



ANALISIS DINAMIKA PERUBAHAN DAN PREDIKSI TUTUPAN LAHAN DI KECAMATAN PETUNGKRIYONO

Ridho Aryan Santoso^{1*}

¹ Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung
Alamat: Jl. Kaligawe Raya Km. 4, Terboyo Kulon, Genuk, Terboyo Kulon, Genuk,
Semarang

*Penulis Korespondensi: ridhoaryan073@gmail.com

Abstract. *Petungkriyono District, Pekalongan Regency, is a primary tropical forest area simultaneously designated as a Strategic Tourism Zone, horticultural agropolitan area, and landslide-prone zone under the Pekalongan Spatial Plan (RTRW) 2020–2040. This overlapping policy framework has created compounding pressures on land cover, culminating in a flash flood and landslide disaster in January 2025 that claimed 25 lives. This study aims to analyze land cover change dynamics in Petungkriyono District during the period 2018–2025 and to predict land cover conditions in 2030. The methodology employs Sentinel-2A satellite imagery classification using Maximum Likelihood Classification (MLC) to generate annual land cover maps, followed by predictive modeling through Cellular Automata–Markov Chain (CA-MC) implemented via the MOLUSCE plugin in QGIS, incorporating four driving variables: distance to roads, slope, elevation, and distance to rivers. Results indicate that forest land declined from 6,798 Ha (81.86%) in 2018 to 6,335 Ha (76.29%) in 2025, while built-up land increased by 61.58% and agricultural land expanded by 20.34% over the same period. The dominant conversion pathway was forest to horticultural farmland, totaling a cumulative 2,595 Ha. The predictive model, validated with an overall Kappa of 0.834 and 93.55% correctness, projects a further 550 Ha reduction in forest cover by 2030. The ANN component Kappa of 0.5972 indicates moderate model capacity; results are therefore better interpreted as an early warning scenario. This study recommends zonation-based tourism management, phased mitigation for settlements in hazard-prone areas, and agricultural intensification as alternatives to continued land expansion.*

Keywords: *land cover, land cover change, Cellular Automata–Markov Chain, Maximum Likelihood Classification, Petungkriyono, land cover prediction.*

Abstrak. Kecamatan Petungkriyono, Kabupaten Pekalongan, merupakan kawasan hutan tropis primer yang secara bersamaan ditetapkan sebagai Kawasan Strategis Pariwisata, kawasan agropolitan hortikultura, dan kawasan rawan bencana tanah longsor dalam RTRW Kabupaten Pekalongan 2020–2040. Tumpang tindih kebijakan ini menciptakan tekanan berlapis terhadap tutupan lahan yang terbukti berimplikasi nyata, antara lain bencana banjir bandang dan longsor pada Januari 2025 yang merenggut 25 jiwa. Penelitian ini bertujuan menganalisis dinamika perubahan tutupan lahan di Kecamatan Petungkriyono pada periode 2018–2025 dan memprediksi kondisi tutupan lahan pada tahun 2030. Metode yang digunakan adalah klasifikasi citra satelit Sentinel-2A dengan Maximum Likelihood Classification (MLC) untuk menghasilkan peta tutupan lahan tahunan, dilanjutkan dengan pemodelan prediktif menggunakan Cellular Automata–Markov Chain (CA-MC) melalui plugin MOLUSCE pada QGIS dengan empat variabel pendorong: jarak terhadap jalan, kemiringan lereng, ketinggian tempat, dan jarak terhadap sungai. Hasil analisis menunjukkan bahwa lahan hutan menyusut dari 6.798 Ha (81,86%) pada 2018 menjadi 6.335 Ha (76,29%) pada 2025, sementara lahan terbangun meningkat 61,58% dan lahan pertanian bertambah 20,34% dalam periode yang sama. Jalur konversi terbesar adalah hutan menjadi pertanian hortikultura dengan total kumulatif 2.595 Ha. Model prediksi yang divalidasi dengan nilai Kappa overall 0,834 dan tingkat kebenaran 93,55% memproyeksikan penyusutan lahan hutan sebesar 550 Ha pada 2030. Nilai Kappa komponen ANN sebesar 0,5972 mengindikasikan kemampuan model yang moderat, sehingga hasil prediksi lebih tepat digunakan sebagai skenario peringatan dini. Penelitian ini merekomendasikan pengelolaan pariwisata berbasis zonasi, mitigasi bertahap bagi permukiman di kawasan rawan, dan intensifikasi pertanian sebagai alternatif pengganti ekspansi lahan.

Kata Kunci: *tutupan lahan, perubahan lahan, Cellular Automata–Markov Chain, Maximum Likelihood Classification, Petungkriyono, prediksi tutupan lahan*

1. LATAR BELAKANG

Perubahan tutupan lahan merupakan fenomena global yang menjadi perhatian peneliti di berbagai negara seiring dengan pertumbuhan penduduk dan kebutuhan ruang pembangunan (Christian et al., 2021). Pola tutupan lahan yang tidak sesuai dengan kemampuan lahan dapat menimbulkan berbagai permasalahan, mulai dari degradasi kualitas lingkungan hingga peningkatan kerentanan terhadap bencana hidrometeorologi (Nabila, 2023). Pada umumnya, pola perubahan tutupan lahan bersifat dinamis dengan kecepatan yang berbeda di setiap wilayah, tergantung pada faktor bio-fisik dan sosial-ekonomi sebagai pendorongnya (Yudichandra et al., 2020).

