/cm²/sr. Urban extraction results show that the urban area increased from 6,542 km² in 2014 to 15,040 km² in 2025. Based on the prediction results, the urban area of Java Island is projected to reach 37,799 km² by 2045, representing an increase of 22,759 km² compared to 2025.

Keywords: *night-time light, VIIRS, urban development, linear regression, google earth engine*

Abstrak

Perkembangan wilayah perkotaan di Pulau Jawa berlangsung sangat pesat seiring dengan meningkatnya aktivitas ekonomi, pertumbuhan penduduk, dan pembangunan infrastruktur. Data *Night-Time Light* (NTL) dari sensor *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) mampu merepresentasikan aktivitas manusia dan perkembangan kawasan terbangun melalui intensitas cahaya malam sehingga banyak digunakan untuk memantau dinamika wilayah perkotaan. Penelitian ini bertujuan menganalisis dinamika NTL, perkembangan wilayah urban, serta memprediksi perkembangan wilayah perkotaan di Pulau Jawa hingga tahun 2045 menggunakan data VIIRS *Day/Night Band* (DNB) VCMSCFG periode 2014–2025. Penelitian dilakukan melalui tahapan pra-pemrosesan data VIIRS NTL, analisis *time-series*, regresi linear, ekstraksi urban menggunakan metode *thresholding* dengan nilai ambang 5 nW/cm²/sr, serta prediksi perkembangan wilayah urban tahun 2045 berbasis regresi linear piksel. Analisis dilakukan menggunakan *platform Google Earth Engine* untuk mengolah data multitemporal dan menghasilkan informasi spasial perkembangan wilayah perkotaan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa intensitas NTL di Pulau Jawa mengalami peningkatan dengan nilai *slope* sebesar 0,132 nW/cm²/sr/tahun, R² sebesar 0,72, dan RMSE sebesar 0,286 nW/cm²/sr. Hasil ekstraksi urban menunjukkan bahwa luas wilayah urban meningkat dari 6.542 km² pada tahun 2014 menjadi 15.040 km² pada tahun 2025. Berdasarkan hasil prediksi, luas wilayah urban Pulau Jawa diperkirakan mencapai 37.799 km² pada tahun 2045 atau meningkat sebesar 22.759 km² dibandingkan tahun 2025.

Kata Kunci: *night-time light, VIIRS, perkembangan perkotaan, regresi linear, google earth engine*

1. Pendahuluan

Urbanisasi merupakan fenomena global yang terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk, perkembangan ekonomi, serta ekspansi wilayah terbangun. Pertumbuhan kawasan perkotaan yang tidak terkendali dapat memicu berbagai permasalahan seperti konversi lahan, peningkatan kepadatan penduduk, degradasi lingkungan, hingga ketimpangan pembangunan antarwilayah [1]. Di Indonesia, Pulau Jawa menjadi wilayah dengan tingkat urbanisasi tertinggi karena berperan sebagai pusat pemerintahan, industri, perdagangan, dan aktivitas ekonomi nasional. Konsentrasi aktivitas tersebut menyebabkan

perkembangan wilayah perkotaan di Pulau Jawa berlangsung sangat cepat dan dinamis [2]. Pemantauan perkembangan wilayah perkotaan menjadi penting untuk mendukung perencanaan tata ruang, pengendalian pembangunan, serta penyusunan kebijakan pembangunan berkelanjutan. Metode konvensional berbasis survei lapangan maupun interpretasi visual citra penggunaan lahan sering kali memerlukan biaya, waktu, dan sumber daya yang besar, khususnya untuk wilayah dengan cakupan spasial luas seperti Pulau Jawa [3]. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang mampu memantau dinamika perkembangan wilayah perkotaan secara efisien, konsisten, dan multitemporal.

Salah satu pendekatan yang banyak digunakan dalam pemantauan perkembangan wilayah perkotaan adalah pemanfaatan data *Night-Time Light* (NTL). Data NTL merepresentasikan intensitas cahaya malam yang dihasilkan oleh aktivitas manusia sehingga dapat digunakan sebagai indikator perkembangan ekonomi, kepadatan aktivitas perkotaan, dan pertumbuhan wilayah terbangun [4]. Intensitas cahaya malam memiliki hubungan erat dengan tingkat urbanisasi karena kawasan perkotaan umumnya menghasilkan tingkat pencahayaan yang lebih tinggi dibandingkan wilayah non-perkotaan [5]. Perkembangan teknologi penginderaan jauh memungkinkan penggunaan data *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) *Day/Night Band* sebagai sumber data NTL dengan kualitas radiometrik dan resolusi spasial yang lebih baik dibandingkan generasi sebelumnya, seperti DMSP-OLS [6]. Produk VIIRS mampu mendeteksi variasi intensitas cahaya malam secara lebih detail serta memiliki cakupan temporal yang kontinu sejak tahun 2012 [6]. Dengan karakteristik tersebut, data VIIRS dinilai efektif untuk melakukan analisis dinamika perkembangan wilayah perkotaan dalam skala regional maupun nasional [7].

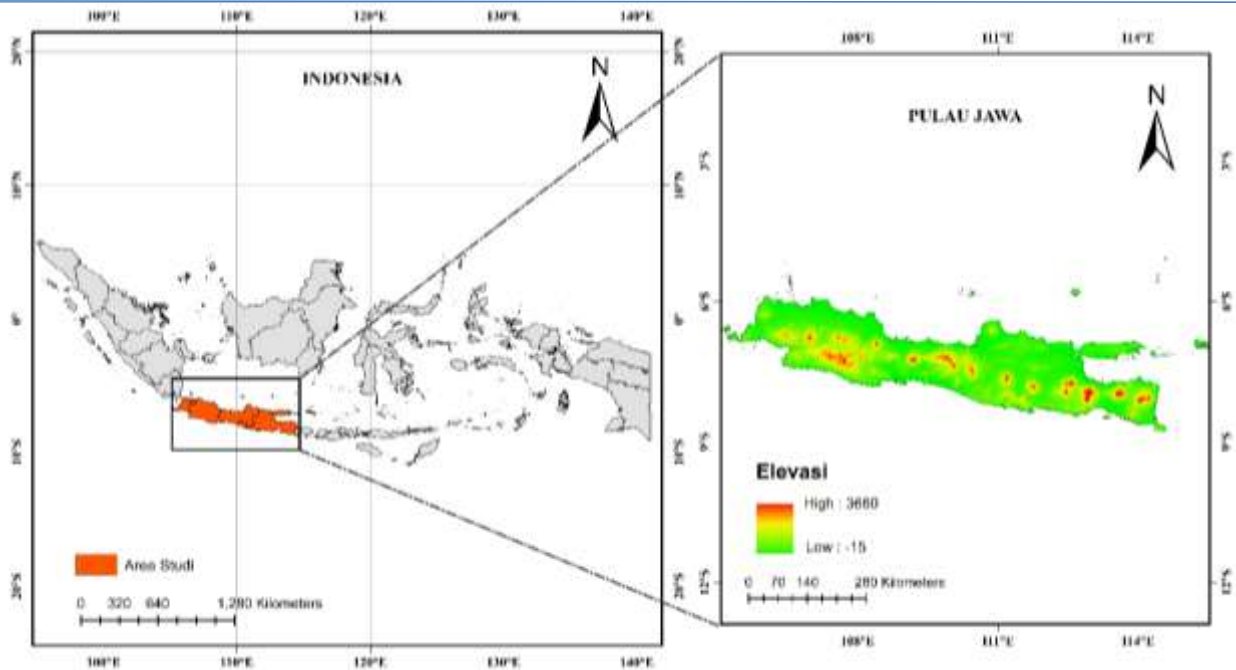
Berbagai penelitian sebelumnya telah memanfaatkan data VIIRS untuk analisis urbanisasi dan perkembangan wilayah terbangun. Elvidge et al. [6] menjelaskan bahwa data VIIRS memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mendeteksi pencahayaan perkotaan dibandingkan DMSP-OLS. Zhao et al. [8] menggunakan data VIIRS untuk menganalisis ekspansi urban dan menunjukkan bahwa intensitas NTL memiliki korelasi yang kuat terhadap perkembangan wilayah terbangun. Penelitian lain oleh Li et al. [9] menunjukkan bahwa data NTL dapat digunakan untuk memantau dinamika urbanisasi secara temporal dan spasial pada berbagai skala wilayah. Selain itu, studi oleh Levin dan Zhang [10] menjelaskan bahwa data NTL mampu merepresentasikan aktivitas manusia dan perkembangan ekonomi secara spasial. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada identifikasi kondisi historis dan pemetaan perubahan urban dalam periode tertentu [9]. Penelitian yang mengintegrasikan analisis *time-series* NTL dengan pendekatan prediksi spasial hingga tahun proyeksi tertentu masih relatif terbatas, khususnya pada wilayah Pulau Jawa. Selain itu, kajian yang memanfaatkan pemodelan regresi linear berbasis *Google Earth Engine* (GEE) untuk menghasilkan proyeksi perkembangan wilayah perkotaan spasial secara multitemporal juga masih belum banyak dilakukan [11].

