



PEMODELAN SPASIAL UNTUK PREDIKSI PERUBAHAN PENGGUNAAN LAHAN DI KABUPATEN KENDAL, PROVINSI JAWA TENGAH

SPATIAL MODELING FOR LAND USE CHANGE PREDICTION IN KENDAL REGENCY, CENTRAL JAVA PROVINCE

Albertus Erico Jerry Krisna Nugroho^{a*}, Imam Mahdi^a, Siska Dwi Utami^a, Pipit Wijayanti^a, Rita Noviani^a

^aMagister Pendidikan Geografi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Sebelas Maret; Kota Surakarta, Indonesia

*Korespondensi: albertusericojerry@student.uns.ac.id

Info Artikel:

- Artikel Masuk: 13 Januari 2025
- Artikel diterima: 30 Juni 2025
- Tersedia Online: 30 Juni 2025

ABSTRAK

Dinamika perubahan penggunaan lahan akibat perkembangan wilayah di Kabupaten Kendal menimbulkan tantangan serius terhadap perencanaan tata ruang dan keberlanjutan lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan penggunaan lahan pada periode 2019 hingga 2024 serta memprediksi distribusi penggunaan lahan pada tahun 2039 melalui pendekatan pemodelan spasial. Metode yang digunakan adalah Sistem Informasi Geografis dan model Cellular Automata–Markov Chain untuk mengklasifikasikan serta memproyeksikan transisi penggunaan lahan. Klasifikasi dilakukan dengan metode supervised classification berbasis maximum likelihood, dan evaluasi akurasi dilakukan menggunakan overall accuracy dan koefisien kappa. Model prediksi menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi dengan nilai kappa sebesar 0,83. Hasil analisis menunjukkan adanya peningkatan signifikan pada lahan terbangun yang diproyeksikan mencapai 39% dari total luas wilayah pada tahun 2039, sedangkan lahan produktif seperti sawah dan tambak diperkirakan mengalami penurunan. Temuan ini membuktikan efektivitas pemodelan spasial dalam memberikan informasi berbasis data untuk mengantisipasi tren penggunaan lahan di masa depan. Penelitian ini memberikan dasar ilmiah bagi perumusan kebijakan pengelolaan lahan yang berkelanjutan di wilayah dengan pertumbuhan menengah seperti Kabupaten Kendal.

Kata kunci: Automata Seluler, Geospasial, Perubahan Penggunaan Lahan, Prediksi

ABSTRACT

The dynamics of land use change due to regional development in Kendal Regency pose serious challenges to spatial planning and environmental sustainability. This study aims to analyze land use changes from 2019 to 2024 and predict land use distribution in 2039 through a spatial modeling approach. The methods used are Geographic Information Systems and the Cellular Automata–Markov Chain model to classify and project land use transitions. Classification is performed using supervised classification based on maximum likelihood, and accuracy evaluation is conducted using overall accuracy and the Kappa coefficient. The prediction model demonstrates high accuracy with a Kappa value of 0.83. The analysis results indicate a significant increase in built-up land, projected to reach 39% of the total area by 2039, while productive land such as rice fields and ponds is expected to decrease. These findings demonstrate the effectiveness of spatial modeling in providing data-driven insights to anticipate future land use trends. This research provides a scientific basis for the formulation of sustainable land management policies in areas with moderate growth, such as Kendal Regency.

Keywords: Cellular Automata, Geospatial, Land Use Change, Prediction

1. PENDAHULUAN

Urbanisasi merupakan fenomena global yang terus meningkat, terutama di kawasan negara berkembang seperti Indonesia yang ditandai dengan ekspansi wilayah terbangun secara masif serta perubahan pola lanskap secara signifikan. Perubahan tersebut tidak hanya mencerminkan pertumbuhan fisik kota, tetapi juga membawa dampak besar terhadap struktur tata ruang, keberlanjutan lingkungan, dan distribusi aktivitas sosial ekonomi (Maheng et al., 2021). Proses urbanisasi yang pesat sering kali tidak diiringi dengan perencanaan yang terintegrasi, sehingga menimbulkan tekanan terhadap kawasan *hinterland* dan mendorong perubahan penggunaan lahan di wilayah pinggiran (Jatayu et al., 2022). Selain itu, perkembangan bentuk kota (*urban form*) yang tidak terkendali telah menyebabkan degradasi fungsi ekologis lahan dan peningkatan kerentanan terhadap bencana lingkungan (Kar et al., 2018). Kajian-kajian terbaru menunjukkan bahwa penggunaan teknologi spasial seperti sistem informasi geografis dan pemodelan prediktif menjadi penting untuk memahami dinamika perubahan lahan serta dampaknya terhadap pembangunan wilayah (Rimal et al., 2018). Dalam konteks Indonesia, pembangunan infrastruktur yang masif dan transformasi spasial yang cepat juga berkontribusi terhadap perubahan struktur wilayah dan disparitas pertumbuhan regional (Jatayu et al., 2024). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang komprehensif dalam mengkaji dan memodelkan perubahan penggunaan lahan sebagai dasar dalam mendukung kebijakan tata ruang yang berkelanjutan terutama di wilayah Indonesia yang terus mengalami perkembangan struktur bentuk kota nya.

Kabupaten Kendal di Provinsi Jawa Tengah, merupakan salah satu wilayah strategis yang mengalami tekanan tinggi dalam perubahan penggunaan lahan akibat pesatnya perkembangan sektor industri, permukiman, dan infrastruktur (Wijaya & Tjahjono, 2024). Perubahan ini terutama dipicu oleh pertumbuhan kawasan strategis seperti Kendal Industrial Park (KIP), yang berperan sebagai pusat pengembangan ekonomi wilayah dan menjadi daya tarik investasi industri (Baihaqi et al., 2019). Berdasarkan data Badan Pusat Statistik Kabupaten Kendal Dalam Angka Tahun 2024 pada presentase penggunaan luas tanah terbagi atas Tanah Sawah (23,60%), Tanah Tegalan (22,28%), Hutan (16,23%), Perkebunan (7,85), lahan terbangun (Permukiman, Industri, Fasilitas umum dan sosial) (25,14%), dan lainnya (4,9%) (Badan Pusat Statistik Kabupaten Kendal, 2024). Perubahan penggunaan lahan di Kabupaten Kendal terus mengalami dinamika terutama pada penggunaan lahan Tanah Sawah dan Tanah Tegalan yang terus mengalami penurunan luas wilayah dari tahun 2021 dan tahun-tahun sebelumnya (Salabim, 2021). Penyusutan lahan pertanian ini tidak hanya berdampak pada sektor agraris, tetapi juga menunjukkan intensitas perubahan ruang yang cukup tinggi dalam rentang waktu yang singkat. Perubahan ini diperkuat oleh peningkatan jumlah penduduk, mobilitas masyarakat, serta pembangunan aksesibilitas transportasi seperti jalan tol yang menghubungkan wilayah Kendal dengan kota-kota besar di sekitarnya (Hidayah et al., 2023).

Berbagai studi terdahulu telah menganalisis dinamika perubahan penggunaan lahan dengan pendekatan spasial, baik pada skala lokal maupun global. Sadewo & Buchori (2018), misalnya, memanfaatkan model *Cellular Automata* (CA) untuk memproyeksikan perubahan lahan di sekitar kawasan industri Kendal, dan menunjukkan efektivitasnya dalam memodelkan pola urbanisasi yang pesat. Nabila et al (2025), turut menegaskan pentingnya evaluasi kesesuaian lahan untuk kawasan industri di Kabupaten Kendal melalui Sistem Informasi Geografis (SIG), terutama dalam konteks pembangunan wilayah yang adaptif terhadap potensi dan risiko lingkungan. Di tingkat internasional, Kumar & Sharma (2022), menunjukkan bahwa integrasi teknologi SIG dan pemodelan spasial berbasis CA terbukti mampu menghasilkan proyeksi perubahan lahan yang akurat, terutama di wilayah yang mengalami tekanan pembangunan tinggi. Hal serupa diungkapkan Aburas et al (2019), yang menyatakan bahwa pendekatan pemodelan spasial sangat berguna untuk menganalisis pola perubahan lahan secara dinamis dalam konteks perencanaan wilayah. van Vliet et al (2016), juga menekankan bahwa pemodelan berbasis CA memberikan gambaran realistis terhadap tekanan pembangunan di wilayah urban dan peri-urban. Selain itu, studi di wilayah metropolitan Indonesia seperti Semarang dan di Kota Jakarta menunjukkan bahwa *urban sprawl* berdampak pada peningkatan suhu permukaan melalui fenomena *urban heat island*, yang berkorelasi erat

dengan perubahan penggunaan lahan (Sejati et al., 2019; Siswanto et al., 2023). Temuan Dewa et al (2025), di Yogyakarta mengungkap bahwa kompleksitas geomorfologi turut memengaruhi variasi spasial ekspansi kota, sehingga penting untuk mempertimbangkan karakteristik biofisik dalam permodelan spasial jangka panjang. Oleh karena itu, integrasi antara teknologi spasial, pemodelan prediktif, dan karakteristik wilayah menjadi krusial dalam memformulasikan kebijakan pengelolaan tata ruang yang berkelanjutan. Meskipun berbagai studi telah dilakukan terkait dinamika perubahan penggunaan lahan menggunakan pendekatan spasial dan model prediktif, masih terdapat kesenjangan penelitian khususnya dalam konteks lokal Kabupaten Kendal. Sebagian besar kajian sebelumnya berfokus pada wilayah metropolitan besar atau kawasan industri secara umum, namun belum banyak yang secara spesifik mengevaluasi dinamika penggunaan lahan di wilayah dengan tekanan pembangunan yang berkembang pesat seperti Kendal, yang kini menjadi salah satu kawasan strategis nasional. Selain itu, belum banyak kajian yang mengintegrasikan data spasial terkini dengan pendekatan pemodelan *Cellular Automata* dalam memproyeksikan perubahan lahan jangka menengah hingga panjang secara akurat di tingkat kabupaten. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk membangun model spasial berbasis *Cellular Automata* guna memprediksi perubahan penggunaan lahan di Kabupaten Kendal, Jawa Tengah, serta mengidentifikasi pola perkembangan wilayah yang terjadi. Kontribusi utama dari penelitian ini terletak pada penerapan integratif antara analisis spasial dan pemodelan prediktif yang berbasis data aktual, yang diharapkan dapat menjadi rujukan bagi pengambilan keputusan dalam perencanaan tata ruang dan pengelolaan lahan berkelanjutan di daerah yang mengalami pertumbuhan cepat. Temuan dari studi ini juga berpotensi memperkaya kajian literatur mengenai urbanisasi dan perubahan penggunaan lahan di wilayah non-metropolitan Indonesia.

