

ANALISIS POLA PERJALANAN MAHASISWA BERBASIS *AGENT-BASED MODELING* SEBAGAI DASAR PERENCANAAN TRANSPORTASI MENDUKUNG *GREEN CAMPUS*

Faisa Dalilah Listyowati, Faizaniar Arista Maharani, Hikmatuzzakiyah Alhafshoh, Dewi Handayani, Lydia Novitriana Nur Hidayati

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Jawa Tengah

Email: faisadalilah0813@student.uns.ac.id

Abstrak

Mobilitas mahasiswa di lingkungan kampus merupakan salah satu faktor penting dalam perencanaan sistem transportasi internal. Tingginya intensitas pergerakan mahasiswa, khususnya penggunaan moda sepeda motor, menyebabkan pola perjalanan yang kompleks dan dinamis. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pola perjalanan mahasiswa Universitas Sebelas Maret menggunakan pendekatan *Agent-Based Modeling* (ABM) dengan bantuan perangkat lunak *Anylogic*. Data yang digunakan berupa data primer survei kuesioner serta data sekunder berupa jaringan jalan kampus. Hasil simulasi menghasilkan Matriks Asal-Tujuan (*Origin-Destination Matrix*) dan visualisasi *desire line* yang menggambarkan distribusi pergerakan mahasiswa. Model yang dikembangkan kemudian divalidasi menggunakan pendekatan regresi linear sederhana untuk mengukur kesesuaian dengan data aktual. Hasil penelitian ini memberikan gambaran pola perjalanan mahasiswa yang dapat digunakan sebagai dasar dalam perencanaan transportasi kampus serta sebagai input bagi penelitian lanjutan.

Kata kunci: *agent-based modeling, desire line, pola perjalanan*

Abstract

Student mobility within campus environments plays an important role in internal transportation planning. High travel intensity, particularly motorcycle usage, results in complex and dynamic travel patterns. This study aims to analyze student travel patterns at Sebelas Maret University using an Agent-Based Modeling (ABM) approach with AnyLogic software. The data used include primary data from questionnaire surveys and secondary data such as campus road networks. The simulation results produce an Origin-Destination (OD) Matrix and desire line visualization representing student movement distribution. The model is validated using regression analysis to assess its accuracy against actual data. The results provide an overview of student travel patterns that can serve as a basis for campus transportation planning and as input for further research.

Keywords: *agent-based modeling, desire line, travel pattern*

1. PENDAHULUAN

Mobilitas mahasiswa di kawasan pendidikan merupakan bagian penting dalam sistem transportasi yang memengaruhi efisiensi pergerakan di dalam kampus. Kawasan Universitas Sebelas Maret (UNS) memiliki aktivitas akademik yang tinggi sehingga menghasilkan pergerakan mahasiswa dalam jumlah besar setiap harinya (Joewono dkk., 2024). Pergerakan ini membentuk pola perjalanan yang kompleks, terutama dengan dominasi penggunaan sepeda motor sebagai moda utama transportasi (Maruddin & Kasim, 2025).

Selama ini, analisis pola perjalanan mahasiswa umumnya dilakukan menggunakan metode konvensional seperti survei kuesioner dan penyusunan Matriks Asal-Tujuan (*OD Matrix*). Metode tersebut mampu memberikan gambaran umum pola perjalanan, namun masih memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan perilaku individu secara detail (Bastarianto dkk., 2023). Pendekatan ini cenderung bersifat agregat sehingga belum mampu menangkap dinamika interaksi antar pengguna dalam sistem transportasi (Moeckel, 2019).

Seiring perkembangan teknologi pemodelan, pendataan *Agent-Based Modeling* (ABM) mulai banyak digunakan untuk menganalisis sistem transportasi (Bastarianto dkk., 2023). ABM memungkinkan pemodelan perilaku individu sebagai agen yang memiliki karakteristik dan Keputusan masing-masing, sehingga dapat menggambarkan pola perjalanan secara lebih realistis dan dinamis (Mahajan dkk., 2023).

Berdasarkan hasil telaah penelitian terdahulu, pendekatan ABM telah banyak diterapkan dalam analisis sistem transportasi dan mobilitas. Penggunaan model hibrida berbasis ABM pada perangkat lunak *AnyLogic*

mampu menghasilkan prediksi arus lalu lintas yang lebih akurat dibandingkan metode konvensional (Benčat & Janota, 2020). *Agent-Based Modeling* mampu mengidentifikasi titik kemacetan dan meningkatkan efisiensi pergerakan pada sistem transportasi publik melalui simulasi berbasis agen (Liu dkk., 2021). Faktor sosio-demografis seperti jenis kelamin diketahui berpengaruh terhadap perilaku perjalanan mahasiswa dan dapat dijadikan dasar dalam penentuan atribut agen, seperti asal–tujuan dan moda transportasi yang digunakan (Hamad dkk., 2021). Selain itu, pemodelan pola perjalanan mahasiswa berbasis *Agent-Based Modeling* (ABM) menggunakan *AnyLogic* pada skala mikro dengan mempertimbangkan asal–tujuan, rute, dan waktu perjalanan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ABM mampu menggambarkan distribusi pergerakan secara realistis, termasuk dominasi gerbang dan koridor dengan volume tinggi (Priyana, 2025). Oleh karena itu, pendekatan tersebut digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini untuk memodelkan pergerakan mahasiswa secara mikro dengan mempertimbangkan karakteristik individu dan distribusi pergerakan di lingkungan kampus.