Kecamatan Petungkriyono, Kabupaten Pekalongan, merupakan salah satu wilayah yang merepresentasikan kompleksitas dinamika spasial antara kepentingan ekologi dan tekanan sosial-ekonomi. Kawasan ini dikenal sebagai kawasan hutan tropis primer yang langka di Pulau Jawa, telah mendapat predikat National Nature Heritage, dan pada tahun 2016 ditetapkan sebagai Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus (KHDTK) oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (Perhutani, 2017). Seluas 7.395 hektar kawasan ini menjadi rumah bagi lebih dari 250 spesies flora dan fauna, termasuk Owa Jawa, Elang Jawa, dan Macan Tutul Jawa.

Namun di atas predikat konservasi tersebut, Peraturan Daerah Kabupaten Pekalongan Nomor 3 Tahun 2020 tentang RTRW 2020–2040 justru menetapkan kawasan ini secara bersamaan dalam tiga status yang secara ekologis saling berbenturan: (1) Kawasan Strategis Pariwisata, (2) bagian dari Kawasan Agropolitan KRIDO TALUN ANYAR dengan komoditas unggulan tanaman hortikultura, dan (3) Kawasan Rawan Bencana Tanah Longsor Perbukitan. Tiga status ini tidak bersifat netral, karena ketiganya secara bersamaan menghasilkan tekanan yang saling memperkuat terhadap tutupan lahan.

Penetapan sebagai kawasan strategis pariwisata mendorong pembangunan fasilitas dan infrastruktur penunjang wisata, sementara penetapan sebagai kawasan agropolitan mendorong perluasan pertanian hortikultura. Pertanian hortikultura sayuran—berbeda dengan kopi yang dapat tumbuh secara agroforestri—memerlukan pembukaan lahan bersih dari vegetasi pohon. Kondisi ini menciptakan kontradiksi ekologis yang nyata: kebijakan agropolitan hortikultura secara tidak langsung bertentangan dengan kebijakan konservasi kawasan.

Dampak dari tekanan berlapis tersebut mencapai titik paling tragis pada 20 Januari 2025, ketika hujan intensitas tinggi memicu banjir bandang dan tanah longsor yang melanda sembilan desa di Kecamatan Petungkriyono, merenggut 25 jiwa, dan memutus akses jalan antar desa selama berhari-hari (Global Flood Emergency, 2025). Penjabat Gubernur Jawa Tengah secara eksplisit menyatakan bahwa alih fungsi lahan di wilayah pegunungan menjadi salah satu pemicu utama bencana tersebut (ANTARA, 2025).

Data tutupan lahan berbasis citra Sentinel-2A mengkonfirmasi tren degradasi tersebut: lahan hutan menyusut dari 6.798 Ha pada 2018 menjadi 6.335 Ha pada 2025 (berkurang 463 Ha atau 6,81%), sementara lahan terbangun tumbuh 61,6% dan lahan pertanian meningkat 20,3% dalam periode yang sama. Kondisi ini mempertegas urgensi adanya kajian spasial prediktif yang dapat memproyeksikan lintasan perubahan tutupan lahan ke depan sekaligus mengidentifikasi zona-zona yang berpotensi mengalami alih fungsi pada kawasan rawan bencana.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini hadir untuk menganalisis dinamika perubahan tutupan lahan Kecamatan Petungkriyono secara temporal (2018–2025) dan memproyeksikannya ke tahun 2030 menggunakan model Cellular Automata–Markov Chain (CA-MC). Tahun 2030 dipilih sebagai titik tengah periode RTRW

Kabupaten Pekalongan 2020–2040 yang masih memungkinkan dilakukannya intervensi kebijakan bermakna sebelum periode perencanaan berakhir. Dengan mempertemukan hasil prediksi dengan peta indeks risiko bencana dan arahan pola ruang RTRW, penelitian ini berupaya menghasilkan basis data spasial yang bersifat antisipatif sebagai landasan kebijakan mitigasi bencana.

2. KAJIAN TEORITIS

Tutupan Lahan dan Perubahannya

Tutupan lahan didefinisikan sebagai tutupan biofisik pada permukaan suatu lahan di muka bumi yang dapat diamati, mencakup vegetasi, konstruksi artifisial, serta kenampakan lain yang menutupi permukaan tanah (SNI 7645-1:2014). Tutupan lahan menyediakan informasi krusial bagi pemodelan dan pemahaman fenomena alam di permukaan bumi, baik di masa lalu maupun masa kini (Cahyono et al., 2019). Data tutupan lahan berupa vegetasi dan konstruksi artifisial dapat dipergunakan untuk mempelajari perubahan iklim dan memahami keterkaitan antara aktivitas manusia dengan perubahan global (Sampurno & Thoriq, 2016).

