

ANALISIS SPASIAL PERKEMBANGAN PERMUKIMAN KECAMATAN BATUAN MENGUNAKAN CELLULAR AUTOMATA

SPATIAL ANALYSIS OF SETTLEMENT DEVELOPMENT IN BATUAN USING CELLULAR AUTOMATA

Carlos Rianto^{*1}, Maria Christina Endarwati¹, Mohammad Reza¹

1 Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Malang, Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2, Malang 65145, Indonesia

e-mail: *[riantocarlos13@gmail.com], [mc.mendarwati@gmail.com], [mohammad_reza@lecturer.itn.ac.id]

ARTICLE INFO	Abstract
<i>Article History:</i> - Received: - Received in revised form: - Accepted on: - Available Online: - <i>Keywords:</i> <i>analisis spasial; permukiman; Frequency Ratio; Cellular Automata; CA-Markov</i> Corresponding Author: Carlos Rianto Program Studi PWK, FTSP, ITN Malang [riantocarlos13@gmail.com]	Perkembangan permukiman di wilayah peri-urban mendorong perubahan penggunaan lahan dan memerlukan pemahaman spasial untuk mendukung pengendalian pemanfaatan ruang. Penelitian ini menganalisis perubahan permukiman Kecamatan Batuan tahun 2019-2025, hubungan perubahan dengan jarak terhadap jaringan jalan, jarak terhadap permukiman eksisting, dan kemiringan lereng, serta memodelkan perkembangan tahun 2031. Pendekatan kuantitatif-spasial menggunakan Post-Classification Comparison, Frequency Ratio (FR), dan Cellular Automata-Markov dengan grid 30 x 30 m dan Moore Neighborhood 3 x 3. Luas permukiman meningkat dari 162,61 ha menjadi 275,20 ha, dengan perubahan bersih 112,59 ha (69,24%) dan gross gain 193,20 ha. Sebanyak 93,26% gross gain berasal dari persawahan dan pertanian tanah kering semusim. FR tertinggi terdapat pada jarak 0-100 m dari permukiman eksisting (2,01), lereng 2-8% (1,64), dan jarak 0-100 m dari jalan (1,51). Uji kesesuaian internal menghasilkan Overall Accuracy 86,67% dan Kappa 0,36. Skenario CA-Markov mengalokasikan tambahan 183,15 ha hingga 2031 sehingga luas permukiman mencapai 458,35 ha. Hasil ini merupakan skenario spasial untuk mendukung pemantauan konversi lahan dan pengendalian pemanfaatan ruang. <i>Settlement growth in peri-urban areas drives land-use change and requires spatial understanding to support land-use control. This study analyzes settlement change in Batuan District during 2019-2025, its association with distance to roads, distance to existing settlements, and slope, and models settlement development to 2031. A quantitative-spatial approach combines Post-Classification Comparison, Frequency Ratio (FR), and Cellular Automata-Markov using 30 x 30 m cells and a 3 x 3 Moore Neighborhood. Settlement area increased from 162.61 ha to 275.20 ha, producing a net change of 112.59 ha (69.24%) and a gross gain of 193.20 ha. Paddy fields and seasonal dryland agriculture accounted for 93.26% of gross gain. The highest FR values occurred within 0-100 m of existing settlements (2.01), on 2-8% slopes (1.64), and within 0-100 m of roads (1.51). Internal model testing yielded 86.67% Overall Accuracy and a Kappa of 0.36. The CA-Markov scenario allocates 183.15 ha of additional settlement by 2031, increasing total settlement to 458.35 ha. The result is a spatial scenario for monitoring land conversion and supporting land-use control.</i>

1. Pendahuluan

Perkembangan kawasan permukiman pada wilayah peri-urban merupakan bagian dari dinamika penggunaan ruang yang perlu dikendalikan karena pertumbuhan kawasan terbangun dapat berlangsung bersamaan dengan keberadaan lahan pertanian dan penggunaan lahan nonterbangun lainnya. Dalam kerangka perumahan dan kawasan permukiman, penyediaan ruang hunian perlu tetap mempertimbangkan keterpaduan dengan lingkungan dan pemanfaatan ruang [1]. Pada konteks Kecamatan Batuan, pertanyaan utama bukan hanya seberapa besar luas permukiman bertambah, tetapi juga di mana perubahan terjadi, penggunaan lahan apa yang terkonversi, dan bagaimana kecenderungan spasialnya berkembang.