Google Earth Engine merupakan platform komputasi awan yang mampu mengolah data penginderaan jauh dalam skala besar secara efisien [12]. Pemanfaatan GEE memungkinkan proses analisis *time-series* VIIRS dilakukan secara lebih cepat dan konsisten dibandingkan pengolahan konvensional. Selain itu, pendekatan regresi linear dapat digunakan untuk menganalisis tren temporal NTL dan memproyeksikan perkembangan urban pada periode mendatang [13]. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dinamika perkembangan wilayah perkotaan di Pulau Jawa menggunakan data VIIRS *Night-Time Light* periode 2014–2025 serta memproyeksikan perkembangan urban hingga tahun 2045 menggunakan pendekatan regresi linear berbasis *Google Earth Engine*. Analisis dilakukan melalui pengolahan *time-series* NTL, evaluasi statistik regresi menggunakan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE) dan koefisien determinasi (R^2), serta ekstraksi wilayah urban berdasarkan nilai ambang (*threshold*) intensitas cahaya malam [15]. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi spasial mengenai pola perkembangan wilayah perkotaan serta mendukung perencanaan pembangunan berkelanjutan di Pulau Jawa.

2. Metode Penelitian

2.1 Wilayah Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada wilayah Pulau Jawa, Indonesia, yang terdiri atas enam provinsi yaitu DKI Jakarta, Banten, Jawa Barat, Jawa Tengah, Daerah Istimewa Yogyakarta, dan Jawa Timur. Pulau Jawa dipilih sebagai lokasi penelitian karena merupakan pusat aktivitas ekonomi, industri, pemerintahan, dan permukiman terbesar di Indonesia dengan tingkat urbanisasi yang sangat tinggi. Tingginya pertumbuhan penduduk dan pembangunan infrastruktur menyebabkan perkembangan wilayah perkotaan di Pulau Jawa berlangsung secara cepat dan dinamis. Wilayah penelitian ditampilkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Wilayah Penelitian

2.2 Data

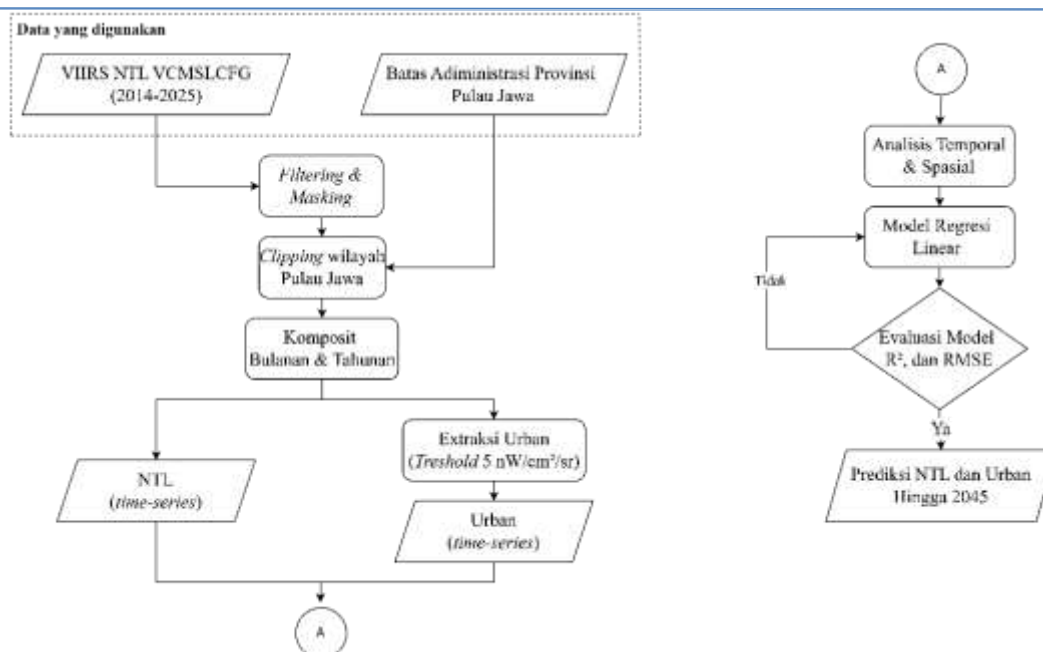
Penelitian ini menggunakan data *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Day/Night Band (DNB) Night-Time Light (NTL)* bulanan periode 2014–2025 yang diperoleh dari produk NOAA/VIIRS/DNB/MONTHLY_V1/VCMSLCFG melalui platform *Google Earth Engine (GEE)*. Produk ini memiliki resolusi spasial 463,83 meter dan menyediakan informasi intensitas cahaya malam dalam satuan ($\text{nW}/\text{cm}^2/\text{sr}$).

Tabel 1. Data yang digunakan dalam penelitian

No	Data	Sumber	Resolusi	Periode
1	VIIRS <i>Night-Time Light</i> (VCMSLCFG)	NOAA <i>Earth Observation Group</i> melalui <i>Google Earth Engine</i>	463,83 m	2014–2025
2	Batas Administrasi Provinsi Pulau Jawa	BIG/BPS	-	2024

2.3 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yang meliputi pra-pemrosesan data *Night-Time Light (NTL)*, analisis *time-series* dan regresi linear, ekstraksi wilayah urban, serta prediksi perkembangan wilayah urban hingga tahun 2045. Seluruh proses pengolahan dan analisis data dilakukan menggunakan platform *Google Earth Engine*. Diagram alir penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

2.3.1 Pra-pemrosesan Data VIIRS

Pra-pemrosesan data dilakukan untuk meningkatkan kualitas data *Night-Time Light* (NTL) sebelum dilakukan analisis temporal, spasial, dan pemodelan regresi. Data yang digunakan merupakan citra bulanan VIIRS *Day/Night Band* (DNB) produk VCMSLCFG periode 2014–2025 yang diakses melalui *Google Earth Engine* (GEE). Produk VCMSLCFG dipilih karena telah melalui proses koreksi terhadap cahaya sementara (*stray light correction*) sehingga lebih stabil untuk analisis temporal [6]. Tahapan pra-pemrosesan diawali dengan melakukan *filtering* temporal sesuai periode penelitian, yaitu Januari 2014 hingga Desember 2025. Selanjutnya dilakukan pemilihan *band avg_rad* sebagai representasi intensitas cahaya malam dan *band cf_cvg* untuk mengidentifikasi kualitas cakupan observasi. Proses *masking* dilakukan dengan menghilangkan piksel yang memiliki nilai radiansi kurang dari atau sama dengan nol serta piksel dengan nilai *cf_cvg* kurang dari satu untuk meminimalkan pengaruh *noise* dan observasi yang tidak stabil.

Setelah proses *masking*, citra dipotong (*clipping*) menggunakan batas administrasi Pulau Jawa sehingga analisis difokuskan pada wilayah penelitian. Untuk analisis dinamika NTL, data dipertahankan dalam bentuk komposit bulanan sehingga variasi temporal dapat diamati secara lebih rinci selama periode pengamatan. Sementara itu, untuk analisis perkembangan wilayah urban, data bulanan diagregasikan menjadi komposit tahunan (*annual composite*) guna menghasilkan representasi yang lebih stabil dan mengurangi pengaruh fluktuasi musiman pada proses ekstraksi urban.

2.3.2 Analisis Time-Series dan Regresi Linear

Analisis *time-series* dilakukan untuk mengidentifikasi dinamika temporal intensitas *Night-Time Light* (NTL) dan perkembangan luas wilayah urban di Pulau Jawa selama periode 2014–2025. Data NTL bulanan digunakan untuk membentuk *time-series* intensitas cahaya malam, sedangkan data luas urban tahunan digunakan untuk membentuk *time-series* perkembangan wilayah urban. Kedua data tersebut dianalisis pada skala Pulau Jawa dan masing-masing provinsi untuk mengetahui pola perubahan yang terjadi selama periode pengamatan. Analisis tren dilakukan menggunakan metode regresi linear sederhana untuk mengukur hubungan antara waktu sebagai variabel independen (x) dan nilai NTL maupun luas urban sebagai variabel dependen (y) [13]. Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi kecenderungan peningkatan atau penurunan nilai pengamatan dari waktu ke waktu serta untuk memperoleh laju perubahan yang direpresentasikan oleh nilai *slope*. Model regresi linear sederhana secara matematis dinyatakan pada Persamaan (1) [13].

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \dots \dots \dots (1).$$

Dimana:

- (Y_i) : nilai variabel respon (NTL),
- (X_i) : variabel prediktor (waktu),
- (β_0) : *intercept* atau konstanta,
- (β_1) : koefisien regresi (*slope*),
- (ε_i) : galat (*error*).

