

## APLIKASI CAR FOLLOWING MODEL UNTUK SIMULASI ARUS LALU LINTAS DI ALUR PELAYARAN SUNGAI

### Edi Kadarsa

Mahasiswa Program Studi Doktor Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan  
Institut Teknologi Bandung  
Jalan Ganesha No. 10  
Bandung 40132  
Telp: (022)2504952  
[aedikadarsah@yahoo.co.id](mailto:aedikadarsah@yahoo.co.id)

### Harun al-Rasyid S. Iubis

Dosen Program Studi Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan  
Institut Teknologi Bandung  
Jalan Ganesha No. 10  
Bandung 40132  
Telp: (022)2504952  
[halubis@yahoo.com](mailto:halubis@yahoo.com)

### Ade Sjafuruddin

Dosen Program Studi Doktor Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan  
Institut Teknologi Bandung  
Jalan Ganesha No. 10  
Bandung 40132  
Telp: (022)2504952  
[ades@trans.si.itb.ac.id](mailto:ades@trans.si.itb.ac.id)

### Russ Bona Frazila

Dosen Program Studi Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan  
Institut Teknologi Bandung  
Jalan Ganesha No. 10  
Bandung 40132  
Telp: (022)2504952  
[frazila@yahoo.com](mailto:frazila@yahoo.com)

### Abstract

To develop river transport in Indonesia, traffic flow research is required to analyse fairway capacity and level of service, and also transportation safety. Due to vessel traffic is insignificant, the research should be undertake using simulation model. To construct the simulation model, the vessel's interaction rules in the system are required. Car following model may be applied to regulate the vessels' interaction by perform some adjustments to characteristics of river, vessels, and driver. This research aims to select car following model and determine rezime to formulate the realistic driver behavior in the system, without discuss the river velocity effect to car following model.

**Keywords:** *car following model, vessel, simulation, river, rezime*

### Abstrak

Dalam rangka pengembangan angkutan sungai di Indonesia, perlu dilakukan penelitian arus lalu lintas untuk analisis kapasitas, tingkat pelayanan alur sungai dan keselamatan transportasi. Disebabkan volume lalu lintas kapal yang kecil, penelitian tersebut sebaiknya dilakukan dengan menggunakan model simulasi. Dalam pembuatan model simulasi dibutuhkan aturan untuk mengatur interaksi kapal-kapal didalam sistem. *Car following model* dapat digunakan untuk mengatur interaksi kapal-kapal dengan terlebih dahulu melakukan penyesuaian-penyesuaian terhadap karakteristik sungai, kapal dan pengendara. Penelitian ini bertujuan memilih *car following model* dari beberapa yang paling umum digunakan dan menentukan rezim untuk membuat perilaku pengendara kapal di dalam sistem menjadi realistis. Penelitian ini tidak membahas pengaruh kecepatan arus sungai terhadap *car following model*.

**Kata Kunci:** *car following model, kapal, simulasi, sungai, rezim*

## PENDAHULUAN

Permasalahan angkutan jalan raya berupa kemacetan, kerusakan jalan, polusi dan biaya transportasi yang tinggi dapat diselesaikan dengan membagi lalu lintas jalan raya ke angkutan sungai, mengingat Indonesia memiliki banyak jaringan sungai yang dapat dilayari oleh kapal-kapal besar (Perhubungan, 2005; Tuan, 2011). Umumnya sungai-sungai tersebut mengalir dari wilayah pedalaman melalui kota-kota kabupaten menuju ke laut lepas sehingga angkutan sungai dapat menjadi alternatif angkutan barang dan penumpang selain angkutan jalan raya.

Pada saat ini volume lalu lintas kapal pada alur pelayaran sungai di Indonesia kecil (Data Survei Asal Tujuan Nasional tahun 2001 dan 2006) karena angkutan sungai tidak berkembang selama beberapa puluh tahun terakhir bahkan cenderung mengalami kemunduran (Maryono, 2003). Agar angkutan sungai dapat berkembang dengan baik perlu dilakukan revitalisasi alur pelayaran dan moda angkutan sungai. Revitalisasi tersebut harus efisien dan sesuai dengan kebutuhan sehingga perlu ditunjang dengan penelitian-penelitian.

