

## STUDI TENTANG PEMODELAN ARUS LALU LINTAS

Rina Mardiaty

Jurusan Teknik Elektro, UIN Sunan Gunung Djati Bandung

Bandung, Indonesia

r\_mardiaty@uinsgd.ac.id

### *Abstrak*

Permasalahan transportasi saat ini masih menjadi permasalahan utama pada setiap negara, khususnya negara berkembang. Masalah transportasi dihadapkan pada fenomena kemacetan, banyaknya polusi yang dihasilkan oleh kendaraan, sampai kepada masih tingginya tingkat kecelakaan lalu lintas tiap tahunnya. Hal ini, bukan saja disebabkan oleh perilaku pengemudi jalan raya saja, akan tetapi perencanaan arus lalu lintas pun menjadi salah satu faktor yang mempengaruhinya. Salah satu alternatif penyelesaian untuk dapat mengatur dan memajemen arus lalu lintas adalah dengan memodelkan arus lalu lintas serta mensimulasikannya dalam komputer sehingga dapat diperoleh prediksi-prediksi yang akan terjadi pada simulasi tersebut. Studi literatur mengenai pemodelan dan simulasi arus lalu lintas terus berkembang sejak setengah abad yang lalu dalam upaya memperoleh sebuah pemodelan yang akurat dan mewakili fenomena yang terjadi sebenarnya. Pemodelan arus lalu lintas berbasis komputer dapat dibagi menjadi tiga skala utama, yaitu: mikroskopik, mesoskopik dan makroskopik. Pada skala mikroskopik, pemodelan arus lalu lintas digambarkan sedetail mungkin yang mencakup perilaku setiap kendaraan dan interaksinya. Pada paper ini dilakukan survey terhadap penelitian terdahulu yang membahas mengenai pemodelan arus lalu lintas pada skala mikroskopik. Pada bagian pertama akan dijelaskan gambaran dan pemahaman mengenai pemodelan arus lalu lintas, pemahaman mengenai model mikroskopik arus dan beberapa penelitian mengenai model yang sudah dikembangkan untuk simulasi mikroskopik beberapa tahun terakhir. Selanjutnya, dilakukan pembahasan mengenai pemodelan arus mikroskopik dihubungkan dengan permasalahan transportasi yang ada di Indonesia. Pada paper ini juga memberikan kemungkinan pengembangan penelitian lebih lanjut untuk model mikroskopik lalu lintas.

**Kata Kunci:** model mikroskopik, model arus lalu lintas.

### **I. Pendahuluan**

Seiring dengan meningkatnya volume kendaraan saat ini, masalah transportasi masih menjadi masalah utama dalam sebuah negara khususnya negara berkembang. Masalah transportasi ini

berdampak ke banyak sektor, dari kemacetan sampai ke masalah polusi yang dihasilkan. Masalah-masalah ini menghasilkan dampak yang bermacam-macam diantaranya adalah sebagai berikut:

1. tidak dapat memprediksi waktu tempuh yang akurat ke suatu tempat dikarenakan kondisi lalu lintas dengan tingkat kemacetan yang bervariasi;
2. pemborosan bahan bakar;
3. produktivitas manusia menurun;
4. membuat pengendara atau pengguna jalan raya menjadi stress;
5. menimbulkan kondisi yang bahaya [Yang 2010].

Selain dari itu, permasalahan yang terpenting adalah menyangkut pada jiwa manusia dimana tingkat kecelakaan lalu lintas harus diminimalisasi. Penyebab permasalahan ini bukan hanya dikarenakan oleh perilaku pengemudi atau pengguna jalannya saja, akan tetapi perencanaan laju lalu lintas pun menjadi salah satu faktor yang mempengaruhinya [Bellomo 2011]. Oleh karena itu, sebuah pemodelan lalu lintas menjadi salah satu elemen yang penting dalam upaya menyelesaikan permasalahan lalu lintas.

Teori mengenai pemodelan arus lalu lintas sudah ada sejak setengah abad yang lalu, dimana teori-teori ini memiliki tujuan: (1) membuat model abstraksi arus lalu lintas dengan sederhana dan efisien dan (2) membuat *framework* kesatuan yang dapat memodelkan arus lalu lintas kendaraan yang saling berhubungan satu sama lain [Ni 2009]. Seiring dalam upaya pengembangan pemodelan lalu lintas, literatur mengenai pemodelan arus lalu lintas mulai banyak bermunculan. Tetapi, sampai

saat ini para peneliti dan ahli pemodelan matematis setuju bahwa pemodelan yang dihasilkan belum memberikan hasil yang optimal. Hal ini salah satunya dikarenakan oleh situasi dan kondisi setiap arus lalu lintas yang berbeda-beda tingkat kompleksitasnya.

Pemodelan arus lalu lintas merupakan area yang menarik untuk diteliti. Berdasarkan literatur yang sudah ada, dapat disimpulkan bahwa pemodelan arus lalu lintas ini menjadi sangat penting dikarenakan beberapa hal berikut.

1. Pemodelan ini menjadi penting dalam proses analisa transportasi didasarkan pada prediksi-prediksi yang dihasilkan oleh model.
2. Pemodelan arus lalu lintas pun memiliki manfaat dalam memberikan informasi yang menunjang proses manajemen arus yang optimal tanpa harus menghabiskan biaya yang cukup besar.
3. Pemodelan arus lalu lintas akan selalu berkembang dikarenakan parameter pemodelan yang digunakan semakin kompleks sehingga diperlukan sebuah upaya guna mendapatkan pemodelan yang diharapkan sesuai dengan fenomena yang sebenarnya.
4. Pemodelan ini bisa menunjang teknologi masa depan yaitu *Intelligent Transportation System (ITS) for safety driving*, dimana kendaraan masa depan yang akan berkembang adalah *intelligent car* atau mobil cerdas.

Miller [Miller 2011] dalam bukunya mengatakan bahwa penelitian pada pemodelan lalu lintas ini membutuhkan lintas ilmu pengetahuan, seperti Teknik, Tata Kota, Ilmu Komputer, dan Matematika. Sehingga, penelitian pada area transportasi ini sangat luas dan sangat bervariasi. Berdasarkan pemodelan berbasis komputer, pemodelan arus lalu lintas salah satunya dapat dibedakan berdasarkan tingkat kedetailannya menjadi tiga skala utama yaitu mikroskopik, mesoskopik dan makroskopik.

Model mikroskopik berusaha memodelkan arus lalu lintas pada level kedetailan tingkat tinggi. Hal ini disebabkan karena pada skala mikroskopik, perilaku dan interaksi antar kendaraan dimodelkan lebih detail. Oleh karena itu, para peneliti sepakat bahwa model simulasi lalu lintas menggunakan pendekatan mikroskopik lebih terlihat realistis menampilkan fenomena situasi yang sebenarnya dibandingkan dengan skala mesoskopik dan makroskopik [Manley 2009].

Alur penjelasan pada makalah ini adalah sebagai berikut: bab dua akan membahas dan memberikan gambaran tentang pemodelan arus lalu lintas secara umum, serta dibahas secara ringkas tentang pemodelan berdasarkan tiga skala utama; pada bab tiga akan dijelaskan secara detil mengenai pemodelan mikroskopik; lalu pada bab empat akan membahas beberapa model mikroskopik yang dikembangkan akhir-akhir ini, dan pada bab terakhir akan dilakukan pembahasan mengenai

pemodelan mikroskopik lalu lintas dihubungkan dengan permasalahan yang ada di Indonesia dan diakhiri dengan kesimpulan yang berisi mengenai isu-isu penelitian yang mungkin bisa dikembangkan dari pemodelan mikroskopik ini.

## II. Pemodelan Arus Lalu Lintas

Saat ini, arus lalu lintas dan kemacetan merupakan dua hal yang tidak dapat dipisahkan dan masih menjadi topik permasalahan yang masih dicari solusi penyelesaiannya oleh para peneliti. Para ahli pemodelan dan simulasi pun hingga saat ini masih terus menggali ilmu pengetahuan serta melakukan pengembangan agar mampu memperoleh model arus lalu lintas yang representatif dan dapat memberikan manfaat yang lebih maksimal bagi manajemen lalu lintas.