Pertumbuhan permukiman tidak berlangsung secara acak. Aksesibilitas memengaruhi peluang interaksi antar lokasi; Hansen menunjukkan bahwa lokasi dengan akses lebih baik memiliki peluang interaksi yang lebih tinggi dan dapat berkaitan dengan intensitas pemanfaatan lahan [2]. Selain akses jalan, kedekatan dengan struktur permukiman yang sudah terbentuk juga relevan karena perkembangan kawasan terbangun dapat bersifat mengelompok dan dipengaruhi oleh lingkungan lokal. Konsep Cellular Automata (CA) merepresentasikan ruang sebagai cell dengan state tertentu yang berubah melalui aturan lokal dan neighborhood [3-5].

Perubahan historis dapat diidentifikasi melalui Post-Classification Comparison (PCC), yaitu membandingkan peta hasil klasifikasi pada dua waktu untuk memperoleh persistence, gain, loss, dan transisi antarkelas [6,7]. Hubungan antara kejadian pertambahan permukiman dan kelas faktor spasial selanjutnya diukur dengan Frequency Ratio (FR). Pendekatan FR memungkinkan skor faktor diturunkan dari pola perubahan aktual, bukan semata-mata dari penilaian subjektif [8]. Sementara itu, Markov Chain digunakan untuk memperoleh kecenderungan kuantitatif transisi berdasarkan kondisi historis [9].

Kecamatan Batuan, Kabupaten Sumenep, berinteraksi dengan pusat Kota Sumenep dan masih memiliki lahan pertanian yang luas di antara kawasan terbangun. Penelitian membatasi faktor spasial utama pada jarak terhadap jaringan jalan, jarak terhadap permukiman eksisting, dan kemiringan lereng karena ketiganya tersedia secara konsisten dan mempunyai interpretasi langsung terhadap lokasi perkembangan. Kontribusi artikel ini adalah menghubungkan perubahan aktual 2019-2025, FR empiris, transition potential, neighborhood, serta target transisi Markov dalam satu alur pemodelan CA pada grid 30 x 30 m. Hasil akhir diperlakukan sebagai skenario spasial dan dievaluasi kembali terhadap Lahan Baku Sawah (LBS) sebagai analisis pascaprediksi, bukan sebagai constraint model.

Penelitian bertujuan: (1) mengidentifikasi perubahan spasial permukiman dan penggunaan lahan yang terkonversi menjadi permukiman pada 2019-2025; (2) menganalisis hubungan relatif perubahan dengan jarak terhadap jaringan jalan, jarak terhadap permukiman eksisting, dan kemiringan lereng menggunakan FR; serta (3) memodelkan dan memprediksi perkembangan permukiman tahun 2031 menggunakan CA-Markov.

2. Metode Penelitian

2.1 Lokasi, Data, dan Unit Analisis

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif-spasial berbasis Sistem Informasi Geografis dengan wilayah analisis Kecamatan Batuan, Kabupaten Sumenep. Data utama terdiri atas penggunaan lahan 2019 dan 2025, jaringan jalan, batas administrasi, kemiringan lereng, serta rawa sebagai constraint operasional. Data jumlah penduduk dan analisis kesesuaian lahan digunakan sebagai informasi pendukung dan tidak dimasukkan langsung ke dalam CA Score. Seluruh layer untuk CA diseragamkan menjadi raster 30 x 30 m, sehingga satu cell mewakili 900 m² atau 0,09 ha.

Tabel 1. Data dan Peran dalam Analisis

Data	Peran dalam analisis	Tahun/Resolusi
Penggunaan lahan	PCC, transisi historis, state CA	2019 dan 2025
Jaringan jalan	Faktor jarak dan FR	Eksisting
Permukiman eksisting	Faktor jarak dan neighborhood	2019/2025
Kemiringan lereng	Faktor fisik dan FR	Eksisting

Data	Peran dalam analisis	Tahun/Resolusi
Rawa	Constraint absolut model	Eksisting
Jumlah penduduk	Informasi pendukung	Agregat desa

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2026.

2.2 Analisis Perubahan Penggunaan Lahan

PCC dilakukan melalui overlay penggunaan lahan 2019 dan 2025. Untuk fokus permukiman, hasil overlay direklasifikasi menjadi nonpermukiman tetap, permukiman tetap (persistence), penambahan permukiman (gross gain), dan pengurangan permukiman (gross loss). Perubahan bersih dihitung sebagai berikut:

$$Net\ Change = Gross\ Gain - Gross\ Loss \quad (1)$$

Area gross gain selanjutnya ditelusuri terhadap kelas penggunaan lahan tahun 2019 untuk mengetahui sumber konversi menjadi permukiman. Perubahan juga direkap menurut desa agar perbedaan intensitas perkembangan dapat dibaca pada skala administrasi.