Penelitian angkutan sungai yang telah dilakukan jumlahnya terbatas terutama untuk penelitian arus lalu lintas. Hal ini disebabkan volume kapal yang berlayar di alur pelayaran sungai kecil sehingga permasalahan lalu lintas sungai cenderung diabaikan oleh para peneliti. Hasil wawancara dengan beberapa peneliti dari LAPI-ITB, PT United Tractor dan Perhubungan Darat yang melakukan penelitian angkutan sungai di Pulau Kalimantan dan Sumatera menunjukkan tidak terdapat alur pelayaran sungai dengan volume lalu lintas yang padat atau mendekati kapasitas. Oleh karena itu penelitian arus lalu lintas untuk keperluan analisis kapasitas, tingkat pelayanan alur sungai dan keselamatan transportasi sebaiknya dengan model simulasi yang dapat digunakan untuk analisis arus lalu lintas pada kondisi eksisting dan ketika alur pelayaran semakin padat.

Di dalam model simulasi arus lalu lintas sungai, kapal –kapal dihasilkan melalui bilangan acak (*random number*) dan disebar ke dalam sistem berdasarkan distribusi peluang tertentu. Setelah kapal-kapal disebar didalam sistem, kapal – kapal tersebut akan berlayar dan berinteraksi dengan lalu lintas disekitarnya terutama dengan kapal terdekat, yaitu antara kapal di depan dan kapal di belakang yang mengikuti. Pada lalu lintas jalan raya, perubahan kecepatan kapal didepan yang direspon oleh kapal dibelakang dapat dijelaskan melalui *car following model*.

## KAJIAN PUSTAKA

### **Car Following Model.**

Car following models terus diperbaiki dan dikembangkan sehingga menghasilkan model-model baru yang dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kelompok berdasarkan konsep dibelakang model tersebut, yaitu:

#### ***Stimulus Response Model***

Chandler et all (1958) yang pertama kali mengusulkan sebuah model linier berdasarkan konsep respon-stimulus. Respon pengemudi dapat berupa percepatan atau perlambatan dari kendaraan di belakang, sementara stimulus ditetapkan sebagai perbedaan kecepatan antara kendaraan didepan dengan kendaraan di belakang yang mengikuti. Stimulus tidak langsung direspon oleh pengemudi di belakang, tetapi membutuhkan waktu yang disebut waktu reaksi. Waktu reaksi dihitung mulai adanya perbedaan kecepatan antara dua kendaraan yang beriringan sampai pengemudi dibelakang mengambil keputusan untuk melakukan percepatan atau perlambatan. Diketahui pula waktu reaksi sebanding dengan sensitifitas.

Respon pengemudi berupa percepatan atau perlambatan merupakan usaha kendaraan di belakang untuk menyamakan kecepatan dengan kendaraan di depan. Hal ini merupakan kelemahan dari model respon stimulus dimana perilaku pengemudi menjadi tidak realistis. Ketika jarak antara dua kendaraan besar, pengemudi di belakang masih bereaksi terhadap perubahan kecepatan kendaraan di depan. Selain itu kendaraan yang berjalan pelan akan terseret menjadi lebih cepat bila kendaraan di depan bergerak dengan kecepatan lebih

tinggi karena pengemudi dibelakang yang mengikuti harus menyesuaikan kecepatannya dengan kecepatan kendaraan di depan (Hoogendoorn and Bovy, 2000).

Peneliti dari *General Motor* menambahkan jarak antara dua kendaraan dan kecepatan kendaraan yang mengikuti untuk memperbaiki sensitivitas sehingga model menjadi tidak linier. Selanjutnya Gazis membuat model non linier menjadi bentuk umum dengan menambahkan parameter  $\alpha$ ,  $l$ ,  $m$  sebagai parameter sensitivitas (May, 1990).

