

Simulasi Transportasi Arus Lalu Lintas Menggunakan Model Cellular Automata

Marina Irdayanti¹, Dr. Irma Palupi, S.Si, M.Si²

^{1,2}Fakultas Informatika, Universitas Telkom, Bandung

¹marinairdayanti@students.telkomuniversity.ac.id, ²irmapalupi@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Dalam tulisan ini, arus lalu lintas di jalan raya seringkali mengalami kemacetan dengan kendaraan yang melintas, sehingga terjadi peningkatan jumlah kendaraan yang digunakan di jalan raya yang dapat menyebabkan kemacetan lalu lintas. Makalah ini bertujuan untuk mensimulasikan arus lalu lintas kendaraan dengan model automata seluler yang menggunakan lintasan gabungan empat persimpangan dengan tiga persimpangan yang terdapat dua bundaran. Kondisi ruas jalan yang simulasikan berupa dua jalur yang berlawanan arah. Model Cellular Automata digunakan karena sesuai dengan pergerakan realistis pengemudi di jalan raya. Selain itu, model ini dapat menganalisis tindakan selanjutnya yang dilakukan, seperti menambah kecepatan, berpindah jalur, dan pengereman. Kemudian, pelajari parameter yang berbeda, termasuk kecepatan kendaraan, jumlah kendaraan, panjang lintasan, probabilitas, dan waktu yang ditempuh kendaraan di lintasan. Hasil implementasi model cellular automata dapat digunakan sebagai perencanaan lalu lintas di jalan raya.

Kata Kunci: Arus Lalu Lintas, Cellular Automata, Simulasi.

Abstract

In this paper, the traffic flow on the highway is congested with passing vehicles, thus increasing the number of vehicles used on the road which can cause traffic jams. This paper aims to simulate vehicle traffic flow with a cellular automata model using a four-lane track with three lanes with two roundabouts. The simulated road condition is in the form of two paths in opposite directions. The Cellular Automata model is used because it corresponds to the real movement of the driver on the highway. In addition, this model can analyze the next actions taken, such as increasing speed, changing lanes, and braking. Then, the different parameters, including vehicle speed, number of vehicles, trajectory, probability, and time traveled by the vehicle on the track. The results of the implementation of the cellular automata model can be used as traffic planning on the highway.

Keywords: Traffic Flow, Cellular Automata, Simulation.

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Kegiatan yang biasanya dilakukan oleh orang lain terkadang, tidak terlepas dengan yang namanya transportasi. Penggunaan transportasi sendiri dapat mempersingkat waktu perjalanan menuju tempat tujuannya masing-masing. Namun, semakin meningkatnya jumlah penggunaan kendaraan di jalan raya dimana, terjadinya antrian dan kemacetan di persimpangan jalan. Untuk menghindari masalah tersebut, maka di persimpangan dilakukan pemasangan alat pendeteksi sinyal lalu lintas. Tujuan menggunakan sinyal lalu lintas untuk mengontrol pergerakan lalu lintas secara teratur dimana, menyesuaikan panjang fase ketika lampu hijau dan merah, sesuai dengan keadaan lalu lintas yang sebenarnya.

Kinerja dari sinyal lalu lintas dapat diamati saat arus lalu lintas di persimpangan jalan, dapat memprediksi jalur manakah yang harus berhenti atau berjalan, seperti: lurus langsung melewati simpangan dan berbelok kiri atau kanan menuju seberang persimpangan. Namun, ketika kendaraan berada di jalan dengan kondisi lampu merah maka, kendaraan akan berhenti saat memasuki persimpangan dan harus mengalah. Setelah itu, dapat masuk ke jalur yang dipilih dengan tidak memperlambat kendaraan di jalur tersebut.

Oleh karena itu, untuk mengamati pergerakan kendaraan dapat menggunakan pendekatan dengan model cellular automata. Arus lalu lintas diatur oleh beberapa faktor, di antaranya adalah perilaku pengemudi (misalnya gaya mengemudi yang tidak sempurna, mobil yang lambat dan kecelakaan mobil) yang berperan penting dalam pembentukan kemacetan di dalam sistem transportasi, terutama yang dikombinasikan dengan peningkatan kepadatan mobil [1]. Kemudian, tindakan kendaraan, seperti: menyalip dan putar balik tidak ada dalam simulasi ini dan setiap kendaraan mengikuti jalur yang diinginkan. Pada penelitian ini, menggunakan model cellular automata dan array dua dimensi dengan beragam parameter untuk arus lalu lintas serta, mensimulasikan kejadian lain yang mungkin terjadi di persimpangan.

1.2 Topik dan Batasannya

Topik dari penelitian ini dalam merancang simulasi transportasi arus lalu lintas dengan metode algoritma Cellular automata untuk melakukan simulasi pemodelan gerakan kendaraan. Cara kerja dari algoritma Cellular automata dalam pergerakan kendaraan dipengaruhi oleh dua faktor, yaitu:

1. Faktor keadaan jalan dimodelkan dalam lintasan dua jalur dengan adanya distance, yaitu jumlah sel kosong secara berurutan di suatu sel. distance ini mewakili jarak jalan kosong didepan kendaraan. Jika distance lebih besar dari kecepatan yang dimiliki kendaraan, maka kecepatan kendaraan tersebut dapat ditambah, namun jika distance lebih kecil dibandingkan kecepatan kendaraan, maka kecepatan kendaraan harus diturunkan sampai sama dengan distance.
2. Faktor kedua adalah faktor pengemudi kendaraan. dengan kemungkinan p , pengemudi kendaraan memperlambat kendaraannya meskipun jalan didepannya kosong.

1.3 Tujuan

Merancang dan membangun sistem simulasi arus lalu lintas dengan menggunakan pemodelan Cellular Automata (CA). Selain itu, menganalisis penggunaan algoritma Cellular Automata dengan sinyal lalu lintas dalam lintasan gabungan simpangan empat dengan simpangan tiga.

