

PENDEKATAN PEMODELAN "DIAGRAM FUNDAMENTAL POLINOMIAL" UNTUK RUAS JALAN BEBAS HAMBATAN

MODELING APPROACH OF "POLYNOMIAL FUNDAMENTAL DIAGRAM" FOR FREE WAY SEGMENTS

Mulyadi Sinung Harjono dan Wimpie Agoeng Noegroho Aspar

Pusat Teknologi Industri dan Sistem Transportasi
Deputi Teknologi Industri Rancang Bangun dan Rekayasa - BPPT
Gedung Teknologi 2 (251) Lantai 3 Komplek PUSPIPTEK Serpong, Tangerang Selatan 15314
Telp: 021-75875943; Facs. 021-75875946
email: wimpie.agoeng@bppt.go.id

Abstrak

Perilaku pergerakan banyak kendaraan pada ruas jalan bebas hambatan menjadi dasar bagi pengembangan banyak pemodelan lalu-lintas. Pengembangan pemodelan lalu-lintas jumlah kendaraan secara makroskopik dipergunakan pada jaringan jalan yang luas. Penelitian ini bertujuan untuk menemukan hubungan antara tingkat pelayanan jalan dengan diagram fundamental. Dengan demikian hubungan ini dapat dimanfaatkan untuk mengembangkan sistem informasi bagi pemangku kepentingan transportasi ataupun pengendalian aliran arus pada jalan bebas hambatan. Tujuan penelitian berikutnya menitik beratkan pada penentuan kecepatan rata-rata banyak kendaraan efektif berdasarkan tingkat pelayanan jalan. Hubungan spesifik antar parameter makroskopik untuk kondisi lalu lintas tertentu pada satu ruas jalan tunggal terjadi pada saat kondisi keadaan mantab dan kondisi equilibrium. Kondisi lalu lintas rata-rata secara praktis diambil pengukuran parameter makroskopik setelah kondisi stabil tercapai dan valid. Pemodelan yang diperoleh berdasarkan pada pemetaan kondisi equilibrium. Pada diagram antar parameter makroskopik tersebut disebut sebagai Diagram Fundamental Lalu-Lintas bagi ruas jalan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kondisi aliran arus kendaraan tertinggi diperoleh kepadatan kendaraan maksimum. Apabila kecepatan rata-rata banyak kendaraan pada kondisi arus bebas (*free flow*) ditetapkan sesuai kecepatan maksimum desain yaitu 120 km/jam, maka diperoleh headway dan gap masing-masing kendaraan adalah 1,5 detik dan 50 meter. Diagram Fundamental Polinomial yang terjadi dapat membantu bagi pengambil kebijakan untuk menentukan pola aliran arus kendaraan, pengendalian optimal dan rekayasa transportasi.

Kata kunci : kecepatan kendaraan, diagram fundamental polinomial, tingkat pelayanan jalan, sistem transportasi cerdas, kondisi lalu-lintas mikroskopik

Abstract

Behaviour movement of vehicles on the highway segment is the basis for the development of a lot of traffic modeling. Development of traffic modeling on the number of vehicles is used macroscopically for an extensive road network. This study aims to find the relationship between the level of service to the fundamental diagram. Therefore, this relationship can be used to develop information systems for the transportation stakeholders or control the current flow on the freeway. The next research goal focuses on determining the average speed of vehicles effectively based on the level of service. Specific relationship between macroscopic parameters for specific traffic conditions on a single road section occurs when steady state conditions and equilibrium conditions were achieved. Average traffic conditions practically were taken on the measurements of

macroscopic parameters after steady state is reached and valid. Modeling was obtained based on mapping the equilibrium conditions. The diagram between the macroscopic parameter is called the Fundamental Traffic Diagram for road segments. The results of the research showed that the highest vehicular traffic flow conditions gives maximum density of vehicles. If the average speed of vehicles on the condition of free flow determined in accordance maximum design speed of 120 km/h, the headway and each vehicle gap would be 1.5 seconds and 50 meters, respectively. It is very meaningful for policy makers to determine the flow traffic pattern and transport engineering.

Keywords : vehicle travel speed, polynomial fundamental diagrams, road link level of services, intelligent transportation system, microscopic traffic conditions

Diterima (recieved) : 18 Juni 2015, Direvisi (Revised) : 06 Juli 2015, Disetujui (Accepted) : 28 Juli 2015

PENDAHULUAN

Perilaku pergerakan banyak kendaraan pada ruas jalan bebas hambatan menjadi dasar bagi pengembangan banyak pemodelan lalu-lintas. Pengembangan pemodelan lalu-lintas banyak kendaraan secara makroskopik dipergunakan pada jaringan jalan yang luas. Karakteristik pemodelan makroskopik ditunjukkan oleh fenomena diagram fundamental pada parameter fisik ruas jalan, yaitu: kepadatan kendaraan, aliran arus kendaraan dan kecepatan rata-rata banyak kendaraan. Pelaksanaan pemodelan ruas jalan secara makroskopik dilakukan dengan membagi jaringan ke dalam ruas jalan tunggal dengan masing-masing ruas jalan dapat memiliki karakteristik diagram fundamental yang berbeda.