### ***Safe Distance Model***

Model pertama diusulkan oleh Kometani dan Sasaki (1959). Model ini menyatakan bahwa pengemudi dibelakang yang mengikuti kendaraan di depan memilih suatu jarak yang aman dengan kendaraan di depan berdasarkan kecepatan kendaraannya untuk menghindari tabrakan dengan kendaraan di depan. Pipe (1952) menyatakan kendaraan dibelakang yang mengiringi kendaraan di depan harus menjaga jarak yang aman paling sedikit sejauh satu kendaraan pada kecepatan 10 mil/jam dan akan meningkat secara linier dengan bertambahnya kecepatan (May, 1990; Hoogendoorn and Bovy, 2000). Pendekatan yang sama dengan Teori Pipe diusulkan oleh Forbes (1958), tetapi jarak antara (*distance headway*) yang dihasilkan oleh kedua teori ini lebih kecil dibandingkan dengan hasil pengamatan di lapangan pada saat kecepatan rendah dan tinggi (Hoogendoorn and Bovy, 2000).

Gipps melakukan perbaikan pada model awal dimana model yang diusulkan dapat dikalibrasi menggunakan asumsi logis perilaku pengemudi. Model Gipps ini digunakan secara luas di dalam simulasi arus lalu lintas mikroskopis. Salah satu faktor yang membuat model ini populer adalah secara teori perilaku pengemudi untuk situasi dua kendaraan beriringan atau platoon dapat dijelaskan secara realistis (Panwai and Dia, 2005).

### ***Optimum Velocity Model***

Bando et al (1995) mengusulkan *car following model* berdasarkan konsep kecepatan optimal, yaitu setiap pengemudi mencoba untuk mencapai kecepatan optimal tergantung kepada jarak dan perbedaan kecepatan dengan kendaraan di depan (Dalam Ranjitkar, Nakatsuji dan Kawamura, 2005). Berdasarkan penjelasan tersebut, respon dari kendaraan di belakang adalah mempercepat kendaraan bila kecepatannya pada saat itu belum mencapai kecepatan optimal sebaliknya akan memperlambat kendaraan bila kecepatannya melampaui kecepatan optimal. Terdapat penelitian yang menunjukkan percepatan dan perlambatan hasil perhitungan model tidak realistis ketika dibandingkan dengan data lapangan (Peng and Sun, 2010)

Model yang memiliki hubungan dekat dengan model ini adalah *Velocity Different Model*. Fungsi percepatan terdiri dari kecepatan optimal yang tergantung dari jarak antara dua kendaraan dan perbedaan kecepatan sebagai stimulus. Kesting dan Treiber (2008) membandingkan model ini dengan *Intelligent Driver Model* menggunakan data jejak kendaraan. Berbeda dengan pengukuran-pengukuran pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, penelitian ini menggunakan tiga pengukuran *error* yang berbeda dengan alasan tidak ada dasar yang kuat untuk menetapkan pengukuran yang terbaik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi nilai-nilai parameter *velocity different model* tinggi untuk tiga pengukuran yang berbeda, sedangkan *intelligent driver model* lebih kecil atau menunjukkan hasil yang lebih baik.

### ***Linier Model***

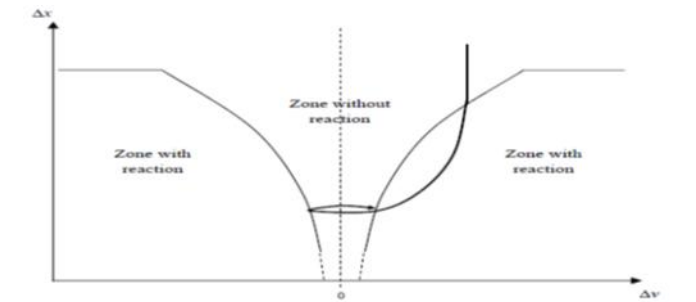
*Linier model* dikembangkan dari model ke tiga Gazis-Herman-Rothery yang kemudian diperbaiki oleh Helly dengan mengusulkan jarak yang diinginkan oleh pengemudi yang

mengikuti kendaraan di depan. Hasil perhitungan dengan *Linier Model* ini dilaporkan mempunyai kecocokan dengan data hasil observasi. Kelemahan utama model ini adalah kalibrasi parameter-parameter konstan pada persamaan jarak yang diinginkan oleh pengemudi susah untuk ditentukan di lapangan (Panwai and Dia, 2005).