2. Studi Terkait

2.1 Cellular Automata

Cellular automata adalah model yang biasa digunakan simulasikan fenomena terkait aliran dan penyebaran, secara umum karakteristik, yang merepresentasikan sebaran atau aliran dengan yang disebut sel-sel yang memiliki elemen-elemen sebagai berikut:

- Grid spasial terdiri dari kisi-kisi sel yang terpisah-pisah dimana dapat memiliki ukuran yang sama atau berbeda. Grid spasial dapat ditinjau dalam cakupan 1 dimensi, 2 dimensi, dan paling tinggi 3 dimensi.
- Kondisi (state), adalah Status sel yang merupakan keadaan sel yang dapat dimiliki oleh masing-masing sel pada grid. Status sel dapat memiliki kondisi berupa angka maupun sifat tertentu. Misalkan pada simulasi kendaraan dengan cellular automata setiap sel mewakili koordinat diskrit posisi di jalan raya. Sehingga, keberadaan kendaraan pada posisi di setiap sel mewakili state di sel tersebut. Jadi, dapat kita tinjau hanya terdapat dua state pada model kendaraan dengan grid spasial dua dimensi yaitu, ada kendaraan atau tidak ada kendaraan.

- Neighbours (tetangga), yaitu sel tetangga yang ditinjau dari lokasi suatu sel. Definisi tetangga dapat bermacam-macam dalam pemodelan arus kendaraan ini hanya terdapat dua anggota tetangga untuk setiap sel.
- Behavior Rules (aturan perilaku): untuk menentukan bagaimana keadaan suatu sel berubah, dipengaruhi oleh sel tetangganya pada setiap langkah waktunya.

2.2 Notasi dan Istilah

Beberapa notasi dan istilah yang akan digunakan adalah sebagai berikut:

- V_{max} : kecepatan maksimal setiap kendaraan yang melaju pada simulasi dan diasumsikan seluruh kendaraan memiliki kecepatan maksimal yang sama.
- t_{max} : langkah waktu yang ditempuh oleh kendaraan di lalu lintas.
- p : probabilitas perilaku pengemudi pada saat melakukan pengereman.
- L : panjang jalan yang di tempati oleh kendaraan di lalu lintas.
- Kecepatan lalu lintas (v): laju dari pergerakan arus lalu lintas.
- Posisi kendaraan (x): kondisi kendaraan yang berada di sepanjang lintasan saat melakukan pergerakan.

2.3 Cellular Automata untuk Arus Lalu Lintas

A. Grid Spasial

Untuk kasus diskritisasi spasial sesuai dengan panjang jalan yang ditempati oleh kendaraan yang berukuran 1 dimensi untuk simulasi ini. Sedangkan diskritisasi waktu, skema diskritisasi dan nilai langkah waktu harus ditentukan. Untuk cellular automata, pembaruannya berurutan mengarah ke proses diskrit yang berbeda [2]. Proses ini dapat disimulasikan berulang-ulang, dengan memperbarui semua posisi di setiap langkah waktu.

B. State

State atau keadaan untuk satu titik sel adalah "1" dan "0", yang menunjukkan bahwa sel ditempati oleh kendaraan atau tidak. Pergerakan kendaraan yang akan memasuki persimpangan dibatasi oleh status sel persimpangan. Jika kendaraan memutuskan untuk bergerak maju pada langkah waktu berikutnya, ia harus memeriksa apakah keadaan semua sel dari posisi saat ini ke posisi target, yang akan ditempati oleh kendaraan tersebut, tersedia atau tidak. Jika tidak, kendaraan tersebut harus berhenti dan menunggu sampai sel tersebut kosong.

C. Neighbours

Untuk bagian ini, diilustrasikan sel tetangga yang memiliki tiga ruas sel, yaitu: kiri, tengah, dan kanan seperti pada gambar 1. Tetangga setiap sel adalah posisi yang berada di depan atau di belakang dimana, ditandai '0' dan diwakili dengan warna putih. Sedangkan, titik sel yang berwarna kuning ditandai '1' dimana, ditempati oleh kendaraan. Bila, titik sel dan sel tetangganya tidak berisi kendaraan maka, pada kondisi berikutnya sel tidak akan memiliki kendaraan dan tidak mengalami perubahan di langkah waktu berikutnya. Jika salah satu sel terdapat kendaraan dimana, memiliki jalan yang kosong di depannya, sehingga dapat maju satu sel ke kanan dan mengosongkan ruang jalan di belakangnya. Kemudian, jika kendaraan berada di tengah sel dan menemukan kendaraan lain tepat di depannya, maka kendaraan tersebut tidak dapat bergerak.

Gambar 1. *Neighbours*

D. Rule Model

Adapun langkah-langkah aksi pengemudi dalam proses update Cellular Automata, antara lain:

1. Percepatan

$$v \rightarrow \min(v + 1, v_{max})$$

Saat penambahan kecepatan v setiap kendaraan 1 unit satuan kecepatan untuk 1 unit satuan waktu, dan tidak boleh melebihi batas kecepatan yang dibolehkan (v_{max}) dimana, $v \leq v_{max}$. Selain itu, jika jarak kendaraan di depannya cukup jauh dan dimana, $d > v$, maka kecepatan kendaraan dinaikkan satu.

2. Perlambatan

$$v \rightarrow \min(v, d - 1)$$

Langkah ini memastikan bahwa pengemudi tidak bertabrakan dengan kendaraan di depannya. Bilamana jarak kendaraan di depannya sangat dekat $d \leq v$, maka kecepatan kendaraan diturunkan sebesar 1 satuan unit kecepatan.