Evaluasi kinerja ruas jalan dilakukan berdasarkan tingkat pelayanan jalan (*Level of Service* = LOS). Hasil evaluasi kualitatif ruas jalan ditunjukkan oleh rentang pemanfaatan ruang jalan oleh kendaraan terhadap kapasitas maksimum, baik sesuai perencanaan pembangunan ataupun kapasitas pada kondisi sebenarnya.

Penelitian ini bertujuan untuk menemukan hubungan antara tingkat pelayanan jalan dengan diagram fundamental. Dengan demikian hubungan ini dapat dimanfaatkan untuk mengembangkan sistem informasi bagi pemangku kepentingan transportasi ataupun pengendalian aliran arus pada jalan bebas hambatan. Tujuan penelitian berikutnya menitik beratkan pada penentuan kecepatan rata-rata banyak kendaraan efektif berdasarkan LOS.

Makalah penelitian ini tersusun sebagai berikut. Bagian bahan dan metode membahas tentang pemodelan kondisi lalu lintas makroskopik terkait parameter

makroskopik utama, diagram fundamental serta sudut pandang parameter secara mikroskopik. Hasil dan pembahasan menguraikan mengenai diskretisasi jaringan jalan, kondisi lalu lintas pada diagram fundamental saat saturasi dan diatas saturasi serta tingkat pelayanan jalan. Makalah ini diakhiri dengan simpulan.

BAHAN DAN METODE

Parameter Makroskopik Utama

Pendekatan pemodelan kondisi lalu lintas secara makroskopik untuk suatu ruas jalan x saat t berdasarkan pada hukum kekekalan arus kendaraan^{1,2)} sesuai Persamaan (1).

$$\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x,t)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

dengan $\rho(x,t)$ adalah kepadatan kendaraan dan $q(x,t)$ adalah aliran arus kendaraan. Selanjutnya, apabila dinamika kondisi lalu lintas didekati sesuai prinsip hidrodinamik untuk arus pergerakan partikel atau gas-kinetik³⁾ yang terbatas pada satu ruas jalan x tertentu, maka diperoleh hubungan matematis untuk parameter makroskopik yang ketiga berdasar Persamaan (2).

$$q_x(t) = \rho_x(t) \cdot v_x(t) \quad (2)$$

Dengan parameter v_x adalah kecepatan rata-rata banyak kendaraan (*average speed*), ρ_x adalah kepadatan kendaraan (*density*) dan q_x adalah aliran arus kendaraan (*throughput, traffic-flow*). Hubungan antar ketiga parameter makroskopik utama tersebut berlaku terbatas untuk satu ruas jalan x tertentu pada saat waktu t . Diagram estimasi hubungan matematis antara ketiga parameter makroskopik tersebut disebut

sebagai Diagram Fundamental Lalu-Lintas atau Diagram Fundamental.

Diagram Fundamental Lalu-lintas

Diagram fundamental lalu lintas dapat diselesaikan antara lain menggunakan prinsip yang dikembangkan oleh Greenshields, Greenberg, demikian pula prinsip triangular ataupun hidrodinamik⁴⁾. Diagram Fundamental pada penelitian ini dimodelkan secara matematis sesuai prinsip hidrodinamik^{5,6)} untuk memperoleh diagram hubungan antara parameter aliran arus kendaraan setimbang $Q_{e,x}$ terhadap kepadatan kendaraan ρ_x dan berlaku terbatas ruas jalan x tertentu. Pemanfaatan prinsip hidrodinamik bertumpu pada asumsi kecepatan rata-rata banyak kendaraan setimbang $V_{e,hd}$ terbatas pada ruas jalan x tertentu, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3).

$$V_{e,hd}(\rho_x) = v_{free} \cdot \exp\left(-\frac{1}{a_{hd}} \cdot \frac{\rho_x}{\rho_{crit}}\right) \quad (3)$$

dengan v_{free} adalah konstanta kecepatan rata-rata banyak kendaraan pada kondisi arus bebas; ρ_{crit} adalah konstanta kepadatan kendaraan kritical saat aliran arus kendaraan maksimum; a_{hd} adalah koefisien koreksi hasil pengukuran lapangan setempat untuk kecepatan rata-rata stasioner pada Diagram Fundamental Lalu-Lintas Hidrodinamik.