Perubahan tutupan lahan merupakan bertambahnya suatu tutupan lahan dari satu jenis penggunaan ke penggunaan lainnya, diikuti dengan berkurangnya tipe penggunaan lahan lain pada kurun waktu berbeda (Mulya et al., 2022). Penyebab perubahan tutupan lahan dapat dibagi menjadi penyebab langsung—aktivitas manusia yang secara langsung memengaruhi tutupan lahan—dan penyebab dasar seperti dinamika populasi dan kebijakan pertanian (Juniyanti et al., 2020). Faktor-faktor pendorong meliputi faktor fisik-biologis (kesesuaian lahan, topografi, tanah), faktor ekonomi (keuntungan, pasar), dan faktor institusi (hukum pertanahan, kebijakan) (Barlowe, 1986 dalam Alwan et al., 2021).

Teknologi Penginderaan Jauh dan SIG

Penginderaan jauh adalah ilmu dan seni untuk memperoleh informasi tentang objek atau fenomena melalui analisis data yang diperoleh tanpa kontak langsung (Lillesand & Keifer, 1990). Citra satelit Sentinel-2 yang dikembangkan oleh European Space Agency (ESA) dalam program GMES merupakan satelit multispektral dengan 13 band pada resolusi spasial 10–60 meter, dapat diakses secara gratis, dan memiliki periode revisit 5 hari (Oktaviani & Kusuma, 2017). Kemampuan resolusi spasial 10 meter dengan cakupan temporal yang baik menjadikan Sentinel-2A sebagai sumber data yang ideal untuk pemetaan tutupan lahan pada skala kecamatan.

Klasifikasi citra terbimbing (supervised classification) menggunakan algoritma Maximum Likelihood Classification (MLC) merupakan salah satu metode dengan tingkat ketelitian tinggi dalam klasifikasi tutupan lahan (Gifari & Yuana, 2023). Metode ini mengasumsikan distribusi statistik normal untuk setiap kelas pada masing-masing band, menghitung probabilitas bahwa setiap piksel termasuk dalam kelas tertentu, dan menetapkan piksel ke kelas dengan probabilitas tertinggi (Lillesand et al., 1979 dalam Gifari & Yuana, 2023).

Model Cellular Automata–Markov Chain

Cellular Automata (CA) merupakan metode pemodelan sistem dinamis diskret di mana kondisi setiap sel pada waktu $t+1$ ditentukan oleh keadaan sel-sel tetangganya berdasarkan aturan transisi yang telah ditetapkan (Mohamed & Worku, 2020). Model ini mampu merepresentasikan proses non-linear dan kompleks yang terdistribusi secara spasial (Liping et al., 2018). Rantai Markov (Markov Chain) adalah metode statistik yang

menghasilkan matriks probabilitas transisi, matriks area transisi, serta citra probabilitas bersyarat berdasarkan data tutupan lahan historis (Salakory & Rakuasa, 2022).

Integrasi model CA–Markov menggabungkan kekuatan analisis temporal rantai Markov dengan kemampuan representasi spasial CA, sehingga prediksi perubahan tutupan lahan menjadi lebih realistis baik dari sisi besaran maupun pola sebaran ruangnya (Hamad et al., 2018). Dalam praktiknya, model CA-Markov telah terbukti efektif menghasilkan simulasi prediksi tutupan lahan dengan tingkat akurasi tinggi di berbagai wilayah dengan karakteristik serupa (Behera et al., 2025). Plugin MOLUSCE pada QGIS mengimplementasikan pendekatan CA-Markov yang mengintegrasikan Artificial Neural Network (ANN) berbasis Multi-layer Perceptron (MLP) sebagai mekanisme transisi, sehingga mampu menangkap hubungan non-linear antara driving variables dan pola perubahan lahan (Nabila, 2023).

Kawasan Rawan Bencana dan Kesesuaian Tata Ruang

Kawasan rawan bencana adalah area yang memiliki potensi tinggi mengalami bencana hidrometeorologi seperti banjir dan tanah longsor, khususnya akibat perubahan tutupan lahan yang menurunkan kapasitas mekanis lereng (BNPB, 2025). Perubahan tutupan lahan hutan menjadi pertanian atau permukiman mengurangi kemampuan perakaran dalam menahan pergerakan tanah, meningkatkan aliran permukaan, dan memperparah risiko longsor (Ramadhan et al., 2016). Analisis kesesuaian tutupan lahan dengan rencana pola ruang RTRW menjadi instrumen penting untuk mengidentifikasi ketidaksesuaian pemanfaatan ruang yang berpotensi meningkatkan kerentanan wilayah.

3. METODE PENELITIAN

Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode penelitian kuantitatif deduktif dengan pendekatan spasial. Penelitian kuantitatif spasial mencakup satu atau lebih kegiatan berupa model angka spasial, pemanfaatan teori spasial, serta pembangunan dan validasi bentuk matematis dari proses spasial. Pendekatan deduktif digunakan dengan memulai dari teori umum dan mengujinya melalui observasi spesifik berbasis data citra satelit multitemporal.

Lokasi dan Data Penelitian

Wilayah studi adalah Kecamatan Petungkriyono, Kabupaten Pekalongan, yang secara astronomis terletak antara 109,70830°–109,74749° Bujur Timur dan -7,18014°–(-7,12480°) Lintang Selatan, dengan luas wilayah 21,69 km² dan terdiri dari 9 desa. Data utama yang digunakan adalah citra satelit Sentinel-2A tahun 2018–2025 yang diperoleh dari European Space Agency (ESA), dilengkapi data administrasi wilayah (BIG), data DEM (DEMNAS-BIG), serta data jaringan jalan, sungai, dan pola ruang RTRW 2020–2040 dari DPUTARU Kabupaten Pekalongan.