3. Faktor Acak

$$v \rightarrow \max(v - 1, 0), \quad \text{dengan probabilitas } \rho$$

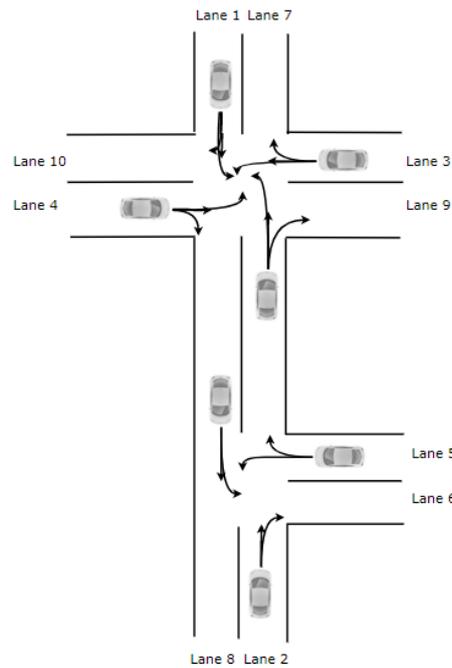
Pengemudi memiliki keinginan untuk mengerem dengan peluang sebesar p , yang menimbulkan kendaraan mengalami perlambatan sebesar 1 satuan unit kecepatan, sehingga jika menginjak rem kecepatan menjadi $v = v - 1 \geq 0$ dimana, kendaraan tidak dibolehkan mundur.

4. Perpindahan kendaraan

$$x \rightarrow x + v$$

Satuan waktu diasumsikan tidak berdimensi, sehingga nilai kecepatan akan sama dengan perpindahan untuk setiap unit satuan waktu.

Pada bagian ini menggambarkan bentuk lintasan yang menggunakan gabungan empat persimpangan dengan tiga persimpangan yang berisi dua jalur yang saling berlawanan arah. Gambar 2. menunjukkan bentuk lintasan yang digunakan dalam simulasi ini. Untuk simulasi model, kendaraan dapat berpindah jalur, memasuki jalur belok kiri atau belok kanan, dan bergerak secara searah dalam lintasan tersebut.



Gambar 2. gabungan lintasan simpangan empat dan simpangan tiga

Kendaraan yang muncul di lintasan lane 1 akan bergerak lurus menuju lane 8 kemudian, ketika kendaraan berasal dari lane 1 akan berbelok kiri menuju lane 9 dan lane 6. Jika tidak, kendaraan dari lane 1 akan berbelok kanan menuju lane 10. Lalu, kendaraan yang muncul dari lane 2 bergerak lurus menuju lane 7 jika tidak, kendaraan akan berbelok kiri menuju lane 10. Sebaliknya, kendaraan yang berasal dari lane 2 akan menuju lane 6 dan lane 9 untuk berbelok kanan. Selanjutnya, kendaraan yang muncul di lane 3 akan berkendara menuju lane 10, bila tidak bergerak lurus akan berbelok kiri menuju lane 2 dan berbelok kanan menuju lane 7. Selain itu, kendaraan yang muncul di lane 4 akan berkendara menuju lane 9 apabila kendaraan tidak ke arah lurus maka, akan berbelok kiri menuju lane 7 serta, berbelok kanan menuju lane 8. Tak hanya itu, kendaraan yang berasal dari lane 5 akan bergerak berbelok kiri menuju lane 8 sebaliknya, akan berbelok ke kanan menuju lane 7. Di setiap persimpangan antar jalan, memperkenalkan bundaran yang dirancang untuk memungkinkan pengemudi mengubah arah selama perjalanan mereka. Selain itu, sebelum memasuki bundaran, setiap kendaraan n diberi probabilitas belok ($\rho_{turn}(n)$), yang memungkinkan pengemudi untuk memilih arah mengemudi yang diinginkannya [3]. Adapun aturan untuk kendaraan yang berada di simpangan tiga, diantara lain:

- Kendaraan yang berada di lane 1 saat berada di tiga simpangan lalu lintas.

$$x_{lane1} + v_{lane1} > L, x_{lane1} < \frac{L}{2}, x_{lane1} + v_{lane1} \geq \frac{L}{2}$$

Kondisi terpenuhi, ketika terjadi konflik antara kendaraan yang akan berbelok ke lane 8 dan kendaraan di lane 1. Sementara itu, kendaraan yang melaju di lane 1 memiliki prioritas untuk berjalan melewati simpangan terlebih dahulu. Kemudian, kendaraan yang berbelok ke lane 8 tidak diizinkan untuk melewati simpangan dan harus mengalah.

- Kendaraan yang berada di lane 2 saat berada di tiga simpangan lalu lintas.

$$x_{lane2} - v_{lane2} \leq 0, \quad x_{lane2} > \frac{L}{2} + 1, \quad x_{lane2} - v_{lane2} \geq \frac{L}{2} + 1$$

Untuk keadaan ini, bila terjadi konflik antara kendaraan yang akan berbelok ke lane 6 dan kendaraan di depan di lane 2. Selanjutnya, kendaraan yang melaju di lane 2 memiliki prioritas untuk berjalan melewati simpangan terlebih dahulu. Kemudian, kendaraan yang berbelok ke lane 6 tidak diperbolehkan untuk melewati simpangan dan harus mengalah.

- Kendaraan yang berada di lane 5 saat berada di tiga simpangan lalu lintas.

$$x_{lane5} - v_{lane5} \leq 0, \quad x_{lane5} > \frac{L}{2}, \quad x_{lane5} - v_{lane5} \geq \frac{L}{2} + 1$$

Pada situasi ini, bila terjadi konflik antara kendaraan yang membelok ke lane 8 serta, kendaraan yang melaju di lane 5. Lalu, kendaraan yang melaju di lane 5 memiliki prioritas untuk berjalan melewati simpangan terlebih dahulu. Kemudian, kendaraan yang berbelok ke lane 8 tidak diizinkan untuk melewati simpangan dan harus mengalah.