### ***Psychophysical Model***

*Psychophysical model* menggunakan ambang batas persepsi atau titik-titik yang ditetapkan sebagai batasan pengemudi mengubah perilaku berkendara. Pengemudi dapat bereaksi mengubah kecepatannya atau jarak dengan kendaraan di depan hanya ketika ambang batas terlampaui (Leutzbach, 1988 dalam Olstam and Tapani, 2004). Ambang batas ditentukan untuk membatasi suatu wilayah yang menunjukkan tingkat respon dan kebebasan pengemudi dalam memilih kecepatan. Ambang batas ini sering dipresentasikan dalam sebuah diagram perbedaan kecepatan dengan jarak relatif (Gambar 1). Dengan ditetapkannya ambang batas persepsi ini, maka aturan perilaku pengemudi adalah (Hoogendoorn and Bovy, 2000):

1. Bila jarak antara dua kendaraan besar atau jauh, pengemudi tidak dipengaruhi oleh perbedaan kecepatan.
2. Pada jarak yang lebih kecil, beberapa kombinasi perbedaan kecepatan dan jarak antara (distance headway) tidak menghasilkan respon dari pengemudi di belakang, karena perbedaan kecepatan dan jarak antara terlalu kecil.



Sumber: Olstam dan Tapani, 2004

Gambar 1 Ambang Batas Wiedemann (1974)

Wiedemann (1974) yang pertama kali mengembangkan *Psychophysical Model*. Dia membedakan kendaraan terhalang oleh kendaraan di depan atau bebas mengatur kecepatannya sampai kecepatan yang diinginkan melalui ambang batas persepsi. Model ini menjadi dasar dari beberapa model simulasi arus lalu lintas mikroskopis (Dalam Hoogendoorn and Bovy, 2000).

Krauss et al (1999) mengembangkan suatu model yang dapat menggambarkan arus lalu lintas pada saat macet seperti *capacity drop* dan *wide jams*. Car following model yang lebih sederhana tidak bisa menggambarkan arus lalu lintas yang macet sebaik model yang diusulkan oleh Krauss ini (Dalam Hoogendoorn and Bovy, 2000)

Kelemahan dari model ini adalah penentuan persepsi dari para pengemudi-pengemudi yang berbeda terhadap kecepatan dan jarak relatif yang bervariasi untuk keperluan kalibrasi dan menetapkan ambang batas individual.

### ***Fuzzy Logic Based Model***

Aplikasi logika fuzzy terhadap *car following models* terjadi pada tahun 1990an. Usaha pertama adalah mengaplikasikan aturan fuzzy pada Model Gazis-Herman-Rothery

(Kikuchi and Chakraborty, 1999 dalam Rahman, 2013). *Model car following* ini menggunakan sekumpulan logika fuzzy, misalnya jika “terlalu dekat”, maka “lakukan perlambatan maksimum”.

Di dalam model-model yang telah dijelaskan sebelumnya, pengendara diasumsikan mengetahui kecepatan kendaraannya, kecepatan kendaraan di depan dan jarak antar kendaraan dengan tepat. Di dalam model logika fuzzy, pengendara diasumsikan hanya menyimpulkan kecepatan kendaraan, misalnya sangat lambat, lambat, sedang (moderat), tinggi dan sangat tinggi. Sekumpulan logika fuzzy tersebut mungkin *overlap* satu sama lain, untuk itu fungsi kepadatan probabilitas digunakan untuk mengurangi kesalahan yang dibuat oleh pengendara dalam menyimpulkan kecepatan dan jarak antar kendaraan. Kesulitan utama dalam aplikasi model ini adalah menentukan atau mengkalibrasi fungsi anggota yang merupakan bagian paling penting dari model (Brackstone and McDonald, 1999 dalam Rahman, 2004).

