

Simulasi Arus Lalulintas Menggunakan Automata Seluler

Suwatri Jura

Program Studi Teknik Informatika STMIK Handayani Makassar
Jl. Adhiyaksa No. 1, Telp. (0411) 4662111, Makassar
e-mail: isti.aries31@gmail.com

Abstrak

Simulasi Arus Lalulintas Menggunakan Autoata Seluluer bertujuan Algoritma fortune untuk sistem pembangkit peta poligon bertujuan Penerapan kerangka kerja algoritma otomata selular untuk simulasi arus lalu lintas. Dan Menganalisis pengaruh hubungan antara kepadatan dan kecepatan kendaraan terhadap arus kendaraan. Jenis penelitian ini adalah simulasi menggunakan model otomata selular yang diawali dengan perumusan masalah, studi kepustakaan, desain model otomata selular dan perancangan sistem simulasi arus kendaraan berdasarkan tingkat kepadatan dan kecepatan kendaraan. Implementasi algoritma akan disusun menggunakan bahasa pemrograman JavaScript. Program arus lalu lintas ini dengan menggunakan Cellular Automata dikerjakan dalam javascript yang telah dikembangkan oleh Artem Volkhin. Program ini sendiri menggambarkan tentang arus lalu lintas dua arah dengan pengaturan jalur masing-masing kendaraan dilakukan sistem acak (random. Kecepatan, perlambatan, dan pindah jalur pada masing-masing kendaraan berdasarkan algoritma yang telah dibahas sebelumnya. Program ini dibentuk dengan menggunakan JavaScript yang awalnya dikembangkan oleh blablabla. Kemudian, dengan mempertimbangkan faktor kecepatan dan kepadatan, diperoleh model arus lalu lintas yang dirasa relatif baik. Hal ini didasarkan pada grafik hubungan antara kecepatan, kepadatan dan arus yang diperoleh berdasarkan hasil pengamatan pada model yang ada pada program.

Kata kunci : Algoritam automata seluler, simulasi, kepadatan.

Abstract

Simulation of Traffic Flow Using Autoata Seluluer aims Fortune algorithm for polygon map generating system aims Implementation of mobile automated algorithm framework for simulation of traffic flow. And Analyzing the influence of the relationship between density and vehicle speed to vehicle flow. The type of this research is simulation using cellular automation model that begins with problem formulation, literature study, cellular automobile model design and design of vehicle current simulation system based on speed and vehicle speed. Implementation of the algorithm will be compiled using JavaScript programming language. This traffic flow program by using Cellular Automata is done in javascript that has been developed by Artem Volkhin. The program itself describes two-way traffic flow with path arrangement of each vehicle performed by random system (random, speed, slowdown, and path switching in each vehicle based on algorithm previously discussed) This program was formed using JavaScript initially Developed by blablabla, then considering the velocity and density factor, a relatively well-regarded traffic flow model is based on the graph of the relationship between velocity, density and current obtained based on observations on the model in the program.

Keywords: Mobile automata algorithm, simulation, density.

1. PENDAHULUAN

Di dunia ini, ada banyak sistem yang begitu kompleks secara kasat mata sangat sulit untuk kita buat modelnya dalam bentuk simulasi seperti proses penyebaran api dalam kebakaran hutan dan penyebaran air pada saat banjir, oleh sebab karena banyaknya faktor yang mempengaruhi objek utama dalam sistem yang ingin dimodelkan. Akan tetapi, pemodelan tersebut dapat kita lakukan dengan menggunakan algoritma Otomata seluler. Otomata selular sendiri pertama kali diteliti oleh Stanislaw Ulam dan John Von Neumann untuk pemodelan sistem biologi. Kemudian John Conway merancang algoritma sejenis yang disebut sebagai "Game of Life". Penelitian selanjutnya dilakukan oleh Stephen Wolfram digunakannya pada bidang sains serta meningkatkan pengembangan dan modifikasi pada variasi otomata selular. Akhirnya, Pemodelan otomata selular menjadi sangat berharga dikarenakan kesederhanaan spesifikasinya di salah satu sisi dan kompleksitas pada sisi lainnya.[7], [8] Otomata selular

adalah kumpulan dari sel-sel yang disusun dalam larik (*array*) satu dimensi, dua dimensi maupun tiga dimensi. Sebuah sel dalam otomata selular berperilaku seperti halnya state dalam *Finite State Automata* (Otomata State Hingga). Nilai-nilai dalam sebuah sel akan ditentukan sesuai kebutuhan dan desain algoritmanya, artinya untuk setiap model proses yang terjadi pastilah berbebeda. Namun, Pada umumnya jika yang dibutuhkan adalah state yang menyatakan daerah yang dapat dilintasi dan daerah yang tidak dapat dilintasi oleh sebuah kendaraan maka sebaiknya kondisi sel yang digunakan adalah sel dengan nilai biner yaitu 0 atau 1.[11] Salah satu contoh yang dapat menggunakan algoritma otomata seluler dengan kondisi tersebut adalah simulasi arus lalu lintas. Banyak hal yang terjadi di jalan raya seperti tersendatnya atau bahkan terhentinya lalu lintas yang disebabkan oleh banyaknya jumlah kendaraan yang melebihi kapasitas jalan, kecelakaan, dan segala perilaku kendaraan yang terjadi saat jumlah kendaraan pada jalan berubah. Jelas dalam hal ini yang menjadi fokus permasalahan adalah bagaimana perilaku kendaraan pada sebuah model arus lalu lintas seiring berjalannya waktu. Jika perilaku kendaraan ini dapat diketahui, tidak tertutup kemungkinan hal ini dapat memberikan sumbangsi dalam menyelesaikan suatu kemacetan pada sebuah jalan pada dunia nyata. Demikian penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan otomata seluler dalam mensimulasikan arus lalu lintas yang dapat menggambarkan dinamika yang terjadi pada sistem arus lalu lintas. Rumusah masalahnya adalah bagaimana menerapkan kerangka kerja algoritma otomata selular untuk simulasi arus lalu lintas yang merujuk pada hubungan kepadatan kendaraan, kecepatan dan arus kendaraan, Bagaimana menganalisa kerangka kerja algoritma otomata seluler terhadap kecepatan, kepadatan, dan arus kendaraan.