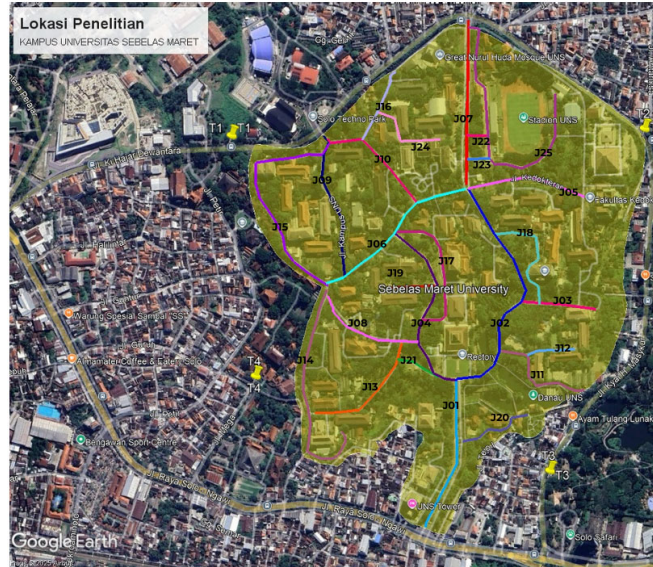
Dalam konteks kawasan kampus, memetakan pola pergerakan pejalan kaki menggunakan ABM dan menghasilkan visualisasi distribusi arus serta identifikasi titik kepadatan tinggi pada waktu tertentu (Fortu dkk., 2024). Pendekatan Matriks Asal-Tujuan (*OD Matrix*) dan visualisasi *desire line* untuk menggambarkan pola perjalanan mahasiswa, di mana hasilnya menunjukkan adanya konsentrasi pergerakan pada jalur tertentu serta waktu puncak aktivitas pada pagi hari. Temuan ini menunjukkan bahwa visualisasi *desire line* efektif dalam mengidentifikasi koridor utama pergerakan (Sari dkk., 2023). Selain itu, beberapa penelitian juga menekankan pentingnya validasi model dalam memastikan kesesuaian hasil simulasi dengan kondisi aktual. Model berbasis agen mampu merepresentasikan pola perjalanan dengan tingkat kesesuaian yang baik terhadap data lapangan. Hal ini umumnya diukur menggunakan koefisien determinasi (R^2), di mana nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan tingkat akurasi model yang tinggi (Sha dkk., 2018).

Dalam konteks pengurangan emisi gas rumah kaca di lingkungan kampus, Handayani dkk., (2024) telah mengevaluasi efektivitas program Hari Bebas Emisi yang diterapkan di Universitas Sebelas Maret sejak Juli 2020. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa program tersebut mampu mengurangi emisi kendaraan bermotor di kampus sebesar 4,62%, dengan total pengurangan emisi CO₂ sebesar 497.240,48 kg selama periode 2022–2030. Namun demikian, kontribusi program ini terhadap target pengurangan emisi nasional dalam *Nationally Determined Contribution* (NDC) masih sangat kecil, yakni hanya 0,00015%. Temuan ini mengindikasikan bahwa upaya pengurangan emisi kendaraan di kampus memerlukan pendekatan yang lebih komprehensif, di antaranya melalui pengelolaan parkir terpusat, penerapan sistem RFID untuk pembatasan kendaraan, program *ridesharing*, serta optimalisasi transportasi umum (Handayani dkk., 2024). Oleh karena itu, pemahaman mendalam terhadap pola perjalanan mahasiswa menjadi prasyarat penting dalam merancang strategi transportasi kampus yang efektif dan berbasis data guna mendukung terwujudnya *green campus* yang berkelanjutan.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada skala makro atau belum secara spesifik mengkaji pola pergerakan mahasiswa berbasis sepeda motor di kawasan kampus. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pola perjalanan mahasiswa Universitas Sebelas Maret menggunakan pendekatan *Agent-Based Modeling* (ABM). Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran pola pergerakan mahasiswa yang dapat digunakan sebagai dasar dalam perencanaan transportasi kampus serta sebagai referensi untuk penelitian lanjutan