Dalam proses analisis, parameter (β_0) dan (β_1) diestimasi menggunakan data sampel sehingga diperoleh persamaan regresi pada Persamaan (2).

$$\hat{Y}_i = b_0 + b_1 X_i \dots \dots \dots (2)$$

Koefisien *slope* ((β_1)) dihitung menggunakan Persamaan (3).

$$b_1 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum (X_i - \bar{X})^2} \dots \dots \dots (3)$$

Nilai *slope* menunjukkan laju perubahan nilai pengamatan terhadap waktu. Pada analisis NTL, *slope* digunakan untuk menggambarkan laju perubahan intensitas cahaya malam, sedangkan pada analisis urban digunakan untuk menggambarkan laju pertumbuhan luas wilayah urban. Nilai *slope* positif menunjukkan adanya peningkatan selama periode pengamatan, sedangkan nilai negatif menunjukkan kecenderungan penurunan.

Evaluasi model regresi dilakukan menggunakan parameter koefisien determinasi (R^2) dan *Root Mean Square Error* (RMSE) [13]. Koefisien determinasi digunakan untuk mengukur seberapa besar variasi data dapat dijelaskan oleh model regresi. Persamaan R^2 ditunjukkan pada Persamaan (4).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} \dots \dots \dots (4)$$

Sementara itu, RMSE digunakan untuk mengukur besarnya kesalahan antara nilai hasil prediksi dan nilai aktual. Persamaan RMSE ditunjukkan pada Persamaan (5).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \dots \dots \dots (5)$$

Nilai R^2 berada pada rentang 0 hingga 1. Semakin mendekati 1, maka model semakin baik dalam menjelaskan hubungan antara variabel yang diamati. Sebaliknya, nilai RMSE yang semakin kecil menunjukkan bahwa hasil prediksi model semakin mendekati nilai aktual [13]. Hasil analisis regresi berupa nilai *slope*, R^2 , dan RMSE digunakan untuk mengevaluasi tren perkembangan NTL dan luas urban selama periode penelitian serta sebagai dasar dalam proses prediksi kondisi tahun 2045.

2.3.3 Ekstraksi Urban

Ekstraksi wilayah urban dilakukan menggunakan pendekatan *thresholding* terhadap nilai intensitas *Night-Time Light* (NTL) dari data VIIRS. Metode *thresholding* digunakan untuk memisahkan wilayah urban dan non-urban berdasarkan nilai ambang radiansi tertentu [15]. Pendekatan ini didasarkan pada karakteristik data NTL yang menunjukkan bahwa wilayah urban umumnya memiliki nilai radiansi yang lebih tinggi dibandingkan wilayah non-urban sehingga dapat dibedakan menggunakan nilai ambang tertentu [16]. Dalam penelitian ini digunakan nilai *threshold* sebesar 5 nW/cm²/sr sebagai batas operasional untuk mengidentifikasi wilayah urban pada Pulau Jawa. Piksel dengan nilai NTL lebih besar dari 5 nW/cm²/sr diklasifikasikan sebagai wilayah urban, sedangkan piksel dengan nilai yang lebih rendah dikategorikan sebagai wilayah non-urban. Proses klasifikasi dilakukan menggunakan data komposit tahunan sehingga menghasilkan peta urban tahunan yang digunakan untuk menganalisis perkembangan wilayah perkotaan selama periode 2014–2025. Data NTL tahunan hasil pra-pemrosesan kemudian diklasifikasikan menjadi peta urban biner menggunakan Persamaan (6).

$$U|x| = \begin{cases} 1, & NTL \geq 5 \\ 0, & NTL < 5 \end{cases} \dots \dots \dots (6)$$

Dimana:

- $U(x)$: kelas urban,
- NTL : nilai intensitas cahaya malam,
- nilai 1 menunjukkan wilayah urban,
- nilai 0 menunjukkan wilayah non-urban.

Setelah proses klasifikasi, dilakukan perhitungan luas wilayah urban pada Pulau Jawa dan masing-masing provinsi untuk setiap tahun pengamatan. Luas urban dihitung berdasarkan jumlah piksel urban yang dikalikan dengan luas spasial piksel VIIRS sehingga diperoleh luas wilayah urban dalam satuan kilometer

persegi (km^2). Hasil perhitungan luas urban digunakan untuk menganalisis dinamika perkembangan wilayah perkotaan, menghitung perubahan dan pertumbuhan luas urban, serta menjadi data masukan dalam analisis regresi perkembangan urban selama periode penelitian.

2.3.4 Prediksi Tahun 2045

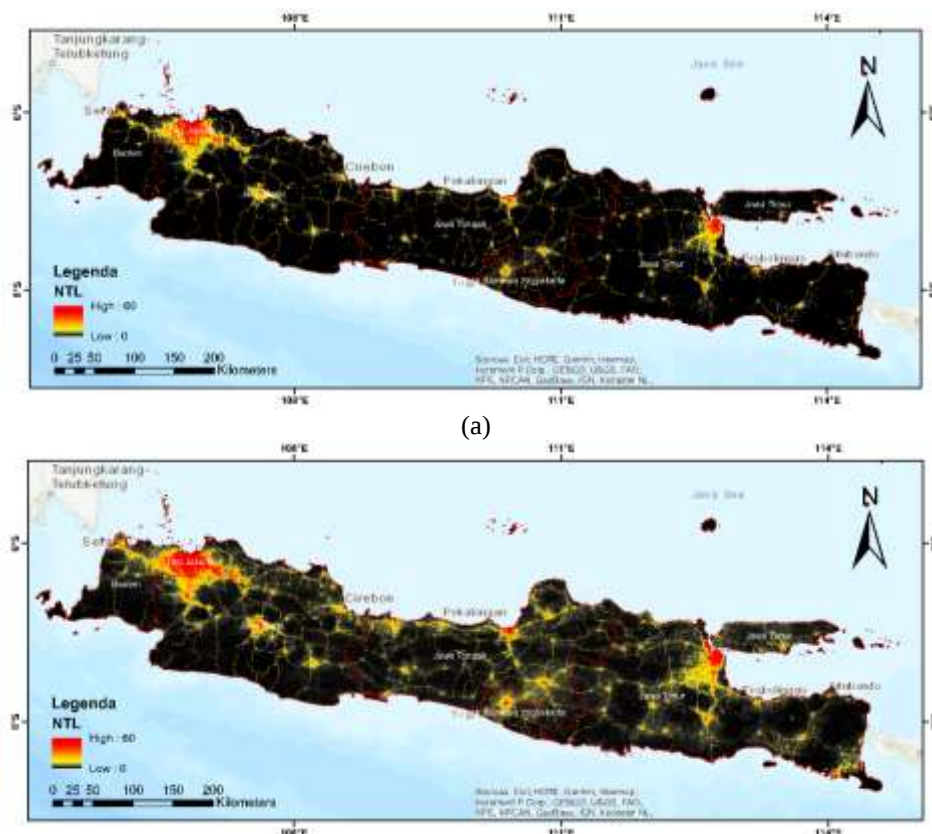
Prediksi perkembangan wilayah perkotaan hingga tahun 2045 dilakukan menggunakan pendekatan regresi linear berbasis piksel (*pixel-based regression*) terhadap data *Night-Time Light* (NTL) tahunan periode 2014–2025. Pada metode ini, setiap piksel dianalisis secara temporal untuk memperoleh hubungan antara waktu dan nilai radiansi NTL berdasarkan model regresi linear yang telah dijelaskan pada Subbab 2.3.2. Parameter regresi yang diperoleh kemudian digunakan untuk memperkirakan nilai radiansi NTL pada tahun 2045 untuk setiap piksel di wilayah penelitian. Hasil prediksi berupa citra NTL tahun 2045 digunakan untuk menggambarkan distribusi spasial intensitas cahaya malam di Pulau Jawa pada periode mendatang. Visualisasi spasial tersebut digunakan untuk mengidentifikasi wilayah yang diperkirakan mengalami peningkatan aktivitas yang tercermin dari intensitas cahaya malam yang lebih tinggi dibandingkan periode sebelumnya.