Ranjitkar, Nakatsuji dan Kawamura (2005) mengadakan penelitian untuk membandingkan berbagai *car following model* yang paling sering digunakan untuk analisis arus lalu lintas mikroskopis. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat tolak ukur dalam memilih model yang tepat. Beberapa *car following model* yang dibandingkan adalah *Chandler Model*, *Generalized General Motor Model*, *Gipps Model*, *Krauss Model*, *Leutzbach Model*, *Nagel Model*, *Bando Model* dan *Newell Model*. Untuk keperluan kalibrasi parameter-parameter dan validasi model digunakan data hasil pengamatan kendaraan yang bergerak beriringan dimana proses pengumpulan data direncanakan dengan sangat baik dan menggunakan peralatan yang canggih (RTK GPS). Kalibrasi parameter-parameter dan validasi model dilakukan dengan menggunakan teknik yang telah teruji. Hasil penelitian secara umum menunjukkan *Chandler Model* dan *Generalized General Motor Model* memiliki kinerja yang lebih baik dari model-model yang lain karena menghasilkan persentil *error* yang lebih rendah untuk memperkirakan kecepatan dan percepatan, sedangkan perkiraan jarak antar kendaraan menunjukkan *percentile error* yang kompetitif dengan model-model lainnya. Hal ini sejalan dengan beberapa literatur yang menyebutkan simulasi model yang dikembangkan berdasarkan *Generalized General Motor Model* untuk kendaraan yang terhalang menunjukan korelasi yang baik dengan data lapangan (Dalam Raharjo, 2013).

### **Model Car Following untuk Simulasi Arus Lalu Lintas pada Alur Pelayaran Sungai**

Pergerakan kapal di sungai dibatasi oleh kondisi alam dan karakteristik kapal. Pengendara kapal di alur pelayaran sungai harus mempertimbangkan kecepatan arus dan gelombang yang mempengaruhi pergerakan kapal, baik kapal dalam keadaan bergerak atau diam. Selain itu kapal tidak bisa mengerem seperti kendaraan di jalan raya. Perlambatan kapal maksimum dengan memutar balik putaran mesin yang membutuhkan jarak dan waktu tertentu sampai kapal berhenti. Hal tersebut membatasi perilaku pengendara dalam bermanuver di alur pelayaran sungai. Berbeda dengan kapal dialur sungai, kendaraan di jalan raya relatif stabil (permukaan jalan raya keras dan rata, kondisi tidak stabil hanya pada jalan-jalan yang rusak dan bergelombang) dan pengendara leluasa mengatur percepatan dan perlambatan dengan menggunakan perseneling, kopling dan rem dimana jarak henti kendaraan pendek terutama bila pengendara menginjak rem dengan keras (perlambatan maksimum). Beberapa penelitian menyimpulkan jarak henti kendaraan tidak lebih dari panjang mobil (Pipe, 1953; Forbes, 1958) sehingga mempengaruhi perilaku pengendara dalam mengemudi.

Berdasarkan dari penjelasan diatas, disimpulkan *General Motor Model* cukup realistis untuk menjelaskan interaksi kapal-kapal terdekat di dalam sistem alur pelayaran sungai sehingga dapat digunakan sebagai aturan simulasi. Secara lebih detil pertimbangan digunakannya *General Motor Model* adalah sebagai berikut :

1. Beberapa penelitian menunjukkan model simulasi yang dikembangkan berdasarkan *General Motor Model* untuk kendaraan yang terhalang mempunyai korelasi yang baik dengan data lapangan.
2. Perhitungan yang rumit dari model- model lainnya bertujuan untuk memasukan pengaruh perilaku pengendara yang dominan dalam mempercepat atau memperlambat kendaraan di jalan raya sedekat mungkin dengan realita, dimana perilaku pengendara-pengendara tersebut bervariasi. Sebaliknya interaksi antara dua kapal yang berdekatan pada alur pelayaran sungai dibatasi oleh kondisi lingkungan dan karakteristik kapal sehingga mengurangi perilaku pengendara dalam bermanuver. Berdasarkan alasan tersebut, *General Motor Model* dianggap dapat menggambarkan perilaku pengendara untuk pergerakan kapal yang terhalang.
3. *General Motor Model* memiliki kelemahan dalam hal perilaku pengendara yang tidak realistis. Kekurangan ini dapat diselesaikan dengan membuat rezim. Rezim adalah pembagian wilayah/jarak yang menunjukkan tingkat respon dan kebebasan pengendara dalam memilih kecepatan serta menunjukkan apakah kendaraan terhalang dengan kendaraan di depan atau tidak.