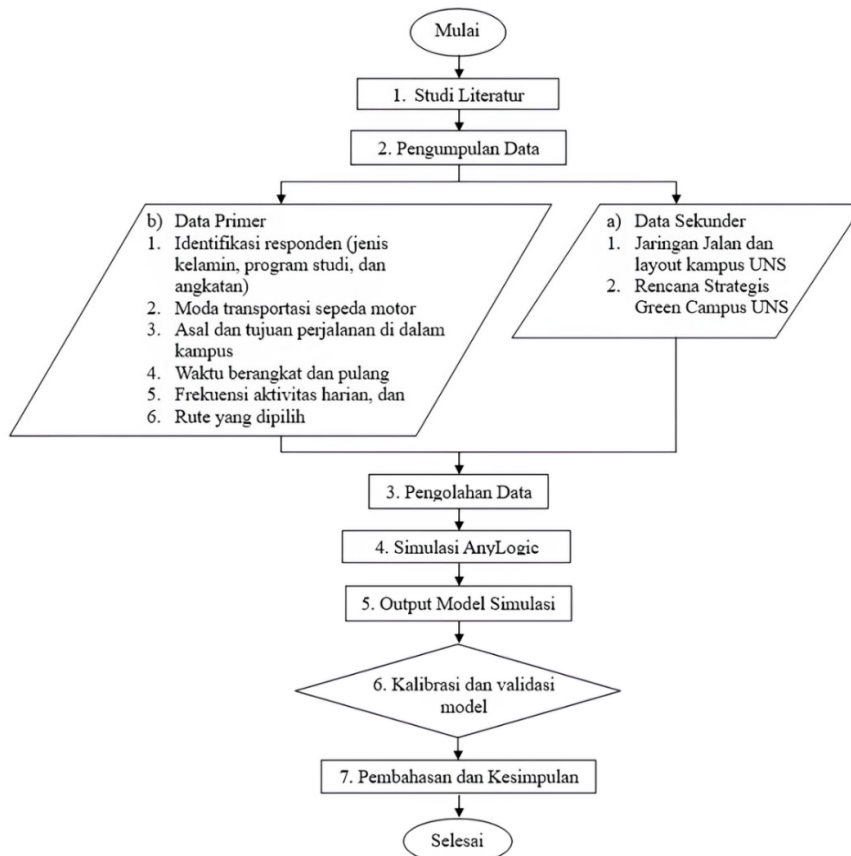
2. METODOLOGI

Penelitian dilakukan di Universitas Sebelas Maret (UNS) yang berlokasi di Jalan Ir. Sutami 36 Kentingan, Jebres, Surakarta. pada area jalur jalan dan akses keluar-masuk kendaraan di area uns yang memiliki mobilitas tinggi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi penelitian. (hasil analisis)

Pengambilan data dilakukan pada masa perkuliahan aktif semester genap 2026 untuk merepresentasikan kondisi operasional normal di lingkungan kampus. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan simulasi berbasis agen (*Agent-Based Modeling/ABM*) menggunakan perangkat lunak *AnyLogic* untuk memodelkan pola perjalanan mahasiswa. Data yang digunakan terdiri dari data primer berupa survei kuesioner dan data sekunder berupa jaringan jalan serta *layout* kampus. Hasil pemodelan menghasilkan visualisasi dalam bentuk *desire line*. Tahapan penelitian dilaksanakan secara sistematis, selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Bagan alir penelitian. (hasil analisis)

2.1 Pengumpulan Data

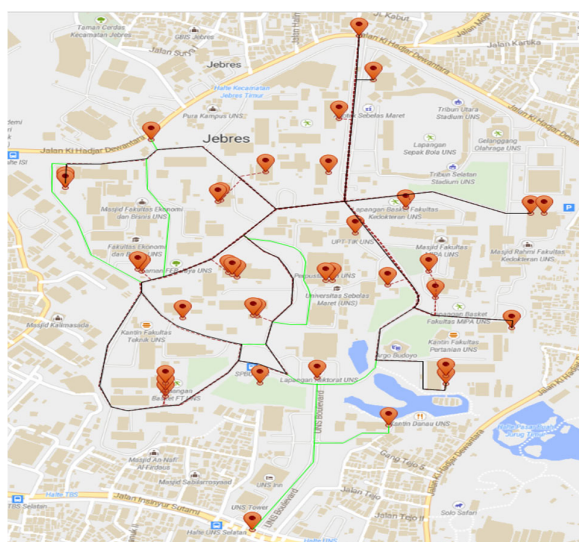
Penentuan jumlah sampel dilakukan sebelum pengumpulan data dengan menggunakan rumus Slovin (Santoso, 2023). Populasi penelitian adalah seluruh mahasiswa S1 Universitas Sebelas Maret (UNS) dari 13 fakultas dengan jumlah 31.974 mahasiswa berdasarkan data akademik tahun ajaran 2022–2025. Dengan tingkat kesalahan (e) sebesar 5%, diperoleh jumlah sampel minimum sebesar 396 responden. Selanjutnya, jumlah sampel didistribusikan secara proporsional pada masing-masing fakultas sesuai dengan jumlah mahasiswa. Dan juga, data sekunder berupa jaringan jalan dan *layout* kampus UNS yang merepresentasikan jalur utama, penghubung antar gedung, area parkir, serta akses keluar-masuk kendaraan.

2.2 Pengolahan Data

Dari hasil kuisioner yang terkumpul kemudian dilakukukan perhitungan melalui Microsoft Excel. Setiap hasil dari survei diperiksa untuk memastikan seluruh pertanyaan terisi dengan format yang sesuai dan tidak terdapat data yang ganda atau kosong. Proses verifikasi dilakukan untuk menjamin kesesuaian data terhadap input pemodelan, khususnya dalam pembentukan agen pada simulasi. Setelah data terverifikasi, responden dikelompokkan berdasarkan atribut yang relevan sehingga dapat memoresentasikan agen mahasiswa secara akurat. Data yang telah dikategorikan ini selanjutnya dilakukan tahap simulasi pada perangkat lunak *Anylogic* sebelum divalidasi dengan data hasil pengamatan *traffic control* guna memastikan konsistensi pola perjalanan.

2.3 Pemodelan Simulasi menggunakan ABM

Pendekatan *Agent-Based Modeling* (ABM) menggunakan perangkat lunak *AnyLogic* memodelkan sistem sebagai kumpulan agen yang memiliki karakteristik, perilaku, serta kemampuan berinteraksi dengan lingkungan. Pemodelan dilakukan dengan membangun *layout* jaringan kampus, memasukkan data rute perjalanan, serta mendistribusikan trip perjalanan berdasarkan interval waktu per jam selama periode pengamatan. Data perjalanan dari 396 responden survei dikalikan dengan faktor pengali yang dihitung berdasarkan perbandingan antara jumlah populasi dan jumlah sampel pada masing-masing fakultas dikalikan dengan nilai tingkat perjalanan (*trip rate*) sehingga jumlah agen yang dibangkitkan dalam model sebanyak 29.879 agen yang merepresentasikan mahasiswa pengguna sepeda motor di UNS (93,45% dari 31.974 mahasiswa). Dengan pendekatan ini, model mampu merepresentasikan pola pergerakan mahasiswa secara dinamis dan mendekati kondisi aktual, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.