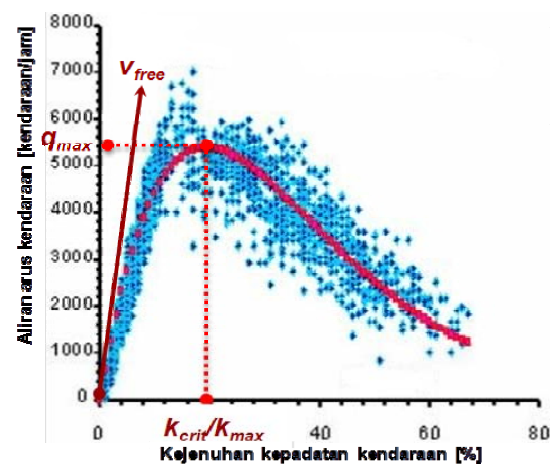
Berdasarkan Persamaan (2) dan (3) yang hanya terbatas pada ruas jalan x tertentu, maka diperoleh Diagram Fundamental antara aliran arus kendaraan setimbang $Q_{e,x}$ yang tergantung pada kepadatan kendaraan ρ_x sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (4).

$$Q_{e,x}(\rho_x) = \rho_x \cdot v_{free} \cdot \exp\left(-\frac{1}{a_{hd}} \cdot \frac{\rho_x}{\rho_{crit}}\right) \quad (4)$$

Contoh penerapan Diagram Fundamental Lalu-Lintas Hidrodinamik yang dapat dibentuk berdasarkan Persamaan (4) adalah sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 1.

Sumbu horizontal pada Gambar 1 menunjukkan kepadatan kendaraan dalam persen terhadap maksimum kepadatan kendaraan sesuai kapasitas jalan. Sumbu vertikal adalah besaran aliran arus kendaraan dalam satuan kendaraan per jam. Setiap titik biru menunjukkan hasil pengukuran aliran arus kendaraan terhadap kepadatan kendaraan pada kondisi mantab (*steady state*). Apabila pengukuran kondisi lalu lintas dilakukan selama kurun waktu yang mencukupi sedemikian rupa, sehingga berbagai kondisi lalu lintas untuk ruas jalan tersebut dapat terwakili dengan baik, maka

sifat kesetimbangan pada Diagram Fundamental dapat terpenuhi. Titik merah memperlihatkan hasil estimasi matematis Diagram Fundamental sesuai prinsip hidrodinamik dengan diagram aliran arus kendaraan $Q_{e,x}$ terhadap kepadatan kendaraan ρ_x . Pada Gambar 1 ditunjukkan pula aliran arus kendaraan maksimum q_{max} yang terjadi pada kepadatan kendaraan kritical $\rho_{x,crit}$ dan diperlihatkan pula kecepatan rata-rata banyak kendaraan pada kondisi arus bebas v_{free} . Penggolongan kondisi lalu lintas pada Diagram Fundamental adalah kondisi arus bebas (*free-flow state*), arus stabil (*stabil state*), arus tertahan (*synchronized state*).



Gambar 1.
Diagram Fundamental Lalu-Lintas Hidrodinamik⁷⁾

Parameter Makroskopik Lanjutan

Apabila kondisi lalu lintas rata-rata secara makroskopik berdasarkan diagram fundamental, didekati dengan model mikroskopik yang berbasis pergerakan individual kendaraan sesuai Kesting⁸⁾, maka didalam potongan ruas jalan x tersebut terdapat asumsi, bahwa

- semua kendaraan bergerak dengan kecepatan yang sama v_x ,
- tidak terdapat perbedaan kecepatan individual antar kendaraan ($\Delta v_a=0$), dan
- setiap kendaraan tersebut tidak memiliki percepatan ($dv_a/dt=0$ dan $dv_{(a-1)}/dt=0$).

Dengan demikian, setiap kendaraan individual mempertahankan jarak tetap terhadap kendaraan di depannya (*equilibrium gap* $s_e(v_a)$). Jarak tetap antar kendaraan ini bergantung pada kepadatan kendaraan ρ_x pada ruas jalan x . Berdasarkan kesamaan $s_e(v_a)$ tersebut, maka selisih waktu antar kendaraan (*equilibrium time gap*) ataupun waktu kedatangan antar kendaraan (*vehicle inter arrival time* atau *headway*) adalah juga

tetap. Dengan demikian, berdasarkan kesamaan $s_e(v_a)$ dan kesamaan *headway*, maka masing-masing kendaraan diasumsikan tersebar secara homogen di dalam ruas jalan dan kendaraan bergerak dengan kecepatan rata-rata banyak kendaraan equilibrium $v_x(t)$ yang sama dan tanpa percepatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Diskritisasi Jaringan Jalan

Jaringan jalan x pada penelitian secara makroskopik dibagi (diskritisasi) ke dalam banyak ruas jalan tunggal x_i . Setiap ruas jalan tunggal tersebut memiliki karakteristik diagram fundamental lalu-lintas yang berbeda sesuai dengan desain dan kondisi infrastruktur jalan. Masing-masing potongan ruas jalan tunggal x_i tersebut berawal dari titik ruas jalan x_i dengan panjang ruas jalan l_i . Dengan demikian berlaku Persamaan (5).

$$x = \sum x_i \quad (5)$$

Setiap model satu ruas jalan tunggal memiliki asumsi karakteristik makroskopik yang sama dan homogen selama inkremen waktu saat t hingga $t+\Delta t$.