2.3 Frequency Ratio, Normalisasi, dan Transition Potential

Gross gain 2019-2025 digunakan sebagai kejadian perubahan dalam perhitungan FR. Jarak terhadap jalan dibagi menjadi 0-100 m, >100-250 m, dan >250-500 m. Jarak terhadap permukiman eksisting dibagi menjadi 0-100 m, >100-250 m, >250-500 m, dan >500 m. Kemiringan lereng dibagi menjadi 0-2%, >2-8%, >8-15%, >15-25%, dan >25-40%. FR dihitung dengan membandingkan proporsi kejadian perubahan pada suatu kelas dengan proporsi luas kelas tersebut [8].

$$FR_{ij} = (C_{ij} / C) / (A_{ij} / A) \quad (2)$$

Nilai $FR > 1$ menunjukkan kejadian perubahan relatif lebih tinggi dibanding proporsi luas kelas; nilai mendekati 1 menunjukkan distribusi relatif proporsional; dan nilai < 1 menunjukkan kejadian relatif lebih rendah. FR bukan probabilitas pembangunan dan bukan bukti sebab-akibat. Setiap faktor kemudian dinormalisasi dengan min-max:

$$S_{ij} = (FR_{ij} - FR_{min,i}) / (FR_{max,i} - FR_{min,i}) \quad (3)$$

Skor normalisasi ketiga faktor digabungkan dengan bobot sama untuk membentuk transition potential (TP).

$$TP = (S_{jalan} + S_{permukiman} + S_{lereng}) / 3 \quad (4)$$

2.4 Cellular Automata-Markov dan Uji Kesesuaian Internal

State model disederhanakan menjadi permukiman (1) dan nonpermukiman (0). Permukiman aktual 2025 dipertahankan sebagai state persisten untuk skenario maju, sedangkan rawa menjadi constraint absolut. Neighborhood menggunakan Moore 3 x 3 dengan delapan cell tetangga. Nilai neighborhood dihitung sebagai proporsi tetangga yang berstatus permukiman:

$$NBR = jumlah\ tetangga\ permukiman / 8 \quad (5)$$

Prioritas spasial cell dinyatakan dengan CA Score, bukan probabilitas. Transition potential dan neighborhood diberi bobot sama:

$$CA\ Score = 0,5(TP) + 0,5(NBR) \quad (6)$$

Markov menentukan kuantitas target transisi dari pola historis. Probabilitas nonpermukiman menjadi permukiman (P01) sebesar 0,0893 diterapkan pada sekitar 2.051,02 ha nonpermukiman tahun 2025 dan menghasilkan target tambahan sekitar 183,15 ha atau 2.035 cell. Target dialokasikan selama enam iterasi: 340 cell pada 2026 dan masing-masing 339 cell pada 2027-2031. Setelah setiap iterasi, state dan neighborhood diperbarui.

Sebelum prediksi final, model diuji secara internal dengan menjalankan simulasi dari 2019 untuk mereplikasi 2025. Hasil simulasi dan aktual dibandingkan cell-by-cell melalui confusion matrix. Overall Accuracy (OA) dihitung sebagai:

$$OA = (TP + TN) / (TP + TN + FP + FN) \quad (7)$$

Kappa digunakan sebagai ukuran pelengkap karena dominasi kelas nonpermukiman dapat meningkatkan OA [10,11]. Pengujian disebut uji kesesuaian internal, bukan validasi temporal independen, karena data penggunaan lahan utama hanya tersedia untuk 2019 dan 2025.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Perubahan Permukiman Tahun 2019-2025

Luas permukiman Kecamatan Batuan meningkat dari 162,61 ha pada 2019 menjadi 275,20 ha pada 2025. Perubahan bersih mencapai 112,59 ha atau 69,24% terhadap kondisi awal. Hasil PCC menunjukkan persistence 82,00 ha, gross gain 193,20 ha, dan gross loss 80,61 ha. Perbedaan antara gross gain dan net change menunjukkan bahwa dinamika spasial lebih besar daripada yang terlihat dari selisih luas dua tahun.

Tabel 2. Dinamika Permukiman Kecamatan Batuan Tahun 2019-2025

Indikator	Luas (ha)
Permukiman 2019	162,61
Permukiman 2025	275,20
Persistence	82,00
Gross gain	193,20
Gross loss	80,61
Net change	112,59

Sumber: Hasil analisis PCC penggunaan lahan 2019 dan 2025, 2026.