Gambar 3. *Layout* rute pola perjalanan mahasiswa UNS. (hasil analisis)

2.4 Output Model Simulasi

Output model dalam penelitian ini digunakan untuk mengetahui pola perjalanan mahasiswa di Universitas Sebelas Maret berdasarkan hasil simulasi agen pada *AnyLogic*. Setiap agen merepresentasikan mahasiswa yang bergerak dari titik asal ke tujuan sesuai aktivitasnya. Hasil simulasi kemudian direkapitulasi menjadi data pergerakan antar zona dan disusun dalam Matriks Asal-Tujuan (OD Matrix) dalam bentuk *desire line* yang menggambarkan intensitas perjalanan, baik dari data survei maupun hasil simulasi (Kuusela dkk., 2020).

2.5 Validasi dan Kalibrasi

Validasi kuantitatif dilakukan menggunakan analisis regresi linear sederhana antara OD Matrix hasil simulasi dan data survei (Simahate, 2018). Nilai koefisien determinasi (R^2) digunakan untuk menilai tingkat kesesuaian model, di mana nilai yang mendekati 1 menunjukkan hasil yang baik dalam merepresentasikan pola pergerakan aktual, yang dihitung menggunakan Persamaan 1 (Argota, 2022).

$$r^2 = \frac{(\sum Y_i - \bar{Y})^2 - \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{(\sum Y_i - \bar{Y})^2} \tag{1}$$

dengan:

- Y_i = nilai data aktual (hasil survei)
- \hat{Y}_i = nilai hasil simulasi (hasil model)
- \bar{Y} = rata-rata data aktual
- \sum = simbol penjumlahan
- n = jumlah data

Selanjutnya, dilakukan proses kalibrasi model untuk meningkatkan tingkat kesesuaian antara hasil simulasi dan data survei lapangan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Distribusi Trip PergerakanAny

Data hasil survei kuesioner yang mencakup informasi jenis kelamin, moda transportasi, asal dan tujuan perjalanan, waktu berangkat dan pulang, titik awal dan akhir perjalanan, serta rute yang dipilih, selanjutnya diolah untuk memperoleh pola dan distribusi trip pergerakan mahasiswa.

Selain itu, data juga direkapitulasi berdasarkan waktu dan lokasi untuk menggambarkan intensitas pergerakan mahasiswa melalui dua gerbang utama Universitas Sebelas Maret, yaitu gerbang belakang dan gerbang samping. Rekapitulasi ini memberikan informasi jumlah trip pada setiap interval waktu, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5, sehingga dapat digunakan untuk mengidentifikasi pola pergerakan serta waktu puncak aktivitas, dan selanjutnya digunakan sebagai input dalam pemodelan *Agent-Based Modeling* (ABM).

Waktu	RB01i	RB02	RB02i	RB03	RB03i	RB04	RB04i	RB05	RB05i	RB06	RB06i	RB08i	RB09i	RB10	RB10i	RB11	RB11i	RB12	RB12i	RB13	RB13i	RB14	RB14i	RB09	RB15	RB15i	RB16	RB17	RB17i	RB18	RB18i
06								1	2																						
07		3	7	2	12								7	3								3		16	1						1
08			1	1						1												1	1								
09			1	2					2				11									1	1	1				7	1	1	
10						1		5	10	1	1			3		1	4			2				1							
11	2	1		1						3	2	2			1	2			1												
12	3				1	2				1	4	1	1		1				1		3				1		1	3	3		
13	4											1																	3	1	
14	2	3			1	7		2	2	4									1	3		2				2				3	
15	7			9			3	1	1	2	2								1	1											
16	1			1	1												1		1			2								1	
Grand Total	19	3	5	8	11	6	3	15	15	17	18	2	23	10	10	4	5	5	5	7	5	5	4	18	1	1	2	8	7	5	5

Gambar 4. Jumlah trip perjalanan gerbang belakang. (hasil analisis)

Waktu	RS01	RS01i	RS02	RS03	RS03i	RS04	RS04i	RS05	RS05i	RS06	RS06i	RS07	RS07i	RS02i	RS08	RS08i	RS09	RS09i	RS10i	RS11	RS11i	RS12i	RS15	RS15i	RS16	RS17	RS18	RS17i	RS18i	RS19	
06															1		4														
07			2	15	1	7		3		18		18			5		6					18		2							1
08				3						1						1		1				4		1							
09			2		2	8				2	5	2			3												4	2			
10				2	3						5				1		5	2				3	2								
11		2		3	2					1	2			11		1		1				1		1							
12				6	1						2	2		2		5	1	1				1	6								
13				10	5						2	1						1				1	1	2					2	1	
14					3	5		1			1					3	2	4				4	1								
15					5	5			3	2	2	1					1					1			3	1					
16					6	1		1	1														2	1	2						
Grand Total	2	2	2	41	34	7	11	3	2	28	18	24	20	2	10	10	19	12	1	27	18	1	4	3	1	4	2	2	1	1	

Gambar 5. Jumlah trip perjalanan gerbang samping. (hasil analisis)