Hubungan spesifik antar parameter makroskopik untuk kondisi lalu lintas tertentu pada satu ruas jalan tunggal terjadi pada saat kondisi keadaan mantab dan kondisi *equilibrium*. Kondisi lalu lintas rata-rata secara praktis diambil data pengukuran parameter makroskopik setelah kondisi stabil tercapai (*steady state*) dan valid, yaitu setelah inkremen waktu saat t hingga mencapai $t+\Delta t$. Apabila banyak kondisi lalu lintas rata-rata *steady state* untuk ruas jalan x_i telah dicatat dan dikumpulkan selama kurun waktu mencukupi sedemikian rupa, sehingga seluruh kemungkinan kondisi lalu lintas rata-rata *steady state* dapat terwakili dengan baik, maka diperoleh catatan kondisi lalu lintas *equilibrium* untuk ruas jalan x_i . Pada kondisi *equilibrium* ini diperoleh segala kemungkinan keterkaitan antar parameter makroskopik yang tidak tergantung dari fungsi waktu. Pemodelan yang diperoleh berdasarkan pada pemetaan kondisi *equilibrium* pada diagram antar parameter makroskopik tersebut disebut sebagai Diagram Fundamental Lalu-Lintas bagi ruas jalan tersebut.

Saturasi pada Diagram Fundamental

Kondisi lalu-lintas pada Diagram Fundamental dapat diuraikan menjadi kondisi lalu lintas dibawah saturasi untuk kepadatan

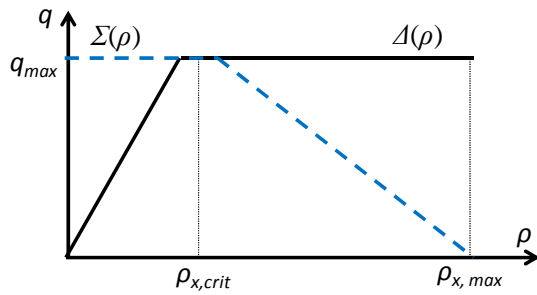
kendaraan kurang dari $\rho_{x,crit}$ atau untuk aliran arus kendaraan di bawah q_{max} . Pada kondisi lalu lintas di bawah saturasi terdapat kondisi arus bebas sampai kondisi arus stabil. Selanjutnya, untuk kepadatan kendaraan lebih dari $\rho_{x,crit}$ diperoleh kondisi arus lalu lintas di atas saturasi dengan kondisi arus lalu lintas stabil, arus tertahan hingga macet total (*jammed*). Pada titik kondisi saturasi saat kepadatan kendaraan sebesar $\rho_{x,crit}$ diperoleh aliran arus kendaraan maksimum q_{max} . Berdasarkan penelitian Flötteröd dan Rohde⁹⁾ secara matematis penguraian diagram fundamental berdasarkan saturasi adalah sebagaimana Persamaan (6).

$$q_x(t) = \min \{ \Delta(\rho(x-,t),x-), \Sigma(\rho(x+,t),x+) \} \quad (6)$$

dengan $\Delta(\rho)$ adalah fungsi *demand*, yaitu suatu fungsi permintaan, yaitu suatu fungsi yang menunjukkan pengaruh ruas jalan $x-1$ (*upstream*) yang berakibat pada aliran arus masuk ke dalam ruas jalan x . Pola aliran arus kendaraan pada fungsi permintaan secara umum adalah meningkat sesuai dengan meningkatnya kepadatan kendaraan. Apabila peningkatan kepadatan kendaraan pada fungsi *demand* tersebut telah mengakibatkan tercapainya aliran arus kendaraan maksimum q_{max} , maka peningkatan kepadatan kendaraan pada fungsi *demand* lebih lanjut hanya menghasilkan aliran arus kendaraan yang tetap sebesar q_{max} .

Selanjutnya, $\Sigma(\rho)$ adalah fungsi pasokan, yaitu fungsi ketersediaan kapasitas ruas jalan x (*downstream*) dalam menerima aliran arus masuk. Pola aliran arus kendaraan pada fungsi pasokan secara umum untuk kepadatan kendaraan lebih kecil dari $\rho_{x,crit}$ adalah tetap sebesar q_{max} . Ketika kepadatan kendaraan meningkat lebih besar dari $\rho_{x,crit}$, maka pola aliran arus kendaraan secara umum adalah menurun sesuai dengan meningkatnya kepadatan kendaraan.

Pembahasan ini menunjukkan, bahwa fungsi permintaan dipicu oleh pengaruh arus di hulu (*upstream*) dan fungsi pasokan bergantung pada ketersediaan kapasitas pada hilir. Interaksi fungsi *demand* dan fungsi pasokan secara matematis diwujudkan dalam bentuk operator minimum. Hasil interaksi ini membentuk diagram fundamental dalam bentuk sederhana sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2 dengan kisaran nilai kepadatan kendaraan adalah antara 0 sampai $\rho_{x,max}$ dan aliran arus kendaraan antara 0 sampai q_{max} .