Pemodelan arus lalu lintas dapat dibedakan berdasarkan beberapa kriteria berikut [Hoogendoorn and Bovy 2009].

1. Jenis variabel bebas yang digunakan (kontinyu, diskrit, semi-diskrit).
2. Tingkat kedetailan model (mikroskopik, mesoskopik, makroskopik).
3. Pengimplementasian proses (deterministik, stokastik).
4. Penerapannya (analitik, simulasi).
5. Ruang lingkup aplikasi.

Pada paper ini akan dipaparkan penjelasan pemodelan arus berdasarkan tingkat kedetailannya

saja, yaitu mikroskopik, mesoskopik dan makroskopik.

Pemodelan arus lalu lintas secara matematis akan memerlukan parameter atau variabel-variabel yang akan digunakan. Variabel yang akan digunakan akan terdiri dari variabel bebas (yang tidak tergantung dengan variabel lain) dan variabel terikat (yang tergantung dengan variabel lain). Secara umum pada pemodelan arus menggunakan variabel bebas terdiri dari variable waktu dan ruang, sedangkan untuk variabel terikat akan terdiri dari kepadatan dan kecepatan [Bellomo and Dogbe 2011]. Bellomo pada papernya menggambarkan variabel-variabel pemodelan arus lalu lintas pada skala mikroskopik, mesoskopik dan makroskopik pada tabel-tabel berikut ini [Bellomo and Dogbe 2011].

Table I. Variabel Umum pada Pemodelan Arus

Variabel Bebas	
$t$	variable waktu yang diperoleh dari merujuk ke <i>critical time</i> $T_c$ . $T_c = \frac{l}{V_M}$
$x$	variabel ruang. $x = \frac{\text{real space}}{l}$
Variabel Terikat	
$n_M$	kepadatan maksimum <i>bumper-to-bumper traffic jam</i> .
$V_M$	kecepatan maksimum rata-rata yang dapat dicapai oleh kendaraan pada saat <i>free flow conditions</i> .

Table II. Variabel pada Skala Mikroskopik dan Makroskopik

Mikroskopik	Makroskopik
Posisi setiap kendaraan ke- $i$ pada	Pada dasarnya, nilai-nilai variabel

saat $t$ : $x_i = x_i(t) \quad x_i \in [0,1]$	pada makroskopik dapat di peroleh dari <i>domain space</i> tertentu pada selang waktu tertentu.
Kecepatannya $v_i = v_i(t) \quad v_i \in [0,1 + \mu]$	Bisa diperoleh kepadatan ( <i>density</i> ) $\rho$ dengan jumlah <i>vehicle</i> $n(t;x)$ pada waktu $t$ pada <i>track</i> $[x - \Delta, x + \Delta]$ : $\rho(t;x) \cong \frac{1}{2\Delta} \frac{n(t;x)}{n_M}$
Untuk <i>multilane</i> R jalur,tinggal ditambah superscript $r$ , $x_i^r$ dan $v_i^r$	<i>Mass (mean) velocity</i> : $\xi(t;x) \cong \frac{1}{\rho(t;x)} \sum_{i=1}^{n(t;x)} v_i(t;x)$
	<i>Flow (q)</i> bisa dicari menggunakan: $q = q(t,x) = \rho(t,x) \xi(t;x)$

Table III. Variabel pada Skala Mesoskopik

<i>Kinetic Theory</i>
Pada teori kinetik ini, setiap <i>lane</i> digambarkan berdasarkan distribusi statistik dari posisi dan kecepatan setiap kendaraan.
Distribusinya: $f = f(t, x, v): R_+ \times [0,1] \times [0,1] \rightarrow R_+$ Dimana $f(t, x, v) dx dv$ adalah jumlah kendaraan pada saat $t$ pada fase $[x, x + dx] \times [v, v + dv]$
<i>Density</i> : $\rho(t, x) = \int_0^{1+\mu} f(t, x, v) dv$ Total jumlah <i>vehicle</i> saat $t$ : $N(t) = \int_0^1 \int_0^{1+\mu} f(t, x, v) dv dx$
<i>Mean (mass) velocity</i> : $\xi(t;x) = \frac{q(t,x)}{\rho(t,x)} = \frac{1}{\rho(t,x)} \int_0^{1+\mu} v f(t, x, v) dv$ <i>Speed Varians</i> : $\sigma(t,x) = \frac{1}{\rho(t,x)} \int_0^{1+\mu} [v - \xi(t,x)]^2 f(t, x, v) dv$

Sebenarnya, dari ketiga model yang ada (mikro, meso dan makro) tidak dapat ditentukan mana

yang paling baik, karena masing-masing model ini memiliki kelebihan dan kekurangannya sendiri disesuaikan dengan tujuan awal dari simulasi yang ingin dicapai.

Table IV. Perbedaan Pemodelan Arus berdasarkan Skala

	Skala dari Simulasi		
	Makroskopik	Mesoskopik	Mikroskopik
Unit yang disimulasikan	Arus lalu lintas	Arus lalu lintas dengan interaksi kendaraan-nya.	Perilaku setiap individu dan simulasi rute.
Teori fundamental	Fisika, Matematika	Fisika, Matematika	Studi Kognitif, fisika dan kecerdasan buatan.
Volume data yang menjadi masukan	Rendah	Sedang	Tinggi
Komputasi yang dibutuhkan	Rendah	Sedang	Secara umum, lebih tinggi diantara dua skala yang lain.
Perilaku stokastik	Jarang	Tergantung dari model	Biasanya mengg

		yang dibuat	unak n stokast ik
<b>Model Aplikasi</b>			
<i>Multi-agent</i> dan interaksi objek	Sedang/ Kurang	Sedang	Kuat
Reaksi terhadap perubahan kondisi arus	Kurang	Sedang	Kuat

Sumber: *Scales of Traffic Flow Simulation*

[Manley 2009]

Pemilihan skala untuk memodelkan arus bukan persoalan yang sederhana, banyak faktor yang mempengaruhinya. Manley pada papernya [Manley 2009] mengatakan beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan pada saat akan menentukan skala yang dipakai untuk mensimulasikan arus lalu lintas adalah sebagai berikut.

1. Ketersediaan sumber daya, apakah sumber daya yang kita miliki sudah cukup untuk membuat simulasi pada skala yang diinginkan, contohnya adalah pada skala mikroskopik diperlukan data yang cukup untuk bisa menentukan parameter-parameter yang akan diinputkan kedalam model. Selain dari itu, untuk membangun model mikroskopik diperlukan teknologi komputer dengan spesifikasi yang tinggi agar mampu melakukan komputasi yang kompleks secara *real-time*.

2. Ruang lingkup area pemodelan, apakah akan dimodelkan pada skala besar atau kecil. Karena perlu diketahui untuk memodelkan mikroskopik pada skala besar akan kurang optimal, dikarenakan proses komputasinya pun memerlukan waktu yang lebih lama. Sedangkan untuk makro dapat diaplikasikan dalam skala besar, karena proses komputasinya pun tidak begitu kompleks seperti mikro.
3. Faktor lainnya, seperti jumlah kendaraan yang akan disimulasikan, apakah akan menggunakan stokastik atau deterministik, apakah *state* yang ada pada sistem itu berubah secara kontinyu atau tidak, dan lain-lain.

Tetapi, untuk tujuan menghasilkan simulasi yang lebih realistis, pemodelan skala mikroskopik adalah pilihan yang tepat untuk memodelkan arus lalu lintas dikarenakan model ini memodelkan perilaku setiap pergerakan kendaraan secara detail [Manley 2009].