Klasifikasi Tutupan Lahan

Klasifikasi tutupan lahan dilakukan menggunakan metode supervised classification dengan algoritma Maximum Likelihood Classification (MLC) pada perangkat lunak ArcGIS 10.8. Tahapan meliputi: (1) penggabungan band citra Sentinel-2A menggunakan kombinasi band Natural Color (B4, B3, B2), (2) pemotongan citra sesuai batas wilayah Kecamatan Petungkriyono, (3) pemilihan training sample sebanyak 150 titik per tahun dengan metode stratified random sampling yang terbagi dalam tiga kelas: Lahan Hutan (85 titik), Lahan Pertanian (35 titik), dan Lahan Terbangun (30 titik), serta (4) klasifikasi dengan MLC.

Akurasi klasifikasi diukur menggunakan Overall Accuracy (OA) dan koefisien Cohen's Kappa (κ), dengan ambang batas minimal $OA \geq 85\%$ dan $\kappa \geq 0,70$ sesuai standar penginderaan jauh (Jensen, 1999). Verifikasi lapangan (ground check) dilakukan pada tanggal 23 Januari 2026 di Kecamatan Petungkriyono untuk memvalidasi hasil klasifikasi.

Faktor Pendorong Perubahan

Empat faktor pendorong (driving factors) digunakan dalam model CA-MC berdasarkan karakteristik fisik wilayah pegunungan: (1) jarak terhadap jalan—representasi aksesibilitas, (2) kemiringan lereng—keterbatasan fisik penggarapan lahan, (3) ketinggian tempat—kesesuaian komoditas hortikultura dataran tinggi, dan (4) jarak terhadap sungai—kondisi hidrologi dan risiko banjir. Setiap faktor diolah menjadi raster 10×10 piksel menggunakan Euclidean Distance dan reclassify pada ArcGIS 10.8, kemudian divalidasi korelasinya melalui Pearson Correlation pada MOLUSCE untuk memastikan tidak ada multikolinearitas.

Model Prediksi CA-MC

Pemodelan prediksi tutupan lahan 2030 dilakukan menggunakan plugin MOLUSCE pada QGIS yang mengintegrasikan Cellular Automata, Markov Chain, dan Artificial Neural Network (ANN) berbasis Multi-layer Perceptron (MLP). Tahapan analisis mencakup: (1) input peta tutupan lahan 2018 dan 2025 sebagai data dasar, (2) perhitungan Transition Probability Matrix oleh komponen Markov Chain, (3) pelatihan MLP dengan konfigurasi neighborhood 1px, learning rate 0,005, 3.000 iterasi, dan 5 hidden layers, (4) simulasi Cellular Automata untuk proyeksi spasial 2030, serta (5) validasi model melalui perbandingan peta simulasi dengan peta aktual menggunakan statistik Kappa.

Analisis Ketidaksesuaian

Analisis ketidaksesuaian dilakukan melalui metode overlay antara: (1) peta prediksi tutupan lahan 2030 dengan peta indeks risiko bencana longsor Kecamatan Petungkriyono, dan (2) peta prediksi tutupan lahan 2030 dengan peta pola ruang RTRW Kabupaten Pekalongan 2020–2040. Proporsi risiko dihitung menggunakan formula: $\text{Proporsi} = (\text{Luas Kelas Risiko} / \text{Total Luas Jenis Lahan}) \times 100\%$.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Klasifikasi dan Pola Sebaran Tutupan Lahan 2018–2025

Hasil klasifikasi citra Sentinel-2A menunjukkan bahwa seluruh tahun pengamatan 2018–2025 memenuhi standar kelayakan dengan Overall Accuracy berkisar antara 86,00%–94,67% dan nilai Kappa 0,76–0,91. Variasi nilai akurasi antarwaktu disebabkan oleh perbedaan kondisi atmosferik, tutupan awan, dan kualitas citra pada masing-masing periode pengambilan data.

Kecamatan Petungkriyono secara konsisten didominasi oleh lahan hutan sepanjang periode pengamatan, namun mengalami penurunan yang stabil dari tahun ke tahun. Tabel 1 menyajikan distribusi luas masing-masing kelas tutupan lahan dari 2018 hingga 2025.

**Tabel 1. Luas Wilayah Pola Sebaran Tutupan Lahan Kecamatan
Petungkriyono 2018–2025**

Kategori	2018 (Ha)	2019 (Ha)	2021 (Ha)	2022 (Ha)	2024 (Ha)	2025 (Ha)
Lahan Hutan	6.798	6.712	6.617	6.547	6.373	6.335

Lahan Pertanian	1.126	1.164	1.172	1.200	1.379	1.355
Lahan Terbangun	380	429	516	558	552	614

Sumber: Peneliti, 2025

Data pada Tabel 1 memperlihatkan bahwa lahan hutan mengalami penurunan paling signifikan pada periode 2022–2023 (berkurang 134 Ha dalam satu tahun), yang bertepatan dengan intensifikasi pasca-penetapan RTRW 2020–2040. Secara spasial, perubahan paling masif terpusat di wilayah selatan kecamatan yang mencakup Desa Simego, Gumelem, dan Curugmuncar area dengan ketinggian mencapai 2.400 mdpl dan tanah vulkanik yang subur, menjadikannya daya tarik tinggi bagi ekspansi pertanian hortikultura.