Prediksi perubahan penggunaan lahan dalam penelitian ini dilakukan menggunakan kombinasi model *Cellular Automata* dan *Markov Chain* (CA-Markov) berbasis raster yang tersedia melalui modul *Land Change Modeler* (LCM) pada perangkat lunak TerrSet. Model ini dipilih karena kemampuannya dalam menangkap dinamika spasial dan temporal perubahan penggunaan lahan berdasarkan tren historis dan kemungkinan transisi antar kelas lahan (Qacami et al., 2023). Pemodelan dalam penelitian ini menggunakan dua peta penggunaan lahan tahun 2019 dan 2024 sebagai dasar proyeksi hingga tahun 2039. Rentang waktu 15 tahun dipilih secara deliberatif untuk menangkap dinamika jangka menengah yang relevan dengan laju pertumbuhan wilayah Kendal yang cenderung moderat. Pemilihan periode ini juga mempertimbangkan kebutuhan perencanaan tata ruang jangka panjang yang sesuai dengan arah pembangunan daerah dan potensi transformasi wilayah akibat pengembangan kawasan industri dan infrastruktur di masa depan. Model CA-Markov telah banyak digunakan dalam berbagai studi untuk meramalkan pola perubahan lahan dalam konteks yang berbeda-beda. Misalnya, Muhammad et al (2022), menggunakan pendekatan serupa untuk memprediksi perubahan penggunaan lahan di Daerah Aliran Sungai Yangtze bagian tengah di Tiongkok, menunjukkan bahwa model ini efektif dalam memperkirakan skenario pembangunan berkelanjutan. Di wilayah semi-arid seperti Asir, Arab Saudi, Alqadhi et al (2021), memanfaatkan algoritma *multi-layer perceptron neural network* (MLP-NN) untuk prediksi perubahan lahan selama dekade mendatang, dan menunjukkan bahwa pendekatan berbasis *machine learning* mampu meningkatkan akurasi klasifikasi. Pendekatan CA-Markov juga diterapkan secara luas di kawasan Asia Tenggara. Hasil penelitian Permatasari et al (2021), menggunakannya untuk memetakan prediksi tutupan lahan di Penajam Paser Utara, Kalimantan Timur, sedangkan Kelly-Fair et al (2022), menyoroti dinamika perubahan lahan di Semarang dalam kaitannya dengan indikator Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs). Penelitian Ambarwulan et al (2023) yang mengkaji DAS Cisadane juga menekankan pentingnya pemodelan spasial multiskenario untuk mengukur dampak terhadap deforestasi dan ketahanan pangan di Indonesia. Penelitian-penelitian tersebut memperkuat validitas penggunaan pendekatan CA-Markov dalam konteks prediksi lahan di wilayah tropis dan subtropis.

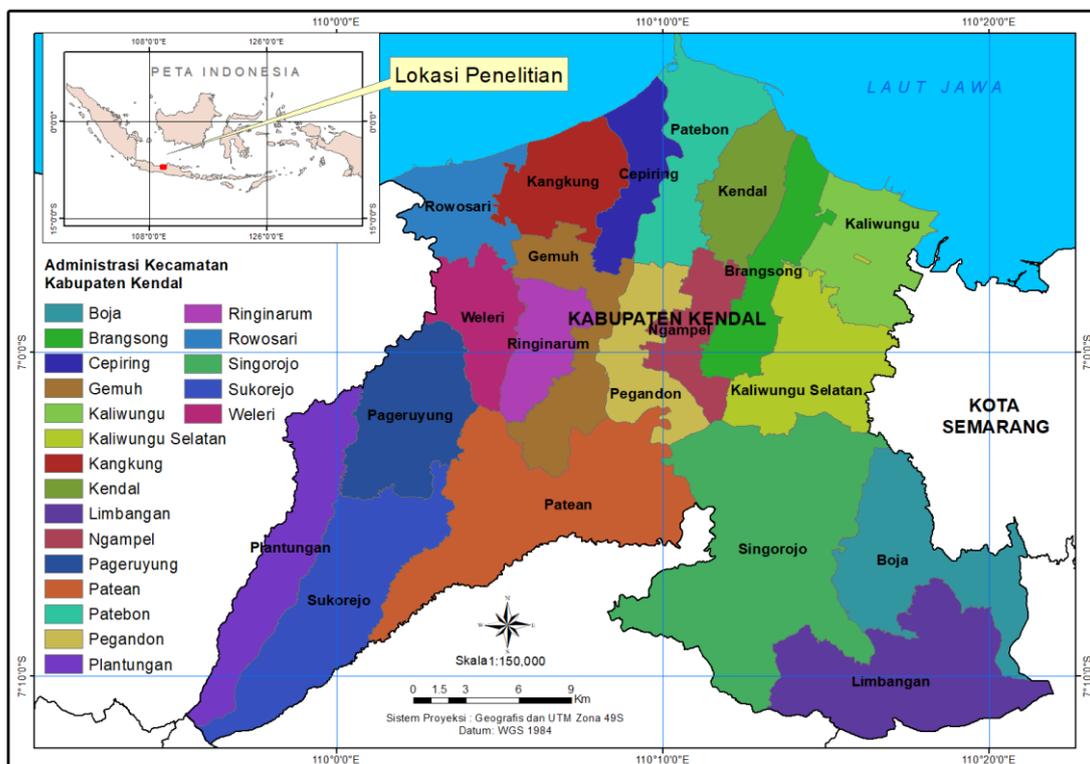
Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dinamika perubahan penggunaan lahan di Kabupaten Kendal pada periode 2019 hingga 2024, serta membangun model prediksi perubahan penggunaan lahan hingga tahun 2039 dengan menggunakan pendekatan berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) dan pemodelan *Cellular Automata*. Pemilihan rentang waktu tersebut disesuaikan dengan

karakteristik pertumbuhan Kabupaten Kendal yang relatif moderat, namun menunjukkan potensi perkembangan wilayah akibat adanya dorongan pembangunan kawasan industri dan infrastruktur. Melalui pendekatan ini, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan informasi spasial yang akurat dan prospektif, yang dapat digunakan sebagai dasar perumusan kebijakan pengendalian alih fungsi lahan dan penguatan perencanaan tata ruang yang lebih adaptif, responsif terhadap dinamika wilayah, serta mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan di Kabupaten Kendal.

2. DATA DAN METODE

2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini berlokasi di Kabupaten Kendal, Provinsi Jawa Tengah, yang secara geografis terletak pada koordinat $109^{\circ}40' - 110^{\circ}18'$ Bujur Timur dan $6^{\circ}32' - 7^{\circ}24'$ Lintang Selatan. Secara administratif, Kabupaten Kendal berbatasan dengan Laut Jawa di sebelah utara, Kota Semarang dan Kabupaten Semarang di sebelah timur, Kabupaten Temanggung di sebelah selatan, serta Kabupaten Batang di sebelah barat. Wilayah ini terdiri dari 20 kecamatan, antara lain Kecamatan Kendal, Plantungan, Sukorejo, Pageruyung, Patean, Singorojo, Limbangan, Boja, Kaliwungu, Kaliwungu Selatan, Brangsong, Pegandon, Ngampel, Gemuh, Ringinarum, Weleri, Rowosari, Kangkung, Cepiring, dan Patebon sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Pemilihan Kabupaten Kendal sebagai lokasi penelitian didasarkan pada karakteristik wilayahnya yang sedang mengalami transformasi spasial signifikan seiring dengan pengembangan kawasan industri Kendal Industrial Park (KIK) dan pembangunan infrastruktur strategis lainnya. Selain itu, Kendal merupakan wilayah dengan laju urbanisasi yang relatif moderat namun menunjukkan tren pertumbuhan kawasan terbangun yang konsisten dalam lima tahun terakhir. Kondisi ini menjadikan Kendal sebagai studi kasus yang relevan untuk mengkaji dinamika penggunaan lahan, sekaligus mengembangkan model prediksi spasial yang dapat digunakan sebagai alat bantu perencanaan tata ruang berbasis data spasial yang berkelanjutan.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

2.2. Sumber Data

Berbagai jenis data yang digunakan dalam penelitian ini baik data spasial maupun non-spasial, yang diperoleh dari berbagai sumber terpercaya. Data tersebut meliputi informasi penggunaan lahan, data administratif, serta data penunjang lainnya yang dibutuhkan dalam proses analisis dan pemodelan yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Bahan dan Sumber Data Penelitian

Bahan Penelitian	Sumber Data
Citra Satelit Landsat 8 OLI	USGS (United States Geological Survey)
Citra Satelit Sentinel-2	ESA (European Space Agency)
Shapefile Administrasi Kabupaten Kendal	Ina-Geoportal
Shapefile jaringan jalan	Ina-Geoportal
Shapefile Penggunaan Lahan, kemiringan lereng, dan kepadatan penduduk	Ina-Geoportal
Data Demografi	Kabupaten Kendal Dalam Angka 2024

2.3. Metode dan Teknik Analisis

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif spasial dengan pemanfaatan Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk menganalisis perubahan penggunaan lahan di Kabupaten Kendal pada periode tahun 2019 hingga 2024, serta menyusun model prediksi perubahan penggunaan lahan hingga tahun 2039. Proses analisis dilakukan secara bertahap mulai dari pengumpulan data spasial, pengolahan citra, klasifikasi tutupan lahan, hingga pemodelan prediktif berbasis Cellular Automata (Tariq & Mumtaz, 2023).