### III. Model Arus lalu Lintas

Simulasi mikroskopik adalah sebuah model yang menggambarkan perilaku dan interaksi setiap pengemudi dalam sebuah sistem lalu lintas, dimana pemodelannya dibuat lebih detail untuk setiap pergerakan kendaraannya. Definisi mengenai pemodelan mikroskopik bervariasi, akan tetapi dari keseluruhan definisi yang ada dapat disimpulkan fokus dari pemodelan ini mengarah

pada pengembangan model perilaku pengemudi dan kendaraan yang digunakannya untuk menghasilkan simulasi yang lebih realistis.

Pada awalnya, simulasi mikroskopik berfokus pada pengembangan perilaku sebuah kendaraan dalam sebuah lingkungan lalu lintas yang diberikan, khususnya dalam menjaga jarak dengan kendaraan yang ada didepannya. Teori yang paling populer untuk memodelkan jarak antar kendaraan ini adalah *car-following model*. Pengembangan terhadap teori *car-following model* terus dilakukan dengan menambahkan unsur perilaku pengendaranya dan elemen lainnya agar simulasi yang dihasilkan lebih realistis.

Teori yang mendasari pemodelan mikroskopik adalah *car-following* dan *lane-changing*. Teori *car-following* mengkaji pergerakan longitudinal setiap kendaraan. Sedangkan, teori *lane-changing* mengkaji tentang bagaimana pengendara melakukan perubahan jalur.

Model *car-following* juga menjadi elemen yang cukup penting dalam proses pengembangan sistem *autonomous cruise control* [Mar and Lin 2005; Wang et al. 2013]. Selain dari itu, *car-following* pun digunakan sebagai *tools* untuk mengevaluasi kebijakan *intelligent transportation system* [Panwain and Dia 2005; Yu and Shi 2008]. Sehingga, para peneliti pun tertarik untuk mengeksplorasi perilaku *car-following* untuk meningkatkan model yang sudah ada atau untuk menemukan model baru.

Seiring dengan berkembangnya ilmu komputer, maka pengembangannya pun meluas kepada penggunaan sel otomatis dan sistem *multi-agent*. Dimana kedua sistem ini dapat memberikan perilaku yang lebih realistis antara hubungan atau interaksi pengendara dengan kondisi lalu lintas yang diberikan [Manley 2009]. Tidak hanya berhenti disana, pengembangan pun terus dilakukan agar mendapat model perilaku yang lebih riil dengan menambahkan metode stokastik dalam penentuan keputusan dan kondisi jalan yang diberikan, sehingga diperlukan studi lain yang berhubungan dengan psikologi pengendara dalam pengambilan keputusan dibedakan sesuai dengan kepribadian manusia yang berbeda-beda (contoh: agresif, tenang, dan lain-lain). Lebih jauh lagi, biasanya digunakan prosedur Monte Carlo untuk membangkitkan nilai acak untuk menampilkan perilaku pengendara pada kondisi lalu lintas [Wang et al. 1996].

Model mikroskopik memiliki keunggulan dalam mensimulasikan kendaraan lebih detail, namun bukan berarti tidak mempunyai kelemahan. Memodelkan perilaku setiap kendaraan dan melakukan *tracking* dalam sebuah kondisi lalu lintas akan membutuhkan *resource* dan *effort* yang besar dalam waktu yang diperlukan, biaya dan proses komputasi tingkat tinggi karena simulasinya dilakukan secara *real-time*. Selain dari itu, pengembangan sebuah model akan berkaitan erat dengan proses akhir yaitu kalibrasi dan validasi

terhadap model tersebut. Model yang dibangun harus akurat, sesuai dengan data atau informasi yang ada. Sebelumnya data atau informasi untuk memvalidasi model masih sedikit, tetapi saat ini informasinya sudah cukup berlimpah, sehingga peneliti dengan mudah mengembangkan model mikroskopik [Yang et al. 2013].

#### IV. Model Arus lalu Lintas

Pemodelan dan simulasi lalu lintas memiliki cakupan yang sangat luas, sehingga dapat dibedakan berdasarkan beberapa kriteria sebagai berikut:

- skala dari variabel bebas (kontinu, diskrit, semi-diskrit);
- tingkat kedetailan (submikroskopik, mikroskopik, mesoskopik, makroskopik);
- proses yang dihasilkan (deterministik, stokastik);
- penerapannya (analitik, simulasi);
- ruang lingkup aplikasi [Hoogendoorn and Bovy 2002].

Dari beberapa penelitian sebelumnya, simulasi arus lalu lintas sebagian dibedakan berdasarkan tingkat kedetailannya menjadi tiga skala utama yaitu mikroskopik, mesoskopik dan makroskopik. Pada bab studi literatur ini akan dipaparkan mengenai penelitian-penelitian yang terkait dengan pemodelan lalu lintas skala mikroskopik. Dikarenakan penelitian-penelitian yang sudah ada

mengenai model mikroskopik memiliki rentang varians yang cukup besar, sehingga pada pembahasannya akan dikelompokkan menjadi beberapa bagian yang memiliki kemiripan metode, *framework*, ruang lingkup simulasi dan lain-lain.

#### **a. Pemodelan Lalu Lintas pada Intelligent Transportation System**

Saat ini perkembangan *Intelligent Transportation System* (ITS) semakin dikembangkan guna mengefisienkan kapasitas jalan yang tersedia saat ini. Dampaknya, berbagai teknologi ITS seperti *adaptive cruise control* (ACC) sudah banyak digunakan di kendaraan yang berteknologi tinggi. Kesting [Kesting 2009] pada papernya mencoba membuat simulasi untuk mengetahui pengaruh dari kendaraan yang menggunakan ACC terhadap arus lalu lintas, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dari kapasitas jalan. Penelitian Kesting mengembangkan sebuah simulasi mikroskopik menggunakan *intelligent driver model* (IDM) agar dapat mensimulasikan pengaruh dari teknologi ACC. Penelitian ini mengembangkan IDM yang sudah ada dengan menggunakan *new constant-acceleration heuristic*. Pengembangan IDM ini diterapkan pada simulasi lalu lintas dengan kondisi multi-jalur serta ditambahkan fitur *driving strategy* pada ACC-nya. Simulasi pada penelitian ini sudah cukup berhasil menampilkan *driving strategy* lalu lintas yang berbeda-beda walaupun masih ada beberapa keterbatasan pada pemodelan IDMnya yang membuat simulasi kurang realistik.

Selain teknologi ACC, perkembangan ITS yang saat ini sedang berkembang adalah *Advanced Driver Assistance System* (ADAS). Seperti penelitian yang dilakukan Schnieder [Schnieder and Detering 2010] yang menggali tentang interaksi antar subsistem (pengemudi, kendaraan dan infrastruktur) yang terjadi pada lalu lintas. Penelitian ini menghasilkan sebuah sistem untuk memodelkan lalu lintas yang dapat digunakan sebagai fondasi untuk ADAS. Hasil pengujian simulasinya menunjukkan bahwa sistem ini dapat secara *powerfull* untuk menjelaskan fenomena yang kompleks pada pemodelan lalu lintas. Yang [Yang et al. 2010] pada penelitiannya berhasil membangun sebuah sistem pengambilan keputusan berdasarkan data *real-time* yang diperoleh. Di beberapa kota seperti New Jersey, New York, London, Paris dan Singapore sudah mengimplementasikan ITS menggunakan *congestion pricing*. Untuk membangun sistem *congestion pricing* perlu didukung oleh pemodelan yang akurat sehingga dapat memprediksi lalu lintas. Yang juga mengusulkan sebuah model lalu lintas yang digeneralisasi dari model LWR dengan menggunakan persamaan diferensial parsial stokastik. Hasil simulasinya dibandingkan dengan model lalu lintas deterministik dan diperoleh bahwa model stokastik ini lebih akurat dibandingkan model deterministik.