Kemudian, adapun aturan untuk kendaraan yang berada di simpangan empat, diantara lain:

- Kendaraan yang berada di lane 1 dan lane 2 saat berada di empat simpangan lalu lintas

$$x_{lane1} + v_{lane1} > L, \quad x_{lane1} < \frac{L}{2}, \quad x_{lane1} + v_{lane1} \geq \frac{L}{2}$$

$$x_{lane2} - v_{lane2} \leq 0, \quad x_{lane2} > \frac{L}{2} + 1, \quad x_{lane2} - v_{lane2} \geq \frac{L}{2} + 1$$

Apabila terjadi konflik antara kendaraan yang akan berbelok ke lane 9 dan lane 10 serta, kendaraan di lane1 dan lane 2. Sementara itu, kendaraan yang melaju di lane 1 dan lane 2 memiliki prioritas untuk berjalan melewati simpangan terlebih dahulu. Kemudian, kendaraan yang berbelok ke lane 9 dan lane 10, tidak diizinkan untuk melewati simpangan dan harus mengalah.

- Kendaraan yang berada di lane 3 dan lane 4 saat berada di empat persimpangan lalu lintas

$$x_{lane3} - v_{lane3} \leq 0, \quad x_{lane3} > \frac{L}{2} + 2, \quad x_{lane3} - v_{lane3} \geq \frac{L}{2} + 2$$

$$x_{lane4} + v_{lane4} \leq L, \quad x_{lane4} < \frac{L}{2}, \quad x_{lane4} + v_{lane4} \geq \frac{L}{2}$$

Bilamana kondisi terpenuhi dimana, terjadi konflik antara kendaraan yang akan berbelok ke lane 7 dan lane 8 serta, kendaraan di depan di lane 3 dan lane 4. Kemudian, kendaraan yang melaju di lane 3 dan lane 4 memiliki prioritas untuk berjalan melewati simpangan terlebih dahulu. Setelah itu, kendaraan yang berbelok ke lane 7 dan lane 8, tidak diperbolehkan untuk melewati simpangan dan harus mengalah.

2.3.1 Kondisi Batas

Pada bagian ini, terdapat dua kondisi dalam setiap sistem yang memiliki domain posisi dan waktu, yaitu kondisi awal atau akhir dan kondisi batas. Dalam simulasi ini digunakan kondisi awal secara acak, dimana sejumlah n kendaraan ditempatkan secara acak di n posisi yang berbeda dalam domain posisi. Sedangkan, untuk kondisi batas digunakan kondisi batas periodik, yaitu setiap kendaraan yang hampir berada di batas akhir setiap axis, secara periodik akan kembali ke posisi awal axis tersebut. Sebuah mobil memasuki jalan, mencapai ujung dan dapat meninggalkan jalan (ruas lain) [4]. Dalam model, kondisi batas ketika memasuki lintasan sebuah terdapat kendaraan dengan kecepatan maksimum dibuat dengan probabilitas α . Jika ditempati oleh kendaraan lain maka, kendaraan tersebut berada di posisi terdepan dikeluarkan dari sistem dengan probabilitas β bila memasuki akhir lintasan [5]. Adapun dua probabilitas yang digunakan dalam kondisi ini, yaitu:

- Probabilitas α yang membangkitkan kemunculan kendaraan, untuk kendaraan yang memasuki jalan raya, jika sel pertama kosong.
- Probabilitas β bila, kendaraan akan memasuki batas akhir lintasan.

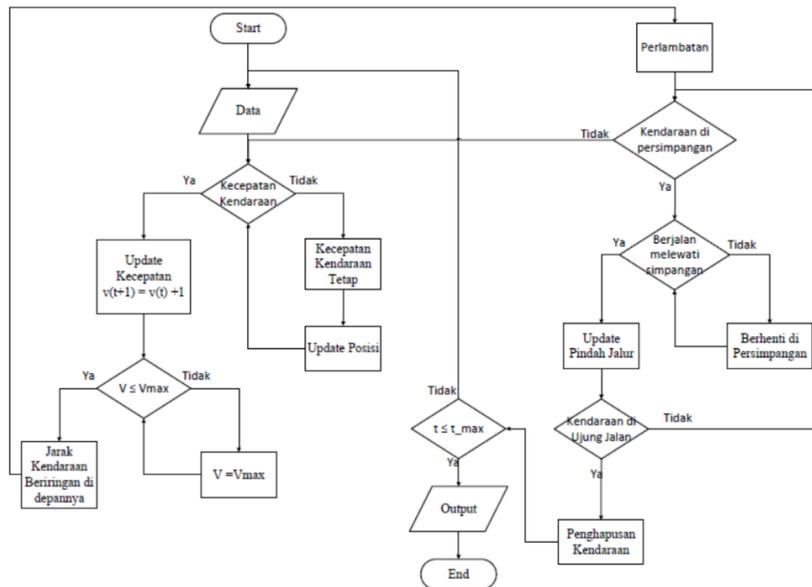
2.3.2 Model Sinyal Lalu lintas

Pada model ini, digunakan dengan aturan cellular automata untuk simulasi lalu lintas dengan persimpangan jalan raya sesuai bentuk lintasan sebelumnya. Sinyal lalu lintas yang digunakan dalam simulasi ini, memberikan prioritas yang sama untuk semua jalur dan semua kendaraan di jalan terlepas, dari jalur mana mereka berada. Selanjutnya, dalam lintasan ini jika ada kendaraan di dekat persimpangan maka, kendaraan yang berada di di depan mobil di jalur lain berjalan lebih dulu. Untuk prioritas yang digunakan ada dua, yaitu: prioritas berjalan dan prioritas berhenti. Adapun prioritas berjalan dan berhenti yang telah ditetapkan untuk simulasi ini, sebagai berikut:

- Prioritas berjalan:
Sinyal lampu lalu lintas ditandai dengan $SinyalH_1 == 1$ ketika lampu hijau untuk jalur prioritas berjalan diutamakan terlebih dahulu maka, akan menghasilkan jarak antara kendaraan yang berada di depan dan di jalur yang ditempati.
- Prioritas berhenti:
 $\sim(SinyalH_1 == 1)$ dimana, terjadi lampu merah atau keadaan kendaraan harus berhenti dan harus mengalah pada kendaraan yang memiliki prioritas berjalan. Maka, akan menghasilkan jarak antara kendaraan yang berada di depan dan di jalur yang ditempati.