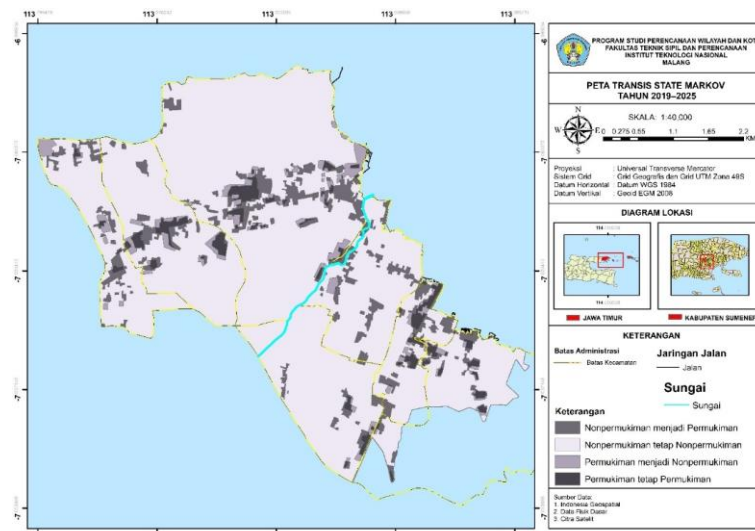
Gross gain terutama berasal dari lahan pertanian. Persawahan menyumbang 110,07 ha atau 56,97%, sedangkan pertanian tanah kering semusim menyumbang 70,12 ha atau 36,29%. Kedua kelas tersebut bersama-sama mencakup 93,26% gross gain. Temuan ini menunjukkan bahwa ekspansi permukiman historis berkaitan kuat dengan konversi lahan budidaya, sehingga pengendalian pertumbuhan perlu membaca konsekuensi terhadap fungsi pertanian.

Tabel 3. Sumber Gross Gain Permukiman Tahun 2019-2025

Penggunaan lahan asal 2019	Berubah menjadi permukiman (ha)	Kontribusi (%)
Persawahan	110,07	56,97
Pertanian tanah kering semusim	70,12	36,29
Padang	7,38	3,82
Kebun	3,97	2,06
Hutan Produksi	1,09	0,56
Perairan darat	0,58	0,30

Sumber: Hasil analisis PCC, 2026.

Pada tingkat desa, seluruh desa mengalami perubahan bersih positif. Perubahan terbesar secara luas terjadi di Babbalan (29,29 ha) dan Batuan (28,81 ha), kemudian Gedung (17,76 ha), Gelugur (12,65 ha), Patean (9,20 ha), Gunggung (8,31 ha), dan Torbang (6,56 ha). Secara spasial, pertambahan membentuk pola campuran: sebagian memperluas tepi permukiman, sebagian mengikuti koridor jalan, dan sebagian mengisi sela di antara kawasan terbangun. Pola mengelompok tersebut sejalan dengan prinsip CA yang menempatkan neighborhood sebagai komponen penting dalam perkembangan ruang [4,5].



Gambar 1: Transisi State Permukiman Kecamatan Batuan Tahun 2019-2025

Sumber: Hasil analisis penelitian, 2026.

3.2 Hubungan Faktor Spasial Berdasarkan Frequency Ratio

FR memperlihatkan variasi hubungan relatif antar kelas faktor. Pada jarak terhadap jalan, kelas 0-100 m memiliki FR 1,51 dan menampung sekitar 96,73% gross gain historis, sehingga pertambahan sangat terkonsentrasi pada zona dekat jaringan jalan. Temuan ini konsisten dengan konsep aksesibilitas yang menekankan keunggulan lokasi yang memiliki keterhubungan lebih baik [2].

Pada jarak terhadap permukiman eksisting, kelas 0-100 m memiliki FR 2,01 dan merupakan nilai tertinggi dari seluruh faktor. Hasil ini menunjukkan bahwa pertumbuhan historis cenderung menguatkan struktur terbangun yang telah ada. Pada kemiringan lereng, kelas 2-8% memiliki FR tertinggi sebesar 1,64, menunjukkan konsentrasi perubahan yang relatif tinggi pada kondisi lahan landai. Penggunaan FR untuk membentuk potensi berdasarkan pola empiris sejalan dengan pendekatan pemetaan pertumbuhan perkotaan yang menggunakan rasio kejadian dan proporsi kelas [8].

Tabel 4. Frequency Ratio Faktor Spasial

Faktor	Kelas	FR	Interpretasi
Jarak jalan	0-100 m	1,51	Relatif mendukung
Jarak jalan	>100-250 m	0,11	Relatif rendah
Jarak jalan	>250-500 m	0,01	Relatif sangat rendah
Jarak permukiman	0-100 m	2,01	Relatif paling kuat
Jarak permukiman	>100-250 m	1,19	Relatif mendukung
Jarak permukiman	>250-500 m	0,52	Relatif rendah
Jarak permukiman	>500 m	0,32	Relatif rendah
Kemiringan	0-2%	0,99	Mendekati proporsional
Kemiringan	2-8%	1,64	Relatif mendukung
Kemiringan	8-15%	0,25	Relatif rendah
Kemiringan	15-25%	1,03	Mendekati proporsional
Kemiringan	25-40%	0,04	Relatif sangat rendah

Sumber: Hasil analisis Frequency Ratio, 2026.