1.1 Penelitian Terkait

Penelitian terkait dengan penelitian ini adalah sebagai berikut:

Penelitian dengan judul *Models for Traffic Control* mengemukakan ide awal tentang otomata selular[2]. Penelitian dengan judul *Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI)* menyatakan bahwa otomata selular adalah sistem dinamik diskrit dengan konstruksi yang sederhana tetapi memiliki perilaku *self-organizing* yang kompleks[3]. Penelitian dengan judul *A class of cellular automata equivalent to deterministic particle systems* menghasilkan sebuah algoritma untuk mendeterminisasi pemetaan lokal dalam ruang berdasarkan koordinat partikel[4]. Penelitian dengan judul *Modeling self-organizing traffic lights with elementary cellular automata* membahas tentang simulasi lalu-lintas kendaraan menggunakan *Elementary Cellular Automata* (ECA)[5]. Penelitian [6] Penelitian ini membahas tentang pengembangan *Traffic Cellular Automata* (TCA) dari elaborasi otomata selular dengan bidang fisika dan mekanika statistic.

Penelitian [7] Penelitian ini membahas tentang pengembangan terakhir pada simulator lalu-lintas ITSUMO (*Intelligent Transportation System for Urban Mobility*). Penelitian [8] Penelitian ini menghasilkan sebuah perluasan otomata selular yang telah diusulkan untuk memodelkan lalu-lintas jalan yang lebih realistis dan lebih efisien. Penelitian [9] Penelitian ini membahas penerapan otomata selular untuk memodelkan kepadatan lalu-lintas kota. Penelitian [10] Penelitian ini membahas tentang pemanfaatan hasil kolaborasi algoritma otomata selular dan algoritma fuzzy untuk memodelkan lalu-lintas kendaraan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Arus Lalu Lintas

Arus lalu lintas terbentuk oleh individual pengemudi dan kendaraan, yang berinteraksi dengan cara yang unik antara satu dengan yang lain dan dengan elemen-elemen jalan serta lingkungannya. Karena persepsi dan kemampuan individu pengemudi mempunyai sifat yang berbeda, maka perilaku kendaraan di dalam arus lalu lintas tidak dapat diseragamkan. Arus lalu lintas akan mengalami perbedaan karakteristik akibat dari perbedaan perilaku pengemudi dikarenakan oleh karakteristiknya yang bervariasi baik berdasarkan lokasi maupun waktu. Arus lalu lintas dapat dikelompokkan menjadi dua bagian, yaitu: arus lalu lintas tidak terganggu dan arus lalu lintas terganggu. Arus lalu lintas tidak terganggu adalah arus lalu lintas yang hanya ditentukan oleh interaksi kendaraan dengan kendaraan lainnya dan interaksi kendaraan dengan jalan, seperti arus lalu lintas kendaraan di jalan tol. Sedangkan arus lalu lintas terganggu adalah arus lalu lintas yang ditentukan oleh alat atau cara dari luar arus lalu lintas misalnya lampu lalu lintas atau marka jalan. Interaksi kendaraan dengan kendaraan lainnya dan interaksi kendaraan dengan jalan mempunyai peranan kedua dalam menentukan arus lalu lintas terganggu.[8]

Dalam rangka untuk mengerti tentang keberagaman karakteristik arus lalu lintas, perlu didefinisikan parameter yang penting dan terukur. Arus lalu lintas dipengaruhi oleh banyak parameter, tetapi secara garis besar dalam tulisan ini terdapat tiga parameter arus lalu lintas, yaitu kecepatan, kepadatan, dan arus.

1. Kecepatan (*Velocity*)

Kecepatan adalah jarak tempuh per-satuan waktu, secara matematis ditulis:

$$v = \frac{s}{t} \quad (2.1)$$

dimana: v = kecepatan, s = jarak tempuh, dan t = waktu tempuh. Satuan dari kecepatan adalah km/jam atau m/s. Terdapat dua macam kecepatan yaitu kecepatan individual dan kecepatan rata-rata.

2. Kepadatan (*Densitas*)

Kepadatan adalah perbandingan antara jumlah kendaraan yang ada dalam suatu ruas jalan dengan panjang ruas jalan tersebut. Kepadatan dilambangkan dengan ρ dan secara matematis ditulis:

$$\rho = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (L_i + gap_i)} \quad (2.2)$$

dimana: n = banyak kendaraan, L_i = panjang kendaraan ke- i , gap_i = jarak antar kendaraan ke- i dan kendaraan di depannya (Maerivoet and Moore. 2008). Satuan dari kepadatan adalah kendaraan/km.

Jika diasumsikan panjang setiap kendaraan dan jarak antar kendaraan adalah sama, maka persamaan (2.2) menjadi:

$$\rho = \frac{1}{L + gap} \quad (2.3)$$

Kepadatan tinggi menunjukkan jarak antar kendaraan cukup dekat atau $gap \approx 0$, sebaliknya kepadatan rendah berarti jarak antar kendaraan cukup jauh.