Gambar 2. Interaksi fungsi permintaan dan pasokan⁹⁾

Selanjutnya pemodelan dilakukan dengan simulasi dinamik sistem kejadian diskrit (*Discrete Event Dynamic System - DEDS*) dengan kemampuan menggabungkan pemodelan modular, secara grafis dan formulasi matematis. Sifat hubungan antara setiap komponen modular, antara lain: *concurrent, parallel*, ataupun *non-deterministic*^{11,12,13,14)}.

Sebelum melakukan estimasi terhadap aliran arus kendaraan sesuai diagram fundamental equilibrium berdasarkan Q_e (aliran arus kendaraan equilibrium), maka perlu diperhatikan hukum kekekalan kendaraan untuk setiap potongan ruas jalan x_i saat t , yaitu dari Persamaan (1) menjadi Persamaan (7).

$$\partial \rho_{xi}(t) / \partial t + \partial Q_e(\rho_{xi}(t)) / \partial x = 0 \quad (7)$$

Dengan demikian, estimasi aliran arus kendaraan equilibrium Q_e saat t dapat diperoleh sebagaimana Persamaan (8).

$$Q_e(\rho_{xi}(t)) = \rho_{xi}(t) \cdot V_e(\rho_{xi}(t)) \quad (8)$$

dengan Q_e tergantung pada kepadatan kendaraan aktual ρ_{xi} saat t , dengan mempertimbangkan kecepatan rata-rata banyak kendaraan equilibrium V_e yang tergantung juga pada kepadatan kendaraan aktual ρ_{xi} saat t .

Diagram fundametal untuk arus lalu lintas terhadap kepadatan kendaraan tersusun atas kondisi arus lalu lintas dibawah saturasi dan diatas saturasi. Pada ruas jalan dengan kondisi dibawah saturasi, peningkatan kepadatan kendaraan secara umum diikuti oleh peningkatan arus lalu lintas. Pada kondisi diatas saturasi, terjadi penurunan arus lalu lintas pada peningkatan kepadatan kendaraan. Kedua kondisi arus lalu lintas tersebut dibatasi oleh kepadatan kendaraan kritikal.

Tingkat Pelayanan Jalan

Ketentuan untuk evaluasi kinerja tingkat pelayanan jalan (*Level of Service - LOS*) diperoleh dari *Highway Capacity Manual (HCM)*¹⁰⁾. Metode yang digunakan HCM

untuk penentuan LOS tergantung pada jenis aliran arus kendaraan, baik yang *interrupted* maupun *uninterrupted*. Penelitian ini fokus pada aliran arus kendaraan *interrupted* sebagaimana terdapat pada jalan bebas hambatan¹⁵⁾. Kriteria LOS pada HCM¹⁰⁾ ini dikembangkan berbasis pada perangkat pencacah kendaraan yang mampu memberikan keluaran parameter makroskopik, yaitu besar kepadatan kendaraan dan aliran arus kendaraan. Rentang kepadatan kendaraan untuk penentuan kriteria LOS adalah sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1. Tingkat pelayanan jalan terbagi atas kelas A sampai F dengan kelas A untuk kondisi terbaik, sedang kelas F untuk kondisi tertahan. Kriteria tingkat pelayanan jalan terhadap kepadatan kendaraan ditunjukkan pada Tabel 1 ini.

Tabel 1. Kriteria LOS terhadap Kepadatan Kendaraan¹⁰⁾

| LOS | Kepadatan Kendaraan [smp/km] |
|-----|------------------------------|
| A | 0 - 7 |
| B | 7 - 11 |
| C | 11 - 16 |
| D | 16 - 22 |
| E | 22 - 28 |
| F | > 28 |

Metode menggunakan HCM¹⁰⁾ selama ini digunakan sebagai *off-line decision support tool* pada perencanaan dan desain jalan. Oleh karena itu, diperlukan kriteria LOS baru untuk analisa *real time* pada ruas jalan bebas hambatan yang dapat dipergunakan sebagai sistem informasi pengguna jalan, masukan bagi instansi pemegang kebijakan transportasi maupun pengembangan strategi kendali jaringan jalan.

Berdasarkan kedua parameter makroskopik yang diambil secara real time, maka kecepatan rata-rata banyak kendaraan dapat diestimasi secara efektif dengan menggunakan nilai pertengahan (median) pada satu rentang kepadatan kendaraan berdasarkan LOS. Tabel 1 tersebut diturunkan parameter aliran arus kendaraan, yang didefinisikan sebagai jumlah kendaraan yang mengalir selama kurun waktu tetap tertentu pada satu ruas jalan tertentu sesuai dengan area pemantauan kepadatan kendaraan. Aliran arus kendaraan pada pengukurannya dapat pula ditunjukkan sebagai derajat kejenuhan (VC Rasio), yaitu rasio antara aliran arus kendaraan terhadap kapasitas aliran arus kendaraan maksimum (q_{max}).