Nilai FR digunakan sebagai hubungan relatif, bukan hubungan kausal. Kelas ber-FR rendah tetap dapat berubah karena tidak berfungsi sebagai constraint. Constraint dalam model bersifat absolut dan hanya mengeluarkan cell tertentu dari kandidat perubahan.

3.3 Pemodelan, Uji Internal, dan Prediksi CA-Markov

Setelah normalisasi, ketiga faktor membentuk transition potential dengan bobot sama. Pada tahap prediksi, posisi zona jarak terhadap permukiman diperbarui menggunakan permukiman aktual 2025 agar kondisi awal spasial sesuai keadaan terbaru, sementara kekuatan kelas tetap berasal dari

hubungan historis 2019-2025. Rawa dikeluarkan sebagai constraint; LBS tidak digunakan sebagai constraint dan baru dievaluasi setelah prediksi.

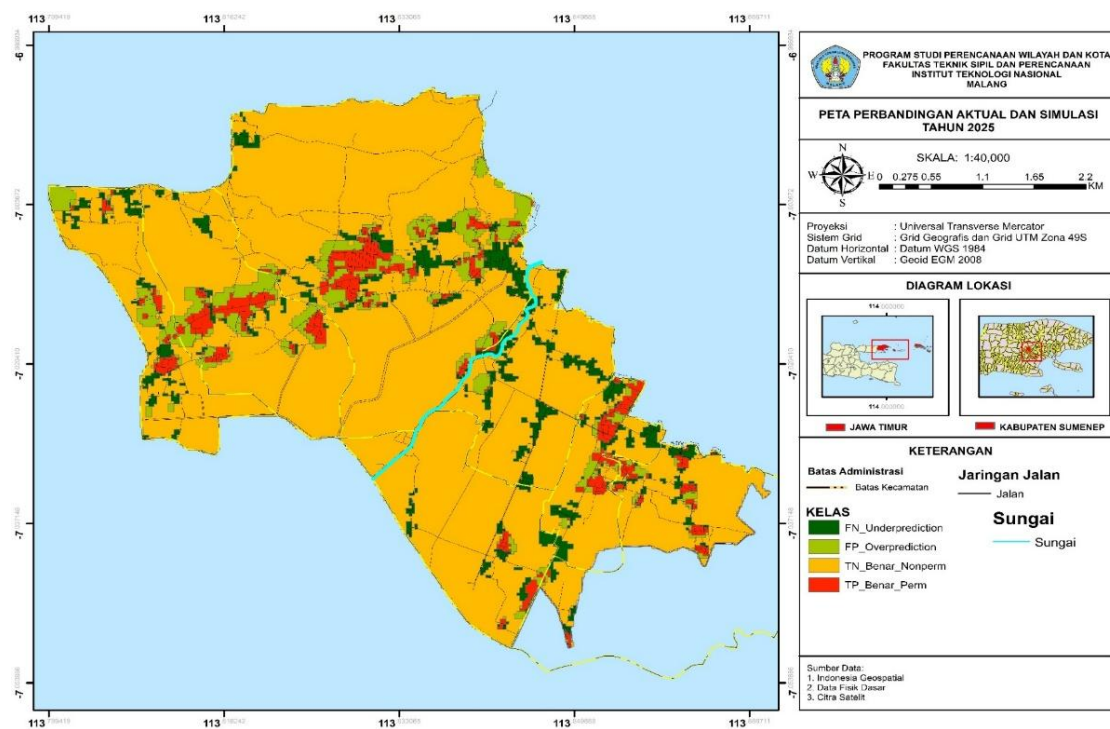
Neighborhood Moore 3 x 3 memperbarui pengaruh lokal pada setiap iterasi. Dengan demikian, cell yang berubah menjadi permukiman pada satu tahun dapat meningkatkan neighborhood cell di sekitarnya pada tahun berikutnya. Mekanisme ini membedakan simulasi dinamis dari pemilihan satu kali terhadap 2.035 cell dengan skor tertinggi. Pendekatan tersebut sesuai dengan karakter CA sebagai sistem perubahan lokal yang dapat menghasilkan pola spasial kompleks melalui iterasi [3-5].