2.3.1. Analisis Klasifikasi Penggunaan Lahan

Analisis klasifikasi penggunaan lahan dilakukan terhadap citra satelit tahun 2019 dan 2024 menggunakan metode klasifikasi terawasi (*supervised classification*) dengan algoritma *Maximum Likelihood Classifier (MLC)*, yang dikenal memiliki akurasi tinggi dalam pemetaan penutup lahan multikategori (Tariq & Mumtaz, 2023). Proses ini diawali dengan koreksi geometrik dan radiometrik, kemudian dilanjutkan dengan pembuatan training sample berdasarkan referensi lapangan dan citra resolusi tinggi dari Google Earth. Hasil klasifikasi dievaluasi menggunakan *confusion matrix*, yang menghasilkan dua ukuran utama seperti *Overall Accuracy (OA)* dan *Kappa Coefficient (κ)*. Alat analisis utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi perangkat lunak QGIS dan ArcGIS yang digunakan untuk pemrosesan, digitasi, dan klasifikasi tutupan lahan, serta pengolahan dan analisis spasial lainnya. Proses klasifikasi citra dilakukan dengan metode *supervised classification* berbasis algoritma *Maximum Likelihood Classification (MLC)* untuk menghasilkan peta penggunaan lahan tahun 2019 dan 2024. Validasi akurasi dilakukan menggunakan metode *confusion matrix* dan nilai kappa untuk memastikan keandalan klasifikasi (Więckowska et al., 2022). Rumus untuk menghitung *Overall Accuracy (OA)* dan *Kappa Coefficient (K)* pada penelitian ini kemudian dihitung untuk mendapatkan hasil klasifikasi yang kemudian digunakan sebagai input dalam analisis prediktif. Nilai Kappa yang mendekati 1 menunjukkan klasifikasi sangat baik. Evaluasi akurasi ini mengacu pada standar klasifikasi spasial *Cohen’s Kappa Coefficient* (Więckowska et al., 2022).

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ii}}{N} \times 100\% \dots \dots \dots (1)$$

Dimana X_{ii} merupakan jumlah piksel yang diklasifikasikan dengan benar untuk kelas ke- i ; N merupakan total jumlah piksel yang di uji.

$$K = \frac{Po - Pe}{1 - Pe} \dots\dots\dots(2)$$

Po merupakan Proporsi observasi yang diklasifikasikan dengan benar (OA); Pe merupakan Proporsi kemungkinan klasifikasi benar secara acak.

Tabel 2. Koefisien Kappa

Nilai Koefisien Kappa (K)	Tingkat Akurasi Klasifikasi
0,00 – 0,20	Sangat Rendah
0,21 – 0,41	Rendah
0,41 – 0,60	Sedang
0,61 – 0,80	Tinggi
0,81 – 1,00	Sangat Tinggi

Sumber: Więckowska et al., 2022

Peneliti memperjelas proses klasifikasi penggunaan lahan dalam penelitian ini, disusun tabel definisi operasional yang mencantumkan kriteria identifikasi masing-masing kelas penggunaan lahan berdasarkan karakteristik visual citra dan referensi interpretasi lapangan. Tabel ini menjadi acuan utama dalam proses *training sample* dan pengelompokan kelas dalam analisis spasial. Berdasarkan Tabel 3, setelah proses pengklasifikasian penggunaan lahan dilakukan analisis spasial perubahan penggunaan lahan. Analisis perubahan penggunaan lahan dalam penelitian ini dilakukan melalui serangkaian tahapan yang mencakup klasifikasi citra, validasi akurasi, analisis spasial, dan pemodelan prediktif. Pendekatan yang digunakan bersifat kuantitatif dan spasial dengan berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG). Dua tahapan utama dalam analisis adalah: (1) analisis perubahan penggunaan lahan periode 2019–2024; dan (2) pemodelan prediksi perubahan penggunaan lahan hingga tahun 2039.

Tabel 3. Definisi Operasional dan Kriteria Identifikasi Klasifikasi Penggunaan Lahan

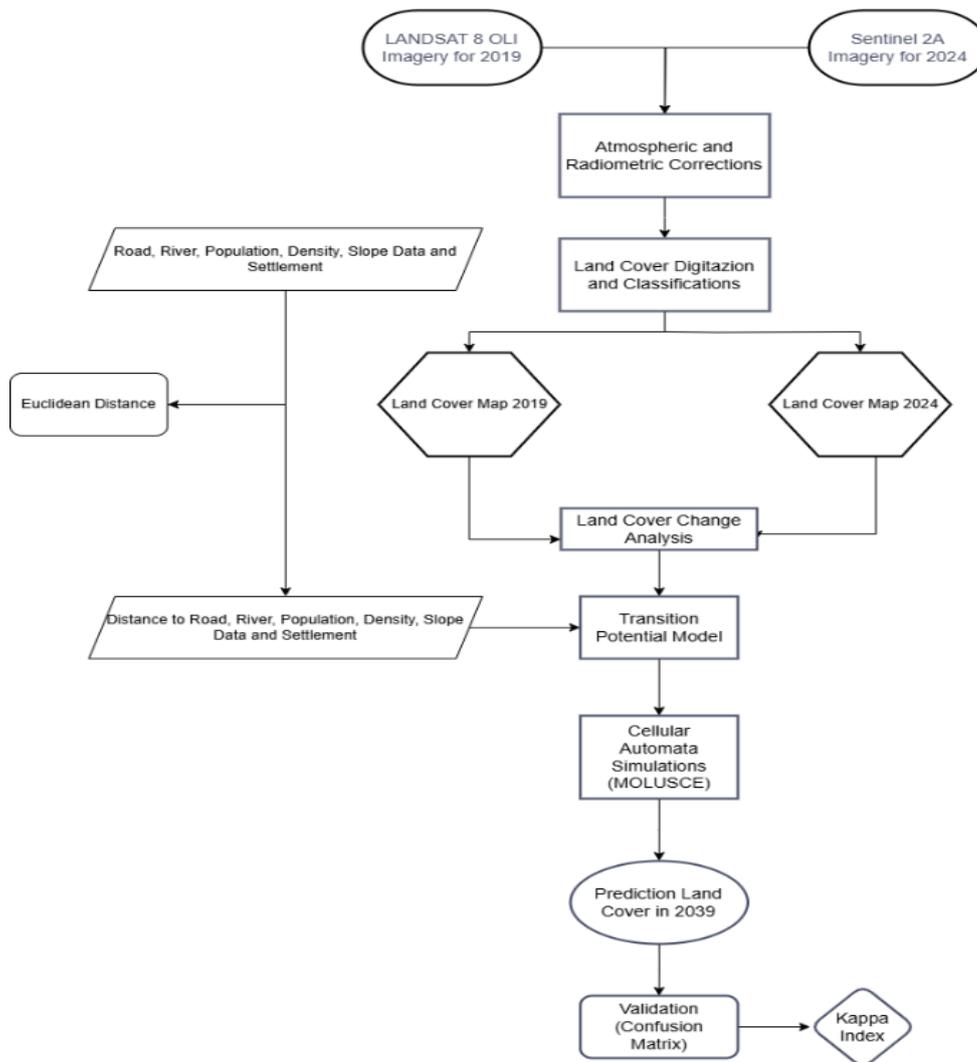
Jenis Penggunaan Lahan	Definisi	Kriteria Identifikasi
Permukiman	Wilayah yang digunakan untuk tempat tinggal, fasilitas sosial, dan aktivitas urban lainnya.	Pola geometris teratur, rona cerah/abu-abu, reflektansi tinggi pada kanal merah dan NIR.
Sawah	Lahan budidaya tanaman padi yang tergenang air secara berkala.	Reflektan rendah saat genangan, tinggi saat panen, perubahan musiman tinggi serta berada di dataran rendah.
Tambak	Kolam-kolam buatan untuk budidaya perikanan di wilayah pesisir atau rawa.	Pola kotak berisi air, reflektansi tinggi pada kanal biru dan hijau, biasanya dekat garis pantai atau sungai.
Ladang	Lahan kering untuk pertanian semusim, palawija, dan hortikultura.	Pola acak, vegetasi rendah, fluktuasi reflektansi sedang pada kanal merah dan NIR.
Hutan Primer	Hutan yang tidak mengalami gangguan besar atau pembukaan lahan sebelumnya.	Reflektansi rendah dan stabil, vegetasi sangat rapat, NDVI sangat tinggi, lokasi di daerah pegunungan.
Hutan Sekunder	Hutan yang telah mengalami gangguan atau pemulihan dari penggunaan sebelumnya.	Rona kehijauan tidak seragam, vegetasi rapat sedang, NDVI sedang hingga tinggi, bentuk tidak beraturan.