Dinamika Perubahan Tutupan Lahan 2018–2025

Dalam periode 2018–2025 terjadi total penyusutan lahan hutan sebesar 463 Ha (–6,81%), sementara lahan pertanian bertambah 229 Ha (+20,34%) dan lahan terbangun meningkat 234 Ha (+61,58%) dari kondisi awal. Analisis transisi mengungkap tiga jalur konversi utama yang bekerja secara bersamaan dan saling memperkuat:

- Lahan Hutan → Lahan Pertanian: mencapai 2.595 Ha secara kumulatif selama 2018–2025, menjadikannya jalur konversi terbesar. Ekspansi pertanian hortikultura—termasuk pembukaan sekitar 70 hektare hutan alam sekunder secara ilegal di kawasan Simego menjadi tekanan paling dominan terhadap kawasan hutan lindung.
- Lahan Hutan → Lahan Terbangun: berlangsung relatif kecil secara langsung, namun berkembang bertahap melalui fase peralihan lahan pertanian terlebih dahulu. Pembangunan fasilitas wisata seperti warung, homestay, dan infrastruktur jalan di sekitar destinasi alam Petungkriyono menjadi pemicu konversi ini.
- Lahan Pertanian → Lahan Terbangun: mencapai 1.404 Ha kumulatif, menjadikannya jalur konversi terbesar kedua. Pertumbuhan permukiman dipercepat oleh meningkatnya aktivitas ekonomi dari sektor wisata dan pertanian.

Pengembangan jalan hotmix pada tahun 2018 yang membuka aksesibilitas ke dalam kawasan hutan lindung menjadi titik akselerasi utama yang mengintegrasikan tekanan pariwisata dan agropolitan secara simultan. Pasca-penetapan RTRW pada 2020, laju konversi meningkat secara signifikan: lahan hutan menyusut tambahan 301 Ha dalam lima tahun (2020–2025), dibandingkan 162 Ha pada periode sebelumnya (2018–2020). Hal ini mengkonfirmasi bahwa penetapan tiga status kawasan yang saling berbenturan dalam RTRW berdampak nyata pada akselerasi alih fungsi lahan.

Model Prediksi dan Validasinya

Sebelum digunakan untuk proyeksi 2030, model CA-MC diuji validasinya. Hasil uji Pearson Correlation menunjukkan tidak ada korelasi kuat antar keempat faktor pendorong (nilai tertinggi 0,26 antara jalan dan kemiringan lereng), mengkonfirmasi bahwa setiap variabel memberikan informasi independen yang layak digunakan dalam model. Tabel 2 menyajikan hasil uji validasi model secara lengkap.

Tabel 2. Hasil Uji Validasi Model CA-MC Prediksi Tutupan Lahan

Parameter Validasi	Nilai	Kategori	Keterangan
% of Correctness	93,55%	Sangat Tinggi	> 85%
Kappa (Overall)	0,834	Almost Perfect	0,81–1,00

Kappa (Histogram)	0,970	Almost Perfect	0,81–1,00
Kappa (Location)	0,859	Almost Perfect	0,81–1,00
Kappa MLP (ANN)	0,597	Moderate	0,41–0,60

Sumber: Peneliti, 2025

Nilai % of Correctness sebesar 93,55% menunjukkan bahwa lebih dari 93% piksel pada peta simulasi sesuai dengan kondisi aktual. Nilai Kappa overall 0,834 mengkonfirmasi akurasi keseluruhan model berada pada kategori Almost Perfect menurut skala Landis & Koch (1977). Kappa histogram yang sangat tinggi (0,970) mengindikasikan model berhasil memperkirakan komposisi luas masing-masing kelas dengan sangat akurat, sedangkan Kappa location (0,859) mengindikasikan kemampuan model dalam mensimulasikan lokasi spasial perubahan.

Perlu dicatat bahwa nilai Kappa MLP (ANN) sebesar 0,5972 tergolong dalam kategori moderate, mengindikasikan bahwa komponen ANN memiliki kemampuan yang cukup namun belum optimal dalam mempelajari pola perubahan lahan dari driving variables. Keterbatasan ini umumnya ditemukan pada pemodelan wilayah dengan tutupan vegetasi padat dan variasi spasial tinggi seperti Kecamatan Petungkriyono. Oleh karena itu, hasil prediksi lebih tepat dipahami sebagai skenario peringatan dini (early warning scenario), bukan dasar tunggal kebijakan mengikat.

Prediksi Perubahan Tutupan Lahan Tahun 2030

Berdasarkan hasil simulasi CA-MC yang telah tervalidasi, proyeksi tutupan lahan Kecamatan Petungkriyono pada tahun 2030 disajikan pada Tabel 3. Transition probability matrix menunjukkan lahan pertanian sebagai kelas paling dinamis dengan probabilitas retensi hanya 0,51, berfungsi sebagai kelas antara dalam siklus konversi lahan hutan menuju lahan terbangun.