## METODOLOGI PENELITIAN

Kajian dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan hasil studi literatur yang dilakukan secara komprehensif terhadap konsep-konsep *car following model* dan hasil survei melalui wawancara yang mendalam dengan kapten kapal dan peneliti angkutan sungai. Analisis dilakukan dengan membandingkan kelemahan dan kelebihan beberapa *car following model* berdasarkan literatur. Selanjutnya ditentukan satu *car following model* yang dapat digunakan sebagai aturan simulasi interaksi kapal-kapal di alur pelayaran sungai dengan beberapa penyesuaian terhadap karakteristik sungai, kapal dan pengendara. Penyesuaian-penyesuaian tersebut berdasarkan 303 literatur dan hasil wawancara.

## ANALISIS

### Penyesuaian Model Umum General Motor untuk Lalu Lintas Sungai

Semua *car following model* dikembangkan oleh para ahli lalu lintas untuk menggambarkan perilaku pengendara pada kendaraan yang bergerak beriringan di jalan raya. Untuk aplikasi *car following model* pada interaksi kapal-kapal yang berlayar beriringan di alur pelayaran sungai perlu dilakukan beberapa penyesuaian karena adanya perbedaan antara angkutan jalan raya dan angkutan sungai.

### Penentuan Rezim

Beberapa model hanya menggambarkan perilaku pengendara ketika mengikuti kendaraan yang terdekat, tetapi beberapa model yang lain secara lengkap menggambarkan perilaku pengendara dalam berbagai situasi (rezim). Model yang baik (realistis) harus mampu menunjukkan di rezim mana kendaraan berada dan tindakan yang harus dilakukan oleh pengendara pada rezim tersebut.

Model-model car following menggunakan beberapa rezim untuk menggambarkan perilaku pengemudi di belakang yang mengiringi kendaraan di depan. Secara garis besar rezim dibagi menjadi tiga, yaitu :

1. Kendaraan Bebas (free driving)  
Kendaraan di dalam rezim ini tidak terhalang oleh kendaraan lain dan pengemudi mampu memacu kecepatannya sampai dengan kecepatan yang diinginkan.
2. Kendaraan Terhalang Secara Normal (normal driving)  
Pada rezim ini, kendaraan mengatur kecepatannya tergantung kepada kecepatan dan jarak kendaraan di depan.
3. Kendaraan Terlalu Dekat (emergency deceleration)  
Kendaraan sudah terlalu dekat dengan kendaraan di depan dan harus dipaksa melakukan perlambatan sampai jarak antara dua kendaraan melebar dan keluar dari rezim darurat untuk menghindari tabrakan.

Umumnya jumlah rezim pada model car following yang diaplikasikan pada jalan raya bervariasi antara dua sampai lima. Tetapi pada model simulasi arus lalu lintas sungai dapat digunakan tiga rezim seperti yang telah dijelaskan di atas.

Pada rezim bebas, kapal-kapal berlayar disekitar kecepatan yang diinginkan dan perubahan kecepatan hanya terjadi karena pengaruh geometrik alur sungai. Setelah ambang batas rezim bebas terlampaui, maka kapal mulai terhalang dan harus mengatur kecepatan dan jarak dengan kendaraan di depan.

Untuk menentukan apakah kapal berlayar bebas atau terhalang oleh kapal di depan berdasarkan ambang batas jarak, yaitu:

1. Jarak antar kapal > ambang batas jarak, maka kapal bebas berlayar tanpa terhalang oleh kapal di depan.
2. Jarak antar kapal < ambang batas jarak, maka pergerakan kapal terhalang oleh kapal di depan, sehingga berlaku aturan car following di dalam sistem.