3. Sistem yang Dibangun

3.1 Perancangan Sistem



Gambar 3: alur sistem transportasi lalu lintas

3.1.1 Kecepatan Kendaraan

Memulai pergerakan kendaraan dalam posisi awal, jika kecepatan kendaraan tetap dimana posisinya tidak berubah maka, melakukan penambahan waktu. Sedangkan, jika melakukan update kecepatan maka, kecepatan tersebut bertambah setiap kendaraan dalam 1 unit kecepatan dan 1 unit waktu dimana tidak boleh melebihi kecepatan maksimum. Selain itu, jika $v \leq v_{max}$ maka, melanjutkan perjalanan dan mengecek jarak kendaraan ketika beriringan di depannya.

3.1.2 Update Posisi

Kendaraan akan melakukan perubahan posisi dimana, posisi di depan kosong dan kecepatan saat ini lebih besar dari batas posisi akhir maka, melakukan perpindahan hingga menuju arah keluar. Selain itu, jika waktu saat ini tidak lebih besar atau sama dengan t_{max} maka, terjadi output dimana simulasi telah selesai. Sebaliknya, akan terjadi secara iterasi sampai $t \leq t_{max}$.

3.1.3 Perlambatan

Setelah melakukan pengecekan jarak kendaraan ketika beriringan di depannya. Jika mengalami perlambatan dimana, kecepatan kendaraan lebih besar dari pada jarak kendaraan beriringan maka, pengemudi menginjak rem agar tidak terjadi tabrakan. Jika mengalami hal sebaliknya, maka pengemudi tidak menginjak rem.

3.1.4 Kendaraan di Persimpangan

Kondisi kendaraan yang berada di jalur ketika lampu hijau ditandai dengan $SinyalH_1 == 1$, yaitu: keadaan ketika lampu warna hijau untuk jalur kendaraan yang didahulukan berjalan melewati simpangan. Saat

lampu merah, ditandai dengan $\sim(\text{SinyalH}_1=1)$, yang menandakan menunggu kendaraan di jalur lain yang sedang melewati persimpangan.

3.1.5 Update Pindah Jalur

Kendaraan akan melakukan perpindahan jalur dimana, telah ditentukan secara random, $\rho_{turn}(n)$ untuk melakukan belokan dalam penelitian ini, seperti: belok kanan, belok kiri, dan lurus. Selain itu, kendaraan bebas memilih jalur yang diinginkan.

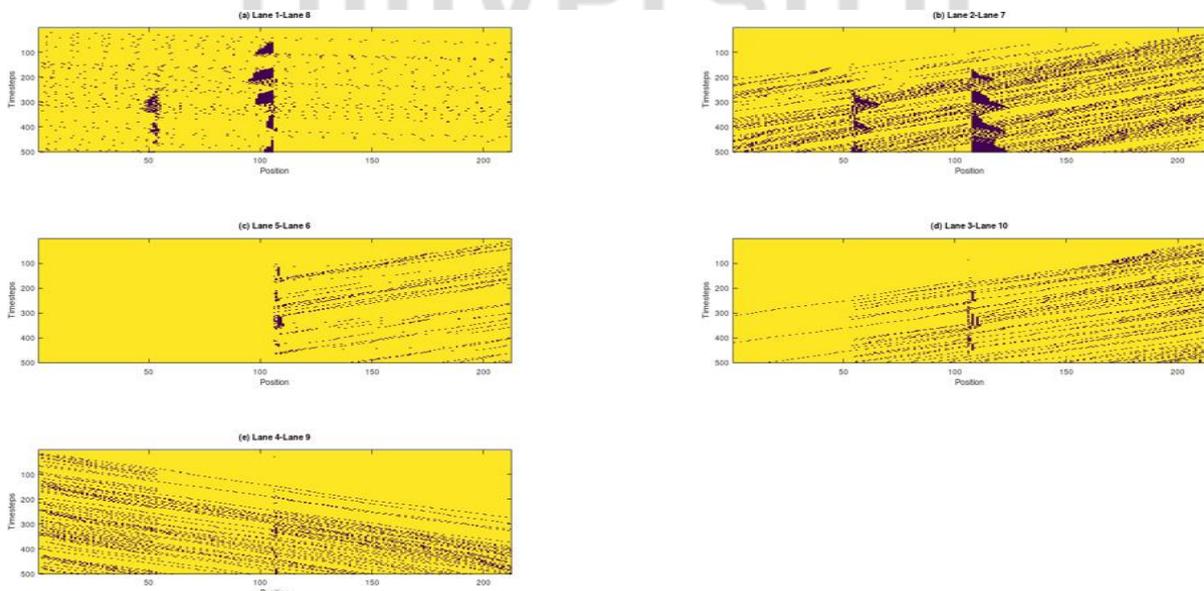
4. Implementasi Model Sistem

Pada penelitian ini terdapat beberapa inisiasi terkait implementasi model dan sistem sebagai langkah awal proses simulasi arus lalu lintas. Inisiasi pertama yang dilakukan adalah sebagai berikut :