Tabel 3. Prediksi Tutupan Lahan Kecamatan Petungkriyono Tahun 2030

Kategori	2018 (Ha)	2018 (%)	2030 (Ha)	2030 (%)	Perubahan
Lahan Hutan	6.798	81,86%	6.248	75,24%	-550 Ha
Lahan Pertanian	1.126	13,56%	1.404	16,90%	+278 Ha
Lahan Terbangun	380	4,58%	652	7,85%	+272 Ha
Total	8.304	100%	8.304	100%	-

Sumber: Peneliti, 2025

Proyeksi menunjukkan bahwa karakter Kecamatan Petungkriyono sebagai kawasan hutan masih akan bertahan, namun dengan tekanan yang terus meningkat. Lahan hutan diprediksi menyusut 550 Ha (-8,09% dari kondisi 2018), sementara lahan terbangun tumbuh paling signifikan secara persentase sebesar +71,58%. Pola ekspansi terbesar diprediksi terjadi di wilayah selatan, yang diperparah oleh rencana pembangunan ruas jalan baru Simego-Igergede, Yosorejo-Curugmuncar, dan Curugmuncar-Songgodadi dengan total anggaran mencapai 8 miliar rupiah. Pembukaan akses jalan baru ini diperkirakan akan mempercepat laju konversi lahan di area yang sebelumnya terisolasi pada periode 2025–2030.

Analisis Ketidaksesuaian dengan Kawasan Rawan Bencana

Overlay antara prediksiutupan lahan 2030 dengan peta indeks risiko longsor menunjukkan bahwa lahan pertanian memiliki proporsi risiko tinggi dan sangat tinggi terbesar (14,32%), diikuti lahan terbangun (13,81%) dan lahan hutan (13,17%). Tingginya proporsi risiko pada lahan pertanian mengindikasikan bahwa area-area yang kehilanganutupan vegetasi menjadi lebih rentan terhadap longsor akibat berkurangnya kemampuan perakaran dalam menahan pergerakan tanah.

Meskipun proporsi risiko pada lahan terbangun relatif lebih kecil dibandingkan lahan pertanian, potensi dampaknya terhadap keselamatan manusia jauh lebih besar. Keberadaan permukiman di zona risiko tinggi dan sangat tinggi terkonsentrasi di Desa Simego, Gumelem, dan Curugmuncar mengindikasikan adanya paparan risiko langsung terhadap jiwa penduduk yang memerlukan penanganan prioritas.

Analisis Kesesuaian Prediksi dengan Pola Ruang RTRW

Overlay antara prediksiutupan lahan 2030 dengan pola ruang RTRW mengidentifikasi ketidaksesuaian pemanfaatan ruang yang signifikan, sebagaimana disajikan pada Tabel 4. Ketidaksesuaian terbesar terjadi pada lahan pertanian yang berada di kawasan Hutan Produksi Terbatas (662 Ha), dan lahan terbangun yang berada di kawasan serupa (59 Ha).

Tabel 4. Ketidaksesuaian Prediksi Tutupan Lahan 2030 dengan RTRW Kabupaten Pekalongan

Tutupan Lahan	Sub Zona RTRW	Keterangan	Luas (Ha)
Lahan Pertanian	Hutan Prod. Terbatas	Tidak Diperkenankan	662,00
	Hutan Lindung	Tidak Diperkenankan	0,28
	Sempadan Sungai	Tidak Diperkenankan	1,00
Total Pertanian			672,28
Lahan Terbangun	Hutan Prod. Terbatas	Tidak Diperkenankan	59,00
	Hutan Lindung	Tidak Diperkenankan	0,11
	Sempadan Sungai	Tidak Diperkenankan	0,19
Total Terbangun			511,71

Sumber: Peneliti, 2025

Total ketidaksesuaian prediksi lahan pertanian terhadap RTRW mencapai 672,28 Ha, sedangkan ketidaksesuaian lahan terbangun mencapai 511,71 Ha. Temuan ini mengkonfirmasi adanya disharmoni yang semakin melebar antara peruntukan kawasan dalam RTRW dan kondisiutupan lahan aktual. Tekanan konversi telah melampaui kapasitas penegakan regulasi yang ada, terutama dengan ditemukannya sekitar 70 hektare hutan lindung yang dikonversi secara ilegal.

Implikasi Terhadap Mitigasi Bencana dan Tata Ruang

Prediksi berkurangnya lahan hutan sebesar 550 Ha hingga 2030 memiliki implikasi langsung terhadap peningkatan risiko bencana longsor. Tutupan hutan pada lereng curam berfungsi sebagai penahan massa tanah melalui sistem perakaran yang dalam dan rapat. Ketika digantikan tanaman hortikultura berakar dangkal, kapasitas mekanis lereng melemah signifikan dan meningkatkan probabilitas kejadian longsor sebagaimana dibuktikan oleh bencana Januari 2025.

Dari perspektif tata ruang, diperlukan revisi RTRW yang mengintegrasikan peta prediksi tutupan lahan berbasis CA-MC sebagai referensi spasial, penetapan zona buffer tegas di sekitar kawasan lindung, serta penyusunan regulasi koridor jalan baru di wilayah selatan. Infrastruktur jalan di kawasan hutan lindung perlu disertai kajian dampak spasial terhadap tutupan lahan sebelum pembangunan dilaksanakan, mengingat jalan merupakan variabel pemicu konversi paling kritis.