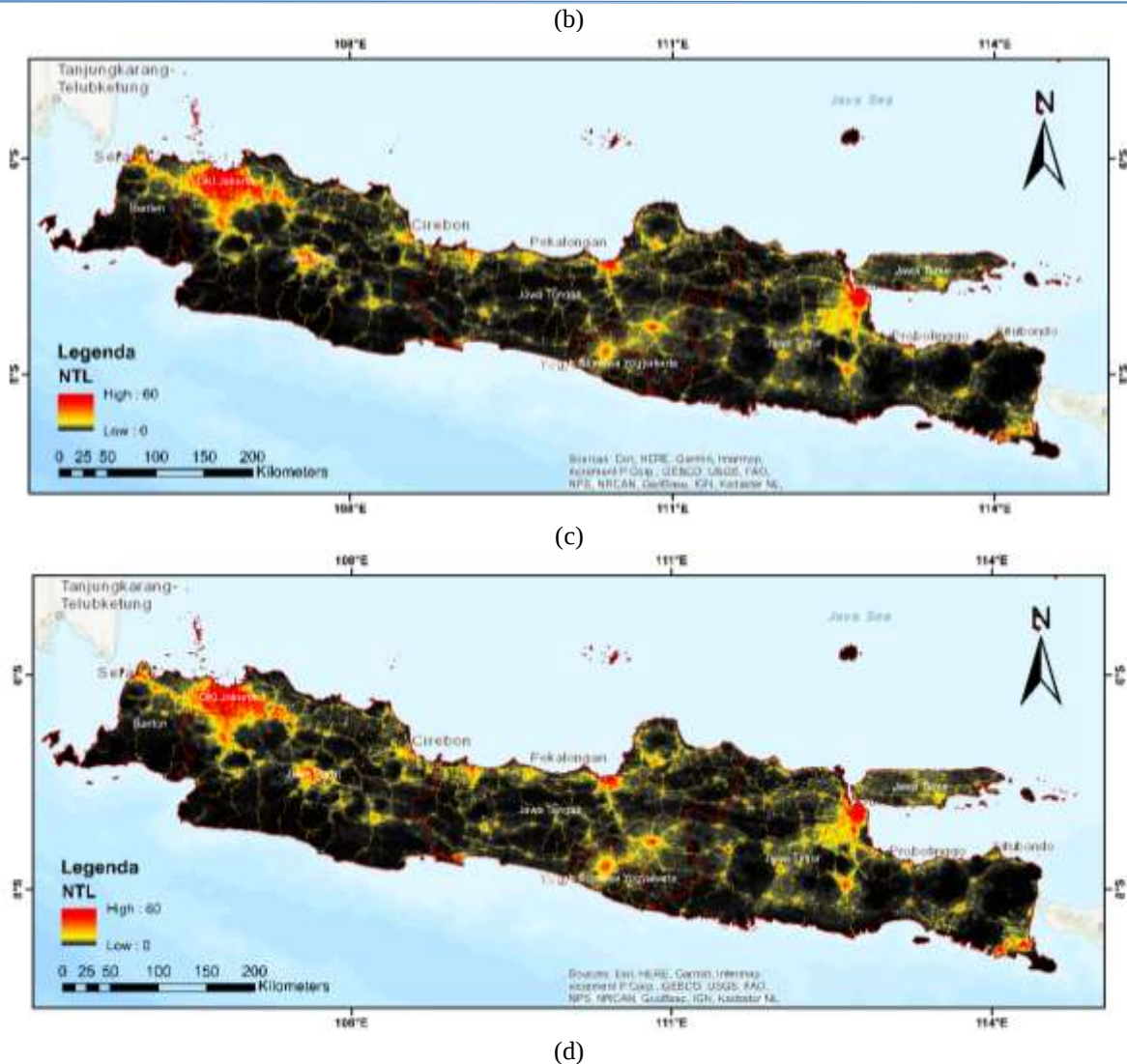
Selanjutnya, citra NTL hasil prediksi tahun 2045 diklasifikasikan menjadi wilayah urban dan non-urban menggunakan nilai *threshold* yang sama dengan proses ekstraksi urban pada Subbab 2.3.3, yaitu sebesar $5 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$. Proses ini menghasilkan peta prediksi urban tahun 2045 yang digunakan untuk menganalisis potensi perkembangan wilayah perkotaan di Pulau Jawa dan masing-masing provinsi. Setelah proses klasifikasi, dilakukan perhitungan luas wilayah urban hasil prediksi tahun 2045. Nilai luas urban tersebut kemudian dibandingkan dengan kondisi tahun 2025 untuk mengetahui perubahan dan pertumbuhan wilayah urban yang diproyeksikan terjadi selama periode 2025–2045. Hasil prediksi disajikan dalam bentuk peta spasial dan statistik luas urban sebagai dasar untuk mengevaluasi kecenderungan perkembangan wilayah perkotaan di masa mendatang.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Dinamika Spasial dan Temporal *Night-Time Light* Tahun 2014–2025

Untuk mengidentifikasi perubahan distribusi spasial aktivitas manusia dan perkembangan wilayah perkotaan di Pulau Jawa, dilakukan visualisasi intensitas *Night-Time Light* (NTL) pada beberapa tahun representatif, yaitu tahun 2014, 2018, 2021, dan 2025. Pemilihan tahun-tahun tersebut bertujuan untuk menggambarkan perubahan spasial NTL selama periode penelitian secara bertahap. Hasil visualisasi spasial NTL ditunjukkan pada **Gambar 3**.

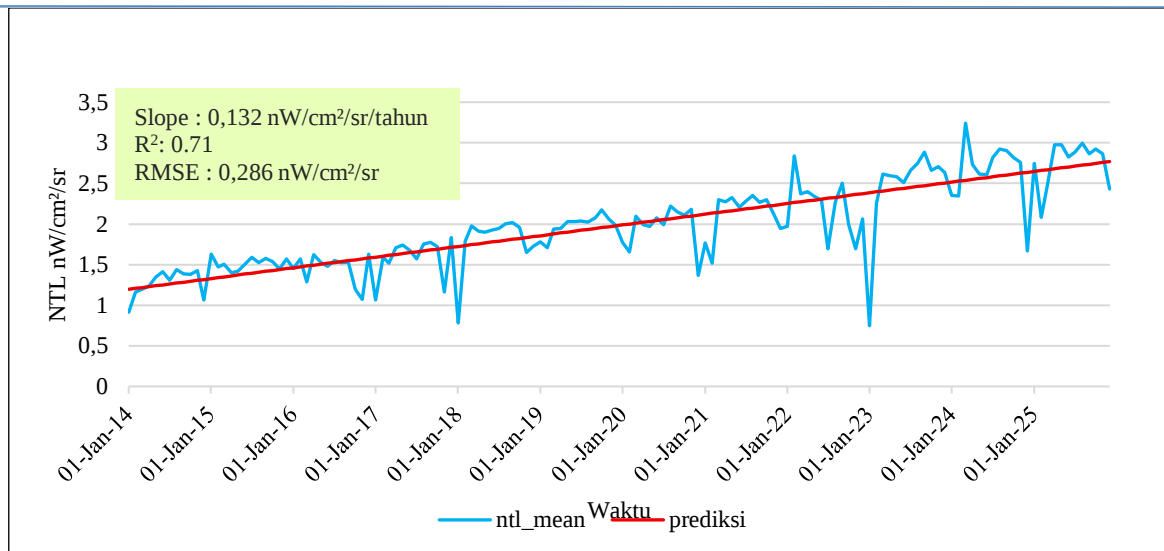




Gambar 3. NTL Pulau Jawa Tahun (a) 2014, (b) 2018, (c) 2021, (d) 2025

Gambar 3 menunjukkan dinamika spasial *Night-Time Light* (NTL) di Pulau Jawa pada tahun 2014, 2018, 2021, dan 2025. Secara umum terlihat adanya peningkatan intensitas dan persebaran cahaya malam selama periode penelitian. Pada tahun 2014, nilai NTL tinggi masih terkonsentrasi pada pusat-pusat perkotaan utama, seperti wilayah DKI Jakarta, Jawa Barat, Jawa Tengah, Daerah Istimewa Yogyakarta, dan Jawa Timur. Seiring waktu, area bercahaya semakin meluas dan membentuk pola yang mengikuti koridor perkotaan serta jaringan transportasi utama di Pulau Jawa. Perubahan spasial tersebut terlihat dari semakin banyaknya area dengan intensitas cahaya menengah hingga tinggi yang muncul di luar pusat kota utama. Peningkatan NTL tidak hanya terjadi pada kawasan metropolitan, tetapi juga pada wilayah penyangga dan kota-kota sekunder yang tersebar di berbagai provinsi. Hal ini menunjukkan bahwa aktivitas ekonomi dan pembangunan wilayah berkembang tidak hanya secara terpusat, tetapi juga menyebar ke wilayah sekitarnya. Pada tahun 2025, peningkatan intensitas NTL terlihat lebih merata dibandingkan tahun 2014, terutama pada kawasan perkotaan dan wilayah penyangga di sekitarnya. Perubahan tersebut menunjukkan meningkatnya aktivitas manusia dan berkembangnya wilayah perkotaan di berbagai bagian Pulau Jawa. Secara keseluruhan, pola spasial NTL mengindikasikan adanya ekspansi aktivitas perkotaan yang sejalan dengan tren peningkatan NTL hasil analisis temporal.

Setelah mengidentifikasi perubahan distribusi spasial NTL, selanjutnya dilakukan analisis temporal menggunakan data rata-rata NTL bulanan periode 2014–2025. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi tren perubahan intensitas cahaya malam secara kuantitatif serta mengevaluasi performa model regresi linear yang digunakan. Hasil analisis *time-series* ditunjukkan pada **Gambar 4**, sedangkan hasil evaluasi model regresi pada masing-masing provinsi disajikan pada **Tabel 2**.