Parameter	Keterangan	Nilai Awal
α	Probabilitas untuk membangkitkan kemunculan kendaraan secara keseluruhan di tiap jalurnya.	0.15
β	Probabilitas kendaraan ketika berada di batas akhir lintasan.	1
L	Panjang jalan yang di tempati oleh kendaraan di lalu lintas.	212
Vmax	Kecepatan maksimal setiap kendaraan yang melaju pada simulasi dan diasumsikan seluruh kendaraan memiliki kecepatan maksimal yang sama.	5
tmax	Langkah waktu yang ditempuh oleh kendaraan di lalu lintas.	500
p	Probabilitas perilaku pengemudi pada saat melakukan pengereman.	0.2
ρ_{turn}	Probabilitas kendaraan pada saat melakukan perubahan jalur saat berada di simpangan lalu lintas.	0.25

5. Hasil dan Analisis

5.1 Grafik Posisi Kendaraan dan Langkah Waktu

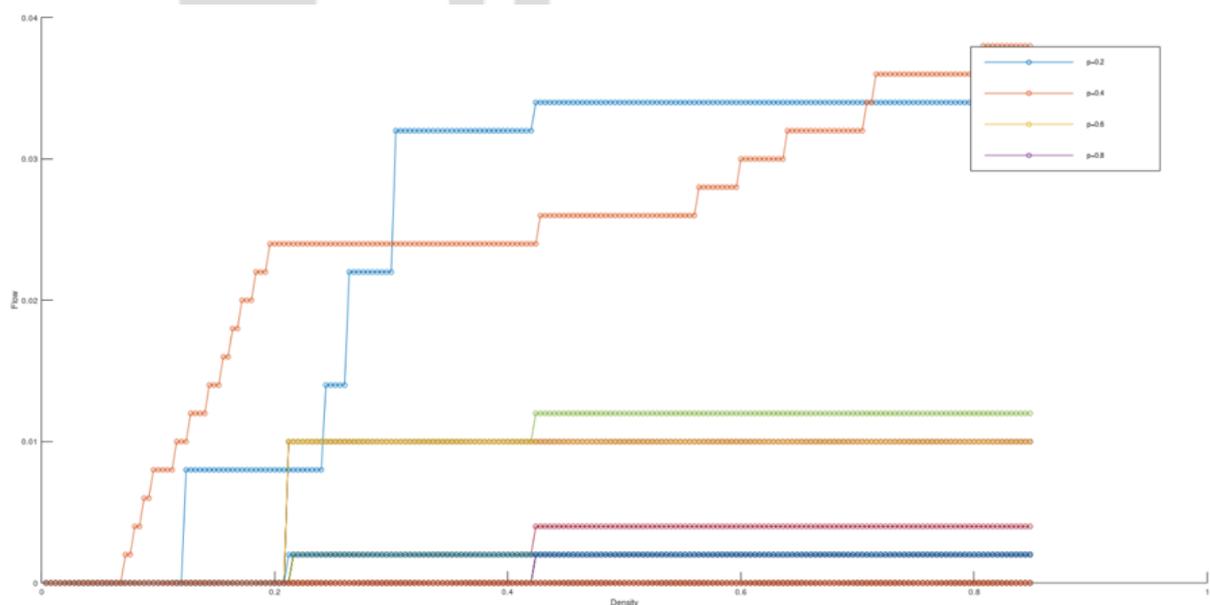


Gambar 4: hasil pengujian sistem transportasi lalu lintas

Pada hasil pengujian yang telah dilakukan memunculkan grafik dimana, terdapat timesteps sebagai waktu dan position sebagai posisi kendaraan. Selain itu, latar belakang kuning mewakili jalan raya, garis pendek biru mengacu pada kendaraan. Gambar. 3(a) di jalur 'lane 1-lane 8' dan gambar 3(b) di jalur 'lane 2-lane 7' adanya kepadatan yang cukup besar di simpangan jalan. Selain itu, gambar 3(c) di jalur 'lane 5-lane 6' dan gambar 3(d) di jalur 'lane 3-lane 10' terdapat pula kepadatan cukup kecil yang terjadi di simpangan jalan. Kemudian, kendaraan berusaha untuk mengurangi kecepatan dengan aman, tetapi diperbolehkan untuk mempercepat secara instan saat keluar dari jalur depan. Pada gambar 3(e) di jalur 'lane 4-lane 9', aliran kendaraan yang stabil terjadi di sekitar daerah padat tersebut dimana, dipenuhi dengan kemacetan kecil, untuk kepadatan ini, dalam model ini berisi kendaraan yang bergerak. Selain itu, ketika simulasi berlangsung terdapat perbedaan jumlah kendaraan saat kendaraan masuk ke lintasan dengan aliran keluar jalur setelah persimpangan dan memiliki panjang kemacetan dengan ukuran yang berbeda karena menggunakan kondisi batas dalam simulasi ini.