Pertumbuhan permukiman yang terkonsentrasi di wilayah selatan dengan risiko longsor yang meningkat akibat deforestasi menciptakan kerentanan ganda bagi penduduk: kebutuhan ekonomi mendorong pembukaan lahan, sementara pembukaan lahan itu sendiri memperparah bahaya yang mengancam keselamatan mereka. Kondisi ini memerlukan pendekatan mitigasi yang mempertimbangkan dimensi sosial-ekonomi, tidak hanya parameter biofisik.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan seluruh tahapan analisis yang dilakukan, disimpulkan sebagai berikut:

Pertama, Kecamatan Petungkriyono mengalami proses degradasi tutupan lahan yang konsisten dan meningkat intensitasnya selama 2018–2025. Lahan hutan menyusut dari 6.798 Ha (81,86%) menjadi 6.335 Ha (76,29%), sementara lahan terbangun meningkat 61,58% dan lahan pertanian bertambah 20,34%. Jalur konversi dominan adalah hutan menjadi pertanian hortikultura (2.595 Ha kumulatif) yang didorong oleh ekspansi komoditas kentang, kubis, dan wortel di wilayah selatan.

Kedua, model Cellular Automata–Markov Chain yang dikembangkan melalui QGIS MOLUSCE menunjukkan performa validasi yang baik (% Correctness 93,55%, Kappa overall 0,834). Proyeksi 2030 mengindikasikan penyusutan lahan hutan sebesar 550 Ha (–8,09% dari 2018), pertumbuhan lahan pertanian +278 Ha, dan ekspansi lahan terbangun +272 Ha. Lahan pertanian merupakan kelas paling dinamis (probabilitas retensi 0,51) yang berfungsi sebagai kelas antara dalam siklus konversi hutan menuju permukiman.

Ketiga, nilai Kappa MLP (ANN) sebesar 0,5972 (moderate) menegaskan bahwa hasil prediksi lebih tepat digunakan sebagai skenario peringatan dini (early warning scenario), bukan dasar tunggal kebijakan mengikat. Setiap kebijakan yang bersumber dari hasil ini harus disertai kajian lanjutan yang lebih detail.

Keempat, terdapat kontradiksi struktural dalam penetapan fungsi kawasan pada RTRW 2020–2040. Penetapan simultan sebagai kawasan strategis pariwisata, agropolitan hortikultura, dan rawan bencana secara ekologis saling bertentangan dan bersama-sama mempercepat alih fungsi lahan hutan. Ketidaksesuaian prediksi tutupan lahan 2030 dengan RTRW mencapai 672,28 Ha untuk lahan pertanian dan 511,71 Ha untuk lahan terbangun.

Rekomendasi kebijakan yang diajukan meliputi: (1) deliniasi batas kawasan hutan yang tegas dan tidak dapat dinegosiasi dengan sosialisasi partisipatif, (2) substitusi komoditas dengan pendekatan agroforestri bernilai tinggi yang kompatibel dengan fungsi lindung, (3) moratorium pembangunan infrastruktur jalan baru di kawasan lindung tanpa kajian dampak spasial, (4) zonasi wisata yang membedakan zona inti, penyangga, dan

pelayanan secara tegas, (5) intensifikasi pertanian lahan yang sudah ada sebagai alternatif ekstensifikasi, serta (6) program relokasi sukarela berbasis insentif yang bermartabat bagi permukiman di zona risiko sangat tinggi.

DAFTAR REFERENSI

- Adhiatma, R., & Lubis, I. (2020). Perubahan dan Prediksi Penggunaan/Penutupan Lahan di Kabupaten Lampung Selatan. *Journal of Natural Resources and Environmental Management*, 10(2), 234–246.
- Alwan, Barkey, R. A., Syafri, & Muhibuddin, A. (2021). *Pemodelan Pola Perubahan Penggunaan Lahan Kawasan Perkotaan*. Pusaka Almada.
- ANTARA. (2025). Alih fungsi lahan jadi pemicu longsor Petungkriyono. Kantor Berita Nasional ANTARA.
- Behera, A., Rawat, K. S., Kumar, S., Almuflih, A. S., & Qureshi, M. R. N. (2025). Simulation and projection of land use and land cover using remote sensing data and CA–Markov model. *Geocarto International*, 40(1).
- BNPB. (2025). INFOBENCANA. Badan Nasional Penanggulangan Bencana, Vol. 6, No. 3.
- Cahyono, B. E., Febriawan, E. B., & Nugroho, A. T. (2019). Analisis Tutupan Lahan Menggunakan Metode Klasifikasi Tidak Terbimbing Citra Landsat. *Jurnal Rekayasa Teknik*, 13(1).
- Christian, Y., Asdak, C., & Kendarto, D. R. (2021). Analisis Perubahan Penggunaan Lahan di Kabupaten Bandung Barat. *TEKNOTAN*, 15(1), 15–20.
- Fitriana, A. L., Subiyanto, S., & Firdaus, H. S. (2017). Model Cellular Automata Markov untuk Prediksi Perkembangan Fisik Wilayah Permukiman Kota Surakarta. *Jurnal Geodesi Undip*, 6(4), 246–253.
- Gifari, O. I., & Yuana, K. A. (2023). Analisis Perubahan Tutupan Lahan Menggunakan Metode Klasifikasi Terbimbing Pada Data Citra Penginderaan Jauh Kota Samarinda. *Jurnal Geosains*, 18(2).
- Global Flood Emergency. (2025). Flash flood and landslide disaster in Petungkriyono District, Indonesia. *Global Disaster Alert and Coordination System*.
- Hamad, R., Balzter, H., & Kolo, K. (2018). Predicting Land Use/Land Cover Changes Using a CA-Markov Model under Two Different Scenarios. *Sustainability*, 10(10), 3421.
- Juniyanti, L., Prasetyo, L. B., Aprianto, D. P., Purnomo, H., & Kartodiharjo, H. (2020). Perubahan penggunaan dan tutupan lahan, serta faktor penyebabnya di Pulau Bengkalis. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam*, 10(3), 419–435.
- Kamil, M. I., Hasyim, A. W., & Yudono, A. (2024). Prediksi Perubahan Tutupan Lahan Menggunakan Cellular Automata-Markov Chain Studi Kasus Kecamatan Lowokwaru. *Jurnal Perencanaan Wilayah Perkotaan dan Lingkungan*, 13(1), 151–162.
- Kementerian Kehutanan. (2025). *Laporan Laju Deforestasi Netto Indonesia 2024*. Kementerian Kehutanan Republik Indonesia.
- Makarim, B. M. N., Gandharum, L., & Mataburu, I. B. (2025). Pendekatan Spasial Cellular Automata-Markov Chain Untuk Prediksi Tutupan Lahan dan Analisis Bahaya Banjir. *Jurnal Geografi, Edukasi dan Lingkungan*, 9(2), 342–369.
- Mohamed, A., & Worku, H. (2020). Simulating urban land use and cover dynamics using cellular automata and Markov chain approach in Addis Ababa and the surrounding. *Urban Climate*, 31.