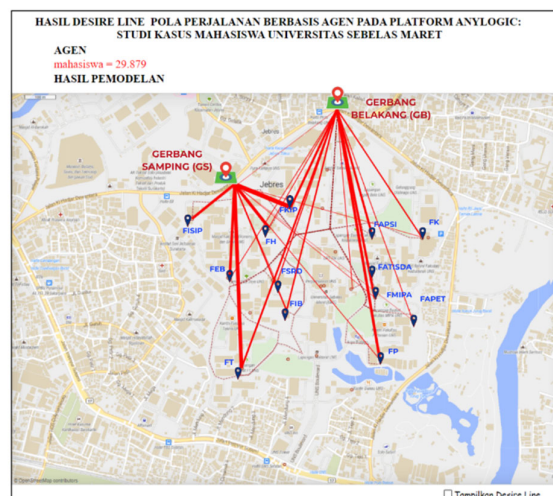
3.2. Hasil Pemodelan Simulasi

Untuk memahami pola dan intensitas pergerakan mahasiswa, digunakan visualisasi *desire line* yang mampu menunjukkan arah dan besarnya arus perjalanan. Berdasarkan hasil pengolahan data *Origin-Destination* (OD), visualisasi tersebut disajikan pada gambar berikut.



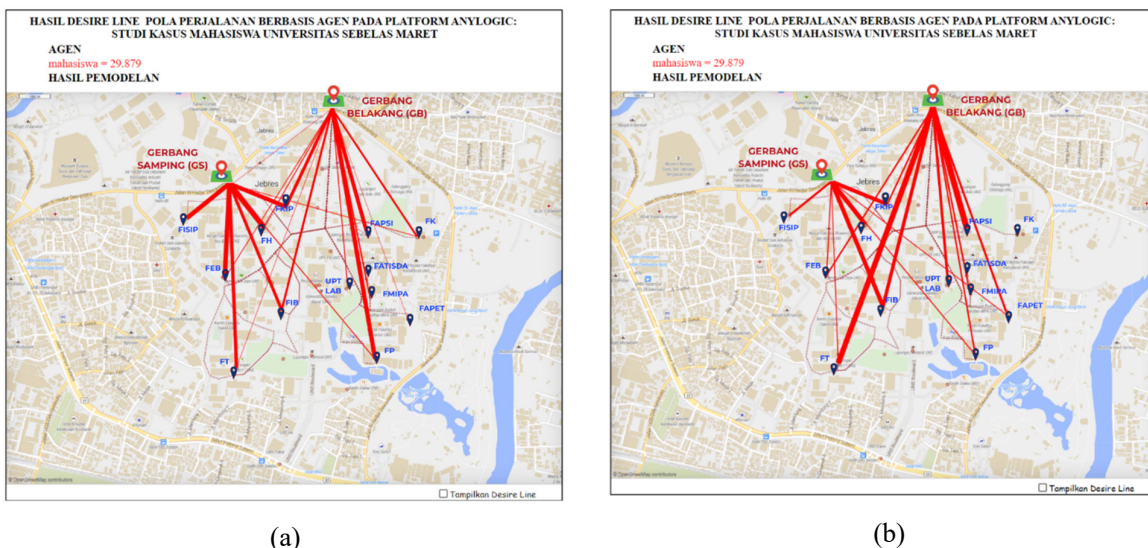
Gambar 6. Hasil pengolahan data kepadatan lalu lintas. (hasil analisis)

Visualisasi kepadatan lalu lintas menunjukkan tingkat kepadatan pergerakan pada setiap ruas jalan di kawasan kampus UNS. Peta ini menggunakan tiga klasifikasi warna berdasarkan volume pergerakan harian: merah untuk ruas dengan intensitas tinggi (>13.000 kend/hari), kuning untuk intensitas sedang (7.000–13.000 kend/hari), dan hijau untuk intensitas rendah (0–7.000 kend/hari). Ruas-ruas berwarna merah, yaitu J07 dan J27 yang merupakan akses langsung dari Gerbang Belakang dan Gerbang Samping, mencatat volume pergerakan tertinggi karena seluruh arus kendaraan masuk dan keluar kampus melewati koridor tersebut. Ruas berwarna kuning umumnya merupakan jalur penghubung antar-gedung dan koridor menuju area parkir fakultas, sedangkan ruas berwarna hijau adalah jalan internal kampus dengan intensitas pergerakan yang lebih rendah.



Gambar 7. Hasil pengolahan data *Origin Destination* visualisasi *desire line*. (hasil analisis)

Visualisasi desire line pada Gambar 7 menggambarkan pola hubungan pergerakan mahasiswa dari dua gerbang utama (Gerbang Belakang dan Gerbang Samping) menuju seluruh fakultas di kawasan kampus UNS. Setiap garis menghubungkan titik asal dan tujuan perjalanan, dengan ketebalan garis yang proporsional terhadap volume pergerakan semakin tebal garis, semakin besar frekuensi perjalanan antara dua titik tersebut. Garis paling tebal terlihat pada koridor Gerbang Samping (GS) menuju FKIP dengan total 5.880 perjalanan, diikuti GS–FT sebesar 4.778 perjalanan, GS–FH sebesar 3.965 perjalanan, GS–FEB sebesar 3.303 perjalanan, dan GS–FISIP sebesar 3.302 perjalanan. Pada Gerbang Belakang (GB), garis paling tebal terdapat pada koridor GB–FP sebesar 3.378 perjalanan, diikuti GB–FMIPA sebesar 2.923 perjalanan dan GB–FKIP sebesar 2.721 perjalanan. Sebaliknya, garis paling tipis terlihat pada pasangan GS–FAPET sebesar 73 perjalanan, GS–FMIPA sebesar 321 perjalanan, GS–FK sebesar 323 perjalanan, dan GB–ORMAWA sebesar 267 perjalanan, yang menunjukkan bahwa interaksi perjalanan pada koridor-koridor tersebut relatif rendah dibandingkan koridor utama lainnya.