Sumber: Nedd et al., 2021

2.3.2. Analisis Prediksi Perubahan Penggunaan Lahan

Analisis prediksi dilakukan dengan menggabungkan model *Markov Chain* dan *Cellular Automata (CA)* menggunakan perangkat lunak *TerrSet (IDRISI)*. Model *Markov Chain* digunakan untuk menghitung

probabilitas perubahan lahan antar kelas berdasarkan dua peta pada tahun 2019 dan 2024, sementara model *Cellular Automata* digunakan untuk mengakomodasi pola spasial dan hubungan spasial antar sel (*neighborhood effect*). Pendekatan CA-Markov terbukti efektif dalam proyeksi perubahan guna lahan di berbagai konteks wilayah berkembang (Fitawok et al., 2020). Model Markov menghasilkan *Transition Probability Matrix* (TPM), yaitu matriks probabilitas perubahan dari satu kategori lahan ke kategori lainnya. Proyeksi untuk tahun 2039 dibuat dengan asumsi bahwa pola transisi dan tekanan spasial tetap mengikuti kecenderungan yang terekam antara tahun 2019–2024. Model CA selanjutnya mengalokasikan perubahan tersebut secara spasial berdasarkan *transition suitability maps*, yang dibentuk melalui analisis spasial berbasis faktor kedekatan jalan, pemukiman, kemiringan lereng, dan jarak dari pusat pertumbuhan. Validasi prediksi dilakukan menggunakan pendekatan *Kappa Simulation Index* (KSI) atau dengan membandingkan pola hasil proyeksi terhadap rencana tata ruang dan tren pembangunan aktual. Pendekatan prediktif ini mengacu pada metodologi terkini dan digunakan secara luas dalam prediksi penggunaan lahan berbasis spasial di berbagai konteks kawasan berkembang (Rimal et al., 2018). Gambar 2, menunjukkan diagram alur penelitian yang menggambarkan hubungan antara tahapan input data, proses klasifikasi, dan analisis spasial hingga tahap prediksi perubahan lahan menggunakan model *celluler automata*. Tahapan ini memberikan gambaran lengkap tentang urutan tahapan analisis yang dilakukan dalam penelitian ini.



Gambar 2. Diagram Analisis Penelitian

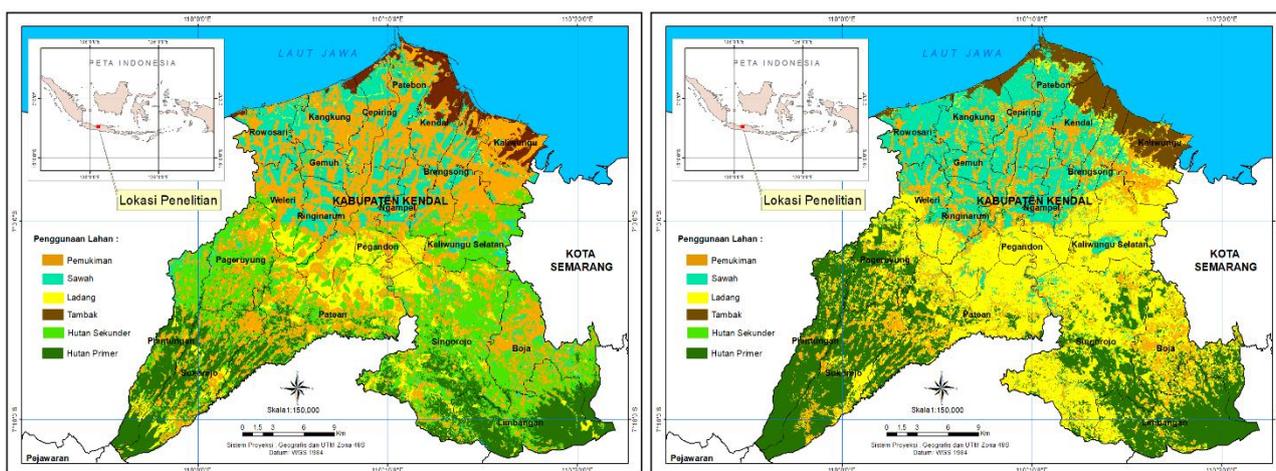
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Perubahan Penggunaan Lahan

Penggunaan lahan di Kabupaten Kendal pada Tahun 2019 dan Tahun 2024 dapat dilihat pada Gambar 3, yang memvisualisasikan penggunaan lahan pada periode tertentu. Hasil temuan yang diperoleh bahwa penggunaan lahan di Kabupaten Kendal dari tahun 2019–2024 menunjukkan perkembangan seperti permukiman yang mengalami peningkatan signifikan bahkan sehingga berdampak pada penurunan luasan penggunaan lahan sawah ataupun ladang di Kabupaten Kendal. Tabel Penggunaan lahan di Kabupaten Kendal disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Luas Penggunaan Lahan Tahun 2019 dan tahun 2024

Penggunaan Lahan	Tahun			
	2019		2024	
	Luas (Ha)	Luas (%)	Luas (Ha)	Luas (%)
Permukiman	16.387,83	16%	30.476,07	30%
Sawah	17.689,23	18%	14.448,06	14%
Tambak	4.410,90	4%	3.749,49	4%
Ladang	35.159,31	35%	12.166,11	12%
Hutan Primer	25.848	26%	16.078,77	16%
Hutan Sekunder	652,14	1%	23.228,91	23%
Total	100.147,41	100%	100.147,41	100%



Gambar 3. Peta Perbandingan Penggunaan lahan Tahun 2024 & 2019

Berdasarkan Tabel 4, hasil analisis perubahan penggunaan lahan menunjukkan peningkatan luas lahan permukiman secara signifikan selama lima tahun terakhir. Berdasarkan hasil pengolahan data citra satelit Landsat 8 dan Sentinel-2 ditemukan bahwa luas permukaan pada tahun 2019 tercatat sebesar 16.387,83 Ha, sementara pada tahun 2024 meningkat menjadi 30.476,07 Ha atau meningkat sebanyak 14% dari tahun 2019. Peningkatan ini terjadi terutama di Kecamatan Kaliwungu, Kecamatan Brangsong, dan Kendal yang mengalami urbanisasi pesat akibat pembangunan di Kendal Industrial Park (KIP) jika kita melihat berdasarkan Gambar 3. Hasil analisis peta perbandingan penggunaan lahan tahun 2024 dan 2019, menunjukkan bahwa pada saat periode penelitian jumlah lahan permukiman masih terbatas, namun distribusi spasial perubahan lahan permukiman selama periode penelitian dengan warna orange berkembang dengan pesat di tahun 2024. Lahan sawah menunjukkan penurunan yang signifikan selama periode 2019-2024. Luas wilayah penggunaan lahan sawah menunjukkan trend pada tahun 2019 mencapai 17.689,23 Ha kondisi tersebut menurun pada tahun 2024 menjadi 14.448,06 Ha. Kondisi penurunan area persawahan di

Kabupaten Kendal terjadi karena pengembangan kawasan permukiman dan infrastruktur pendukung industri, seperti jalan raya dan kawasan industri. Berdasarkan Peta Perbandingan Penggunaan lahan Tahun 2024 & 2019 terlihat bahwa area persawahan mengalami penyusutan terutama di wilayah pusat kota Kendal dan sekitarnya yang berkembang menjadi area permukiman.

Lahan tambak di kawasan pesisir Kabupaten Kendal juga mengalami penurunan luas wilayah. Pada tahun 2019 luas nya 4.410,90 Ha namun pada tahun 2024 menjadi 3.749,49 Ha. Penurunan ini terjadi karena alih fungsi penggunaan lahan tambak menjadi permukiman terutama di Wilayah Kecamatan Kaliwungu dan Kecamatan Kendal. Penggunaan lahan ladang mengalami penyusutan sebesar 22.993,20 Ha selama periode penelitian ini. Penurunan ini juga merupakan dampak alih fungsi lahan secara masif akibat perkembangan permukiman, dan infrastruktur seperti industri fasilitas umum dan fasilitas sosial namun ada juga yang berubah menjadi penggunaan lahan sawah di beberapa kecamatan seperti Kecamatan Singorojo dan Kaliwungu Selatan. Hutan Primer di Kabupaten Kendal mengalami penurunan luas sebesar 9.769,23 Ha dari tahun 2019 hingga 2024. Meskipun hutan primer mengalami penurunan, penambahan jumlah luas hutan sekunder mengalami peningkatan secara signifikan. Luas wilayah hutan sekunder di Kabupaten Kendal pada tahun 2019 sebesar 652,14 Ha dan pada tahun 2024 meningkat seluas 23.228,91 Ha yang terjadi di Kecamatan Boja, Kecamatan Singorojo, Kecamatan Plantungan, dan Kecamatan Sukorejo. Pertumbuhan jaringan jalan memainkan peran signifikan dalam perubahan penggunaan lahan di Kabupaten Kendal sehingga memberikan dampak pertumbuhan penduduk di Kabupaten Kendal yang mengkonversikan lahan nya menjadi permukiman.

Perubahan penggunaan lahan di Kabupaten Kendal dari tahun 2019 hingga 2024 memperlihatkan tren perubahan yang didorong oleh berbagai faktor sosio-ekonomi dan kebijakan pembangunan. Peningkatan luas permukiman menjadi salah satu indikasi utama tekanan urbanisasi dan pengembangan kawasan industri di wilayah Kabupaten Kendal (Prasetyo et al., 2021). Berdasarkan pada Tabel 4 dan Gambar 3, menunjukkan bahwa permukiman mengalami peningkatan signifikan dari 16.387,83 Ha atau sebesar 16% dari total luas wilayah pada tahun 2019, menjadi 30.476,07 Ha atau sebesar 30% dari luas wilayah pada tahun 2024. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Adiyaksa & Djojomartono, (2020), yang menunjukkan bahwa alih fungsi lahan menjadi permukiman di Kabupaten Kendal banyak terjadi akibat pembangunan Kendal Industrial Park (KIP) yang mempengaruhi distribusi penggunaan lahan di wilayah ini. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan jumlah penggunaan lahan permukiman dari tahun 2019 ke tahun 2024 naik sebanyak 14% dari total luas wilayahnya. Hal ini selaras dengan penelitian Dinda et al (2022), kebutuhan lahan permukiman akan terus meningkat secara konsisten pada wilayah yang sedang mengalami perkembangan akibat tekanan penduduk.