- Mulya, Q. P., Aliyah, I., & Yudana, G. (2022). Perubahan penggunaan lahan dan faktor-faktor yang mempengaruhi di kawasan Jalan Ahmad Yani Kartasura. *REGION: Jurnal Pembangunan Wilayah*, 17.
- Nabila, D. A. (2023). Pemodelan prediksi dan kesesuaian perubahan penggunaan lahan menggunakan CA-ANN. *Tunas Agraria*, 6(1), 41–55.
- Oktaviani, N., & Kusuma, H. A. (2017). Pengenalan Citra Sentinel-2 untuk Pemetaan Kelautan. Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.
- Perda Kabupaten Pekalongan Nomor 3 Tahun 2020 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten Pekalongan Tahun 2020–2040.
- Perhutani. (2017). Petungkriyono: Heart of Java. Perum Perhutani KPH Pekalongan Timur.
- Permana, M., Sitorus, S. R. P., & Darmawan, D. (2021). Analisis Perubahan Penggunaan Lahan dan Prediksinya dengan Menggunakan Markov–Cellular Automata di Wilayah Peri Urban Kota Malang. *Tataloka*, 23(3), 307–319.
- Prayogi, H., Setiadi, H., Supriatna, & Dewayany. (2024). Model Prediksi Perubahan Penutup Lahan di Kabupaten Majalengka Menggunakan Metode Cellular Automata Markov Chain. *Majalah Geografi Indonesia*.
- Rakuasa, H., Salakory, M., & Latue, P. C. (2022). Analisis dan Prediksi Perubahan Tutupan Lahan Menggunakan Model CA-Markov Chain di DAS Wae Ruhu Kota Ambon. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 9(2), 285–295.
- Ramadhan, R., Widiatmaka, & Sudadi, U. (2016). Perubahan Penggunaan Lahan dan Pemanfaatan Ruang Pada Wilayah Rawan Longsor di Kabupaten Banjarnegara. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 6(2), 159–167.
- Salakory, M., & Rakuasa, H. (2022). Modeling of Cellular Automata Markov Chain for predicting the carrying capacity of Ambon City. *Journal of Natural Resources and Environmental Management*, 12(2), 372–387.
- Sampurno, R. M., & Thoriq, A. (2016). Klasifikasi Tutupan Lahan Menggunakan Citra Landsat 8 OLI di Kabupaten Sumedang. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 10(2).
- SNI 7645-1:2014 tentang Klasifikasi Penutup Lahan. Badan Standardisasi Nasional Indonesia.
- Tallo, A. J., Tallo, M. G. Y., Antjak, A. L., Doko, M. I., & Lodang, M. A. C. (2025). Land Cover Change Prediction Using Cellular Automata and Markov Chain Models. *Techno Nusa Mandiri*, 22(2).
- Verburg, P. H., Veldkamp, W. S. A., Espaldon, R. L. V., & Mastura, S. S. A. (2002). Modeling the Spatial Dynamics of Regional Land Use: The CLUE-S Model. ResearchGate.
- Yudichandra, F. K., Widiatmaka, W., & Anwar, S. (2020). Perubahan dan Prediksi Penggunaan Lahan Menggunakan Markov–Cellular Automata di Kota Batu. *Tataloka*, 22(2), 202–211.
- Zalmita, N., Alvira, Y., & Furqan, M. H. (2020). Analisis Perubahan Penggunaan Lahan Menggunakan SIG di Gampong Kecamatan Syiah Kuala. *Jurnal Geospasial*, 9(1), 1–9.