Salah satu permasalahan utama lalu lintas yang saat ini sering terjadi adalah kemacetan yang dapat

menimbulkan beberapa kerugian diantaranya adalah banyak waktu yang terbuang dan penurunan produktivitas dari jutaan manusia. Salah satu solusi yang mungkin adalah dengan menyediakan sarana informasi yang dapat didistribusikan kepada para pengendara di jalan raya atau bisa juga melalui sistem untuk pemilihan rute dalam menghindari kemacetan. Informasi mengenai kemacetan juga bisa diperoleh dari sebuah sensor *static* yang ditempatkan pada beberapa titik lokasi (*induction loops* atau sensor kamera) atau bisa dengan menempatkan sebuah kendaraan yang *mobile* yang bisa memberikan informasi tersebut. Leontiadis [Leontiadis et al. 2011] mencoba mendesain sebuah sistem yang memungkinkan sebuah kendaraan memperoleh informasi mengenai *crowd traffic* berbasis *ad hoc manner* lalu diimplementasikan pada sebuah *realistic network-mobility simulator* yang dapat dievaluasi modelnya. Selain dari itu pada penelitian ini dilakukan juga sebuah studi kasus untuk mengevaluasi apakah sistem terdesentralisasi dapat membantu pengemudi untuk meminimalisasikan waktu perjalanannya. Hasil yang diperoleh menyatakan bahwa sistem navigasi dapat memberikan mengoptimalkan kondisi lalu lintas.

Isu perkembangan berikutnya untuk mengatasi kemacetan adalah gambaran mengenai *Vehicular Data Network* (VDNs) yang merupakan sebuah transformasi sebuah kendaraan menuju *intelligent mobile entities* yang bisa saling berkomunikasi

secara *wireless* dan dengan menggunakan *stationary roadside units* (RSUs). Beberapa studi mengenai VDN yang sudah berkembang ini berusaha untuk dapat menampilkan sebuah model yang bisa menggambarkan mimik dari fenomena lalu lintas dan juga berusaha untuk menampilkan VDN yang akurat pada saat dievaluasi. Khabbaz [Khabbaz 2012] pada papernya mengusulkan sebuah model universal berbasis pemodelan perilaku pada kondisi *free-flow* menggunakan pendekatan *M/G/∞ queuing system*. Model yang dibangun ini bertujuan dapat menjadi fondasi sebagai pengembangan pemodelan VDN sehingga kendaraan-kendaraan yang ada dapat dibekali dengan sejumlah informasi yang dapat diakses mengenai kondisi jalan, kemacetan dan lain-lain, sehingga menghasilkan kondisi lalu lintas yang lebih optimal.

Seiring dengan perkembangan VDN ini, maka perkembangan teknologi transportasi cerdas sudah mengarah ke *Platooning*. *Platooning* adalah teknologi terkini agar kendaraan dapat bergerak secara otonom dan sangat efisien dalam mengendarai dalam kondisi *freeways* dan juga sebagai pendukung keselamatan dalam berkendara [Segata et al. 2013]. Selain dari itu, *platooning* dapat memberikan *driving experience* dengan cara yang berbeda yang mencakup aspek kenyamanan dan keamanan pengemudi, mengurangi konsumsi bahan bakar, dan dapat memberikan ruang bagi pengemudinya untuk sekedar relaksasi misalnya

membaca *e-mail*, koran, menelepon disaat kondisi lalu lintas dalam keadaan macet. *Platooning* merupakan area penelitian yang cukup menantang, karena diperlukan beberapa kemampuan dalam mengembangkannya yaitu teori sistem kontrol, teknik transportasi, *vehicle dynamics*, dan *wireless networking*. Pada papernya Segata [Segata et al. 2013] mencoba menjelaskan konsep sistem *platooning* dilihat dari sisi *wireless networking*-nya, serta menjelaskan *state-of-the-art* mengenai perkembangan *platooning* dari sisi komunikasi *wireless*. Pada paper ini juga dijelaskan bahwa pada sisi *wireless networking* masih terdapat beberapa keterbatasan, sehingga masih sangat terbuka permasalahannya untuk dapat dilakukan penelitiannya.

#### **b. Pemodelan Mikroskopik Berbasis Car-Following dan Lane Changing**

Pemodelan lalu lintas dengan skala mikroskopik didominasi oleh dua pendekatan teori yaitu *car-following model* dan *lane-changing model*. Kedua pendekatan ini berfokus pada bagaimana sebuah kendaraan berinteraksi dan berperilaku pada kondisi lalu lintas yang berbeda-beda. Teori *car-following* adalah teori yang menjelaskan bagaimana sebuah kendaraan menjaga jarak aman dengan kendaraan yang ada di depannya. Pemodelan *car-following* sudah banyak dikembangkan dengan berbagai karakteristik dan parameter yang berbeda-beda. Das [Das et al. 2009] mencoba mengembangkan sebuah

pemodelan *car-following* untuk ruas jalan yang sempit menggunakan pendekatan sel otomatis. Lu [Lu et al. 2011] juga pada papernya mengembangkan pemodelan *car-following* berbasis teori Homeostasis yang mengkaji bahwa pengambilan keputusan seorang pengemudi dalam memperkirakan resiko yang akan dihasilkan didasarkan pada pengalaman yang sudah dimiliki oleh si pengemudi. Pemodelan *car-following* menggunakan teori *risk homeostasis* ini dikembangkan menggunakan parameter *desired safety margin* (DSM). *Safety margin* disini merupakan nilai batasan resiko yang diinformasikan kepada pengemudi saat berkendara, yang akan diperoleh dengan pertimbangan parameter stimulusnya. Hasil dari simulasi pada penelitian ini dibandingkan dengan Gazis-Herman-Rothery (GHR) model. Hasil perbandingan rata-rata antara DSM dan GHR model tidak begitu berbeda, hanya pada penelitian ini dihasilkan model yang dapat merubah parameter-parameter sesuai dengan yang diinginkan sehingga model ini lebih fleksibel dan efektif untuk mensimulasikan teori *car-following*. Model yang dikembangkan pada penelitian ini juga memberikan pemahaman dan pengetahuan baru dalam menjelaskan proses *car-following* berdasarkan *risk homeostasis theory*.

Efisiensi dari sebuah model simulasi lalu lintas bergantung pada model *car-following* dan *lane-changing* yang dihasilkan [Hamid 2010]. Pada papernya Hamid [Hamid 2010] dilakukan

pengujian pada tiga model *car-following* yang sudah ada (CARSIM, WAVSIM dan PARAMICS). Pengujiannya menggunakan data riil yang diperoleh dari tiga daerah yang berbeda dan kondisi *environment* yang berbeda. Tujuan penelitian ini untuk mencari model yang paling baik sehingga dapat dijadikan sebagai asumsi dasar untuk mengembangkan model *car-following*. Pengujian ketiga model ini dilakukan menggunakan data riil lapangan. Dari ketiga model tersebut, yang mempunyai akurasi yang paling tinggi adalah CARSIM, sehingga asumsi-asumsi yang ada pada CARSIM dapat dijadikan referensi untuk mengembangkan sebuah model *car-following*.

Selain *car-following theory*, *lane-changing theory* pun merupakan sebuah elemen yang penting dalam hal bagaimana sebuah kendaraan merubah jalurnya untuk beberapa alasan, misalnya menghindari *obstacle*, menyusul kendaraan yang lebih lambat, dan lain-lain. Abdi [Abdi et al. 2012] pada papernya menganalisis beberapa algoritma *lane-changing* yang ada, sehingga diketahui faktor-faktor efektif apa saja yang dapat dipakai pada skenario *lane-changing*. Analisis algoritma *lane-changing* pada penelitian ini menggunakan metode *fuzzy clustering*. Rahman [Rahman et al. 2013] pada papernya juga melakukan perbandingan-perbandingan terhadap model *lane-changing* yang sudah ada dalam upaya untuk mencari model yang paling optimal serta

memaparkan penelitian lanjutan yang bisa dikembangkan dari model *lane-changing* ini. Kesimpulan yang diperoleh pada penelitian Rahman menyatakan bahwa pemodelan *lane-changing* merupakan pemodelan yang kompleks terlebih lagi dengan faktor-faktor *driver distraction* (misal: melakukan sms atau telp pada saat menyetir), lingkungan, kondisi jalan dan masih banyak lagi yang sampai saat ini belum seluruhnya diimplementasikan kepada model *lane-changing*.