3. Arus (*Flow*)

Arus adalah jumlah kendaraan yang melalui suatu jalan tiap interval waktu (Maerivoet and Moore. 2008). Karena ρ adalah jumlah kendaraan tiap panjang jalan pada suatu jalan tertentu, sedangkan jarak yang ditempuh adalah $v \times t$, maka jumlah kendaraan yang melewati jalan tersebut dalam waktu t adalah $\rho \times v \times t$. Jadi secara matematis arus dapat ditulis:

$$q = \rho \times v \quad (2.4)$$

Satuan dari arus adalah kendaraan/jam. Karena arus merupakan hasil perka lian kepadatan dan kecepatan, maka nilai arus akan sama dengan 0 bila $\rho = 0$ atau $v = 0$. Dapat juga dinyatakan bahwa q akan maksimum pada kombinasi optimum antara ρ dan v . Sebagai ilustrasi, tinjau keadaan berikut:

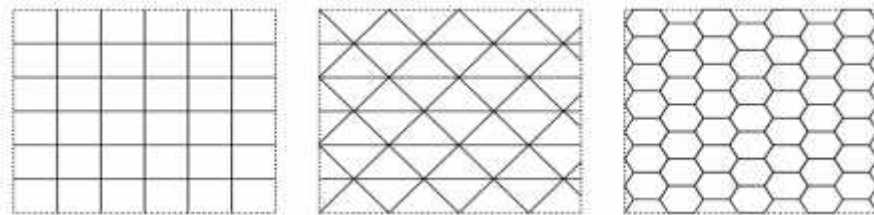
- Kemacetan arus lalu lintas terjadi pada saat dimana ρ sangat tinggi dan v sangat rendah, kombinasi ini menghasilkan q sangat rendah,
- Sebaliknya, q sangat tinggi jika ρ sangat rendah dan v sangat tinggi.

a. Otomata Selular

Otomata selular diadopsi dari teori otomata yaitu *Finite State Automata* (FSA). Otomata selular merepresentasikan sistem dinamik diskrit yang terdiri dari empat bagian:

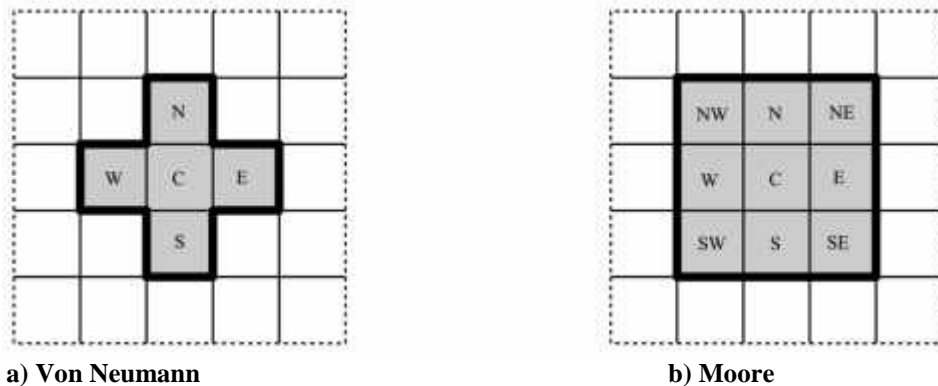
$$CA = (L, Q, N, u, C_0) \quad (1)$$

Dimana: L menyatakan *language* yang mewakili ruang pengamatan diskrit, Q menyatakan himpunan semua *state* yang mungkin, N menyatakan *Neighbourhood* atau hubungan ketetanggaan antara sel pusat dengan persekitarannya, u menyatakan aturan transisi state, dan C_0 menyatakan kondisi awal sel. Lingkungan diskrit menyatakan semesta komputasi otomata selular. Dalam hal ini otomata selular dibangun dari struktur sel-sel diskrit yang dapat berupa bentuk kotak-kotak, heksagonal ataupun topologi lainnya. Namun demikian tipe sel yang digunakan dalam sebuah studi model otomata selular harus sama dalam hal ukuran dan bentuknya, tetapi dapat menyimpan nilai yang berbeda-beda. Dari sisi dimensi jika struktur sel-selnya terdiri dari sebuah *array* satu dimensi maka disebut *Elementary Cellular Automata* (ECA). Selain itu untuk dimensi yang lebih tinggi sel-sel otomata selular akan disusun dalam struktur yang disebut *grid*. [8]



Gambar 1. Contoh topologi grid otomata selular dua dimensi dari kiri: kotak, segitiga isometric dan heksagonal.

Sebuah kotak dalam otomata selular menyatakan sebuah sel. Himpunan berhingga dari sel-sel tersebut dilambangkan dengan Σ . Hubungan untuk setiap sel di definisikan sebuah ketetanggaan (*neighbourhood*) yang secara lokal menentukan evolusi sel. Dalam ECA yang menjadi *neighbourhood*-nya adalah sel-sel yang berada di depan dan dibelakang sel tinjauan yang berhubungan langsung dengan sel tinjauan berikut. Untuk struktur otomata dua dimensi yang menjadi *neighbourhood*-nya adalah sel-sel dalam radius satu ($r = 1$) disekitar sel tinjauan. Terdapat dua teknik yang paling sering digunakan untuk struktur ketetanggaan di dimensi dua yaitu model *Von Neumann* merupakan model yang mengamati sel-sel dalam 4 arah (*north, east, south* dan *west*) dan model *Moore* merupakan model yang mengamati sel-sel dalam 8 arah (*north, northeast, east, southeast, south, southwest, west* dan *northwest*).[8]