Gambar 4. Time-series NTL Pulau Jawa 2014-2025

Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai *Night-Time Light* (NTL) rata-rata Pulau Jawa mengalami kecenderungan meningkat selama periode 2014–2025. Pada awal periode pengamatan, nilai radiansi rata-rata berada pada kisaran 1–1,5 nW/cm²/sr dan terus meningkat hingga mencapai lebih dari 2,5 nW/cm²/sr pada akhir periode penelitian. Peningkatan tersebut menunjukkan bertambahnya intensitas aktivitas manusia yang tercermin dari meningkatnya pencahayaan malam, yang secara tidak langsung mengindikasikan perkembangan wilayah perkotaan, pembangunan infrastruktur, dan peningkatan aktivitas ekonomi di Pulau Jawa. Meskipun menunjukkan tren peningkatan jangka panjang, data NTL masih memperlihatkan fluktuasi pada beberapa periode pengamatan. Penurunan nilai radiansi terjadi pada beberapa bulan tertentu, terutama pada rentang tahun 2017–2018, 2020–2021, dan 2023. Fluktuasi tersebut dapat dipengaruhi oleh variasi kondisi atmosfer, kualitas observasi satelit, maupun perubahan aktivitas manusia yang bersifat sementara. Namun demikian, variasi tersebut tidak mengubah pola peningkatan jangka panjang yang terlihat dari kecenderungan garis regresi. Hasil regresi linear menunjukkan nilai *slope* sebesar 0,132 nW/cm²/sr/tahun, yang mengindikasikan bahwa rata-rata intensitas cahaya malam di Pulau Jawa meningkat sekitar 0,132 nW/cm²/sr setiap tahun selama periode 2014–2025. Nilai koefisien determinasi (*R*²) sebesar 0,719 menunjukkan bahwa sekitar 71,9% variasi data NTL dapat dijelaskan oleh model regresi linear, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain yang tidak dimodelkan. Selain itu, nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 0,286 nW/cm²/sr menunjukkan bahwa model memiliki tingkat kesalahan yang relatif rendah sehingga mampu merepresentasikan tren temporal NTL dengan baik.

Untuk mengetahui karakteristik perkembangan NTL pada tingkat provinsi, dilakukan analisis regresi linear sederhana terhadap data NTL periode 2014–2025 pada masing-masing provinsi di Pulau Jawa. Hasil regresi dievaluasi menggunakan nilai *slope*, koefisien determinasi (*R*²), dan *Root Mean Square Error* (RMSE). Nilai *slope* digunakan untuk menggambarkan laju perubahan NTL terhadap waktu, sedangkan *R*² dan RMSE digunakan untuk mengevaluasi kemampuan model dalam merepresentasikan pola data. Hasil perhitungan regresi untuk Pulau Jawa dan masing-masing provinsi disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Perhitungan Evaluasi Model Regresi

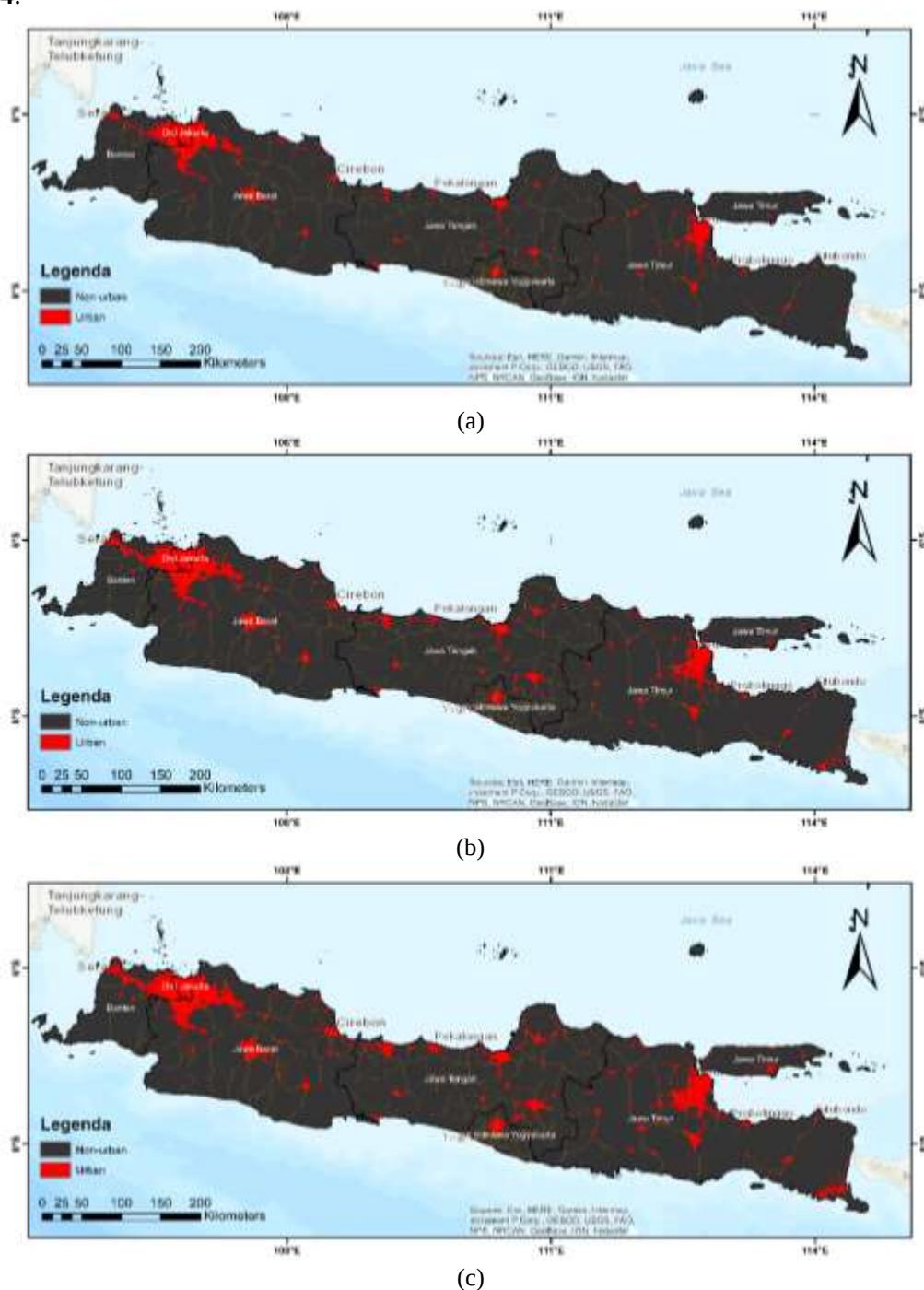
Wilayah	Slope (nW/cm ² /sr)	<i>R</i> ²	RMSE (nW/cm ² /sr)
DKI Jakarta	0,52	0,14	4,7
Jawa Barat	0,13	0,67	0,13
Jawa Tengah	0,13	0,75	0,26
Daerah Istimewa	0,2	0,43	0,80
Yogyakarta			
Jawa Timur	0,11	0,64	0,3
Banten	0,18	0,35	0,87

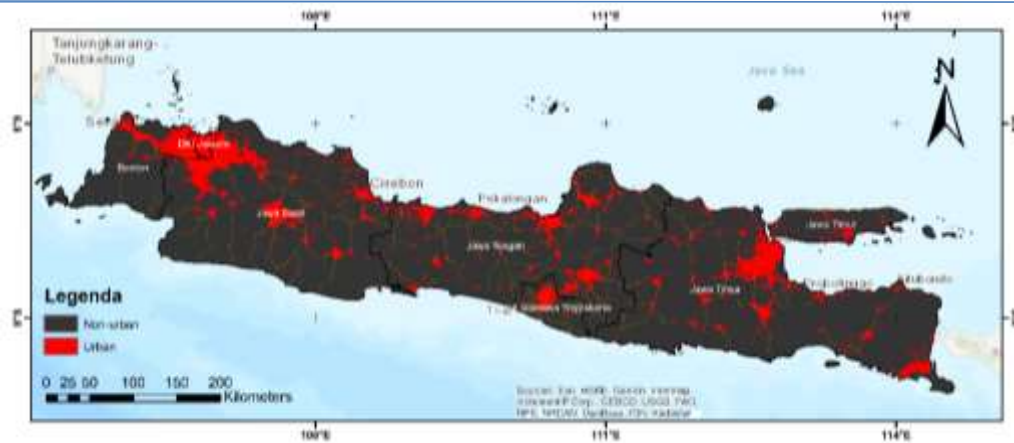
Berdasarkan **Tabel 2**, seluruh provinsi di Pulau Jawa menunjukkan nilai *slope* positif yang mengindikasikan adanya peningkatan intensitas cahaya malam selama periode penelitian. DKI Jakarta memiliki nilai *slope* tertinggi sebesar 0,52 nW/cm²/sr/tahun, menunjukkan peningkatan intensitas cahaya yang relatif lebih cepat dibandingkan provinsi lainnya. Namun demikian, nilai *R*² DKI Jakarta hanya sebesar

0,14 dengan RMSE sebesar 4,7 nW/cm²/sr, yang menunjukkan bahwa pola temporal NTL di wilayah tersebut memiliki fluktuasi yang cukup tinggi sehingga kurang baik direpresentasikan oleh model linear. Sebaliknya, Jawa Tengah memiliki nilai R^2 tertinggi sebesar 0,75 dengan RMSE sebesar 0,26 nW/cm²/sr, menunjukkan bahwa model regresi mampu menjelaskan variasi data NTL dengan baik dan memiliki tingkat kesalahan yang relatif rendah. Jawa Barat dan Jawa Timur juga menunjukkan performa model yang baik dengan nilai R^2 masing-masing sebesar 0,67 dan 0,64. Sementara itu, Daerah Istimewa Yogyakarta dan Banten memiliki nilai *slope* yang relatif tinggi, masing-masing sebesar 0,20 dan 0,18 nW/cm²/sr/tahun, namun dengan nilai R^2 yang lebih rendah, mengindikasikan adanya variasi temporal yang lebih besar selama periode pengamatan.