Memodelkan perilaku pengemudi pada saat *car-following* dan *lane-changing* dilakukan dengan mengobservasi data-data yang diperoleh di lapangan. Ma [Ma and Andreasson 2007] pada papernya mengembangkan sebuah metode pengumpulan data yang digunakan untuk membangun simulasi mikroskopik lalu lintas. Pada penelitian ini dibangun instrumen untuk mengumpulkan data perilaku pengemudi yang fokus pada *car-following* dan *lane-changing*. Untuk mengurangi *noise* pada pengukuran pada pola *car-following* maka digunakan *Kalman smoothing* ke dalam bagian *state-state* fisik (percepatan, kecepatan dan posisi). Sehingga dari pola-pola *car-following* yang diperoleh hasilnya lebih *smooth* sehingga dapat dianalisis properti-properti yang dimiliki pengemudi untuk melakukan *car-following*. Setelah itu, dilakukan pengklasifikasian perilaku *car-following* yang berbeda-beda menggunakan algoritma *fuzzy*

*clustering* untuk dapat digunakan pada simulasi mikroskopik lalu lintas.

### c. Pemodelan Perilaku Pengemudi

Pemodelan mikroskopik lalu lintas akan selalu berhubungan dengan bagaimana memodelkan perilaku setiap kendaraan dan pengemudi. Studi literatur mengenai pemodelan perilaku pengemudi menggunakan pendekatan dan metode yang berbeda-beda sudah banyak dilakukan dengan tujuan agar mendapatkan simulasi yang benar-benar realistis. Song [Song et al. 2000] pada penelitiannya mencoba memodelkan perilaku mengemudi menggunakan model kognitif dengan *simulation tools* yang sudah ada yaitu SmartAHS. Kontribusi yang diberikan pada penelitian ini adalah membangun sebuah formasi dari *database knowledge* pengemudi dan pengembangan pemodelan proses kognitif pada saat pengemudi sedang melakukan kegiatan menyetir. Informasi yang ada di dalam *database* mampu mensimulasikan pengemudi untuk memilih perilaku yang dilakukan dari kumpulan kemungkinan perilaku yang ada, seperti *following* atau *overtaking*.

Booth [Booth 2007] pada papernya membangun sebuah *neural network driver agent* untuk meningkatkan realistik dari simulasi kendaraan. *Neural network* ini digunakan untuk pemodelan *lane-changing behavior*. Hasil pemodelan perilaku pengemudi berbasis *agent* ini dibandingkan dengan simulasi pengemudi manusia. Berdasarkan

pengujian yang dilakukan mampu menunjukkan *neural driver agent* yang lebih baik dibanding pengemudi manusia dalam mengestimasi atau menentukan kapan akan merubah jalur dan menentukan kecepatan kendaraan yang tepat untuk merubah jalur.

Pemodelan perilaku pengemudi akan dipengaruhi oleh banyak faktor, diantaranya usia, kematangan emosi, jenis kelamin, kondisi pribadi seseorang maupun kondisi lingkungan. Beberapa penelitian mengenai pemodelan perilaku pengemudi yang sudah ada dilakukan menggunakan beberapa pendekatan, diantaranya *fuzzy logic*, *fuzzy rules* untuk *low-level control action model*, *hidden markov model*, dan *dynamic bayesian networks*. Sebagian besar dari pendekatan ini menggunakan distribusi acak dari data perilaku pengemudi yang diperoleh pada saat berkendara. Tavellaei [Tavellaei et al. 2008] memodelkan perilaku pengemudi menggunakan dua metode fuzzy. Yang pertama metode fuzzy akan digunakan untuk memodelkan *low-level control* (untuk memodelkan *steering angle* dan *speed variation*) serta menggunakan *fuzzy multi criteria decision making* yang diimplementasikan pada *high-control action* (memodelkan proses pengambilan keputusan oleh pengemudi). Validasi model ini menunjukkan simulasi yang dihasilkan cukup natural dan dapat dijadikan sebagai dasar pemodelan perilaku individu pengemudi yang bisa

digunakan sebagai fondasi dari *automatically guided vehicles*.

Beberapa penelitian [Absil and Pauwelussen 2010; Jiang et al. 2010] mulai mengembangkan pemodelan perilaku pengemudi untuk digunakan pada sebuah *platform* sehingga bisa dihasilkan *outcome* atau *virtual world* pada kasus lalu lintas yang lebih realistis. Model mikroskopik dan *network simulation* saat ini biasanya diimplementasikan pada *platform* yang berbeda, dan simulasi perilaku pengemudi harus dibuat seakurat mungkin dan memiliki hasil yang sebanding dengan kenyataannya. Boubaker [Boubaker et al. 2011] juga membangun sebuah model mikroskopik menggunakan *linear model* dan *intelligent driver model*. Tujuan dari simulasi ini adalah mempresentasikan model *car-following* yang memiliki karakteristik gerak kendaraannya longitudinal. Model ini mensimulasikan respon setiap kendaraan berdasarkan perilaku kendaraan yang ada di depannya lalu dilakukan kalibrasi menggunakan prinsip Levenberg Maquardt, sehingga nanti dapat ditentukan pemilihan parameter yang penting dan cocok untuk proses kalibrasi.

Selain mensimulasikan model pada kondisi jalan yang biasa, beberapa penelitian [Jia et al. 2011; Tan and Jia 2013] mencoba mensimulasikan lalu lintas pada saat pertemuan di jalan tol (*expressway*). Kondisi ini disebut *merging section*, dimana sebuah kendaraan akan sering melakukan

perubahan lajur pada saat *merge* (bertemu ketika akan masuk atau keluar dari jalur utama), interaksi konflik antara kendaraan pada lajur percepatan dan lajur yang berdekatan perlu untuk mendapatkan perhatian yang berbeda dibanding pada jalan biasa. Jia [Jia et al. 2011] pada penelitiannya mencoba memodelkan *vehicles merging behavior* yang lebih akurat untuk mengatasi kelemahan-kelemahan dari model-model sebelumnya. *Platform* yang digunakan untuk mengembangkan model ini adalah sistem MTSS, dengan menggunakan data dari Guangzhou untuk mengkalibrasi dan memvalidasi *merging probability model*. Hasil dari simulasi dibandingkan dengan data lapangan dan hasilnya cukup memuaskan.

Pemodelan perilaku pengemudi dapat dibuat lebih mudah jika *framework* untuk mensimulasikannya sudah tersedia. Schakel [Schakel et al. 2013] pada papernya membahas *framework open source* untuk simulasi mikroskopik. Fokus penelitian Schakel mencoba membuat solusi yang dapat menghasilkan sebuah simulasi *open source* yang dapat memberikan akses penuh dan dapat dijadikan sebagai *framework* untuk pengembangan aplikasi ITS yang baru dan dapat memungkinkan untuk melakukan perubahan-perubahan pada simulasi mikroskopiknya.

#### **d. Pemodelan Berbasis Multi-Agent**

Pemodelan mikroskopik berbasis *agent* akhir-akhir ini banyak dilakukan dalam upaya menghasilkan sebuah simulasi yang lebih realistis.

Pada penelitiannya, Claes [Claes and Holvoet 2011] mengembangkan sebuah *framework* yang bisa mensimulasikan populasi kendaraan yang memiliki perilaku pengemudi yang heterogen. *Agent* pada simulasi ini digambarkan sebagai kendaraan yang mampu mengontrol kendaraan serta mampu menentukan rute jalan yang akan dilalui. Penelitian ini berhasil membuat sebuah *platform* yang dinamakan Gridlock yang mudah untuk digunakan, mudah dikembangkan dan fleksibel.