Berdasarkan Gambar 4, penurunan luas lahan sawah sebesar 4% selama periode yang ditandai dengan alih fungsi lahan produktif pertanian menjadi kawasan permukiman. Faktor utama yang mendorong pengurangan lahan sawah ini adalah tekanan pembangunan infrastruktur dan permukiman yang terus meningkat. Pola ini serupa dengan temuan Lamidi et al (2018), di Kota Serang yang menyatakan bahwa urbanisasi menimbulkan alih fungsi lahan pertanian menjadi non-pertanian. Kondisi ini berisiko pada ketahanan pangan daerah dengan melihat kondisi Kabupaten Kendal dikenal sebagai salah satu daerah lumbung pangan di Jawa Tengah. Temuan ini selaras dengan hasil penelitian Sadewo & Buchori (2018), yang mengidentifikasi pola penurunan lahan sawah akibat perkembangan Kendal Industrial Park (KIP).



Gambar 4. Grafik Perubahan Penggunaan Lahan Tahun 2019 dan Tahun 2024

Jenis penggunaan lahan lain yang mengalami penurunan lainnya adalah lahan tambak yang secara signifikan berubah dari 4.410,90 Ha menjadi 3.749,49 Ha atau penurunan sebesar 661,41 Ha selama periode 2019 hingga 2024. Penurunan luas lahan tambak ini tidak hanya mempengaruhi sektor perikanan tetapi juga berdampak pada ekosistem pesisir. Penggunaan lahan Hutan primer dan penggunaan lahan ladang mengalami penurunan luas masing-masing sebesar 9.769,23 Ha dan 22.993,20 Ha. Pembukaan lahan ini terlihat di beberapa wilayah Kecamatan Kaliwungu Selatan, Kecamatan Boja, Kecamatan Pageruyung dan Kecamatan Patean hal ini terjadi karena pengembangan infrastruktur di wilayah tersebut. Meskipun beberapa kawasan berhasil direhabilitasi menjadi hutan sekunder, upaya tersebut belum sepenuhnya mampu mengimbangi kehilangan fungsi ekologis yang signifikan dari hutan primer, seperti penyerapan karbon dan perlindungan biodiversitas di wilayah Kabupaten Kendal. Penelitian oleh Wijaya et al (2021), menekankan pentingnya penanggulangan fenomena *urban heat island* di wilayah Kendal, yang salah satunya dapat didukung melalui peningkatan luasan hutan sekunder sebagai bentuk intervensi ekologis. Upaya konservasi dan reboisasi di beberapa wilayah, seperti yang dikaji oleh Hakim et al (2019), di Kota Makassar, menunjukkan bahwa dinamika penggunaan lahan tidak hanya dipengaruhi oleh proses urbanisasi, tetapi juga sangat bergantung pada efektivitas kebijakan pengelolaan ruang terbuka hijau dan perencanaan tata guna lahan secara berkelanjutan.

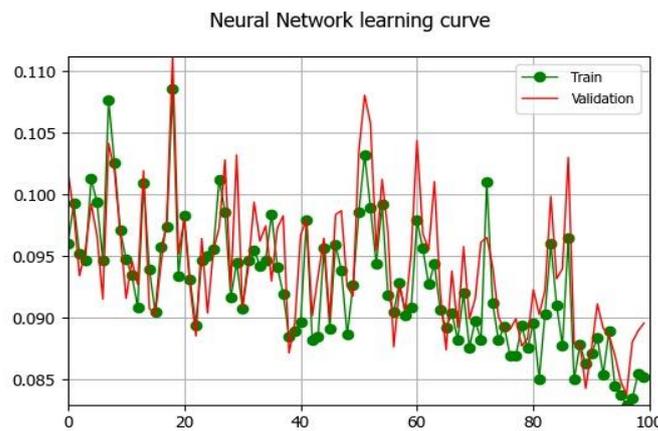
3.2. Prediksi Perubahan Penggunaan Lahan Kabupaten Kendal 2039

Penelitian ini melakukan analisis dengan rentan waktu 2 periode tahun penggunaan lahan dalam rentang Waktu 5 tahun. Pada kajian ini data yang digunakan adalah tahun 2019 dan tahun 2024 sehingga tahun prediksi yang dihasilkan adalah tahun 2039 dari data tahun 2019-2024. Data tahun 2024 digunakan untuk validasi dimana data tahun 2019-2024 akan menghasilkan data prediksi tahun 2039 sehingga dapat dibandingkan dengan data tahun 2024 sebagai *reference*. Prediksi perubahan penggunaan lahan dilakukan dalam format raster, sehingga data tutupan lahan yang masih dalam format vektor harus dikonversi kedalam raster terlebih dahulu. Setelah data tutupan lahan dalam format raster pada waktu interval tahun 2019-2024 sudah disiapkan, selanjutnya digunakan fungsi *Molusce* yang terdapat pada menu raster. Analisis rentan waktu dari tahun 2019-2024 yang akan menghasilkan prediksi tutupan lahan 2039 sebagai proses validasi jika kita melakukan *Inputing data*, *Evaluating correlation* dan *Area changes*. Maka terdapat hasil perolehan yang telah tervalidasi secara otomatis seperti Gambar 5. Pada saat *Update tables* maka secara otomatis akan

membentuk hasilnya sehingga akan dihasilkan *map changes area*. Kemudian hasil dilakukan *Transition Potential Modeling* dengan tools *Artificial Neural Network* sehingga menghasilkan *Train Neural Network* yang digambarkan pada Gambar 6. Selanjutnya, Proses validasi dilakukan dengan membandingkan hasil prediksi tahun 2024 dengan peta tahun 2019 sebagai *reference*. Model yang dihasilkan mempunyai tingkat akurasi prediksi dengan nilai *Kappa overall "0.83"* atau Tingkat akurasi klasifikasi berkategori "*Sangat Tinggi*" sebagai informasi dari tingkat akurasi prediksi yang dihasilkan (Lihat Tabel 2). Data-data tersebut dapat digunakan untuk memprediksi pada tahun 2039.

Class statistics							ha
Class color	2019	2024	Δ	2019 %	2024 %	Δ %	
1	16387.83 ha	30476.07 ha	14088.24 ha	16.363708257657386	30.43121135134698	14.067503093689595	
2	17689.23 ha	14448.06 ha	-3241.17 ha	17.663192687659123	14.426793463755079	-3.236399223904044	
3	4410.90 ha	3749.49 ha	-661.41 ha	4.4044074629588525	3.7439710123307233	-0.6604364506281293	
4	35159.31 ha	12166.11 ha	-22993.20 ha	35.10755794882763	12.148202334938068	-22.959355613889564	
5	25848.00 ha	16078.77 ha	-9769.23 ha	25.809953547475665	16.055103172413546	-9.75485037506212	
6	652.14 ha	23228.91 ha	22576.77 ha	0.6511800954213394	23.194718665215607	22.54353856979427	