Gambar 8. Hasil *desire line* pada jam puncak 07.00-08.00 (a) dan pukul 14.00-16.00 (b). (hasil analisis)

Hasil gambar di atas merupakan pola pergerakan yang menunjukkan adanya jam puncak (*peak hour*) pada pergerakan masuk dan pergerakan keluar.

3.3. Hasil Validasi Model

Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi berbasis *Agent-Based Modeling* (ABM) terhadap data volume lalu lintas (*traffic counting*) pada titik gerbang kampus. Kesesuaian antara keduanya diukur menggunakan analisis regresi linier dan hasil ditunjukkan oleh nilai koefisien determinasi (R^2) dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Tabel hasil R^2

Gerbang	R^2
Gerbang Belakang (Masuk)	0.74
Gerbang Belakang (Keluar)	0.66
Gerbang Samping (Masuk)	0.61
Gerbang Samping (Keluar)	0.67

Sumber: Olahan penulis, 2026

Tabel di atas menunjukkan hasil nilai koefisien determinasi (R^2) di atas 0,6 untuk seluruh titik gerbang masuk dan keluar kampus. Nilai R^2 tersebut mengindikasikan bahwa lebih dari 60% variasi volume pergerakan aktual dapat dijelaskan oleh model, sehingga model dinyatakan memiliki akurasi yang memadai untuk digunakan dalam analisis lanjutan. Pendekatan validasi berbasis data lapangan seperti ini merupakan prosedur standar dalam pemodelan transportasi berbasis agen untuk memastikan representasi kondisi nyata.

3.4. Pembahasan Hasil

Berdasarkan hasil visualisasi *desire line* pada Gambar 7, pola pergerakan mahasiswa Universitas Sebelas Maret (UNS) menunjukkan adanya konsentrasi arus perjalanan pada beberapa koridor utama. Koridor pergerakan paling dominan berasal dari Gerbang Samping (GS), dengan pasangan GS–FKIP mencapai 5.880 perjalanan sebagai nilai tertinggi, diikuti GS–FT sebesar 4.778 perjalanan, GS–FH sebesar 3.965 perjalanan, dan GS–FEB sebesar 3.303 perjalanan. Pada Gerbang Belakang (GB), pergerakan dominan terjadi pada pasangan GB–FP sebesar 3.378 perjalanan dan GB–FMIPA sebesar 2.923 perjalanan. Temuan ini menunjukkan bahwa pergerakan mahasiswa cenderung terfokus pada jalur tertentu yang berfungsi sebagai koridor utama mobilitas kampus.

Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa visualisasi *desire line* mampu mengidentifikasi konsentrasi pergerakan pada jalur tertentu serta menunjukkan hubungan kuat antara titik asal dan tujuan perjalanan. Selain itu, penelitian oleh (Fortu dkk., 2024) juga menunjukkan bahwa pendekatan berbasis agen mampu mengidentifikasi titik kepadatan tinggi dan distribusi arus pergerakan secara spasial pada lingkungan kampus. Dengan demikian, hasil penelitian ini memperkuat bahwa pendekatan ABM yang

digunakan telah mampu menggambarkan pola pergerakan mahasiswa secara realistis, sebagaimana juga dikemukakan oleh (Bastarianto dkk., 2023; Priyana, 2025).

Secara kuantitatif, pada Gambar 6 hasil pemodelan menunjukkan bahwa ruas dengan volume pergerakan tertinggi adalah J27 (Gerbang Samping) dengan 23.445 kendaraan per hari atau sekitar 23,63% dari total arus lalu lintas Gerbang Samping, diikuti oleh J07 (Gerbang Belakang) dengan 22.210 kendaraan per hari atau sekitar 34,9% dari total arus di kawasan Gerbang Belakang. Selanjutnya ruas J06 mencatat 16.877 kendaraan (17,01%), J10 sebesar 16.656 kendaraan (16,79%), dan J26 sebesar 11.243 kendaraan (11,33%). Tingginya volume pada J27 sejalan dengan temuan bahwa Gerbang Samping mendominasi pergerakan masuk kampus dengan kontribusi sebesar 59,5%, sedangkan Gerbang Belakang menjadi akses keluar utama dengan kontribusi 57,8%. Kondisi ini diduga dipengaruhi oleh karakteristik fisik akses masing-masing gerbang, di mana Gerbang Samping memiliki permukaan jalan yang lebih baik dibandingkan Gerbang Belakang yang masih menggunakan perkerasan paving block, sehingga mahasiswa cenderung memilih Gerbang Samping sebagai akses utama. Untuk memudahkan pembacaan pola distribusi pergerakan, hasil simulasi diklasifikasikan menjadi tiga tingkat intensitas berdasarkan perhitungan nilai persentil: intensitas tinggi (merah, >13.000 kend/hari), sedang (kuning, 7.000–13.000 kend/hari), dan rendah (hijau, 0–7.000 kend/hari). Kondisi ini menunjukkan bahwa mobilitas mahasiswa di dalam kampus bersifat tinggi dan berulang (*multi-trip*), yang merupakan karakteristik umum pergerakan di kawasan pendidikan (Hamad dkk, 2021). Hal ini juga mengindikasikan bahwa sistem transportasi kampus harus mampu mengakomodasi pergerakan internal yang intensif, bukan hanya perjalanan masuk dan keluar kampus.