Sebagai contoh adalah tingkat pelayanan jalan bebas hambatan pada Tabel 2. Satuan aliran arus kendaraan dalam contoh ini adalah satuan mobil penumpang per jam (smp/jam). Untuk lalu lintas jalan bebas hambatan dapat diketahui, bahwa tingkat pelayanan jalan untuk lalu lintas bebas hambatan tergantung pada derajat kejenuhan (*V/C ratio* atau rasio aliran arus kendaraan) terhadap kecepatan rata-rata (banyak kendaraan). Kombinasi parameter tingkat pelayanan jalan ini merupakan bagian dari diagram fundamental kesetimbangan lalu lintas.

Tingkat pelayanan jalan terbagi atas kelas A-F dengan kelas A untuk kondisi terbaik, sedang kelas F untuk kondisi terburuk. Klasifikasi tingkat pelayanan jalan dan kondisi lalu lintas untuk lalu lintas perkotaan mengacu pada parameter rasio kejenuhan aliran arus kendaraan, kejenuhan (*V/C ratio*), dan kecepatan rata-rata banyak kendaraan untuk ruas persimpangan jalan.

Rasio kejenuhan atau derajat kejenuhan (*V/C ratio*) untuk ruas jalan adalah perbandingan antara jumlah rata-rata kendaraan (*V*) yang lewat setiap jam terhadap kapasitas (*C*) kendaraan setiap jam yang disebut juga sebagai perbandingan aliran arus kendaraan. *Load factor* adalah derajat kejenuhan (*V/C ratio*) khusus untuk ruas persimpangan jalan. Volume dan kapasitas kendaraan pada ruas jalan tersebut dihitung dalam satuan mobil penumpang per jam (smp/jam). Parameter kecepatan perjalanan rata-rata adalah kecepatan rata-rata banyak kendaraan yang berada dalam ruas jalan selama inkremen waktu pengukuran tertentu. Parameter kondisi lalu lintas digolongkan dalam tingkat pelayanan jalan secara kualitatif, agar mudah dipahami pengguna jalan. Kondisi lalu lintas tersebut terbagi atas kondisi arus bebas, arus stabil dan arus tertahan.

Selanjutnya tingkat pelayanan jalan dibedakan untuk jalan bebas hambatan dan jalan lalu lintas perkotaan, yaitu jalan arteri primer, jalan kolektor primer, jalan lokal sekunder, jalan arteri sekunder dan jalan kolektor sekunder. Pelaksanaan penetapan jenis kelas jalan ini ditentukan oleh pemerintah¹⁶⁾. Sedangkan tingkat rasio volume terhadap kapasitas jalan berdasarkan HCM ditunjukkan pada Tabel 2 kolom 3. Nilai rasio tersebut relatif lebih besar karena adanya pengaruh perbedaan pengambilan standard operasional yang digunakan.

Metode *V/C ratio* selama ini digunakan sebagai *off-line decision support tool* pada perencanaan dan desain jalan. Oleh karena itu perlu dikembangkan kriteria LOS baru

untuk analisa real-time pada ruas jalan bebas hambatan yang dapat dipergunakan sebagai sistem informasi pengguna jalan, masukan bagi instansi pemegang kebijakan transportasi maupun pengembangan strategi kendali jaringan jalan.

Berdasarkan kedua parameter makroskopik yang diambil secara real-time, maka kecepatan rata-rata banyak kendaraan dapat diestimasi secara efektif dengan menggunakan nilai pertengahan (median) pada satu rentang kepadatan kendaraan berdasarkan LOS.

Pembuktian Pemodelan Tingkat Pelayanan Jalan

Pemodelan tingkat pelayanan jalan secara matematis dalam penelitian ini menggunakan pendekatan pemodelan diagram fundamental hidrodinamik sebagaimana Persamaan (3) dan (4). Berdasarkan Tabel 1 dapat diperoleh data untuk parameter utama pembentuk Persamaan (3) dan (4), yaitu kecepatan rata-rata banyak kendaraan sebesar 100 km/jam saat arus bebas dan kecepatan rata-rata banyak kendaraan sebesar 65 km/jam untuk arus stabil dengan kepadatan kendaraan kritis. Berdasarkan kondisi ini, maka keseluruhan parameter untuk pemodelan diagram fundamental hidrodinamik telah dapat diperoleh. Pemodelan berdasarkan tingkat pelayanan jalan ini hanya berlaku untuk kondisi lalu lintas dibawah saturasi.