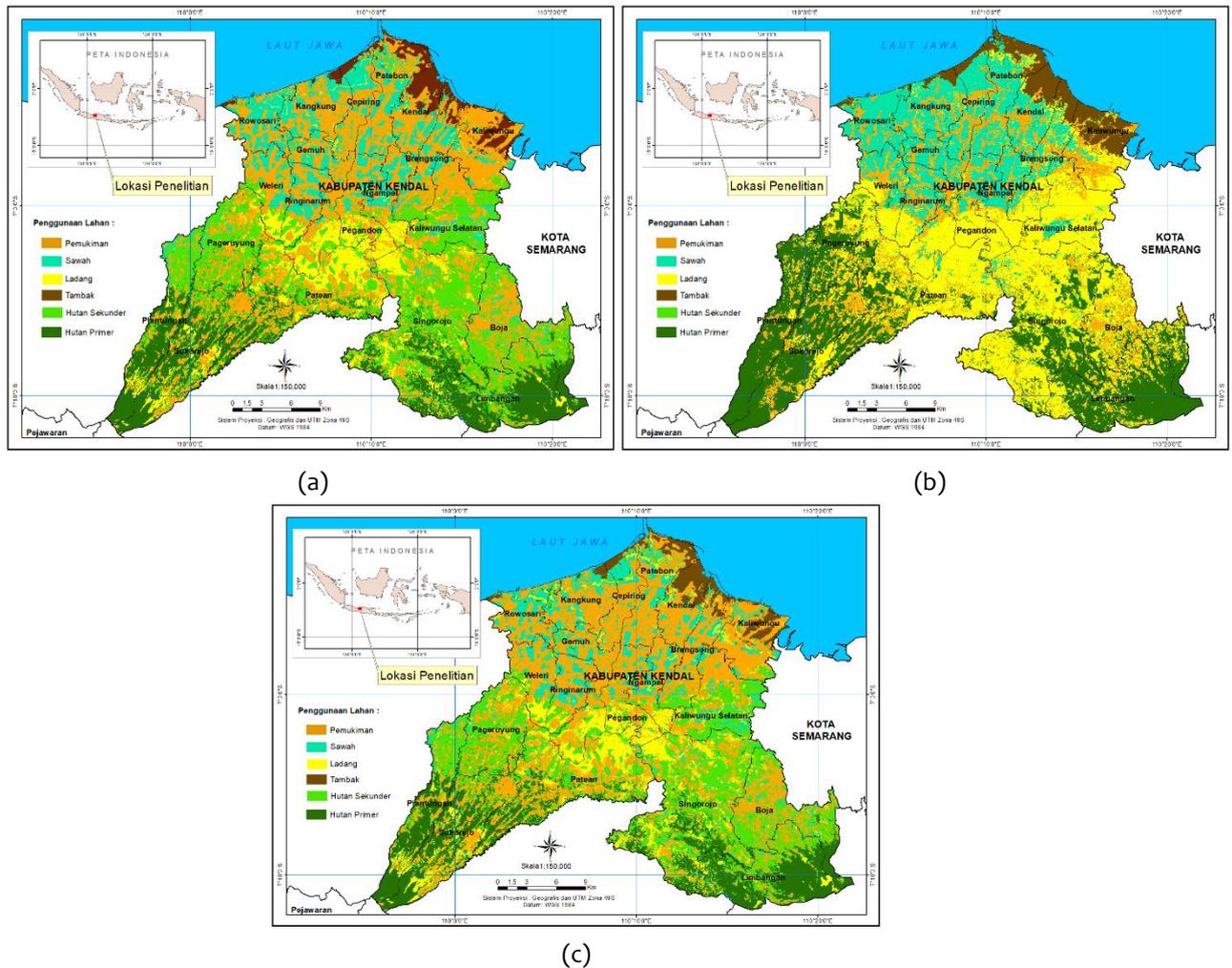
Gambar 5. Class Statistics Validation



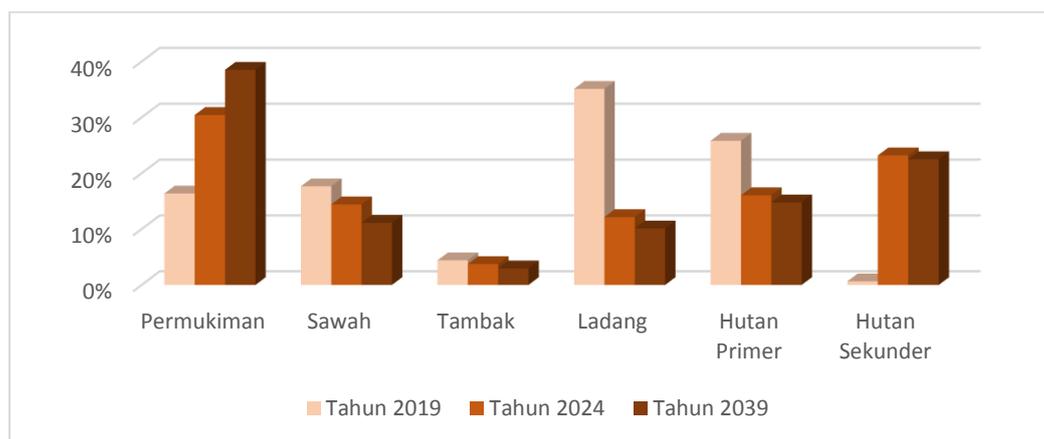
Gambar 6. Train Neural Network

Tabel 5. Prediksi Luas Penggunaan Lahan Tahun 2019, Tahun 2024 dan Tahun 2039

Penggunaan Lahan	Tahun					
	2019		2024		2039	
	Luas (Ha)	Luas (%)	Luas (Ha)	Luas (%)	Luas (Ha)	Luas (%)
Permukiman	16.387,83	16%	30.476,07	30%	38.570,75	39%
Sawah	17.689,23	18%	14.448,06	14%	11.137,60	11%
Tambak	4.410,90	4%	3.749,49	4%	2.970,83	3%
Ladang	35.159,31	35%	12.166,11	12%	10.137,99	10%
Hutan Primer	25.848	26%	16.078,77	16%	14.791,15	15%
Hutan Sekunder	652,14	1%	23.228,91	23%	22.539,09	23%
Total	100.147,41	100%	100.147,41	100%	100.147,41	100%



Gambar 7. Peta Prediksi Model Prediksi Perubahan Penggunaan Lahan (a) Tahun 2019, (b) Tahun 2019, dan (c) Tahun 2039



Gambar 8. Presentas Diagram Model Prediksi Perubahan Penggunaan Lahan

Berdasarkan Tabel 5, Proyeksi tutupan lahan hingga tahun 2039 menunjukkan trend perubahan penggunaan lahan yang menyerupai di tahun 2024 dengan peningkatan signifikan pada area permukiman menjadi 38570,75 Ha atau sebesar 39% dari luas total penggunaan lahan. Trend ini menunjukkan bahwa jika

tidak ada intervensi kebijakan yang implikatif, urbanisasi akan terus mendominasi penggunaan lahan di Kabupaten Kendal. Melalui Model *Cellular Automata* (CA) penelitian ini dapat memberikan proyeksi berbasis data yang mendalam sehingga melengkapi penelitian sebelumnya yang cenderung berfokus pada waktu sebelum 2039 dan fokus pada kecamatan tertentu di wilayah Kabupaten Kendal. Berdasarkan Gambar 7, prediksi penelitian yang dilakukan oleh peneliti secara menyeluruh didukung oleh penelitian Fitriyanto et al (2019), menunjukkan dominasi permukiman akan menjadi tantangan dalam masa depan. Proyeksi serupa juga ditemukan pada penelitian Syafitri & Susetyo (2019), yang menunjukkan bahwa luas lahan pertanian semakin mengalami penurunan khususnya jenis penggunaan lahan sawah, ladang dan tegalan karena perkembangan area permukiman sehingga mengakibatkan permasalahan baru seperti ketahanan pangan lokal. Peningkatan area permukiman tidak terlepas dari peran infrastruktur, terutama jaringan jalan yang mendukung aksesibilitas kawasan. Hasil penelitian Baihaqi et al (2019), menyebutkan bahwa pertumbuhan jaringan jalan menjadi salah satu pendorong utama konversi lahan di Kendal. Dalam konteks penelitian ini, penggunaan SIG dan metode CA memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai interaksi antara jaringan jalan, pertumbuhan permukiman, dan perubahan penggunaan lahan.

Dalam studi ini, validasi hasil prediksi dilakukan dengan mengukur akurasi kecocokan antara hasil prediksi tahun 2024 dan citra aktual tahun yang sama, menggunakan metode *Kappa Coefficient*. Proyeksi spasial tahun 2039 yang dihasilkan memberikan gambaran mengenai tren alih fungsi lahan yang kemungkinan besar terjadi jika tidak ada intervensi kebijakan atau perencanaan tata ruang yang signifikan. Berdasarkan Gambar 8, menunjukkan bahwa proyeksi penggunaan lahan pada tahun 2039 penggunaan lahan sawah, penggunaan lahan tambak, penggunaan lahan ladang dan penggunaan lahan hutan primer mengalami penurunan. Penurunan diproyeksi pada tahun 2039 pada penggunaan lahan sawah menjadi sebesar 11.137,60 Ha atau seluas 11% dari total luas penggunaan wilayah. Penggunaan lahan tambak berkurang menjadi 3% atau seluas 2.970,83 Ha. Penggunaan lahan ladang mengalami penurunan menjadi 10% dari total luas wilayah atau seluas 10.137,99 Ha. Penggunaan lahan hutan primer berkurang menjadi seluas 14.791,15 atau sebesar 15% dari total luas wilayah penggunaan lahan di Kabupaten Kendal tahun 2039. Pengurangan lahan sawah, penggunaan lahan tambak, dan ladang juga memunculkan tantangan besar dalam hal keberlanjutan lingkungan. Ketergantungan yang tinggi pada lahan pertanian sebagai penyokong pangan lokal kini semakin terancam. Oleh karena itu, diperlukan kebijakan tata ruang yang mampu menyeimbangkan kebutuhan pembangunan dan perlindungan lingkungan. Pada sisi lain, pemerintah Kabupaten Kendal berupaya untuk mempertahankan penggunaan lahan sawah untuk menjadikan Kabupaten Kendal sebagai lumbung padi di Provinsi Jawa Tengah (Diskominfo Kabupaten Kendal, 2025). Penelitian ini memberikan kontribusi penting dengan menawarkan data proyeksi yang dapat digunakan untuk menyusun kebijakan berbasis bukti. Hasil simulasi *Cellular Automata* menunjukkan bahwa pengurangan lahan sawah dan tambak cenderung berlanjut hingga tahun 2039. Prediksi ini menunjukkan urgensi dalam implementasi kebijakan konservasi lahan produktif, seperti pemberlakuan zona agraris yang dilindungi. Selain itu, pengurangan tambak juga menyoroti perlunya perhatian terhadap mitigasi dampak pembangunan di kawasan pesisir, seperti rehabilitasi mangrove untuk mendukung keberlanjutan ekosistem. Transformasi lahan ladang menjadi area non-pertanian juga mengindikasikan adanya pergeseran pola ekonomi di Kabupaten Kendal. Berbagai studi mengenai prediksi permodelan perubahan penggunaan lahan di wilayah-wilayah berkembang seperti Kabupaten Kendal tidak terlepas dari dinamika urbanisasi, pertumbuhan penduduk, dan tekanan pembangunan infrastruktur. Studi-studi terdahulu telah menunjukkan bahwa perencanaan tata ruang yang tidak adaptif terhadap tren spasial dapat menyebabkan degradasi lingkungan dan inefisiensi pemanfaatan lahan. Oleh karena itu, pemodelan spasial berbasis citra penginderaan jauh dan pendekatan prediktif menjadi instrumen penting dalam memproyeksikan perubahan tata guna lahan dan mendukung perumusan kebijakan berbasis data.