Gambar 2. Model ketetanggaan dalam dimensi dua

Aturan transisi atau sering juga disebut fungsi transisi adalah aturan yang menentukan bagaimana status suatu sel berubah berdasarkan status sel tersebut dan status sel tetangganya sekarang. Fungsi transisi diterapkan terhadap semua sel secara serentak (paralel). Pada umumnya fungsi transisi yang sama diterapkan kepada semua sel. Otomata selular berevolusi dalam domain ruang dan waktu sebagai aturan yang diterapkan pada keseluruhan sel secara paralel. Jika aturan transisi yang digunakan tidak mengandung komponen stokastik maka disebut sebagai otomata selular deterministik, sebaliknya jika mengandung komponen stokastik disebut otomata selular probabilistik (Maerivoet and Moore. 2008).

b. Roadmap Penelitian

Penelitian terkait dengan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. John von Neumann. Pada tahun 1966 melakukan penelitian dengan judul: **The Theory of Self-Reproducing Automata**. Penelitian ini mengemukakan ide awal tentang otomata selular.[9]
2. Stephen Wolfram. Pada tahun 1984 melakukan penelitian dengan judul: **Universality And Complexity In Cellular Automata**. Penelitian ini menyatakan bahwa otomata selular adalah sistem dinamik diskrit dengan konstruksi yang sederhana tetapi memiliki perilaku *self-organizing* yang kompleks.[12], [13]
3. Henryk Fuk's. Pada tahun 2002 melakukan penelitian dengan judul: **A class of cellular automata equivalent to deterministic particle systems**. Penelitian ini menghasilkan sebuah algoritma untuk mendeterminisasi pemetaan lokal dalam ruang berdasarkan koordinat partikel.[4]
4. Carlos Gershenson. Pada tahun 2009 melakukan penelitian dengan judul: **Modeling Self-Organizing Traffic Lights With Elementary Cellular Automata**. Penelitian ini membahas tentang simulasi lalu-lintas kendaraan menggunakan *Elementary Cellular Automata* (ECA).[5]
5. Sven Maerivoet. pada tahun 2008 melakukan penelitian dengan judul: **Cellular Automata Models of Road Traffic**. Penelitian ini membahas tentang pengembangan *Traffic Cellular Automata* (TCA) dari elaborasi otomata selular dengan bidang fisika dan mekanika statistic.[8]
6. Ana C. Bazzan. Pada tahun 2011 melakukan penelitian dengan judul: **Extending Traffic Simulation Based On Cellular Automata: From Particles To Autonomous Agents**. Penelitian ini membahas tentang pengembangan terakhir pada simulator lalu-lintas ITSUMO (*Intelligent Transportation System for Urban Mobility*).[1]
7. Pavol Kor ek. Pada tahun 2011 melakukan penelitian dengan judul: **A Scalable Cellular Automata Based Microscopic Traffic Simulation**. Penelitian ini menghasilkan sebuah perluasan otomata selular yang telah diusulkan untuk memodelkan lalu-lintas jalan yang lebih realistis dan lebih efisien.[7]

8. David A. Rosenblueth. pada tahun 2011 melakukan penelitian dengan judul: **A Model of City Traffic Based on Elementary Cellular Automata**. Penelitian ini membahas penerapan otomata selular untuk memodelkan kepadatan lalu-lintas kota.[11]
9. Bartłomiej Płaczek. Pada tahun 2013 melakukan penelitian dengan judul: **A Traffic Model Based On Fuzzy Cellular Automata**. Penelitian ini membahas tentang pemanfaatan hasil kolaborasi algoritma otomata selular dan algoritma fuzzy untuk memodelkan lalu-lintas kendaraan.[10]

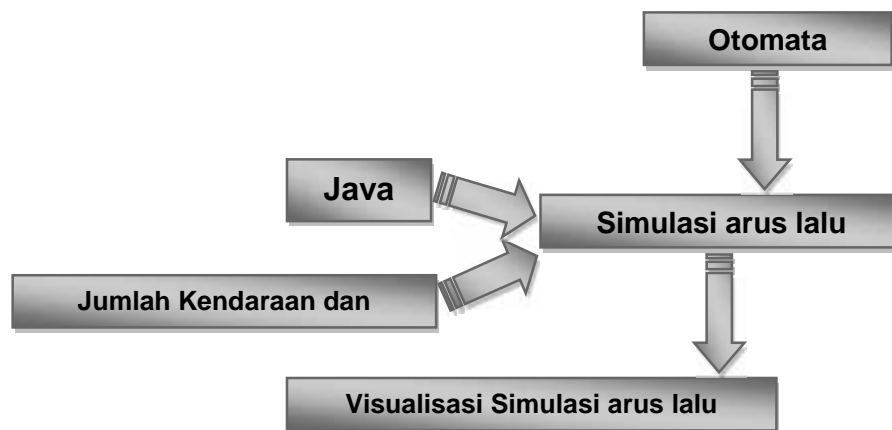
Dalam penelitian ini akan dikembangkan perluasan model otomata selular untuk simulasi arus lalu lintas. Struktur sel-sel yang digunakan akan dibangun dalam sebuah grid sel dua dimensi menggunakan *neighbourhood von Neumann*.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Rancangan Sistem

Adapun sistem simulasi arus lalu lintas yang akan dibangun diharapkan mampu memenuhi persyaratan sistem sebagai berikut:

1. Sistem akan dibangun menggunakan bahasa pemrograman JavaScript.
2. Sistem simulasi arus lalu lintas ini akan mampu mensimulasikan dinamika yang terjadi di jalan raya yang disebabkan meningkatnya jumlah kendaraan.