5.2 Pengereman Kendaraan

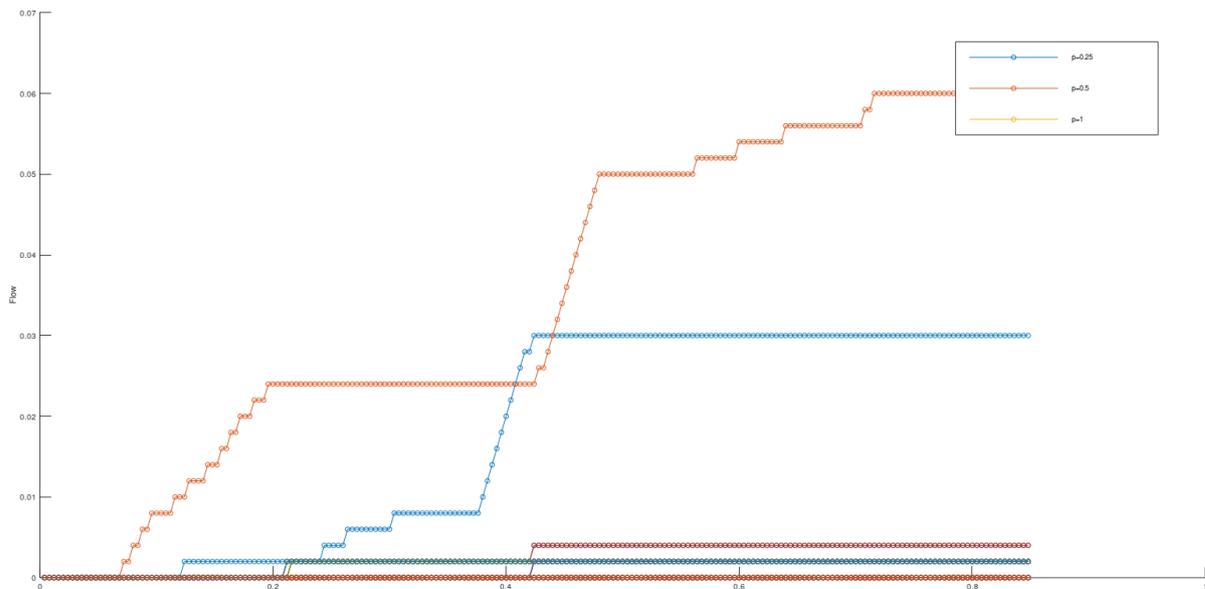
Pada bagian ini, melakukan pengujian terkait probabilitas pengemudi dalam melakukan pengereman dan tiap aksi pengemudi memiliki perilaku yang berbeda terhadap situasi lalu lintas setempat. Sementara itu, dalam penelitian ini akan ditentukan nilai probabilitas pengereman untuk simulasi arus lalu lintas dengan nilai density sehingga, menghasilkan Gambar 5. Untuk, grafik probabilitas pengereman digunakan beragam *density* dalam simulasi ini beserta flow dimana, hasil dari pengujian tersebut yaitu, ketika probabilitas untuk pengereman kendaraan nilainya lebih kecil maka, menghasilkan nilai flow yang semakin meningkat dalam simulasi ini.



Gambar 5: hasil pengujian pengereman kendaraan

5.3 Aksi Pindah Jalur

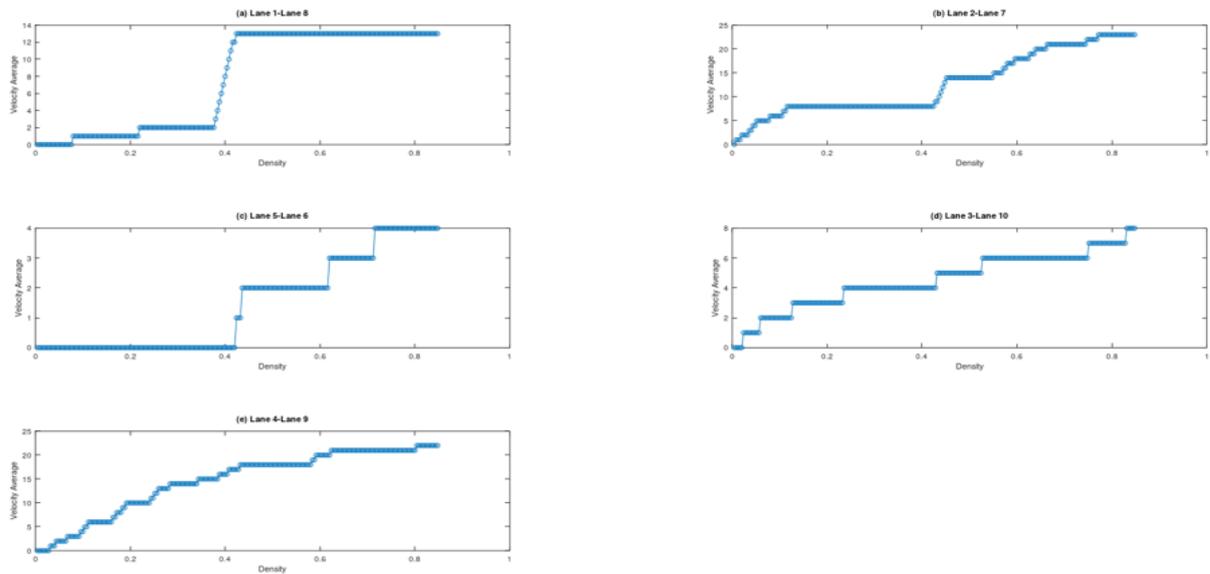
Untuk bagian ini, melakukan pengujian terkait probabilitas perpindahan jalur dimana, terdapat perilaku pengemudi saat ingin mengubah arah kendaraannya ke jalur lain. Selanjutnya, terdapat hasil pengujian ini pada Gambar 6 yang menggunakan nilai flow terhadap density dengan beragam probabilitas pindah jalur. Kemudian, dapat disimpulkan terkait pengujian ini dimana, semakin kecil nilai probabilitas pindah jalur maka semakin besar arus yang dihasilkan sebaliknya, semakin kecil probabilitas atau peluang aksi pindah jalur yang dihasilkan maka semakin besar nilai kecepatan rata-rata kendaraan.