Menurut Sutomo (1992), Ambang batas jarak dua kendaraan yang bergerak beriringan di jalan raya ditentukan sebagai berikut:

$$\text{minGap} = (\text{norStopDistance})_{\text{rear}} + (\text{minSpacing})_{\text{rear-front}} - (\text{brakeDistance})_{\text{front}} \quad (1)$$

Dimana:

$\text{minGap}$  = ambang batas jarak

$\text{norStopDistance} = T \dot{x}_{n+1}(t) + (\dot{x}_{n+1}(t))^2 / 2 a_r$

$\text{brakeDistance} = (\dot{x}_n(t))^2 / 2 a_m$ ;  $a_m$  : tingkat perlambatan maksimum

$\text{minSpacing} = x_n(t + S) - x_{n+1}(t + S) = \text{minimum clearance}$  antara dua kendaraan; S: waktu dari t sampai semua kendaraan stop.

T : waktu reaksi

$\dot{x}_n(t)$  : kecepatan kapal di depan pada waktu t

$\dot{x}_{n+1}(t)$  : kecepatan kapal yang mengikuti pada waktu t

$a_r$  tingkat perlambatan normal. Menurut Sutomo (1992), tingkat perlambatan ini diasumsikan dilakukan tanpa menginjak rem, tetapi hanya memainkan gas dan gigi kendaraan untuk mengurangi kecepatan.

Persamaan (1) yang diusulkan oleh Sutomo dapat digunakan untuk menentukan ambang batas jarak dengan beberapa penyesuaian dalam rangka penentuan rezim.

Terdapat perbedaan antara moda angkutan sungai dengan angkutan jalan raya dalam cara memperlambat atau mempercepat kendaraan. Untuk kapal yang berlayar di alur pelayaran, ada tiga cara kapten kapal melakukan perlambatan atau percepatan, yaitu dengan mengatur kemudi, mematikan mesin kapal dan memutar balik arah putaran mesin (Soebekti, 2012). Perlambatan normal adalah suatu kondisi dimana kapten kapal mengurangi kecepatan dengan menggunakan kemudi. Besar perlambatan normal dengan menggunakan kemudi dapat diperoleh dari survei lapangan, yaitu wawancara dengan operator kapal dan ekspresmen kapal uji.

Untuk menjamin tidak terjadi kecelakaan maka harus ditentukan jarak minimum yang menunjukkan bahwa kapal sudah terlalu dekat dengan kapal di depan. Persamaan yang digunakan untuk menentukan jarak minimum sama dengan Persamaan (1), kecuali *normal stop distance* (*norStopDistance*) digantikan oleh *minimum stop distance* (*minStopDistance*).

$$\text{minStopDistance} = T\dot{x}_{n+1}(t) + (\dot{x}_{n+1}(t))^2 / 2 a_m \quad (2)$$

Perlambatan maksimum untuk kapal yang berlayar di alur pelayaran sungai ditentukan berdasarkan perlambatan dengan mesin kapal diputar balik dengan kecepatan penuh.

### **Pengaruh Arah dan Kecepatan Arus Sungai Terhadap Kecepatan**

Berbeda dengan jalan raya dimana percepatan dan perlambatan kendaraan dipengaruhi oleh kelandaian jalan, maka percepatan dan perlambatan kapal di alur sungai dipengaruhi oleh kecepatan arus sungai (ASCE, 2005; Frima, 2004). Pengaruh kecepatan arus sungai terhadap *car following model* tidak merupakan bagian dari pembahasan makalah ini.

### **Penentuan posisi kapal dan Kecepatan Kapal pada waktu tertentu (t)**

Komputer akan selalu memperbaharui informasi mengenai posisi kapal, percepatan dan kecepatan pada interval waktu tertentu. Besar interval waktu tergantung kepada tingkat keakuratan yang dibutuhkan. Lebih kecil interval waktu, lebih baik akurasi. Posisi dan kecepatan kendaraan mengikuti Hukum Newton, sedangkan akselerasi mengikuti model *car following*. Oleh karena itu persamaan yang mengatur suatu arus lalu lintas dapat dikembangkan sebagaimana dibawah ini dengan interval waktu *update* adalah  $\Delta t$  (Mathew, 2014).

$$V_{tn} = v_{nt} + \Delta t + a_{nt} + \Delta t \times \Delta t \quad (3)$$

$$X_{tn} = x_{nt} + \Delta t + v_{nt} \Delta t + \Delta t \times \Delta t + \frac{1}{2} a_{nt} \Delta t \quad (4)$$

Persamaan  $V_n^t$  adalah suatu versi simulasi dari hukum gerak newton sederhana  $v = u + at$  dimana  $X_n^t$  adalah versi dari hokum newton sederhana lainnya, yaitu  $s = ut + \frac{1}{2} at^2$ .