Gambar 3. Rancangan sistem

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Penelitian

1. Model *Cellular Automata*

Model arus lalu lintas dengan *Cellular Automata* dapat dituliskan dalam 5-tupel (L, Q, N, δ, C_0) , dimana:

- L = Empat baris sel segi empat dua dimensi,
- Q = $\{0, 1, 2, 3, \dots, v_{max}, 100\}$, dimana:
 $100 = \text{kosong}$, $\{0, 1, 2, 3, \dots, v_{max}\} = \text{kecepatan kendaraan}$,
- N = $\{\{sel\ i, j \mid i = \text{kiri, kanan dan } j = q - v_{max}, \dots, q - 1, q + 1, \dots, q + v_{max}\}, \{sel\ p, j \mid j = q + 1, \dots, q + v_{max}\}, v_1, v_3, v_4, v_4\}$, dimana:
 $\{p, q\} = \text{indeks sel } v\ p, q$, $kiri = \text{indeks sebelah kiri sel } v\ p, q$, dan
 $kanan = \text{indeks sebelah kanan sel } v\ p, q$.
- δ = Dilakukan dalam empat langkah. Setelah satu langkah selesai dilaksanakan, baru kemudian langkah berikutnya dapat dilaksanakan.

2. Mekanisme Transisi Sel atau Perubahan Status Sel

Dari penjelasan tentang karakteristik arus lalu lintas diketahui bahwa jalan lurus satu arah pada arus lalu lintas yang akan dimodelkan dapat dipandang sebagai jalan yang memiliki empat lajur semu, karena jalan tersebut dapat dilalui maksimal oleh empat kendaraan roda dua secara bersamaan. Sehingga jalan pada arus lalu lintas yang akan dimodelkan dapat direpresentasikan sebagai sel *Cellular Automata* yang memiliki geometri segi empat dua dimensi dalam empat baris

sel. Setiap sel *Cellular Automata* dapat terisi sebuah kendaraan roda dua ataupun kosong, sedangkan untuk kendaraan roda empat menempati dua buah sel sekaligus tepat berdampingan pada baris yang berbeda. Pada jalan sebenarnya setiap sel mempunyai panjang 5 meter. Misalkan sel *Cellular Automata* mempunyai panjang 100 sel, maka pada kenyataannya sel tersebut merepresentasikan jalan yang mempunyai panjang 500 meter atau sama dengan ½ kilometer.

Status setiap sel berupa bilangan bulat tak negatif dari himpunan

$$Q = 0, 1, 2, 3, 4, \dots, v_{max}, 100$$

yang merupakan representasi dari kecepatan kendaraan, dengan v_{max} adalah batas atas kecepatan maksimal kendaraan dalam model. Status sel juga berarti jarak suatu sel akan dipindah ke depan untuk *time-step* selanjutnya. Status sel dilambangkan sebagai sebuah persegi panjang yang memiliki warna berbeda dengan warna jalan (abu-abu) dimana dalam penelitian ini hanya berupa kendaraan beroda empat. Untuk sel yang tidak terisi kendaraan memiliki status 100 yang merupakan persegi yang berwarna abu-abu (jalan).

Status sel pada model bila dikonversi menjadi kecepatan kendaraan sebenarnya adalah sama dengan 5 m/s. Hal ini terjadi karena setiap sel mempunyai panjang 5 m pada jalan sebenarnya dan satuan waktu yang digunakan adalah sekon. Jika dikonversikan lagi dalam satuan km/jam, maka:

$$5 \text{ m/s} = 5 \cdot \frac{3600}{1000} \text{ km} \cdot \text{jam} = 18 \text{ km} \cdot \text{jam}$$

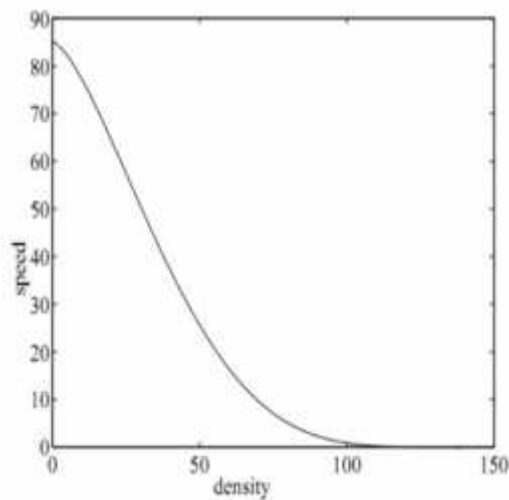
Diketahui bahwa setidaknya terdapat dua karakteristik arus lalu lintas yang akan dimodelkan yaitu perpindahan lajur kendaraan untuk mendahului kendaraan lainnya dan akselerasi/deselerasi kecepatan kendaraan. Kedua karakteristik tersebut dipengaruhi oleh faktor keadaan jalan dan faktor pengemudi. Misalkan v adalah status sel yang terisi kendaraan dan selanjutnya sel tersebut disebut dengan sel v . Faktor keadaan jalan untuk sel v dimodelkan dengan adanya $gap, v_1, gap_1, v_2, gap_2, v_3, gap_3, v_4$ dan gap_4 . Dimana gap adalah jumlah sel kosong secara berurutan tepat di depan sel v , gap mewakili jarak jalan kosong di depan kendaraan. Sel v_1 adalah sel yang berada tepat di sebelah kanan sel v , dan gap_1 adalah jumlah sel kosong secara berurutan tepat di depan sel v_1 . Sel v_2 adalah sel yang berstatus terisi kendaraan yang berada tepat dibelakang sel v_1 , dan gap_2 adalah jumlah sel kosong secara berurutan diantara sel v_1 dan sel v_2 . Sedangkan v_3, gap_3, v_4 , dan gap_4 berturut-turut adalah sama dengan v_1, gap_1, v_2 , dan gap_2 tetapi terletak pada barisan sel yang berada tepat di sebelah kiri sel v . Faktor kedua yang dapat mempengaruhi pergerakan kendaraan roda dua adalah faktor pengemudi kendaraan yang dimodelkan dengan adanya probabilitas pengemudi kendaraan menurunkan kecepatannya (dilambangkan dengan $p.slow$), dan probabilitas pengemudi kendaraan mendahului kendaraan di depannya (dilambangkan dengan $p.move$).