3.2 Perkembangan Luas Urban Tahun 2014-2025

Perkembangan wilayah urban di Pulau Jawa dianalisis menggunakan hasil ekstraksi data *Night-Time Light* (NTL) VIIRS dengan nilai ambang (*threshold*) sebesar 5 nW/cm²/sr. Untuk menggambarkan perubahan spasial wilayah urban selama periode penelitian, digunakan empat tahun representatif yaitu 2014, 2018, 2021, dan 2025. Hasil ekstraksi wilayah urban pada masing-masing tahun ditunjukkan pada Gambar 4.



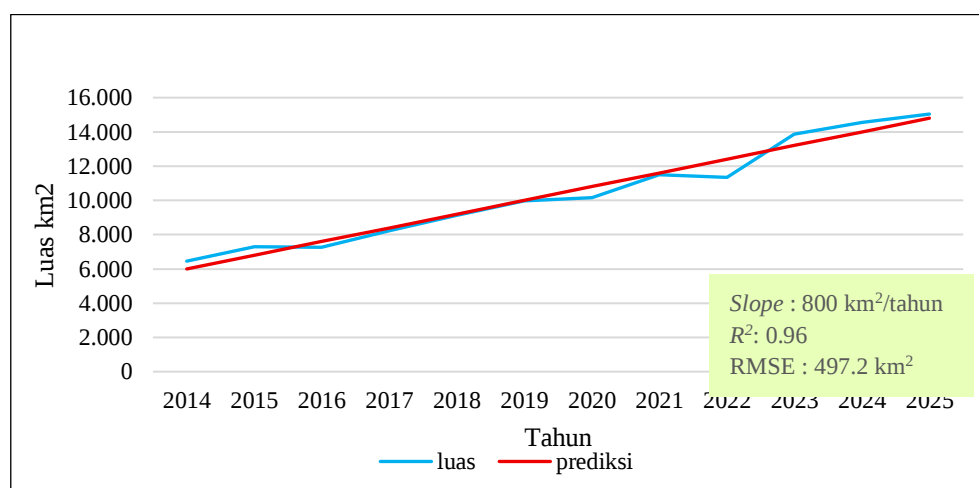


(d)
Gambar 5. Urban Pulau Jawa Tahun (a) 2014, (b) 2018, (c) 2021, (d) 2025

Gambar 5 menunjukkan perkembangan wilayah urban di Pulau Jawa pada tahun 2014, 2018, 2021, dan 2025 yang diperoleh dari hasil ekstraksi data VIIRS *Night-Time Light* menggunakan nilai ambang 5 $nW/cm^2/sr$. Secara umum terlihat adanya peningkatan luas dan persebaran wilayah urban selama periode penelitian. Pada tahun 2014, wilayah urban masih terkonsentrasi pada pusat-pusat perkotaan utama seperti DKI Jakarta dan sekitarnya, Bandung, Semarang, Daerah Istimewa Yogyakarta, Surabaya, serta beberapa kota besar lainnya. Sebagian besar wilayah Pulau Jawa masih didominasi oleh area non-urban. Pada tahun 2018 dan 2021, wilayah urban mulai menunjukkan ekspansi ke area di sekitar pusat-pusat perkotaan utama serta berkembang pada koridor antar kota. Pola ini menunjukkan adanya pertumbuhan kawasan terbangun yang mengikuti jalur transportasi dan pusat kegiatan ekonomi. Perluasan wilayah urban terlihat cukup jelas di wilayah Jawa Barat, koridor utara Jawa Tengah, serta kawasan metropolitan Surabaya dan sekitarnya.

Pada tahun 2025, persebaran wilayah urban terlihat semakin luas dibandingkan tahun 2014. Selain terjadi pada kawasan metropolitan utama, perkembangan urban juga muncul pada kota-kota menengah dan wilayah penyangga di berbagai provinsi. Pola tersebut menunjukkan bahwa perkembangan wilayah perkotaan di Pulau Jawa tidak hanya terjadi secara terpusat pada kota-kota besar, tetapi juga menyebar ke wilayah sekitarnya. Temuan ini sejalan dengan hasil analisis NTL pada Subbab 3.1 yang menunjukkan adanya peningkatan aktivitas manusia dan perkembangan wilayah perkotaan selama periode 2014–2025.

Untuk mengetahui perkembangan wilayah urban secara kuantitatif, dilakukan analisis luas urban tahunan berdasarkan hasil ekstraksi data VIIRS NTL periode 2014–2025. Nilai luas urban kemudian dianalisis menggunakan regresi linear sederhana untuk mengidentifikasi tren perkembangan wilayah urban di Pulau Jawa. Hasil perkembangan luas urban dan model regresi yang diperoleh disajikan **Gambar 6**.



Gambar 6. Perkembangan Urban Pulau Jawa 2014-2025

Gambar 6 menunjukkan perkembangan luas wilayah urban di Pulau Jawa selama periode 2014–2025. Secara umum terlihat adanya peningkatan luas urban yang relatif konsisten dari tahun ke tahun. Pada tahun 2014 luas wilayah urban tercatat sekitar 6.400 km^2 dan meningkat menjadi sekitar 15.040 km^2 pada tahun 2025. Peningkatan tersebut menunjukkan adanya ekspansi kawasan perkotaan yang

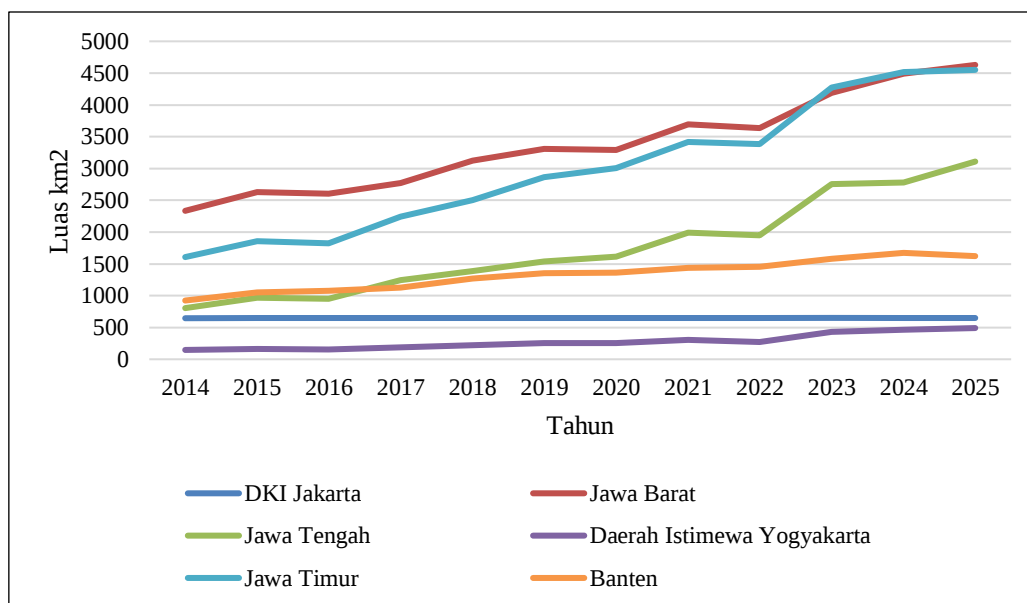
berlangsung secara berkelanjutan selama periode penelitian. Hasil regresi linear menunjukkan nilai *slope* sebesar 800 km²/tahun, yang mengindikasikan bahwa luas wilayah urban di Pulau Jawa bertambah rata-rata sekitar 800 km² setiap tahun. Nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,96 menunjukkan bahwa sekitar 96% variasi perkembangan luas urban dapat dijelaskan oleh model regresi linear.

Selain itu, nilai RMSE sebesar 497,2 km² menunjukkan bahwa model memiliki tingkat kesalahan yang relatif rendah dibandingkan rentang perubahan luas urban yang diamati. Dengan demikian, model regresi mampu merepresentasikan tren perkembangan wilayah urban di Pulau Jawa dengan baik. Meskipun secara umum menunjukkan peningkatan, terdapat beberapa periode yang memperlihatkan laju pertumbuhan yang berbeda. Peningkatan luas urban relatif lebih cepat terjadi setelah tahun 2021, yang ditunjukkan oleh kenaikan luas urban yang lebih signifikan dibandingkan periode sebelumnya. Namun demikian, pola keseluruhan tetap menunjukkan tren pertumbuhan yang positif dan konsisten selama periode penelitian.