Pembahasan Pemodelan untuk Kondisi Arus Lalu Lintas Diatas Saturasi

Pada kondisi aliran arus kendaraan tertinggi (2.400 smp/jam) diperoleh kepadatan kendaraan maksimum (28 smp/km). Apabila kecepatan rata-rata banyak kendaraan pada kondisi arus bebas (free flow) ditetapkan sesuai kecepatan maksimum desain 120 km/jam, maka diperoleh *headway* dan gap masing-masing kendaraan adalah 1,5 detik dan 50 meter. Jika diasumsikan, bahwa panjang kendaraan beserta jarak aman antar kendaraan (smp) adalah sebesar 6 meter, maka pada kondisi tertahan dan aliran arus kendaraan mendekati 0 smp/jam diperoleh banyak kendaraan dalam ruang yang dipantau adalah 230 kendaraan (smp). Dengan demikian menurut HCM¹⁰⁾ diperoleh diagram fundamental secara lengkap sebagaimana pada Gambar 3. Kecepatan rata-rata banyak kendaraan efektif berdasarkan diagram fundamental tersebut untuk setiap tingkat pelayanan jalan adalah terdapat pada Tabel 3.

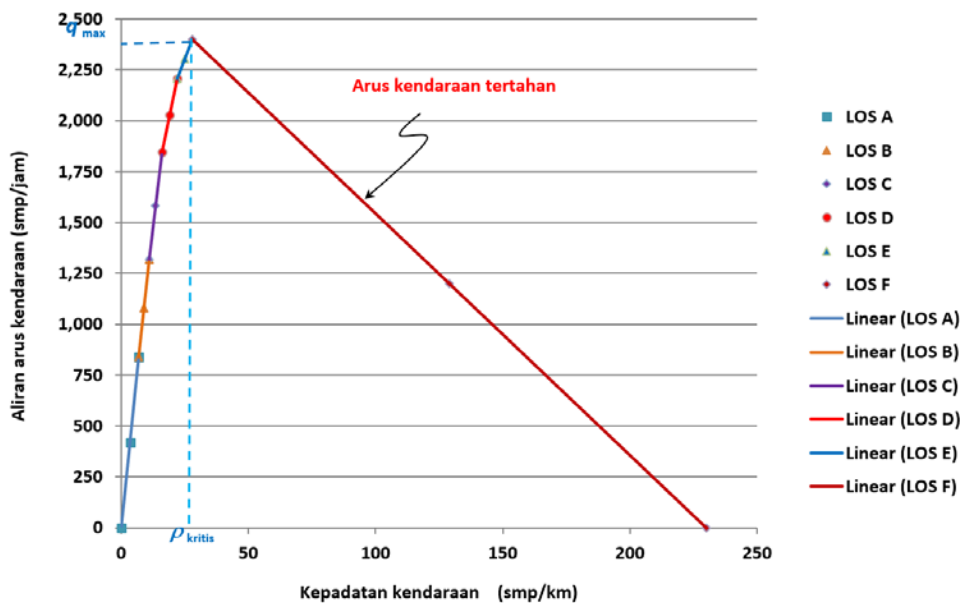
SIMPULAN

Pembentukan diagram fundamental untuk setiap ruas jalan tunggal memerlukan data aliran arus kendaraan dan kepadatan kendaraan yang memenuhi kondisi *equilibrium* (kesetimbangan) dan *steady state* (mantab). Komponen parameter utama diagram fundamental yang menentukan hubungan dengan LOS adalah aliran arus kendaraan maksimum q_{max} dan kepadatan

kendaraan kritis ρ_{crit} . Kedua komponen parameter ini menentukan titik saturasi dalam diagram fundamental. Pada diagram fundamental untuk jalan bebas hambatan dengan kecepatan rata-rata kendaraan pada arus bebas sebesar 120 km/jam diperoleh aliran arus kendaraan maksimum 2,400 smp/jam pada kepadatan kendaraan kritis 28 smp/km dengan *headway* 1,5 detik dengan gap 50 meter.

Tabel 2.
LOS berdasarkan rasio V/C ¹⁰⁾

| LOS | V/C Ratio ¹⁶⁾ | V/C Ratio HCM ¹⁰⁾ | Karakteristik Aliran Arus Kendaraan ¹⁰⁾ |
|-----|--------------------------|------------------------------|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| A | < 0,2 | < 0,35 | Arus bebas, dibawah 840 smp/jam |
| B | 0,2 - 0,45 | 0,35 - 0,55 | Awal arus stabil, sampai 1.320 smp/jam |
| C | 0,45 - 0,7 | 0,55 - 0,77 | Arus stabil, sampai 1.400 smp/jam |
| D | 0,7 - 0,85 | 0,77 - 0,92 | Arus tidak stabil, sampai 1.848 smp/jam |
| E | 0,85 - 1 | 0,92 - 1 | Awal arus tertahan, sampai 2.400 smp/jam |
| F | > 1 | > 1 | Arus tertahan, kurang dari 2.400 smp/jam |



Gambar 3.