Suatu kendaraan akan bergerak lebih cepat jika jarak dengan kendaraan di depannya cukup jauh dan memungkinkan kendaraan tersebut menambah kecepatannya ($v < gap$). Namun jika kendaraan di depannya terlalu dekat ($v \geq gap$), kendaraan tersebut dapat berpindah jalur jika di sebelahnya kosong, baik di depan maupun di belakang. Jika lajur di sebelahnya kosong, maka kendaraan tersebut harus menurunkan kecepatannya hingga sama dengan gap .

Program arus lalu lintas ini dengan menggunakan *Cellular Automata* dikerjakan dalam javascript yang telah dikembangkan oleh Artem Volkhin. Program ini sendiri menggambarkan tentang arus lalu lintas dua arah dengan pengaturan jalur masing-masing kendaraan dilakukan sistem acak (*random*). Kecepatan, perlambatan, dan pindah jalur pada masing-masing kendaraan berdasarkan algoritma yang telah dibahas sebelumnya. Program ini dibentuk dengan menggunakan JavaScript yang awalnya dikembangkan oleh blablabla. Kemudian, dengan mempertimbangkan faktor kecepatan dan kepadatan, diperoleh model arus lalu lintas yang dirasa relatif baik. Hal ini didasarkan pada grafik hubungan antara kecepatan, kepadatan dan arus yang diperoleh berdasarkan hasil pengamatan pada model yang ada pada program. Berdasarkan hasil pengamatan diperoleh hubungan antara kecepatan dan kepadatan dan hubungan antara kepadatan dan arus. Hal ini yang akan menjadi parameter penilaian model yang dibuat oleh program dengan cara membandingkan hasil ini dengan teori yang menjelaskan hubungan antara kecepatan-kepadatan dan kepadatan-arus.

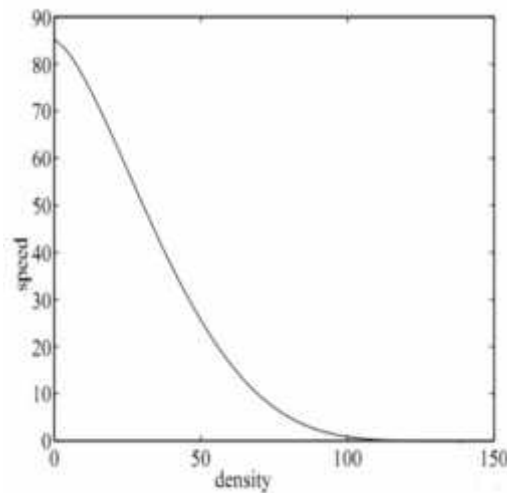
1. Hubungan Kecepatan dan Kepadatan

Berdasarkan teori (Bellemans *et al.* 2002), dijelaskan bahwa hubungan antara kepadatan dan kecepatan dapat digambarkan dalam bentuk grafik sebagai berikut.



Gambar 4. Grafik relasi kecepatan dan kepadatan Bellemans

Jika kita bandingkan dengan grafik yang diperoleh dari model yang dibuat maka akan tampak sebagai berikut.

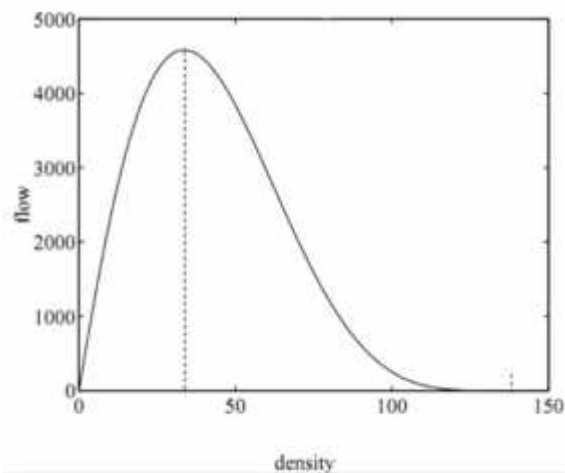


Gambar 5. Perbandingan Grafik Hasil dan Grafik Teori

Dari Gambar 5. terlihat bahwa Hubungan kecepatan dan kepadatan dari model yang dibuat saling berbanding terbalik dan hal tersebut sesuai dengan teori yang ada. Berdasarkan teori yang ada, dapat dijelaskan bahwa ketika jumlah kendaraan di jalan sedikit, maka jalur menjadi rengang sehingga setiap kendaraan dapat bebas menaikkan kecepatan kendaraan hingga mencapai kecepatan maksimal tanpa takut terganggu keberadaan kendaraan lainnya. Dalam kasus tersebut akan tercapai kecepatan yang tinggi. Sebaliknya, pada saat jalan banyak dipadati kendaraan, maka pada saat tersebut setiap kendaraan dipaksa untuk menurunkan kecepatannya untuk menghindari kontak dengan kendaraan yang lain akibatnya kecepatan rata-rata dari setiap kendaraan menurun. Merujuk pada hasil yang didapatkan, penurunan nilai dari kecepatan kendaraan terhadap peningkatan kepadatan kendaraan masih belum semulus dengan grafik pada teori namun sangat mendekati dari segi bentuk. Hal ini menjadi indikator bahwa model masih perlu untuk diperbaiki terutama pada saat prosedur penurunan kecepatan sebagai akibat dari meningkatnya kepadatan lalu lintas.