Untuk menganalisis perkembangan wilayah urban pada tingkat provinsi, dilakukan regresi linear terhadap luas urban tahunan masing-masing provinsi selama periode 2014–2025. Hasil evaluasi model regresi disajikan pada **Tabel 3**, sedangkan pola perkembangan luas urban tahunan masing-masing provinsi ditunjukkan pada **Gambar 7**.

Tabel 3. Hasil Evaluasi Regresi Perkembangan Luas Urban Tahun 2014–2025

Wilayah	<i>Slope</i> km ² /tahun	R^2	RMSE km ²
DKI Jakarta	0.45	0.92	0.46
Jawa Barat	206.65	0.96	133.25
Jawa Tengah	208.64	0.94	177.47
Daerah Istimewa	31.6	0.89	37.35
Yogyakarta			
Jawa Timur	287.07	0.97	169.41
Banten	66.42	0.97	38.65



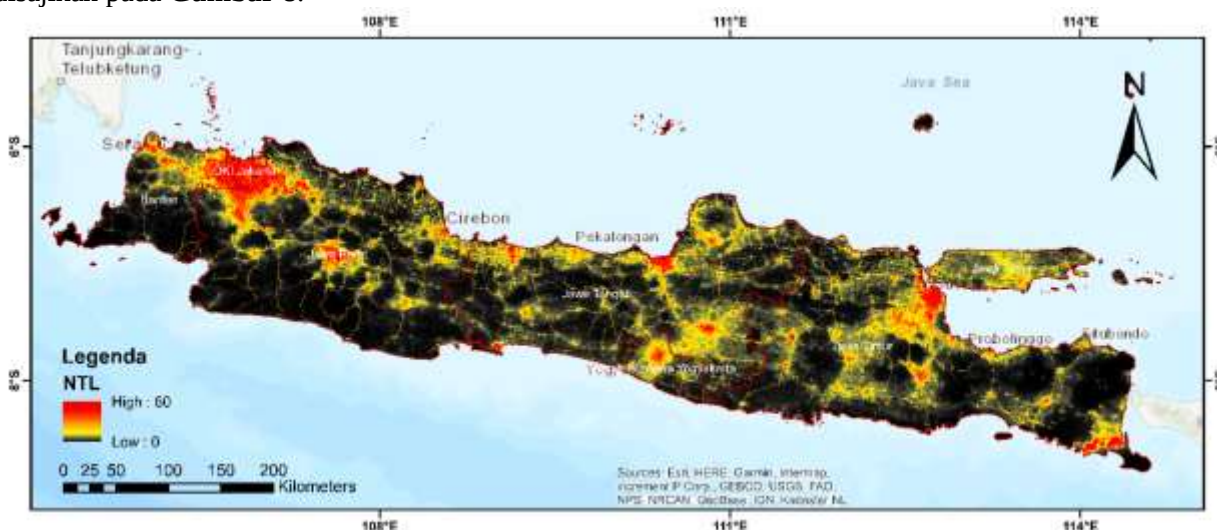
Gambar 7. Perkembangan Urban 2014-2025

Berdasarkan **Tabel 3** dan **Gambar 7**, seluruh provinsi di Pulau Jawa menunjukkan kecenderungan peningkatan luas wilayah urban selama periode penelitian. Jawa Timur, Jawa Barat, dan Jawa Tengah merupakan provinsi dengan perkembangan urban paling signifikan, yang ditunjukkan oleh luas urban yang terus meningkat dari tahun ke tahun. Jawa Timur memiliki laju pertumbuhan urban tertinggi dengan nilai *slope* sebesar 287,07 km²/tahun, diikuti oleh Jawa Tengah sebesar 208,64 km²/tahun dan Jawa Barat sebesar 206,65 km²/tahun. Hasil tersebut menunjukkan bahwa ekspansi wilayah urban selama periode penelitian relatif lebih intensif terjadi pada ketiga provinsi tersebut. Dari sisi performa model, sebagian besar provinsi menunjukkan nilai koefisien determinasi yang tinggi dengan rentang 0,89–0,97. Jawa Timur dan Banten memiliki nilai R^2 tertinggi sebesar 0,97, sedangkan Jawa Barat sebesar 0,96. Nilai tersebut menunjukkan bahwa model regresi linear mampu merepresentasikan pola perkembangan urban dengan baik.

Selain itu, nilai RMSE yang relatif rendah pada seluruh provinsi menunjukkan bahwa tingkat kesalahan model masih berada dalam batas yang dapat diterima. Berbeda dengan provinsi lainnya, DKI Jakarta menunjukkan nilai *slope* yang paling rendah, yaitu 0,45 km²/tahun. Kondisi ini sejalan dengan pola pada Gambar 7 yang memperlihatkan bahwa luas urban DKI Jakarta relatif stabil selama periode penelitian. Hal tersebut dapat dikaitkan dengan keterbatasan lahan yang tersedia karena sebagian besar wilayah telah berkembang menjadi kawasan terbangun sejak awal periode pengamatan. Sementara itu, Daerah Istimewa Yogyakarta menunjukkan pertumbuhan urban yang lebih rendah dibandingkan Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Jawa Timur, namun tetap memperlihatkan tren peningkatan yang konsisten dengan nilai *slope* sebesar 31,6 km²/tahun.

3.3 Prediksi Perkembangan Wilayah Tahun 2045

Setelah model regresi linear berbasis piksel diterapkan pada data VIIRS NTL bulanan periode 2014–2025, diperoleh prediksi distribusi spasial NTL Pulau Jawa pada tahun 2045. Hasil prediksi tersebut disajikan pada **Gambar 8**.

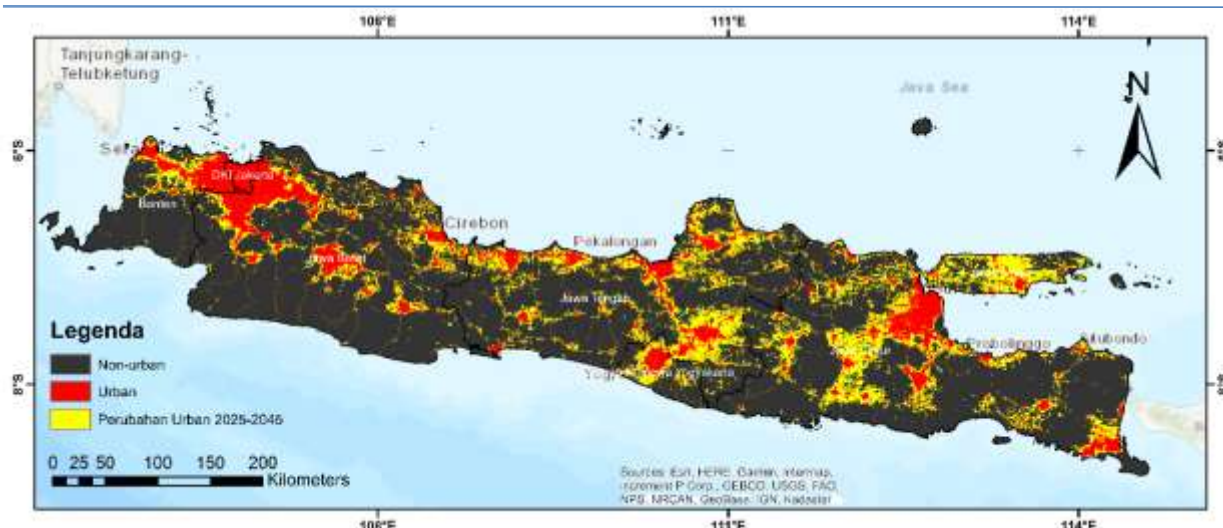


Gambar 8. Prediksi NTL Pulau Jawa 2045

Gambar 8 menunjukkan hasil prediksi distribusi spasial *Night-Time Light* (NTL) di Pulau Jawa pada tahun 2045. Secara umum, wilayah dengan intensitas NTL tinggi masih terkonsentrasi pada pusat-pusat perkotaan utama, seperti kawasan DKI Jakarta dan sekitarnya, koridor perkotaan Jawa Barat bagian utara, kawasan perkotaan Jawa Tengah, Daerah Istimewa Yogyakarta, serta wilayah metropolitan Surabaya dan sekitarnya. Selain itu, peningkatan intensitas cahaya malam juga terlihat pada beberapa wilayah yang sebelumnya memiliki nilai NTL relatif rendah, menunjukkan adanya potensi perkembangan aktivitas perkotaan pada masa mendatang. Pola spasial hasil prediksi menunjukkan bahwa perkembangan NTL cenderung mengikuti koridor perkotaan dan jaringan transportasi utama yang telah berkembang selama periode pengamatan. Hal ini mengindikasikan bahwa pusat-pusat pertumbuhan yang telah terbentuk pada tahun 2025 diperkirakan tetap menjadi penggerak utama perkembangan wilayah perkotaan hingga tahun 2045.