Hasil penelitian Nurwanda & Honjo (2020), melalui hasil studinya di Kota Bogor menekankan bahwa integrasi model prediktif dan analisis suhu permukaan lahan (*Land Surface Temperature*) dapat memperkuat pemahaman terhadap dampak perluasan kota terhadap kondisi lingkungan. Konteks ini relevan bagi Kabupaten Kendal, dimana ekspansi wilayah permukiman dan kawasan industri dapat memicu peningkatan

suhu iklim mikro serta penurunan kualitas ekologis lahan jika tidak direncanakan secara spasial (Baihaqi et al., 2019). Demikian pula, hasil penelitian Sejati et al (2019), di wilayah Metropolitan Semarang mengungkapkan keterkaitan erat antara pertumbuhan kawasan terbangun dengan fenomena *urban heat island*, yang dapat diperparah oleh alih fungsi lahan tanpa mitigasi ekologis yang memadai. Lebih lanjut, studi oleh Prayitno et al (2020), di Kabupaten Pasuruan menunjukkan bahwa pemanfaatan model prediktif seperti *Cellular Automata* secara efektif dapat memproyeksikan distribusi penggunaan lahan di masa depan, terutama dalam menghadapi tekanan pembangunan wilayah. Temuan ini mendukung pendekatan penelitian di Kendal, yang juga menerapkan model CA untuk merumuskan peta prediksi hingga tahun 2039. Hal serupa diungkapkan oleh Agustina et al (2022), dalam konteks Kota Cirebon, di mana pemodelan spasial berbasis CA menunjukkan kemampuan tinggi dalam mendeteksi pola perkembangan kota dan mengidentifikasi zona yang berisiko mengalami tekanan penggunaan lahan. Studi jangka panjang oleh Rachman et al (2024), di Jakarta memberikan wawasan penting melalui analisis intensitas perubahan penggunaan lahan selama 30 tahun terakhir. Mereka menunjukkan bahwa pendekatan spasial tidak hanya penting untuk proyeksi teknis, tetapi juga untuk mengevaluasi kebijakan tata ruang yang telah berlangsung. Pendekatan semacam ini dapat direplikasi dalam konteks Kendal untuk menilai efektivitas kebijakan RTRW (Rencana Tata Ruang Wilayah) yang sedang berjalan. Sementara itu, Letsoin et al (2020), yang menganalisis perubahan tutupan lahan di Papua dari tahun 1990 hingga 2019 juga menekankan pentingnya penggunaan citra satelit jangka panjang untuk memahami pola transformasi spasial yang kompleks, khususnya di wilayah yang memiliki keragaman ekologis tinggi seperti Kendal bagian selatan. Selain penggunaan untuk analisis perubahan tata guna lahan, pendekatan spasial juga dapat diperluas dalam aspek ketahanan wilayah. Virtriana et al (2022), misalnya, mengembangkan model prediksi ketahanan pangan berbasis data penginderaan jauh di Jawa Barat. Studi tersebut menunjukkan bahwa pemanfaatan data spasial tidak hanya terbatas pada pemetaan lahan, tetapi juga berkontribusi terhadap perencanaan multisektor seperti ketahanan pangan, yang sangat relevan untuk wilayah agraris seperti Kendal yang sebagian besar wilayahnya masih merupakan lahan sawah dan tegalan.

Secara keseluruhan, temuan-temuan dari literatur tersebut memperkuat pendekatan penelitian ini dalam mengembangkan model spasial prediktif berbasis SIG dan *Cellular Automata* untuk menganalisis perubahan penggunaan lahan di Kabupaten Kendal. Pendekatan ini tidak hanya memberikan gambaran mengenai distribusi spasial perubahan, tetapi juga menjadi dasar pengambilan keputusan dalam perencanaan ruang, mitigasi risiko ekologis, dan pengendalian konversi lahan yang berlebihan. Model prediktif yang dikembangkan dalam studi ini diharapkan mampu menjawab kebutuhan perencanaan jangka menengah dan panjang di Kendal, seiring dengan semakin kompleksnya tekanan pembangunan yang dihadapi wilayah tersebut.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa pendekatan pemodelan spasial berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) dan *Cellular Automata–Markov Chain* mampu mengidentifikasi dan memprediksi dinamika perubahan penggunaan lahan di Kabupaten Kendal secara akurat. Dengan menggunakan data citra satelit tahun 2019 dan 2024, model prediktif yang dibangun dapat memproyeksikan distribusi spasial penggunaan lahan hingga tahun 2039 dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi ($Kappa: 0,83$). Hasil penelitian menunjukkan bahwa jika tren alih fungsi lahan saat ini terus berlangsung tanpa intervensi kebijakan, maka kawasan permukiman akan terus meluas hingga mendominasi 39% dari total wilayah, sementara lahan produktif seperti sawah, ladang, dan tambak mengalami penyusutan signifikan. Kondisi ini mengindikasikan risiko terhadap keberlanjutan lingkungan dan ketahanan pangan daerah. Temuan ini memberikan justifikasi ilmiah bahwa integrasi model spasial dengan data historis mampu menyajikan informasi berbasis bukti yang krusial dalam perencanaan tata ruang dan pengendalian konversi lahan. Pemodelan prediktif yang diterapkan dalam penelitian ini tidak hanya bersifat diagnostik terhadap perubahan yang terjadi, tetapi juga bersifat prognostik untuk mendukung pembuatan kebijakan yang responsif terhadap dinamika wilayah.

Aplikasi hasil penelitian dapat digunakan oleh pemerintah daerah dalam menyusun strategi zonasi, menetapkan kawasan lindung, serta merancang kebijakan perlindungan lahan pertanian berkelanjutan Sebagai lanjutan dari penelitian ini, penting untuk mengintegrasikan faktor perubahan iklim ke dalam model prediksi penggunaan lahan. Dampak perubahan iklim terhadap produktivitas pertanian, kenaikan muka air laut, dan dinamika pesisir dapat memberikan pandangan yang lebih holistik mengenai tantangan yang dihadapi Kendal di masa depan. Pada akhirnya, penelitian ini tidak hanya memberikan peta perubahan penggunaan lahan dan prediksi jangka panjang, tetapi juga memberikan rekomendasi kebijakan yang berbasis data. Penggunaan teknologi SIG, seperti QGIS dan ArcGIS, telah terbukti efektif dalam memetakan dinamika perubahan lahan dan menyediakan informasi yang relevan untuk perencanaan tata ruang. Sehingga, penelitian ini memberikan kontribusi penting bagi pengelolaan lahan yang lebih bijaksana di Kabupaten Kendal.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas semua dukungan dari pihak yang turut mendukung berlangsungnya penelitian ini Program Studi Magister Pendidikan Geografi, FKIP, Universitas Sebelas Maret yang telah memberi dukungan dalam kegiatan penelitian ini.

6. REFERENSI

- Aburas, M. M., Ahamad, M. S. S., & Omar, N. Q. (2019). Spatio-temporal simulation and prediction of land-use change using conventional and machine learning models: a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(4). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7330-6>.
- Adiyaksa, F., & Djojmartono, P. N. (2020). Evaluasi Alih Fungsi Lahan Pertanian Menjadi Lahan Industri di Kabupaten Kendal Tahun 2014-2018. *Journal of Geospatial Information Science and Engineering*, 3(1), 71–78. DOI: <https://doi.org/10.22146/jgise>.
- Agustina, I. H., Aji, R. R., Fardani, I., Rochman, G. P., Ekasari, A. M., & Mohmed, F. A. J. (2022). Cellular Automata for Cirebon City Land Cover and Development Prediction. *Planning Malaysia*, 20(1), 77–88. DOI: <https://doi.org/10.21837/PM.V20I20.1080>.
- Alqadhi, S., Mallick, J., Balha, A., Bindajam, A., Singh, C. K., & Hoa, P. V. (2021). Spatial and decadal prediction of land use/land cover using multi-layer perceptron-neural network (MLP-NN) algorithm for a semi-arid region of Asir, Saudi Arabia. *Earth Science Informatics*, 14(3), 1547–1562. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00633-2>.
- Ambarwulan, W., Yulianto, F., Widiatmaka, W., Rahadiati, A., Tarigan, S. D., Firmansyah, I., & Hasibuan, M. A. S. (2023). Modelling land use/land cover projection using different scenarios in the Cisadane Watershed, Indonesia: Implication on deforestation and food security. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 26(2), 273–283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.04.002>.
- Baihaqi, H. F., Prasetyo, Y., & Bashit, N. (2019). Analisis Perkembangan Kawasan Industri Kendal Terhadap Perubahan Suhu Permukaan (Studi Kasus: Kawasan Industri Kendal, Kabupaten Kendal). *Jurnal Geodesi Undip*, 9(1), 176–186.
- Badan Pusat Statistik Kabupaten Kendal. (2024). *Kabupaten Kendal Dalam Angka 2024* (Vol. 01). Badan Pusat Statistik Kabupaten Kendal.
- Dewa, D. D., Buchori, I., Rudiarto, I., & Sejati, A. W. (2025). Spatiotemporal Variations of Urban Expansion and its Relation with Geomorphological Complexity: a Case Study of the Yogyakarta Urban Region, Indonesia. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 18(1). DOI: <https://doi.org/10.1007/s12061-024-09629-z>.
- Dinda, R., Mariati, H., & Fitriawan, D. (2022). Analisis Proyeksi Penduduk Dan Alokasi Kebutuhan Lahan Permukiman Di Kota Padang 2020-2030. *Jurnal Azimut*, 4(1), 19-27. DOI: <https://doi.org/10.31317/jaz.v4i1.790>.
- Diskominfo Kabupaten Kendal. (2025, April 23). *Bupati Kendal Dukung Jawa Tengah Jadi Lumbung Padi Pangan Nasional*. KendalKab.Go.Id. Retrieved from https://www.kendalkab.go.id/berita/id/20250423001/bupati_kendal_dukung_jawa_tengah_jadi_lumbung_pangan_nasional.
- Fitawok, M. B., Derudder, B., Minale, A. S., & Passel, S. Van. (2020). Modeling the Impact of Urbanization on Land-Use Change in Bahir Dar City, Ethiopia: An Integrated Cellular Automata–Markov Chain Approach. *Land*, 9(4), 115. DOI: <https://doi.org/10.3390/land9040115>.
- Fitriyanto, B. R., Helmi, M., & Hadiyanto. (2019). Model Prediksi Perubahan Penggunaan Lahan Dengan Pendekatan