Selain dari itu, beberapa peneliti [Bazghandi and Pouyan 2011; Gaouiouez et al. 2013] mengungkapkan pada papernya bahwa untuk saat ini hanya model yang berbasis *agent* yang mampu menghasilkan skenario simulasi lalu lintas yang lebih riil dibandingkan pendekatan yang lainnya. Gaouiouez [Gaouiouez et al. 2013] pada papernya mencoba menghasilkan sebuah algoritma *car following* dengan menambahkan efek “*real-factor*” yang didistribusikan secara acak, sehingga simulasi yang dihasilkan disebut dengan sistem *multi-agent* yang terandomisasi. Fokus penelitian ini adalah membangun model mikroskopik baru melalui kombinasi pendekatan sistem *multi-agent* dengan model matematik, khususnya model statistik serta menggunakan karakteristik utama dari sistem *multi-agent*.

Pemodelan mikroskopik sangat erat kaitannya dengan pemodelan perilaku dari pengemudi kendaraannya, seperti pada penelitian Jun [Jun and

Jian 2008] yang mencoba memodelkan perilaku pengemudinya menggunakan teknologi *agent* dan *ACT-R cognitive behavior* agar dapat memperoleh sebuah *framework* model *driver-vehicle* unit. *Framework driver-vehicle unit* ini dibangun untuk dapat mensimulasikan model mikroskopik perilaku *agent* yang heterogen.

Perkembangan simulasi berbasis *intelligent agent* juga dapat dimanfaatkan sebagai teknologi dalam proses *routing* [Buscema et al. 2009]. Latar belakang proses *routing* ini muncul dalam upaya menyelesaikan masalah kemacetan yang masih harus diselesaikan sampai saat ini. Buscema mengatakan bahwa salah satu alternatif untuk mengurangi kemacetan salah satunya adalah dengan menggunakan *Advance Traveller Information System (ATIS)*. Sistem ini dapat memberikan informasi dan rekomendasi rute kepada pengunanya, dan mampu membantu pengguna untuk memilih alternatif *path* terbaik. Sistem ini mampu mencapai tujuan yang diinginkan, akan tetapi belum diketahui seberapa besar sistem ini memberikan pengaruh terhadap perubahan perilaku pengendara dan sejauh mana dapat meningkatkan efisiensi ruas jalan lalu lintas. Oleh karena itu, pada penelitian ini, Buscema mencoba menganalisis dampak penggunaan teknologi ATIS, dengan memodelkan perilaku pengemudi yang digambarkan sebagai *autonomous agent* yang diberikan informasi lalu lintas secara *real-time*. Hasil penelitian ini menunjukkan *rate*

yang dapat dikatakan layak yang menyatakan bahwa penyediaan informasi secara *real time* bagi pengemudi dapat mengurangi kemacetan dan meningkatkan performa dan efisiensi kapasitas jalan.

Dengan berkembangnya simulasi berbasis *agent*, [Chen and Cheng 2010] melakukan review terhadap penggunaan teknologi *agent* pada sistem lalu lintas dan transportasi. Saat ini komputasi berbasis *agent* merupakan teknologi paling *powerfull* dalam pengembangan sebuah sistem kompleks. Konsep *agent* ini sudah banyak digunakan pada aplikasi yang berbeda-beda, misalnya aplikasi manufaktur, sistem kontrol *real-time*, perdagangan elektronik, *network management*, sistem transportasi, manajemen informasi, *scientific computing*, kesehatan, dan dunia hiburan. Alasan utama mengapa teknologi *agent* ini berkembang cukup sukses adalah karena sistem *agent* memiliki sifat otonom dan memungkinkan adanya interaksi antar *agent* dalam upaya mencapai tujuan yang diinginkan. Pada papernya, Chen memaparkan teknologi *agent* yang dipakai dalam pengembangan sistem ITS dalam upaya untuk menyelesaikan masalah transportasi. ITS mampu diaplikasikan dalam teknologi komputer, komunikasi, teknologi sensor dalam upaya mengubah sistem transportasi menjadi sistem lebih teratur dan menjadi sistem yang terintegrasi dengan baik. *Core* atau basis dari ITS adalah informasi, informasi lalu lintas yang

tersedia secara *real-time* adalah dasar pengimplementasian ITS yang lebih efisien dan efektif. Salah satu teknologi yang mampu meningkatkan kemampuan komputer terdistribusi dari sistem informasi terpusat adalah teknologi *agent*.

Aral [Aral et al. 2011] pada papernya mengusulkan model *car-following* dengan menambahkan parameter *agent drivers* dan *diligent ones*. Penelitian ini diimplementasikan pada sebuah kasus meluapnya lumpur lapindo di Indonesia. Skenario simulasinya adalah ketika lumpur panas meluap melewati bendungan, maka lumpur panas akan menghampiri jalan sehingga kendaraan-kendaraan yang ada disana harus segera dievakuasi. Kontribusi penelitian adalah dengan menggunakan parameter tambahan *agent drivers* dan *diligent drivers* dapat menghasilkan waktu evakuasi yang diperlukan. Hasil pengujiannya dibandingkan dengan model Nagel-schrekenbergs dan diperoleh efektifitas dalam mengurangi waktu evakuasi. Parameter ini ditambahkan dengan tujuan agar dapat memberikan respon yang baik terhadap lingkungannya, dan juga dapat mengenali perubahan kecepatan yang terjadi sehingga dapat mengontrol lalu lintas dan meminimalisasi waktu evakuasi. *Agent driver* disini mempunyai kemampuan untuk memimpin kendaraan lain dan mereka mempunyai informasi yang bisa diperoleh dari *evacuation control centre* dan mentransfer ke pengemudi lain melalui koneksi jaringan *wireless*.

*Agent drivers* juga bisa menuntun kendaraan yang lain untuk menuju ke tempat yang lebih aman dengan jalur tercepat. *Dilligent drivers* juga memiliki kemampuan untuk mengatur jarak antar kendaraan dengan kendaraan lain didepannya.

Penelitian tentang proses *routing pattern* juga dilakukan oleh Yu [Yu and Shi 2012] yang mengatakan bahwa *route pattern* dan perilaku *crowd* pada lalu lintas sudah mulai dijadikan sebagai bahasan yang cukup penting untuk mengatasi kemacetan, terlebih lagi pada daerah perkotaan yang padat. Pada kenyataan sebenarnya akan sulit untuk membuat sebuah sistem yang bisa memprediksi rute karena keterbatasan sensor yang ada dan juga karena arus lalu lintas ini sulit diprediksi karena memiliki perilaku pengemudi yang berbeda-beda satu sama lain. Sehingga, fokus permasalahannya adalah cukup sulit untuk membuat sistem prediksi yang akurat. Selain dari itu, Jun [Jun and Jian 2012] pada penelitiannya mengembangkan sebuah sistem berbasis *agent* yang dapat menghasilkan informasi lalu lintas yang akurat agar bisa menghasilkan rute dengan tepat. Penelitiannya menghasilkan sebuah model prediksi rute menggunakan pendekatan *Hierarchical Bayesian Non-Parametric* yang menghasilkan prediksi rute yang efisien dengan tingkat akurasi 85%.

Penelitian terbaru Manley [Manley and Cheng 2013] mengembangkan sebuah simulasi berbasis *multi-agent* untuk mengatasi kemacetan yang

dihasilkan oleh insiden yang terjadi tiba-tiba. Biasanya pada saat kejadian ini pengemudi akan mencoba mencari jalan lain untuk menghindari kemacetan. Dengan tujuan untuk dapat memprediksikan dan mengurangi keadaan seperti ini maka diperlukan sebuah simulasi yang dapat menggambarkan semua variasi perilaku pengemudi yang heterogen. Untuk membuat simulasi ini, hal yang pertama dilakukan adalah tentang *spatial knowledge* dan perilaku pengemudi yang akan dimodelkan nanti mencakup apa saja, harus dilakukan pembahasan mendalam mengenai kajian ini. Untuk dapat memodelkan perilaku pengemudi ini dengan skala yang besar (dapat dilihat sebagai makro) maka *Agent-based modeling* (ABM) adalah sebuah *tools* yang tepat untuk menggambarannya. Hasil pada simulasi berbasis agent ini menunjukkan bahwa *spatial knowledge* yang berbeda antar pengemudi cukup signifikan dalam menentukan rute alternatif dan pergerakan yang terjadi pada lalu lintas.