Uji kesesuaian internal menghasilkan TN 21.068 cell, TP 1.335 cell, FP 1.723 cell, dan FN 1.723 cell. Overall Accuracy sebesar 86,67%, sedangkan Kappa sebesar 0,36. OA menunjukkan sebagian besar cell mempunyai kelas yang sama, tetapi dominasi nonpermukiman ikut meningkatkan nilai tersebut. Kappa yang lebih moderat menunjukkan bahwa kemampuan model menempatkan pertumbuhan pada cell yang tepat masih terbatas, sehingga hasil 2031 harus dibaca sebagai skenario spasial, bukan prediksi deterministik [10,11].

Tabel 5. Hasil Uji Kesesuaian Internal

Ukuran	Hasil	Makna
Overall Accuracy	86,67%	Proporsi seluruh cell yang sesuai
Kappa	0,36	Kesesuaian setelah memperhitungkan peluang acak

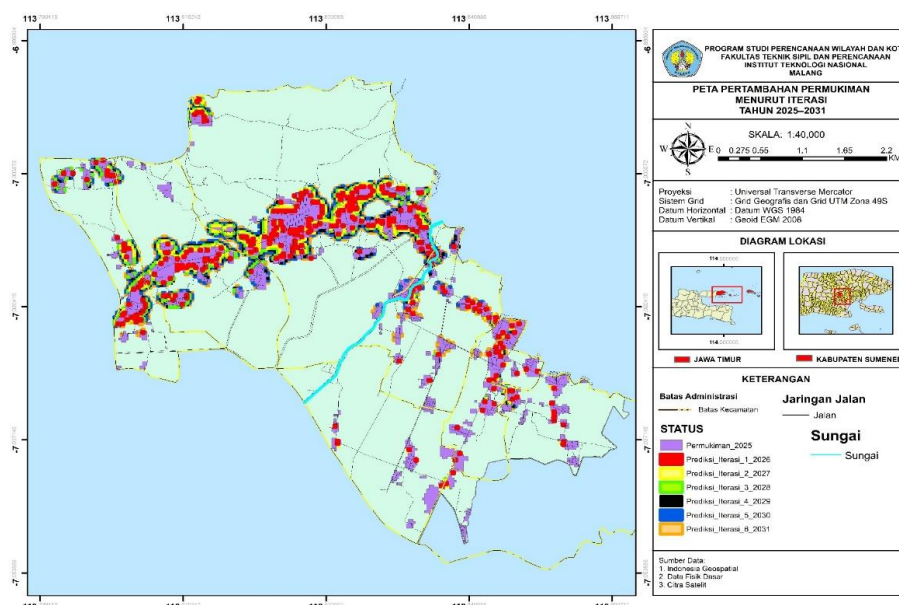
Sumber: Hasil simulasi CA-Markov, 2026.



Gambar 2: Perbandingan Aktual dan Simulasi Permukiman Tahun 2025

Sumber: Hasil analisis penelitian, 2026.

Target transisi Markov sebesar 183,15 ha dialokasikan dalam enam iterasi. Tahun 2026 mengalokasikan 340 cell atau 30,60 ha, sedangkan tahun 2027-2031 masing-masing 339 cell atau sekitar 30,51 ha. State dan neighborhood diperbarui setelah setiap alokasi sehingga distribusi pertumbuhan bersifat bertahap.



Gambar 3: Pertambahan Permukiman Menurut Iterasi Tahun 2025-2031

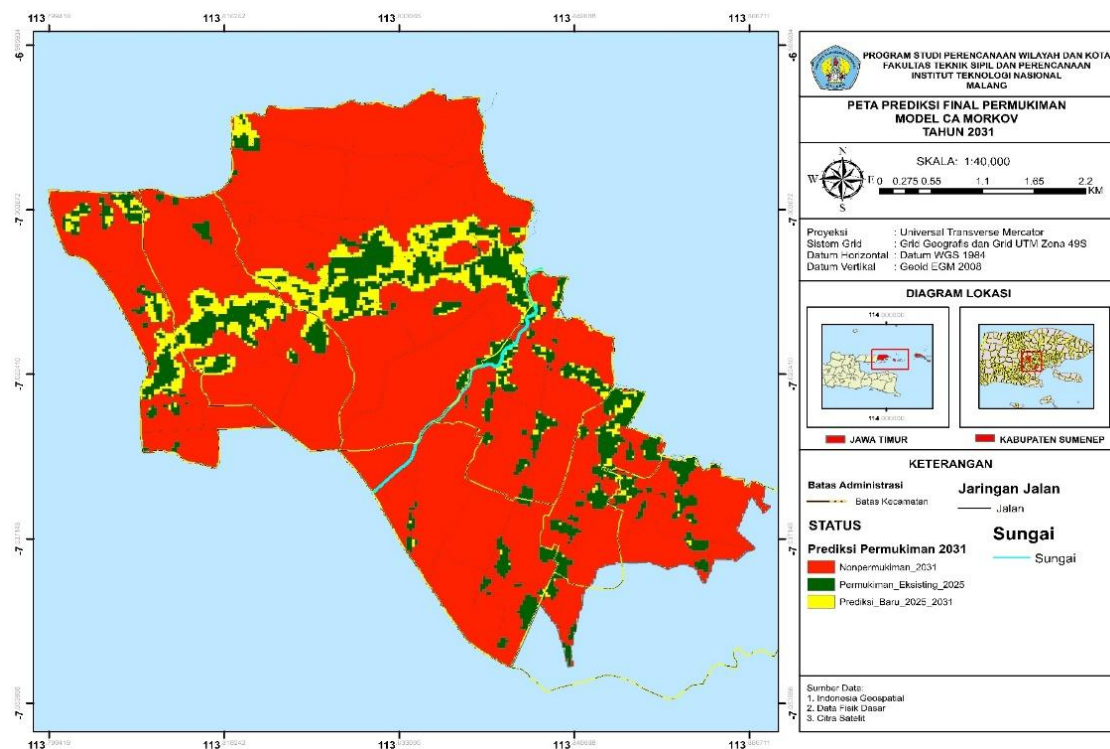
Sumber: Hasil analisis penelitian, 2026.