## **KESIMPULAN**

*Generalized General Motor Model* dapat digunakan untuk menjelaskan interaksi antara dua kapal yang bergerak beriringan dengan beberapa penyesuaian. Kelemahan dalam hal perilaku pengendara yang tidak realistis ketika jarak antara dua kendaraan besar dan kendaraan yang berjalan pelan akan terseret menjadi lebih cepat bila kendaraan di depan bergerak dengan kecepatan lebih tinggi dapat diselesaikan dengan membuat rezim berdasarkan persamaan yang diusulkan oleh Sutomo (1992) dengan penyesuaian pada percepatan normal, maksimum dan minimum. Pengaruh kecepatan arus sungai terhadap



percepatan dan kecepatan kapal harus diperhitungkan pengaruhnya dan diusulkan untuk penelitian selanjutnya.

## REFERENSI

- ASCE. 2005. *Ship Channel Design and Operation*. Manuals and Report on Engineering Practice No. 107.
- Frima, A. 2004. Capacity Study for the Rio de la Plata Waterway, Argentina, *Thesis for Magister Degree*. Civil Engineering Ports and Waterways, Technische Universiteit Delf, Belanda.
- Hoogendoorn, Serge P., and Bovy, Piet H.L. 2000. 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*.
- Kesting, Arne., and Treiber, Martin. 2008. Calibrating Car-Following Models using Trajectory Data: Methodological Study. *Journal of the Transportation Research Board*, 2088, 148-156.
- Maryono, Agus. 2003. *Pembangunan Sungai Dampak dan Restorasi Sungai*, Yogyakarta: UGM Press.
- Matthew, Tom V. 2014. *Transportation Systems Engineering*. Bombay, India: IIT
- May, A.D. 1990, *Traffic Flow Fundamental*. New Jersey, U.S.A: Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Olstam, J.J., and Tapani, Andreas. 2004. Comparison of Car-Following models. *VTI meddelande 960 A*.
- Panwai, Sakda., and Dia, Hussein. 2005. Development and Evaluation of A Reactive Agent-Based Car Following Model. *ITS Research Laboratory*. Departement of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane.
- Peng, G., and Sun, D. 2010. A Dynamical Model of Car-Following with the Consideration of the Multiple Information of Preceding. *Physics Letters A, Vol.274, No. 15-16, pp. 1694-1698, 2010*.
- Raharjo, Effendhi Pri. 2013. Pengembangan Model Kapasitas Bagian Jalanan Jalan (Weaving Section) di Jalan Tol. *Doctoral Dissertation*. Rekayasa Transportasi, Institut Teknologi Bandung (unpublished).
- Rahman, M. Md. 2013. Application on Parameter Estimation and Calibration Method for Car Following Models. *Thesis for Magister Degree*. Departement of Civil Engineering, Clemson University.
- Ranjitkar, Prakash., Nakatsuji, Takashi., and Kawamura, Akira. 2005. Car-Following Models: An Experiment Based Benchmarking. *Journal of the Eastern Asia for Transportation Studies, Vol.6, pp. 134:6, 236-245*.
- Soebekti, H.R. 2012. *Intisari Olah Gerak Kapal*. Yogyakarta: deepublish.
- Sutomo, Heru. 1992. Appropriate Saturation Flow At Traffic Signals in Javanese Cities: A Modelling Approach. *Doctoral Dissertation*. Institute for Transportation Studies, The University of Leeds.
- Tuan, V. A. 2011 Making Passenger Inland Waterways A Sustainable Transport Mode in Asia Current Situation and Challenges. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 8, 2011*.

Zhou, W., and Zhang, S. 2003. Analysis of Distance Headways. *Proceeding of the Eastern Society for Transportation Studies, Vol. 4, October, 2003*