Gambar 6: hasil pengujian aksi pindah jalur

5.4 Tingkat Kepadatan Kendaraan

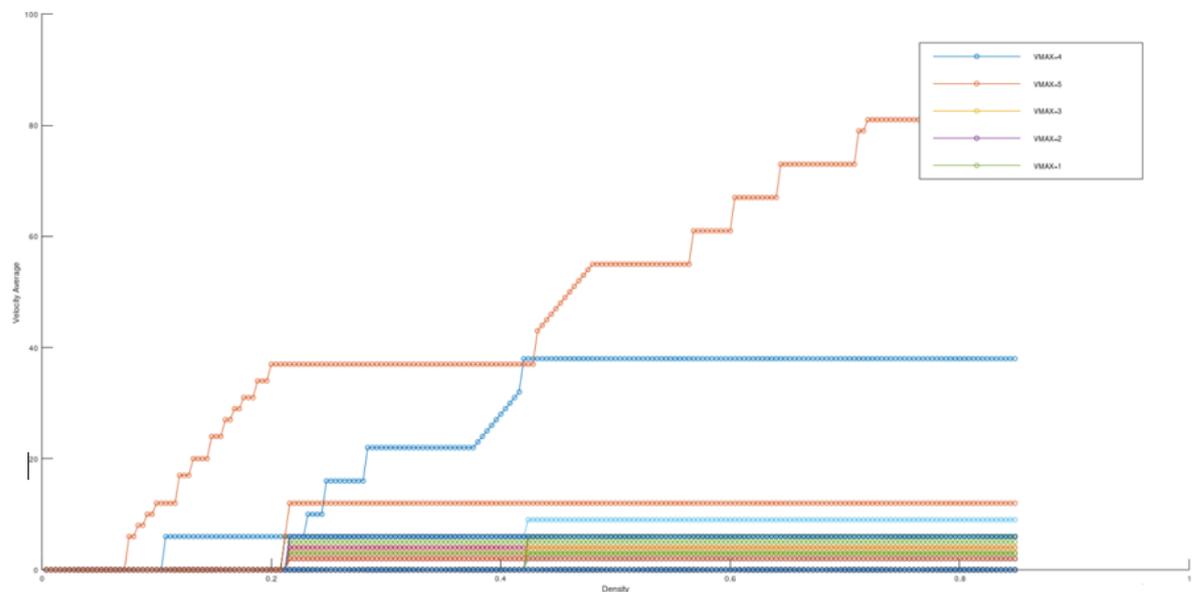
Pada bagian ini akan melakukan pengujian terkait jumlah kendaraan yang berada di lintasan ini. Kemudian menggunakan *velocity average* dengan nilai *density* 0,15, dapat dilihat pada Gambar 7 grafiknya meningkat yang merepresentasikan bahwa semakin besar jumlah kendaraan yang di munculkan dalam lintasan maka semakin kecil nilai kecepatan rata-rata. Hal ini menunjukkan bahwa dalam simulasi ini akan terjadi konflik atau tabrakan dimana, kendaraan yang berada pada arus lalu lintas dapat terjadi kemacetan sehingga kecepatan rata-rata setiap kendaraannya akan menurun. .



Gambar 7: hasil pengujian tingkat kepadatan kendaraan

5.5 Kecepatan Maksimum Kendaraan

Penelitian ini akan melakukan pengujian terkait pengaruh arus lalu lintas dimana, terdapat *density* dengan berbagai macam kecepatan maksimal kendaraan yang digunakan pada simulasi ini. Hasil pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 8 dimana dapat disimpulkan dari pengujian ini bahwa semakin besar kecepatan maksimum yang dimiliki kendaraan maka semakin besar nilai kecepatan rata-rata.



Gambar 8: hasil pengujian kecepatan maksimum kendaraan

6. Kesimpulan

Pada penelitian ini mensimulasikan dan mempelajari sistem lalu lintas kendaraan kondisi batas terbuka dan mendefinisikan aturan kendaraan masuk atau keluar lintasan dan secara mendalam mempelajari dampak perilaku kendaraan masuk atau keluar lintasan pada arus lalu lintas serta, menghasilkan nilai kecepatan rata-rata dan *flow* terhadap kepadatan arus lalu lintas. Kemudian, dalam penelitian yang telah dilakukan

sebelumnya terkait pengaruh arus lalu lintas terhadap perilaku pengemudi sehingga menghasilkan kesimpulan dimana, nilai probabilitas yang didapatkan semakin kecil untuk setiap aksi pengemudi maka nilai kecepatan rata-rata dan density yang dihasilkan semakin besar. Hal ini dapat dibuktikan dimana, semakin kecil nilai probabilitas perilaku pengemudi maka, semakin ideal untuk arus lalu lintas dalam simulasi ini. Selanjutnya, terkait pengaruh kecepatan maksimum terhadap arus lalu lintas dan kecepatan dimana, menghasilkan kecepatan maksimum kendaraan yang lebih besar sehingga, nilai kecepatan rata-rata kendaraan akan semakin besar pula.

Referensi

- [1] H. Pang and X. Yang, "Simulation of Urban Macro-Traffic Flow Based on Cellular Automata," *Proc. 31st Chinese Control Decis. Conf. CCDC 2019*, pp. 520–524, 2019, doi: 10.1109/CCDC.2019.8832372.
- [2] A. Tordeux, "Comparing interacting particles systems to cellular automata traffic flow models," pp. 1–11, 2012.
- [3] Y. Regragui and N. Moussa, "A cellular automata model for urban traffic with multiple roundabouts," *Chinese J. Phys.*, vol. 56, no. 3, pp. 1273–1285, 2018, doi: 10.1016/j.cjph.2018.02.010.
- [4] L. Angeline, M. Y. Choong, B. L. Chua, R. K. Y. Chin, and K. T. K. Teo, "A stochastic traffic cellular automata with controlled randomness," *Proc. - 2017 IEEE 2nd Int. Conf. Autom. Control Intell. Syst. I2CACIS 2017*, vol. 2017-Decem, no. October, pp. 68–73, 2017, doi: 10.1109/I2CACIS.2017.8239035.
- [5] Q. Yan-Feng, X. Yu, W. Xue, C. Bing-Ling, and W. Yi, "Study on PM emissions in cellular automata model with slow-to-start effect," *arXiv*, 2020.