Nilai NTL hasil prediksi tahun 2045 selanjutnya diklasifikasikan menggunakan nilai *threshold* 5 nW/cm²/sr untuk menghasilkan peta prediksi wilayah urban. Selain menunjukkan kondisi urban tahun 2045, peta ini juga digunakan untuk mengidentifikasi area yang diperkirakan mengalami perubahan dari non-urban menjadi urban selama periode 2025–2045. Hasil klasifikasi tersebut ditunjukkan **Gambar 9**.

Gambar 9 menunjukkan distribusi wilayah urban hasil prediksi tahun 2045 beserta area yang diperkirakan mengalami perubahan urban selama periode 2025–2045. Wilayah berwarna merah menunjukkan kawasan yang telah berstatus urban pada tahun 2025 dan diperkirakan tetap menjadi kawasan urban pada tahun 2045, sedangkan wilayah berwarna kuning menunjukkan area yang diprediksi berubah dari non-urban menjadi urban. Secara spasial, perkembangan urban diperkirakan terjadi pada wilayah yang berada di sekitar pusat-pusat pertumbuhan eksisting dan koridor perkotaan utama. Pola tersebut menunjukkan bahwa ekspansi wilayah urban cenderung berkembang secara kontigu atau menyatu dengan kawasan urban yang telah terbentuk sebelumnya.



Gambar 9. Peta Perubahan Urban Pulau Jawa Hingga 2045

Perubahan urban yang cukup luas terlihat pada bagian barat Pulau Jawa, koridor utara Jawa Tengah, kawasan sekitar Daerah Istimewa Yogyakarta, serta wilayah Jawa Timur yang terhubung dengan kawasan metropolitan Surabaya. Hasil prediksi juga menunjukkan bahwa perkembangan wilayah urban tidak hanya terjadi pada kawasan metropolitan utama, tetapi turut meluas ke wilayah penyangga dan kota-kota menengah di sekitarnya. Pola ini mengindikasikan bahwa pusat-pusat pertumbuhan yang telah berkembang selama periode observasi diperkirakan tetap menjadi penggerak utama ekspansi wilayah perkotaan hingga tahun 2045.

Untuk mengkuantifikasi hasil prediksi perkembangan wilayah urban, dilakukan perbandingan luas urban antara kondisi tahun 2025 dan hasil prediksi tahun 2045. Perhitungan dilakukan berdasarkan jumlah piksel urban hasil klasifikasi yang dikalikan dengan luas spasial piksel VIIRS. Hasil perbandingan luas urban disajikan pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Perbandingan Luas Urban Pulau Jawa Tahun 2025 dan 2045

Parameter	Nilai
2025	15.040 km ²
2045	37.799km ²
Perubahan	22.759 km ²
Pertumbuhan	151,33%

Berdasarkan **Tabel 4**, luas wilayah urban di Pulau Jawa diperkirakan meningkat dari 15.040 km² pada tahun 2025 menjadi 37.799 km² pada tahun 2045. Dengan demikian, terjadi penambahan luas urban sebesar 22.759 km² selama periode prediksi. Jika dibandingkan dengan kondisi tahun 2025, luas wilayah urban diperkirakan mengalami pertumbuhan sebesar 151,33%.

Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa tren perkembangan wilayah perkotaan yang teridentifikasi dari data VIIRS *Night-Time Light* periode 2014–2025 diperkirakan akan terus berlanjut hingga tahun 2045. Secara spasial, pertumbuhan urban cenderung mengikuti pola perkembangan kawasan perkotaan yang telah ada sebelumnya, sehingga menghasilkan ekspansi urban yang semakin luas pada berbagai wilayah di Pulau Jawa. Temuan ini mengindikasikan bahwa aktivitas manusia dan perkembangan kawasan terbangun diperkirakan akan terus meningkat seiring dengan pertumbuhan wilayah perkotaan pada masa mendatang.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menganalisis dinamika *Night-Time Light* (NTL) di Pulau Jawa menggunakan data VIIRS *Day/Night Band* (DNB) VCMSCFCFG periode 2014–2025. Hasil analisis *time-series* menunjukkan adanya tren peningkatan intensitas cahaya malam dengan nilai slope sebesar 0,132 nW/cm²/sr/tahun, koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,72, dan RMSE sebesar 0,286 nW/cm²/sr. Secara spasial, peningkatan intensitas NTL terlihat pada kawasan metropolitan utama, koridor perkotaan, serta wilayah penyangga yang menunjukkan meningkatnya aktivitas manusia dan perkembangan wilayah perkotaan di Pulau Jawa.

Hasil ekstraksi urban menggunakan nilai *threshold* 5 nW/cm²/sr menunjukkan bahwa luas wilayah urban di Pulau Jawa meningkat dari 6.542 km² pada tahun 2014 menjadi 15.040 km² pada tahun 2025. Perkembangan urban terjadi secara bertahap di seluruh provinsi dengan laju pertumbuhan terbesar ditemukan di Jawa Timur, Jawa Tengah, dan Jawa Barat. Hasil regresi luas urban menunjukkan nilai *slope* sebesar 800 km²/tahun dengan *R*² sebesar 0,96 dan RMSE sebesar 497,2 km², yang menunjukkan bahwa model mampu merepresentasikan tren perkembangan urban dengan baik.

Berdasarkan model regresi linear berbasis piksel, luas wilayah urban Pulau Jawa pada tahun 2045 diproyeksikan mencapai 37.799 km² atau meningkat sebesar 22.759 km² dibandingkan kondisi tahun 2025. Secara spasial, ekspansi urban diperkirakan berkembang di sekitar kawasan urban eksisting, koridor perkotaan utama, dan wilayah penyangga kota-kota besar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa data VIIRS *Night-Time Light* memiliki potensi yang baik untuk memantau dinamika perkembangan wilayah perkotaan serta mendukung analisis dan prediksi perkembangan wilayah secara spasial dan temporal.

5. Daftar Pustaka

- [1] United Nations, "World Urbanization Prospects 2018". New York, NY, USA: Department of Economic and Social Affairs, 2019.
- [2] Badan Pusat Statistik, "Statistik Indonesia 2024". Jakarta, Indonesia: BPS RI, 2024.
- [3] J. R. Jensen, *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*, 4th ed. Boston, MA, USA: Pearson, 2015.
- [4] C. D. Elvidge, K. E. Baugh, M. Zhizhin, and F. C. Hsu, "Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping nighttime lights," *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, vol. 35, pp. 62–69, 2013.
- [5] X. Li and Y. Zhou, "Urban mapping using DMSP/OLS stable nighttime light: a review," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 38, no. 21, pp. 6030–6046, 2017, doi: 10.1080/01431161.2016.1274457.
- [6] C. D. Elvidge et al., "VIIRS night-time lights," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 38, no. 21, pp. 5860–5879, 2017, doi: 10.1080/01431161.2016.1242228.
- [7] N. Levin and Q. Zhang, "A global analysis of factors controlling VIIRS nighttime light levels from densely populated areas," *Remote Sensing of Environment*, vol. 190, pp. 366–382, 2017, doi: 10.1016/j.rse.2016.12.001.
- [8] M. Zhao, Y. Zhou, X. Li, W. Cheng, C. Zhou, T. Ma, M. Li, and K. Huang, "Mapping Urban Dynamics (1992–2018) in Southeast Asia Using Consistent Nighttime Light Data from DMSP and VIIRS," *Remote Sensing of Environment*, vol. 248, Art. no. 111980, 2020, doi: 10.1016/j.rse.2020.111980.
- [9] X. Li, Y. Zhou, X. Chen, and X. Cao, "Mapping urban extent based on night-time light data: a review," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 41, no. 8, pp. 2785–2808, 2020, doi: 10.1080/01431161.2019.1677960.
- [10] N. Levin et al., "Remote sensing of night lights: A review and an outlook for the future," *Remote Sensing of Environment*, vol. 237, Art. no. 111443, 2020, doi: 10.1016/j.rse.2019.111443.
- [11] A. Gorelick et al., "Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone," *Remote Sensing of Environment*, vol. 202, pp. 18–27, 2017, doi: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
- [12] D. C. Montgomery, E. A. Peck, and G. G. Vining, *Introduction to Linear Regression Analysis*, 5th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2012.
- [13] Y. Zhou, S. J. Smith, C. D. Elvidge, K. Zhao, A. Thomson, and M. Imhoff, "A cluster-based method to map urban area from DMSP/OLS nightlights," *Remote Sensing of Environment*, vol. 147, pp. 173–185, 2014, doi: 10.1016/j.rse.2014.03.004.
- [14] Y. Dou, Z. Liu, C. He, and H. Yue, "Urban Land Extraction Using VIIRS Nighttime Light Data: An Evaluation of Three Popular Methods," *Remote Sensing*, vol. 9, no. 2, Art. no. 175, 2017, doi: 10.3390/rs9020175.
- [15] T. Ma, "An Estimate of the Pixel-Level Connection between Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Day/Night Band (VIIRS DNB) Nighttime Lights and Land Features across China," *Remote Sensing*, vol. 10, no. 5, Art. no. 723, 2018, doi: 10.3390/rs10050723.