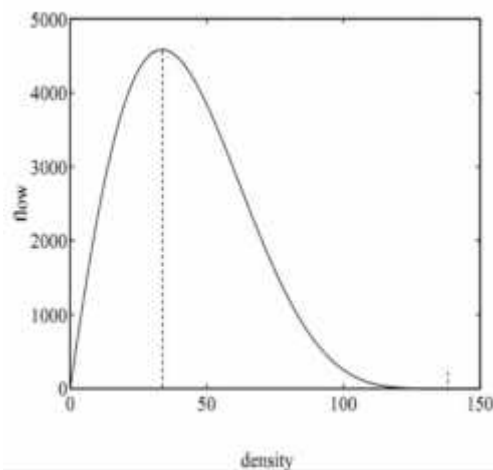
2. Hubungan Arus dan Kepadatan

Jika merujuk pada teori yang sama maka hubungan Arus dan Kepadatan pada model arus lalu lintas dengan otomatis seluler adalah sebagai berikut.[2]



Gambar 6. Grafik relasi arus dan kepadatan Bellemans.

Berikut adalah perbandingan antara grafik hubungan Arus dan Kepadatan yang diperoleh dari model dan grafi pada teori.



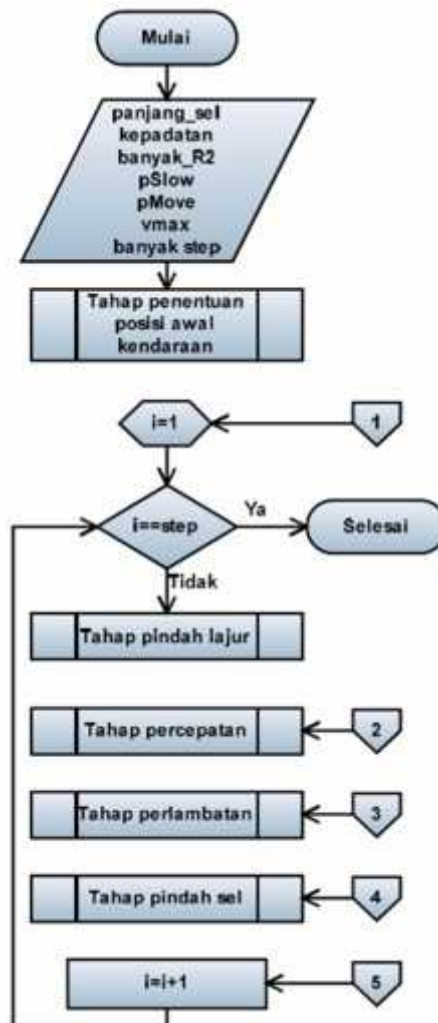
Gambar 7. Grafik relasi arus dan kepadatan Bellemans.

Dari grafik diatas, diperoleh relasi arus – kepadatan yang grafiknya membentuk karakteristik yang sama, yaitu pada saat awal kenaikan kepadatan kendaraan juga meningkatkan jumlah arus kendaraan hingga pada titik tertentu atau titik maksimal setelah itu secara perlahan-lahan arus kendaraan akan berkurang seiring bertambahnya kepadatan kendaraan hingga arus menjadi nol. Hal ini dapat diartikan bahwa jika pada suatu jalan jumlah kendaraan terus meningkat maka pada awalnya arus kendaraan akan bertambah namun pada saat tertentu arus akan berkurang dan jika kepadatan kendaraan masih terus bertambah maka akan terjadi kemacetan pada lalu lintas tersebut. Hal ini terjadi karena pada saat kepadatan kendaraan melebihi titik kritisnya maka kendaraan dengan kecepatan tinggi harus menurunkan kecepatannya pada saat kendaraan di depannya menjadi lebih pelan dan cukup dekat. Kemacetan yang mulai ditimbulkan oleh pengemudi yang menurunkan kecepatannya pada tahap perlambatan. Kecepatan akan semakin menurun pada saat kepadatan terus meningkat karena kemacetan yang terjadi terus bertambah dan sulit terurai hingga akhirnya terjadi kemacetan total pada saat kepadatan maksimal yang mengakibatkan kecepatan nol.

3.2 Implementasi Algoritma Otomata Selular

Sesuai dengan fungsi transisi yang diperoleh pada bagian sebelumnya, terdapat empat langkah untuk memperbarui status sebuah sel. Sehingga algoritma model arus lalu lintas dengan *Cellular Automata* secara garis besar terdiri dari empat langkah utama yaitu tahap pindah jalur, tahap percepatan, tahap perlambatan, dan tahap pindah sel. Keempat tahapan tersebut diawali dengan tahap penentuan

posisi awal kendaraan. Algoritma model arus lalu lintas dengan *Cellular Automata* disajikan pada Gambar 8. dalam bentuk *flowchart*.



Gambar 8: Diagram alir model arus lalu lintas dengan *Cellular Automata*.

Pada *flowchart* tersebut terlihat bahwa algoritma model arus lalu lintas dengan *Cellular Automata* terdiri dari lima sub algoritma, yaitu sub algoritma tahap penentuan posisi awal kendaraan, sub algoritma tahap pindah lajur, sub algoritma tahap percepatan, sub algoritma tahap perlambatan, dan sub algoritma tahap pindah sel. *Flowchart* tahap penentuan posisi awal kendaraan disajikan pada Gambar 4.3. Pada Gambar 4.4 dan 4.5 merupakan *flowchart* dari tahap pindah lajur. Selanjutnya, Gambar 4.6 merupakan *flowchart* dari tahap percepatan, dan Gambar 4.7 adalah *flowchart* dari tahap perlambatan. Sedangkan Gambar 4.8 merupakan *flowchart* dari tahap pindah sel.