Hasil akhir menunjukkan tambahan permukiman 183,15 ha sehingga luas permukiman meningkat dari 275,20 ha pada 2025 menjadi sekitar 458,35 ha pada 2031. Distribusi tambahan tidak merata menurut desa; Batuan memperoleh tambahan terbesar 97,92 ha, diikuti Torbang 37,80 ha dan Gelugur 24,03 ha. Angka per desa merupakan agregasi cell hasil simulasi dan bukan target pembangunan yang ditetapkan secara normatif.

Tabel 6. Distribusi Prediksi Permukiman Tahun 2031 Menurut Desa

Desa	Permukiman 2025 (ha)	Tambahan 2025-2031 (ha)	Prediksi 2031 (ha)
Batuan	88,50	97,92	186,42
Torbang	39,78	37,80	77,58
Gelugur	28,78	24,03	52,81
Babbalan	33,25	13,23	46,48
Gedungan	39,87	6,66	46,53
Gunggung	26,90	2,52	29,42
Patean	18,12	0,99	19,11
Total	275,20	183,15	458,35

Sumber: Hasil agregasi cell simulasi CA-Markov, 2026.



Gambar 4: Peta Prediksi Final Permukiman Tahun 2031

Sumber: Hasil analisis penelitian, 2026.

Secara spasial, hasil prediksi memperlihatkan kombinasi perluasan tepi (edge expansion), penguatan kelompok permukiman, perkembangan linear pada beberapa koridor jalan, dan infill. Interpretasi ini bersifat deskriptif terhadap bentuk pada peta dan tidak merupakan klasifikasi morfologi berbasis indeks. Konsentrasi pertumbuhan dekat kawasan eksisting konsisten dengan FR jarak permukiman 2,01 dan penggunaan neighborhood dalam model.

3.4 Evaluasi Pascaprediksi terhadap Lahan Baku Sawah

Overlay pascaprediksi digunakan untuk mengetahui bagian tambahan permukiman yang beririsan dengan LBS. Analisis ini tidak digunakan sebagai constraint CA-Markov dan tidak mengubah hasil prediksi. Total LBS yang dievaluasi sekitar 1.021,68 ha, sedangkan tumpang tindih dengan tambahan prediksi mencapai 13,91 ha atau 7,59% dari total tambahan 183,15 ha. Secara absolut, tumpang tindih terbesar berada di Batuan sebesar 5,18 ha dan Babbalan 4,10 ha.

Tabel 7. Tumpang Tindih Prediksi Pertambahan Permukiman dengan LBS

Desa	LBS (ha)	Prediksi baru (ha)	Tumpang tindih (ha)	Prediksi di LBS (%)
Babbalan	175,68	13,23	4,10	30,95
Batuan	198,08	97,92	5,18	5,29
Gedungan	85,87	6,66	1,60	24,01
Gelugur	50,31	24,03	0,17	0,69
Gunggung	130,60	2,52	1,03	40,94
Patean	271,40	0,99	0,37	36,92
Torbang	109,74	37,80	1,47	3,90
Total	1.021,68	183,15	13,91	7,59

Sumber: Hasil overlay LBS Kecamatan Batuan 2025 dan prediksi 2025-2031, diolah 2026.