#### **e. Pemodelan pada Lalu Lintas Campuran**

Dari beberapa penelitian yang sudah dipaparkan sebelumnya, sebagian besar simulasi mikroskopik lalu lintas dibangun untuk jenis kondisi lalu lintas kendaraan yang sejenis. Lee pada papernya [Lee et al. 2009] memperlihatkan sebuah studi mengenai perilaku dari sepeda dan sepeda motor pada sebuah persimpangan berbasis BP *neural network*. Penelitian Lee memodelkan lalu lintas campuran yang menjadi karakteristik lalu lintas pada negara

China, khususnya di sebuah pertemuan persimpangan jalan. Campuran antara sepeda dan motor pada saat yang bersamaan dengan arah tujuan yang berbeda-beda memang menjadi ciri khas dari persimpangan di perkotaan, yang mengakibatkan penurunan kapasitas dari persimpangan. Lee mencoba mengembangkan simulasi mikroskopik sebagai alat yang dapat menggambarkan perilaku dari sepeda dan sepeda motor dalam pengambilan keputusan, desain dan analisis operasi lalu lintas. Fokus pada penelitian ini membahas mengenai kondisi lalu lintas campuran yang fokus pada masalah dari adanya kehadiran sepeda dan membangun model yang dapat menentukan kendaraan motor untuk melakukan *crossing* menggunakan *neural network*. Penelitian yang dikembangkan Lee juga mencoba membangun model perilaku motor menggunakan teori *gap acceptance* menggunakan probabilitas dan model *discrete choice logic model* untuk merepresentasikan pengambilan keputusan motor untuk melewati dan probabilitas *gap* yang akan diterima.

Di Indonesia, ada beberapa penelitian yang mengkaji mengenai pemodelan simulasi lalu lintas campuran. Beberapa penelitian [Sadili 2011; Aly 2012] meneliti mengenai karakteristik lalu lintas dengan komposisi kendaraan campuran. Simulasinya dianalisis secara makroskopik menggunakan model Greenshield, Underwood dan Greenberg.

#### 4.2 Pemodelan Mikroskopik pada *Crowd Traffic*

Optimisasi dan kontrol lalu lintas sangat diperlukan baik pada jalan perkotaan ataupun jalan-jalan utama. Penelitian tentang pemodelan lalu lintas ini merupakan area yang menarik untuk keilmuan matematik dan ilmu terapan. Selain dari itu, pada papernya, Bellomo [Bellomo and Dogbe 2011] seorang ahli pemodelan matematik memaparkan beberapa motivasi dibalik pengembangan model lalu lintas dianggap cukup penting, diantaranya: 1) untuk mengurangi kecelakaan lalu lintas; 2) mengurangi kemacetan (*time delay*); 3) mengurangi polusi yang dihasilkan. Hal ini mengakibatkan studi literatur pemodelan lalu lintas sudah banyak dan cukup bervariasi, akan tetapi studi literatur yang membahas fenomena *crowd* pada lalu lintas masih tergolong sedikit.

Lalu lintas dan *crowd* merupakan sebuah sistem kompleks yang terdiri dari sekumpulan entitas yang berinteraksi berdasarkan *rule* untuk mencapai strategi tertentu dan memiliki kemampuan berkomunikasi dengan entitas lain dan untuk mengatur perubahan-perubahan yang terjadi berdasarkan strategi yang dimiliki [Bellomo and Dogbe 2011]. Bellomo pada papernya melakukan analisis pendahuluan mengenai kesulitan-kesulitan pada pemodelan lalu lintas dan fenomena *crowd*-nya. Pada paper ini dipaparkan konsep dasar dari pemodelan lalu lintas dan *crowd*, lalu konsep representasi model lalu lintas dan *crowd* pada skala

mikroskopik, makroskopik dan digiring ke mesoskopik dengan fokus pada teori kinetik. Pada paper ini fokus penelitiannya sebenarnya mengarahkan pemodelan lalu lintas dan *crowd* menggunakan teori kinetik pada skala mesoskopik.

## V. Kesimpulan

Berdasarkan literatur yang sudah dibahas sebelumnya, diketahui bahwa memang belum ada aturan atau model generik yang dapat digunakan untuk mewakili semua kondisi lalu lintas. Hal ini dikarenakan kondisi lalu lintas memiliki ciri khas masing-masing (kondisi lingkungan, infrastruktur, manajemen lalu lintas, dan lain-lain).

Keunikan model-model ini membuat area penelitian yang sangat luas dan bervariasi. Topik ini mempunyai kemungkinan untuk dapat terus berkembang, salah satunya dikarenakan gaya mengendarai seseorang akan terus berubah setiap waktunya, ditambah lagi dengan perkembangan teknologi otomotif saat ini. Dari *state-of-the-art* yang sudah ada, sistem *multi-agent* diakui dapat memberikan hasil simulasi yang efisien dan mendekati realistik oleh beberapa peneliti. Dan para peneliti pun sepakat bahwa pemodelan mikroskopik merupakan *tools* yang paling cocok dan efektif untuk menggambarkan pergerakan dan interaksi sebuah kendaraan pada arus lalu lintas.

Kondisi lalu lintas setiap negara berbeda, khususnya di Indonesia. Indonesia memiliki perilaku pengendara yang cukup unik sehingga memiliki kondisi arus lalu lintasnya pun unik dan

berbeda. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya adalah bervariasinya moda transportasi yang ada di Indonesia. Variasi moda transportasi itu menghasilkan tingkah pola pergerakan yang berbeda-beda. Dibandingkan dengan negara lain, walaupun terjadi kemacetan, akan tetapi kemacetannya cenderung tertib. Hal ini tentunya berbeda dengan kondisi kemacetan di Indonesia. Di Indonesia, kemacetan yang terjadi dapat menimbulkan fenomena kerumunan (*crowd*) dimana masing-masing pengendara dari setiap jenis kendaraan memberikan perilaku yang berbeda-beda (contoh: agresif, tenang, dan lain-lain). Fenomena kerumunan yang biasanya terjadi pada lalu lintas di Indonesia adalah pada saat jam sibuk (*rush hours*).

Pengembangan penelitian selanjutnya yang bisa dikembangkan berdasarkan permasalahan transportasi yang ada di Indonesia adalah memodelkan kerumunan (*crowd*) lalu lintas yang terjadi pada saat waktu-waktu tertentu dengan menggunakan pendekatan-pendekatan seperti sistem *multi-agent* atau berbasis sel otomata. Banyak faktor-faktor keunikan yang ada di Indonesia yang masih belum diimplementasikan pada pemodelan mikroskopik yang sudah ada sebelumnya.