Dari sisi temporal yang ditunjukkan pada Gambar 8, pola pergerakan menunjukkan adanya jam puncak (*peak hour*) yang konsisten. Pada arah masuk, jam puncak terjadi pada pukul 07.00–08.00 untuk kedua gerbang secara bersamaan, dengan Gerbang Belakang mencapai 3.297 kendaraan dan Gerbang Samping mencapai 5.428 kendaraan. Pada arah keluar, terdapat perbedaan antara kedua gerbang: Gerbang Belakang mencapai puncak pada pukul 14.00–15.00, sedangkan Gerbang Samping mencapai puncak pada pukul 15.00–16.00. Perbedaan waktu puncak keluar ini mengindikasikan keberagaman pola kepulangan mahasiswa dari 13 fakultas dengan jadwal yang berbeda. Pola ini mencerminkan aktivitas akademik mahasiswa yang terpusat pada pagi hingga siang hari. Temuan ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa puncak pergerakan mahasiswa terjadi pada awal aktivitas perkuliahan dan saat kepulangan (Sari dkk., 2023), sehingga memperkuat validitas pola waktu yang dihasilkan dalam penelitian ini.

Dari aspek validasi model, nilai koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh berkisar antara 0,61 hingga 0,74, dengan rincian $R^2 = 0,74$ untuk Gerbang Belakang (masuk), $R^2 = 0,66$ untuk Gerbang Belakang (keluar), $R^2 = 0,61$ untuk Gerbang Samping (masuk), dan $R^2 = 0,67$ untuk Gerbang Samping (keluar). Nilai R^2 tersebut berada pada rentang 0,60–0,79 yang menurut Sugiyono (2019) dikategorikan sebagai tingkat hubungan yang kuat antara variabel simulasi dan data aktual. Washington et al. (2020) dalam buku *Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis* menegaskan bahwa dalam analisis data transportasi, nilai R^2 pada kisaran 0,5 hingga 0,7 telah menunjukkan hubungan yang moderat dan dapat diterima, terutama pada data lalu lintas yang memiliki variabilitas tinggi. Dengan demikian, nilai R^2 tidak harus mendekati satu untuk dapat dianggap valid, selama masih berada dalam rentang yang dapat menjelaskan hubungan antar variabel secara memadai. Bastarianto dkk., (2023) juga menegaskan bahwa konsistensi pola yang dihasilkan model terhadap pola aktual merupakan indikator penting validitas model berbasis agen. Secara pola, model ini berhasil merepresentasikan dominasi Gerbang Samping sebagai akses masuk utama (59,5%) dan Gerbang Belakang sebagai akses keluar utama (57,8%).(Sha dkk., 2018). Hal ini menunjukkan bahwa model yang dikembangkan telah memiliki tingkat reliabilitas yang memadai.

Namun, jika dibandingkan dengan beberapa penelitian lain yang menggunakan ABM dengan tingkat akurasi lebih tinggi, perbedaan nilai R^2 dalam penelitian ini kemungkinan dipengaruhi oleh keterbatasan data. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan data skala besar, seperti pengamatan kontinu atau integrasi data empiris yang lebih lengkap, dapat meningkatkan akurasi model secara signifikan (Moeckel, 2019; Liu dkk., 2021). Dalam penelitian ini, jumlah sampel survei sebesar 396 responden dibandingkan dengan total populasi lebih dari 31.000 mahasiswa serta keterbatasan waktu pengambilan data *traffic counting* menjadi faktor yang memengaruhi hasil kalibrasi model.

Meskipun demikian, hasil penelitian ini tetap menunjukkan konsistensi pola dengan penelitian terdahulu, baik dari segi distribusi spasial (*desire line*), pola waktu perjalanan, maupun pendekatan pemodelan yang digunakan. Dengan demikian, model yang dikembangkan dapat dinyatakan valid untuk digunakan sebagai dasar analisis awal dalam perencanaan transportasi kampus. Lebih lanjut, hasil ini juga memberikan implikasi penting dalam mendukung konsep *green campus*, di mana identifikasi koridor dengan intensitas

pergerakan tinggi dapat digunakan sebagai dasar dalam perencanaan transportasi yang lebih ramah lingkungan, seperti pengembangan jalur sepeda, peningkatan fasilitas pejalan kaki, serta optimalisasi transportasi bersama untuk mengurangi penggunaan kendaraan bermotor pribadi.

Selain itu, informasi mengenai pola waktu puncak dan distribusi pergerakan dapat dimanfaatkan untuk merancang strategi manajemen lalu lintas kampus yang lebih efisien, seperti pengaturan akses kendaraan, pengembangan sistem parkir terpusat, serta penerapan kebijakan pembatasan kendaraan pada koridor tertentu. Upaya ini diharapkan dapat menekan emisi kendaraan dan meningkatkan efisiensi pergerakan di lingkungan kampus, sehingga sejalan dengan prinsip keberlanjutan dalam pengembangan transportasi.

Oleh karena itu, untuk meningkatkan akurasi model pada penelitian selanjutnya, disarankan penggunaan data dengan cakupan yang lebih luas, baik dari segi jumlah responden maupun variasi waktu pengamatan. Selain itu, integrasi data berbasis teknologi seperti CCTV atau sensor lalu lintas dapat menjadi alternatif untuk memperoleh data yang lebih representatif. Hal ini diharapkan tidak hanya meningkatkan nilai koefisien determinasi, tetapi juga mendukung pengembangan sistem transportasi kampus yang lebih berkelanjutan dan berbasis data (*data-driven sustainable transport system*).