Temuan tersebut memperkuat pentingnya menggunakan prediksi sebagai alat skrining dan pemantauan, bukan sebagai rekomendasi konversi. Area dengan kecenderungan pertumbuhan tinggi perlu dibaca bersama rencana tata ruang, kondisi lahan aktual, status perlindungan lahan pertanian, dan verifikasi lapangan.

4. Kesimpulan

1. Perkembangan permukiman Kecamatan Batuan pada 2019-2025 meningkat dari 162,61 ha menjadi 275,20 ha. Net change mencapai 112,59 ha atau 69,24%, sedangkan gross gain 193,20 ha dan gross loss 80,61 ha. Sebanyak 93,26% gross gain berasal dari persawahan dan pertanian tanah kering semusim.
2. Hubungan relatif terkuat terdapat pada jarak 0-100 m dari permukiman eksisting (FR 2,01), kemiringan 2-8% (FR 1,64), dan jarak 0-100 m dari jaringan jalan (FR 1,51). Hasil tersebut menunjukkan konsentrasi historis pertumbuhan dekat struktur terbangun, akses jalan, dan kondisi lahan yang relatif landai.
3. Model CA-Markov dengan grid 30 x 30 m, transition potential berbasis FR, Moore Neighborhood 3 x 3, dan constraint rawa menghasilkan Overall Accuracy 86,67% serta Kappa 0,36 pada uji kesesuaian internal. Nilai Kappa menunjukkan ketepatan lokasi spesifik masih terbatas.
4. Skenario 2025-2031 mengalokasikan tambahan 183,15 ha sehingga luas permukiman diperkirakan mencapai 458,35 ha pada 2031. Polanya berupa perluasan tepi, penguatan kelompok permukiman, perkembangan linear, dan infill. Oleh karena itu, hasil model lebih tepat digunakan sebagai skenario spasial untuk pemantauan dan evaluasi pemanfaatan ruang daripada sebagai kepastian pembangunan.

5. Saran

Penelitian lanjutan perlu menambahkan satu atau lebih tahun penggunaan lahan yang independen agar validasi temporal dapat dipisahkan dari periode kalibrasi. Penambahan periode akan membantu menilai kestabilan aturan transisi dan kemampuan model mereplikasi pola perubahan pada waktu yang berbeda.

Variabel model dapat dikembangkan menggunakan data dengan resolusi spasial yang sesuai dengan cell, misalnya akses terhadap pusat pelayanan, jaringan utilitas, harga lahan, kepadatan bangunan, data kepemilikan, atau penduduk yang telah didisagregasi. Penggunaan variabel tambahan sebaiknya disertai uji sensitivitas agar pengaruh masing-masing faktor dapat dinilai tanpa membuat model terlalu kompleks.

Pengembangan berikutnya juga dapat membandingkan skenario tren historis dengan skenario kebijakan yang memasukkan constraint resmi yang telah tervalidasi, seperti kawasan lindung, LBS/LP2B, atau zona tertentu dari RTRW/RDTR. Perbandingan skenario dapat memperluas fungsi model dari prediksi tren menjadi evaluasi alternatif pengendalian ruang.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Malang, serta dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dalam pengembangan metodologi dan pembahasan penelitian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada instansi penyedia data yang mendukung pelaksanaan penelitian.

Daftar Pustaka

- [1] Republik Indonesia. Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 1 Tahun 2011 tentang Perumahan dan Kawasan Permukiman. Jakarta; 2011.
- [2] Hansen WG. How accessibility shapes land use. *J Am Inst Plann.* 1959;25(2):73-76.
- [3] Wolfram S. Universality and complexity in cellular automata. *Physica D.* 1984;10:1-35.
- [4] White R, Engelen G. Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environ Plan A.* 1993;25:1175-1199.
- [5] Clarke KC, Hoppen S, Gaydos L. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay Area. *Environ Plan B Plann Des.* 1997;24:247-261.
- [6] Singh A. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *Int J Remote Sens.* 1989;10(6):989-1003.
- [7] Pontius RG Jr, Shusas E, McEachern M. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agric Ecosyst Environ.* 2004;101:251-268.
- [8] Park S, Jeon S, Kim S, Choi C. Prediction and comparison of urban growth by land suitability index mapping using GIS and RS in South Korea. *Landsc Urban Plan.* 2011;99:104-114.
- [9] Muller MR, Middleton J. A Markov model of land-use change dynamics in the Niagara Region, Ontario, Canada. *Landsc Ecol.* 1994;9(2):151-157.

- [10] Congalton RG. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sens Environ.* 1991;37(1):35-46.
- [11] Pontius RG Jr, Malanson J. Comparison of the structure and accuracy of two land change models. *Int J Geogr Inf Sci.* 2005;19:243-265.