## Referensi

Ali Abdi, Hossein Mobasheri and Mir Pouya

- Naseri Alavi. 2012. The Evaluation of Lane-Changing Behavior in Urban Traffic Stream with Fuzzy Clustering Method. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 4(22): 4701-4710.
- Ali Bazghandi and Ali A. Pouyan. 2011. An Agent-Based Simulation Model for Urban Traffic System. *Computer and Information Science* Vol.4, No.4.
- Anna Booth. 2007. Using Neural Network to Improve Behavioral Realism in Driving Simulation Scenarios. *TRL Limited*.
- Arne Kesting. 2008. Microscopic Modeling of Human and Automated Driving: Towards Traffic-Adaptive Cruise Control. *Faculty of Traffic Sciences, Technische Universitat Dresden, Germany*.
- Nicolla Bellomo and Christian Dogbe. 2011. On the Modeling of Traffic and Crowds: A Survey of Models, Speculations, and Perspectives. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, vol. 53, No.3 pp. 409-463.
- Bo Chen and Harry H. Cheng. 2010. A Review of the Applications of Agent Technology In Traffic and Transportation System. *IEEE Transaction on Intelligent Transportation System*, Vol.11, No.2.
- Bongsob Song, Delphine Delorne and Joel Vander Werf. 2000. Cognitive and Hybrid of Model Driver. *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicle Symposium 2000, Dearborn, USA-October 3-5*.
- Chiyomi Miyajima, et al. 2007. Driver Modeling Based on Driving Behavior and Its Evaluation in Driver Identification. *Proceeding of IEEE*, vol. 95, No.2.
- Daiheng Ni. A Unified Perspective on Traffic Flow Theory Part I: The Field Theory. *Applied Mathematical Sciences*, vol. 7, no.39, 192901946, HIKARI Ltd.
- Daniele Buscema, et al. 2009. The Impact of Real Time Information on Transport Network Routing Through Intelligent Agent-Based Simulation. *IEEE*.
- Ed Manley. 2009. Scales of Traffic Flow Simulation. *Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, University College of London*.
- Ed Manley and Dr. T. Cheng. 2013. Multi-agent Simulation of Drivers Reactions to Unexpected Incidents on Urban Road Networks.
- Guangquan Lu, Bo Cheng, Yunpeng Wang and Qingfeng Lin. 2013. A Car-Following Model Based on Quantified Homeostatic Risk Perception. *Mathematical Problem and Engineering*, Volume 2013, hindawi Publishing Corporation.
- Hamid A.E. Al-Jameel. 2010. Evaluation of Car-Following Model Using Field Data. *SPARC 2010*.
- Hongfei Jia, Yunlong Tan and Lili Yang. 2011. Modeling Vehicle Merging Behavior in Urban

- Expressway Merging Sections Based on Logistic Model. *International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering, Changchun China*.
- Ilias Leontiadis, et al. 2011. On the Effectiveness of an Opportunistic Traffic Management System for Vehicular Networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.12m No.4.
- Jan Valentin. *Traffic Flow Theory*. Unpublished.
- Jiang Jun and Lu Jian. 2008. Research of Driver-Vehicle Unit Model Framework Based on Agent and ACT-R. *IEEE*.
- Jiangbo Yu, Kian Hsiang Low, Ali Oran and Patrick Jaillet. 2012. Hierarchical Bayesian Nonparametric Approach to Modeling and Learning the Wisdom of Crowds of Urban Traffic Route Planning Agents. *ACM International Conference on Web Intelligence Agent Technology*, 2012.
- Kang-Ching Chu, Li Yang, Romesh Saigal and Kazuhiro Saitou. 2010. Validation of Stochastic Traffic Flow Model with Microscopic Traffic Simulation. *Department of Industrial and Operations Engineering, The University of Michigan*.
- Kohei Aral, et al. 2011. Car-Following parameters by Means of Cellular Automata in the Case of Evacuation. *International Journal of Computer Science and Security*, Vol. 5: Issue(1).
- Lars Schnieder and Stefan Detering. 2010. System-Theoretic Foundation for Advanced Driver Assistance Systems. *IEEE*.
- Li Yang, Romesh Saigal, Chih-peng Chu and Yatwah Wan. 2010. A Stochastic Model for Traffic Flow Prediction and Its Validation. *Department of Industrial and Operations Engineering, The University of Michigan*.
- M.A. Tavallaei, S. Khanmohammadi and I. Hasanzadeh. 2008. A Fuzzy Behavior Based Microscopic Traffic Model. *Proceeding of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Mechatronics and its Applications*. Jordan.
- M. Baykal-Gursoy, W. Xiao, and K. Ozbay. Modeling Traffic Flow Interrupted by Incidents. *Industrial and Systems Engineering Department, Rutgers University*.
- Maurice J. Khabbaz, Wissam F.Fawaz and Chadi M. 2012. A Simple Free-Flow Traffic Model for Vehicular Network Intermittently Connected Network. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*, Vol.13, No.3.
- Michele Segata, Renato Lo Cigno and Falko Dressler. 2013. Towards Communication Strategies for Platooning. *IEEE*.
- Mizanur Rahman, Mashrur Chowdhury, Yuanchang Xie and Yiming He. 2013. Review of Microscopic Lane-Changing Models and Fututre Research Opportunities. *IEEE Transactions on Intelligent Transportaion System*, Vol.14, No.4.
- Mounir Gouiouez, et al. 2013. Following Car

- Algorithm with Multi Agent Randomized System. *International Journal of Computer Science & Information Technology* Vol 5, No.4, 2013.
- Mounir Gouiouez, Noureddine Rais and Mostafa Azzouzi Idrissi. 2013. A New Car-Following Model: As Stochastic Process using Multi Agent System. *International Journal of Engineering Science & Research*, 2983-2989.
- Neil E. Absil and Jasper Pauwelussen. 2010. Driver Model Library: Driver behaviour and decision making framework. *IEEE*.
- Rachmat Sadili. 2011. Analisis Karakteristik Arus Lalu Lintas Campuran dengan Variasi Komposisi Kendaraan Sepeda Motor pada Jalan di Daerah Perkotaan. *Tesis: Universitas Indonesia*.
- Rutger Claes and Tom Holvoet. 2011. Gridlock: A Microscopic Traffic Simulation Platform. *Belgium: Reference: 2<sup>nd</sup> International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation System*.
- Samia Boubaker, Ferid Rehim and Adel Kalboussi. 2011. Comparative Analysis of Microscopic Models of Road Traffic Data. *IEEE*.
- Serge P. Hoogendoorn and Victor Knoop. Traffic Flow Theory and Modelling. *The Transport System and Transport Policy*.
- Serge P. Hoogendoorn and Piet H.L. Bovy. 2002. State-of-the-art of Vehicular Traffic Flow Modelling. *Special Issue on Road Traffic Modelling and Control of the Journal of System and Control Engineering*.
- Shanshan Lee, Dalin Qian and Nianyuan Lee. 2009. Study on Micro Behavior of Interference between Bicycle and Motor-vehicle at Signalized Intersection Based on BP Neural Network. *Asia-Pacific Conference on Information Processing*.
- S. Das, et al. 2012. A Cellular Automata Based Model for Traffic in Congested Traffic. *USA: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, San Antonio*.
- Aly, S.H. 2012. Model Hubungan Karakteristik Makro Lalu Lintas yang Bersifat Heterogen di Kota Makassar. *Prosiding Teknik Sipil Universitas Hassanudin*.
- Tian Jiang, et al. 2010. Microscopic Simulation for Virtual Worlds with Self-Driving Avatars. *Portugal: 13<sup>th</sup> International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation System*.
- W. Schakel, et al. 2013. A Modular Approach for Exchangeable Driving Task Models in a Microscopic Simulation Framework. *The Netherlands: Proceeding of the 16<sup>th</sup> International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation System*.
- Xiaoliang Ma and Ingmar Andreasson. 2007.

- Behavior Measuremet, Analysis, and Regime Classification in Car Following. *IEEE Transactions on Intelligent System*, Vol.8, No.1.
- Yunlong Tan and Hongfei Jia. 2013. Vehicle Interaction Behaviors Model Based on Driver Characteristics at Expressway-Ramp Merging Area. *6<sup>th</sup> International Conference Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*.
- S. Panwai, and H. Dia. 2005. Comparative Evaluation of Microscopic Car-Following Behavior. *IEEE Transaction on Intelligent Transportation System*, Vo. 6, no.3, pp.314-325.
- L. Yu and Z. Shi. 2008. Nonlinear Analysis of an Extended Traffic Flow Model in ITS Environment. *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 36, no.3, pp.550-558.
- J. Mar and H.T. Lin. 2005. A Car-Following Collision Prevention Control Device Based on The Cascaded Fuzy Inference System. *Fuzzy Sets and System*, Vol. 150, no.3, pp.457-473.
- J. Wang, et al. 2013. An Adaptive Longitudinal Driving Assistance System Based on Driver Characteristics. *IEEE Transaction on Intelligent Transportation System*, Vo. 14, no.1, pp.1-12.
- Y. Wang and P.D. Prevedouros. 1996. Synopsis of Traffic Simulation Models. *Department of Civil Engineering, University of Hawaii, Honolulu*.