4. KESIMPULAN

Hasil visualisasi *desire line* menunjukkan bahwa pergerakan mahasiswa Universitas Sebelas Maret terkonsentrasi pada beberapa koridor utama dengan tingkat intensitas tinggi, sedang, dan rendah. Koridor dengan intensitas tinggi umumnya berada pada jalur yang menghubungkan gerbang kampus dengan pusat aktivitas, sehingga menjadi jalur dominan mobilitas mahasiswa. Pergerakan mahasiswa terkonsentrasi pada jalur akses utara kampus, khususnya pada ruas jalan J07 dan J27 yang berfungsi sebagai koridor penghubung utama antara gerbang kampus dengan pusat aktivitas akademik. Selain itu, Gerbang Samping mendominasi pergerakan masuk kampus dengan kontribusi sebesar 59,5%, sedangkan Gerbang Belakang menjadi akses keluar yang paling banyak digunakan dengan kontribusi sebesar 57,8%. Secara kuantitatif, volume kendaraan pada koridor intensitas tinggi mencapai lebih dari 13.000 kendaraan per hari, yang merupakan hasil simulasi dari 29.879 agen mahasiswa pengguna sepeda motor berdasarkan faktor pengali dari 396 responden survei. Angka ini mencerminkan akumulasi pergerakan berulang (*multi-trip*). Selain itu, pola waktu pergerakan memperlihatkan adanya jam puncak pada pukul 07.00–08.00 untuk pergerakan masuk, di mana Gerbang Samping mencapai sekitar 7.500 kendaraan dan Gerbang Belakang sekitar 5.900 kendaraan, serta pukul 14.00–15.00 untuk pergerakan keluar. Kondisi ini mencerminkan pola aktivitas akademik mahasiswa yang terkonsentrasi pada pagi hingga siang hari dan berakhir secara bertahap pada sore hari.

Dari aspek validasi, nilai koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh berkisar antara 0,61 hingga 0,74, dengan rincian $R^2 = 0,74$ untuk Gerbang Belakang (masuk), $R^2 = 0,66$ untuk Gerbang Belakang (keluar), $R^2 = 0,61$ untuk Gerbang Samping (masuk), dan $R^2 = 0,67$ untuk Gerbang Samping (keluar). Nilai tersebut menunjukkan bahwa model mampu menjelaskan lebih dari 60% variasi volume pergerakan aktual, sehingga model dinyatakan cukup representatif untuk menggambarkan pola pergerakan mahasiswa di lingkungan kampus UNS. Selain kesesuaian angka, model juga berhasil merepresentasikan konsistensi pola dominasi gerbang yang selaras dengan data eksisting, sehingga dapat digunakan sebagai dasar analisis awal dalam perencanaan transportasi kampus.

DAFTAR PUSTAKA

- Argota, J., 2022. *Getting Real: The Challenge of Building and Validating a Large-Scale Digital Twin of Barcelona's Traffic with Empirical Data*.
- Bastarianto, F.F., Hancock, T.O., Choudhury, C.F. dan Manley, E., 2023. *Agent-based models in urban transportation: Review, challenges, and opportunities*. *European Transport Research Review*, 15(1).
- Benčat, G. dan Janota, A., 2020. *Journal of Civil Engineering and Transport*, 2(2), hlm. 73–89.
- Fortu, Z.J.T.F., Guevarra, L.M.L., Ang, M.R.C.O. dan Vergara, K.A.P., 2024. *Agent-Based Modeling of UP Diliman Intracampus Pedestrian Mobility Using NetLogo and GIS*.
- Hamad, K., Thet, P., Htun, T. dan Obaid, L., 2021. *Characterization of travel behavior at a university campus: A case study of Sharjah University City, UAE*. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 12, 100488.
- Handayani, D., Purnawan, C., Nugraha, S., Chrismaningwang, G. dan Ubaidillah, 2024. *Impact of Green Campus Transportation Programs on Emission Reduction Target 2030*. *ASEAN Engineering Journal*, 14(1), hlm. 213–221. <https://doi.org/10.11113/aej.V14.20551>.

- Joewono, T.B. dan Rizki, M., tanpa tahun. *Eksplorasi perjalanan mahasiswa terkait kegiatan kampus berdasarkan catatan perjalanan*. Jurnal Transportasi, 14(2), hlm. 117–126.
- Kuusela, P., Norros, I., Kilpi, J. dan Rätty, T., 2020. *Origin-destination matrix estimation with a conditionally binomial model*.
- Liu, W., Wang, F., Zhang, C., Zhang, J. dan Wang, L., 2021. *A simulation study of urban public transport transfer station based on AnyLogic*. 15(4), hlm. 1216–1231.
- Mahajan, V., Cantelmo, G., & Antoniou, C., 2023. Towards automated calibration of large-scale traffic simulations. *preprint_v2*, Technical University of Munich.
- Maruddin, M. dan Kasim, R., 2025. *Analisis sebaran pergerakan mahasiswa Kampus Universitas Muslim Indonesia Makassar*. Region, 20(2).
- Moeckel, R., 2019. *Validation of an agent-based travel demand model with floating car data*. Transportation Research Procedia, 37, hlm. 242–249.
- Priyana, J. (2025). *Pemodelan pola perjalanan berbasis agen pada platform AnyLogic: Studi kasus mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret* [Skripsi S1, Universitas Sebelas Maret]. Repositori Universitas Sebelas Maret.
- Santoso, A., 2023. *Rumus Slovin: Panacea Masalah Ukuran Sampel?* Suksma: Jurnal Psikologi Universitas Sanata Dharma, 4(2).
- Sha, S., Gu, Z. dan Saberi, M., 2018. *Calibration and validation of a simulation-based dynamic traffic assignment model for a large-scale congested network*. Simulation Modelling Practice and Theory, 86, hlm. 169–186.