- Sistem Informasi Geografis Dan Cellular Automata Markov Chain: Studi Kasus Kabupaten Rokan Hulu. *Jurnal Teknologi Technoscientia*, 11(2), 137–147.
- Hakim, A. M. Y., Baja, S., Rampisela, D. A., & Arif, S. (2019). Spatial dynamic prediction of landuse / landcover change (case study: Tamalanrea sub-district, makassar city). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 280(1). DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/280/1/012023>.
- Hidayah, H. S. N., Ni'matuzzahroh, N., Kuswati, F. Y., Utama, R. A., Fariz, T. R., Amalia, A. V., & Haris, A. (2023). Kajian Perubahan Tutupan Lahan Terbangun di Daerah Peri Urban Kabupaten Kendal. *Uniplan: Journal of Urban and Regional Planning*, 4(2), 77-86. DOI: <https://doi.org/10.26418/uniplan.v4i2.68456>.
- Jatayu, A., Saizen, I., Rustiadi, E., Pribadi, D. O., & Juanda, B. (2022). Urban Form Dynamics and Modelling towards Sustainable Hinterland Development in North Cianjur, Jakarta–Bandung Mega-Urban Region. *Sustainability (Switzerland)*, 14, 907. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14020907>.
- Jatayu, A., Zahara, S., Syafitri, R. A. W. D., Dafadhilah, S., Roosyanindhita, D. R., Sidiq, M. I., & Priambodo, M. S. (2024, May). Measuring Levels of Infrastructure Development and its Impact on Regional Growth-Insights from Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1353, No. 1, p. 012011). IOP Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1353/1/012011>.
- Kar, R., Obi Reddy, G. P., Kumar, N., & Singh, S. K. (2018). Monitoring spatio-temporal dynamics of urban and peri-urban landscape using remote sensing and GIS – A case study from Central India. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21(3), 401–411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.12.006>.
- Kelly-Fair, M., Gopal, S., Koch, M., Kusumaningrum, H. P., Helmi, M., Khairunnisa, D., & Kaufman, L. (2022). Analysis of Land Use and Land Cover Changes through the Lens of SDGs in Semarang, Indonesia. *Sustainability (Switzerland)*, 14(13), 7592. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14137592>.
- Kumar, A., & Sharma, S. K. (2022). Information cryptography using cellular automata and digital image processing. *Journal of Discrete Mathematical Sciences and Cryptography*, 25(4), 1105–1111. <https://doi.org/10.1080/09720529.2022.2072437>.
- Lamidi, L., Pramudya, B., & Munibah, K. (2018). Perubahan penggunaan lahan di kota Serang, Provinsi Banten. *Tataloka*, 20(1), 65-74. DOI: <https://doi.org/10.14710/tataloka.20.1.65-74>.
- Letsoin, S. M. A., Herak, D., Rahmawan, F., & Purwestri, R. C. (2020). Land cover changes from 1990 to 2019 in Papua, Indonesia: Results of the remote sensing imagery. *Sustainability (Switzerland)*, 12(16), 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12166623>.
- Maheng, D., Pathirana, A., & Zevenbergen, C. (2021). A preliminary study on the impact of landscape pattern changes due to urbanization: Case study of Jakarta, Indonesia. *Land*, 10(2), 1–27. DOI: <https://doi.org/10.3390/land10020218>.
- Muhammad, R., Zhang, W., Abbas, Z., Guo, F., & Gwiazdzinski, L. (2022). Spatiotemporal Change Analysis and Prediction of Future Land Use and Land Cover Changes Using QGIS MOLUSCE Plugin and Remote Sensing Big Data: A Case Study of Linyi, China. *Land*, 11(3), 419. <https://doi.org/10.3390/land11030419>.
- Nabila, F. F., Hardati, P., & Aji, A. (2025). Evaluasi Kesesuaian Lahan Kawasan Industri menggunakan Sistem Informasi Geografis di Kabupaten Kendal Evaluation of Land Suitability for Industrial Estate using Geographic Information System in Kendal Regency. *Jurnal Perencanaan Wilayah, Kota Dan Permukiman*, 7(1), 198–210. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.20961/desa-kota.v7i1.93048.%25p>.
- Nedd, R., Light, K., Owens, M., James, N., Johnson, E., & Anandhi, A. (2021). A Synthesis of Land Use/Land Cover Studies: Definitions, Classification Systems, Meta-Studies, Challenges and Knowledge Gaps on a Global Landscape. *Land*, 10(2020), 1–30.
- Nurwanda, A., & Honjo, T. (2020). The prediction of city expansion and land surface temperature in Bogor City, Indonesia. *Sustainable Cities and Society*, 52(December 2018), 101772. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101772>.
- Permatasari, R. J., Damayanti, A., Indra, T. L., & Dimiyati, M. (2021). Prediction of land cover changes in Penajam Paser Utara regency using cellular automata and markov model. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 623(1), 012005). IOP Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/623/1/012005>.
- Prasetyo, Y., Bashit, N., & Baihaqi, H. F. (2021). Analisis Korelasi Kawasan Pengembangan Kendal Industrial Park Terhadap Ruang Terbuka Hijau. *Jurnal Kelautan Tropis*, 24(1), 102–112. DOI: <https://doi.org/10.14710/jkt.v24i1.10297>.
- Prayitno, G., Sari, N., Hasyim, A. W., & Nyoman Widhi, S. W. (2020). Land-use prediction in Pandaan District pasuruan regency. *International Journal of GEOMATE*, 18(65), 64–71. DOI: <https://doi.org/10.21660/2020.65.41738>.
- Qacami, M., Khattabi, A., Lahssini, S., Rifai, N., & Meliho, M. (2023). Land-cover/land-use change dynamics modeling based on land change modeler. *Annals of Regional Science*, 70(1), 237–258. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00168-022-01169-z>.

- Rachman, F., Huang, J., Xue, X., & Marfai, M. A. (2024). Insights from 30 Years of Land Use/Land Cover Transitions in Jakarta, Indonesia, via Intensity Analysis. *Land*, 13(4), 545. DOI: <https://doi.org/10.3390/land13040545>.
- Rimal, B., Zhang, L., Keshtkar, H., Haack, B. N., Rijal, S., & Zhang, P. (2018). Land use/land cover dynamics and modeling of urban land expansion by the integration of cellular automata and markov chain. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(4), 154. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi7040154>.
- Sadewo, M. N., & Buchori, I. (2018). Simulasi Perubahan Penggunaan Lahan Akibat Pembangunan Kawasan Industri Kendal (KIK) Berbasis Cellular Automata. *Majalah Geografi Indonesia*, 32(2), 115-122. <https://doi.org/10.22146/mgi.33755>.
- Salabim, A. (2021, December 13). *Luas Tanaman Padi di Kendal Tahun 2021 Berkurang dari Tahun sebelumnya*. Swara Kendal. Retrieved from <https://swarakendal.com/luas-tanaman-padi-di-kendal-tahun-2021-berkurang-dari-tahun-sebelumnya/>.
- Sejati, A. W., Buchori, I., & Rudiarto, I. (2019). The spatio-temporal trends of urban growth and surface urban heat islands over two decades in the Semarang Metropolitan Region. *Sustainable Cities and Society*, 46(January), 101432. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101432>.
- Siswanto, S., Nuryanto, D. E., Ferdiansyah, M. R., Prastiwi, A. D., Dewi, O. C., Gamal, A., & Dimiyati, M. (2023). Spatio-temporal characteristics of urban heat Island of Jakarta metropolitan. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 32(February), 101062. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101062>.
- Syafitri, R. A. W. D., & Susetyo, C. (2019). Pemodelan pertumbuhan lahan terbangun sebagai upaya prediksi perubahan lahan pertanian di Kabupaten Karanganyar. *Jurnal Teknik ITS*, 7(2), C255-C262.
- Tariq, A., & Mumtaz, F. (2023). A series of spatio-temporal analyses and predicting modeling of land use and land cover changes using an integrated Markov chain and cellular automata models. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(16), 47470–47484. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25722-1>.
- van Vliet, J., Bregt, A. K., Brown, D. G., van Delden, H., Heckbert, S., & Verburg, P. H. (2016). A review of current calibration and validation practices in land-change modeling. *Environmental Modelling and Software*, 82, 174–182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.04.017>.
- Virtriana, R., Riqqi, A., Anggraini, T. S., Fauzan, K. N., Ihsan, K. T. N., Mustika, F. C., Atmaja, F. W., Suwardhi, D., Harto, A. B., Sakti, A. D., Deliar, A., Soeksmantono, B., & Wikantika, K. (2022). Development Of Geospatial Information Integrated With Big Data To Agricultural Hazard Monitoring In West Java. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 46(M-2–2022), 209–215. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLVI-M-2-2022-209-2022>.
- Więckowska, B., Kubiak, K. B., Józwiak, P., Moryson, W., & Stawińska-Witoszyńska, B. (2022). Cohen's Kappa Coefficient as a Measure to Assess Classification Improvement following the Addition of a New Marker to a Regression Model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(16), 10213. <https://doi.org/10.3390/ijerph191610213>.
- Wijaya, J., & Tjahjono, H. (2024). Analisis Kesesuaian Penggunaan Lahan di Kabupaten Kendal Terhadap Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kabupaten Kendal. *Geo-Image Journal*, 13(2), 91-100.
- Wijaya, M. I. H., Ariyani, N. M., Priambudi, B. N., Gumelar, A., & Ichsanudin, H. (2021). Urban Heat Island: Identification of Spatial Patterns of Green Open Space for Mitigation in Kendal Industrial Park, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 887(1). DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/887/1/012010>.