4. KESIMPULAN

Dari hasil dan pembahasan dapat ditarik kesimpulan bahwa *Cellular Automata* dapat digunakan untuk memodelkan arus lalu lintas yang berisi kendaraan roda empat. Relasi yang terjadi antar parameter arus lalu lintas yang diperoleh dari hasil simulasi adalah sebagai berikut:

1. Relasi arus – kepadatan adalah parabolik dimana grafik relasi keduanya hampir menyerupai segitiga karena relasi sebelum dan setelah arus maksimal terjadi adalah hampir linier. Semakin tinggi kepadatan, maka arus akan semakin tinggi sampai nilai kepadatan tertentu dimana terjadi arus maksimum, setelah itu semakin padat arus lalu lintas yang terjadi, maka arus akan semakin kecil.
2. Relasi kecepatan – kepadatan adalah eksponensial, kecepatan akan terus menurun seiring dengan meningkatnya kepadatan. *Free flow* terjadi dari kepadatan nol hingga kepadatan tertentu. Setelah itu

nilai kecepatan akan menurun drastis, tetapi pada akhirnya relasi kecepatan dan kepadatan hampir linier karena kemacetan yang terjadi semakin lama terurai.

3. Relasi kecepatan – arus adalah parabolik, hal tersebut menunjukkan bahwa semakin besar kecepatan akan menyebabkan arus terus bergerak naik dan kemudian arus akan terus bergerak turun setelah kecepatan tertentu yang menjadi puncak parabola.
4. Relasi varians kecepatan – kepadatan mirip dengan diagram fundamental relasi arus – kepadatan yaitu berupa parabolik tetapi memiliki ekor yang lebih panjang di bagian kanannya. Hal ini terjadi karena semakin padat arus lalu lintas, maka varians dari kecepatan semakin mengecil. Dimana sebelumnya varians kecepatan terus membesar seiring dengan penambahan kepadatan dan berhenti pada saat kepadatan tertentu yang kemudian varians kecepatan terus menurun.

5. SARAN

Masih terdapat banyak permasalahan bagi pembaca yang ingin mengembangkan pemodelan arus lalu lintas menggunakan *Cellular Automata* ini. Permasalahan tersebut antara lain adalah pemodelan arus lalu lintas dengan menggunakan algoritma yang lebih efisien, pembuatan program simulasi menggunakan software lain sehingga pemvisualisasiannya lebih baik dan menarik, serta pemodelan jenis arus lalu lintas yang memiliki karakteristik berbeda. Beberapa jenis arus lalu lintas lainnya yang dimaksud adalah arus lalu lintas yang terdapat lampu lalu lintas, marka lalu lintas ataupun rambu lalu lintas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bazzan, Ana L, C. et al. 2011. **Extending Traffic Simulation Based On Cellular Automata: From Particles To Autonomous Agents**. Proceedings 25th European Conference on Modelling and Simulation ©ECMS.
- [2] Bellemans, T., Schutter, B. D., & Moor, B. D. 2002. **Models for Traffic Control**. *Journal A*. Vol. 43(3–4): 13–22.
- [3] Departemen Pekerjaan Umum Ditjen Bina Marga. 1997. **Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI)**. Indonesia: Departemen Pekerjaan Umum
- [4] Fuk's, Henryk. 2002. **A class of cellular automata equivalent to deterministic particle systems**. Hydrodynamic limits and related topics", S. Feng, A. T. Lawniczak and S. R. S. Varadhan (Eds.), AMS, Providence.
- [5] Gershenson, Carlos. 2009. **Modeling self-organizing traffic lights with elementary cellular automata**. arXiv:0907.1925v1.
- [6] Huang, Kerson. 1987. **Statistical Mechanics**. Massachusetts Institute of Technology.
- [7] Pavol Kor ek, Lukáš Sekanina and Otto Fu ík. 2011. **A Scalable Cellular Automata Based Microscopic Traffic Simulation**. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Baden-Baden. Germany.
- [8] Maerivoet, Sven and Moor, Bart De. 2008. **Cellular Automata Models of Road Traffic**. Physics Reports.
- [9] Neumann, John Von. 1966. **Theory of Self-Reproducing Automata**. University of Illinois Press. London.
- [10] Placzek, Bartłomiej. 2013. **A traffic model based on fuzzy cellular automata**. *Journal of Cellular Automata*, vol. 8, no. 3–4, pp. 261–282 (2013). Old City Publishing, Inc.
- [11] Rosenblueth, David A and Gershenson, Carlos. 2011. **A Model of City Traffic Based on Elementary Cellular Automata**. *Complex Systems*, 19©2011ComplexSystemsPublications, Inc.
- [11] Sewall, Jason. et al. 2011. **Interactive Hybrid Simulation of Large-Scale Traffic**. *ACM TOG* 30(6).
- [12] S´anchez, Javier. et al. 2004. **Genetic Algorithms and Cellular Automata for Traffic Light Cycles Optimization**. *Evolutionary Computation (CEC2004)*.
- [12] Wolfram, Stephen. 1984. **Universality and Complexity in Cellular Automata**. The Institute for Advanced Study, Princeton. USA.
- [13] Wolfram, Stephen. 1984. **Computation Theory of Cellular Automata**. The Institute for Advanced Study, Princeton. USA.