Diagram Analisis Fundamental Polinomial Hasil Analisis

Tabel 3.

| LOS berdasarkan kecepatan rata-rata | | |
|-------------------------------------|-----|---|
| No | LOS | Kecepatan rata-rata banyak kendaraan efektif [km/jam] |
| 1 | A | 120 |
| 2 | B | 120 |
| 3 | C | 117,33 |
| 4 | D | 106,74 |
| 5 | E | 92,16 |
| 6 | F | 9,3 |

Kondisi lalu-lintas dibawah saturasi pada diagram fundamental dipengaruhi oleh

aliran arus kedatangan kendaraan dari ruas jalan sebelumnya. Kondisi ini ditunjukkan dengan LOS A-E. Dengan demikian, target optimalisasi pengendalian aliran arus kendaraan pada kondisi LOS A-E masih dapat dilakukan dengan meningkatkan aliran arus ke dalam ruas jalan tersebut.

Apabila aliran arus kendaraan lebih besar dari nilai saturasi, maka diperlukan strategi penyelesaian dengan memperhatikan kapasitas dan pasokan kepadatan kendaraan pada ruas jalan yang tersedia. Target optimalisasi pengendalian aliran arus kendaraan dilakukan dengan

mengurangi kepadatan kendaraan pada ruas jalan.

Klasifikasi derajat kejenuhan dari kecepatan rata-rata banyak kendaraan perlu dikalibrasi lebih detil menggunakan data lapangan di berbagai simpang. Pada penelitian lanjutan dikembangkan model berdasarkan klasifikasi kepadatan kendaraan untuk mendapatkan prediksi aliran arus kendaraan pada ruas jalan tertentu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini terlaksana atas pembiayaan dari DIPA BPPT tahun 2014 "Inovasi dan Layanan Teknologi Transportasi Untuk Konektivitas, Logistik dan Perkotaan." Ucapan terima kasih dan apresiasi disampaikan kepada semua pihak yang terlibat dalam kegiatan ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Lebacque, J. P., "The Godunov Scheme and what it means for first order Traffic Flow Models," *Proceeding of the 13.th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, hal. 647-677, Lyon France, Juli, 1996.
2. Thai, B. J., Prodhomme dan Bayen, A. M., "State Estimation for the discretized LWR PDE using Explicit Polyhedral Representations of the Godunov Scheme," *Proceeding of the American Control Conferenece*, hal. 2428–2435, Washington D.C.-USA, Juni, 2013.
3. Treiber, M dan Kesting, A., *Verkehrsdynamik und-simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsfluss-Dynamik*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.
4. Sadili, R., "Analisis Karakteristik Arus Lalu Lintas Campuran dengan Variasi Komposisi Kendaraan Sepeda Motor pada Jalan di Daerah Perkotaan," *Tesis Pascasarjana Fakultas Teknik - Program Studi Teknik Sipil*, Universitas Indonesia, 2011.
5. Wang, Y. dan Papageorgiou, M., "Real-Time Freeway Traffic State Estimation based on Extended Kalman Filter: a General Approach," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 39, hal. 141–167, Februari, 2005.
6. Papageorgiou, M., Blosseville, J.-M., dan Hadj-Salem, H., "Macroscopic Modelling of Traffic Flow on the Boulevard Périphérique in Paris," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 47, hal. 29–47, Februari, 1989.
7. Lebacque, J.-P. dan Khoshyaran, M. , "First-Order Macroscopic Traffic Flow Models: Intersection Modeling, Network Modeling" In: *Transportation and Traffic Theory, Flow, Dynamics and Human Interaction*. H. Mahmassani ed. Elsevier, hal. 365-386, 2005
8. Kesting, A., "Microscopic Modeling of Human and Automated Driving: Towards Traffic-Adaptive Cruise Control," *Doctoral Thesis Faculty of Traffic Sciences „Friedrich List“*, Tech. Univ. Dresden, Germany, Februari, 2008.
9. G. Flötteröd, dan J. Rohde, "Operational macroscopic modeling of complex urban road intersections," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 45, hal. 903–922, April, 2011.
10. National Research Council, "Highway Capacity Manual," *Transportation Research Board*, Washington-DC, 2000.
11. Silva, C. M., Júlvez, J., Mahulea, C., dan Vázquez, C. R., "On Fluidization of Discrete Event Models: Observation and Control of Continuous Petri Nets," *Discrete Event Dynamic System*, Vol. 21, hal. 427–497, September, 2011.
12. David, R dan Alla, H., *Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, revised 2nd edition, 2010.
13. Silva, M. dan Recalde, L., "Continuization of Timed Petri Nets: From Performance Evaluation to Observation and Control," *Applications and Theory of Petri Nets*, Vol. 3536 of Lecture Notes in Computer Science, hal. 832-833, 2005.
14. Júlvez, J., Mahulea, C., dan Vázquez, C. R., "SimHPN: A MATLAB toolbox for Simulation, Analysis and Design with Hybrid Petri Nets," *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, Vol. 6, hal. 806–817, Mei, 2012.
15. Tok, Oh A., dan Ritchie, S. G., "Real-Time Freeway Level of Service Using Inductive-Signature-Based Vehicle Reidentification System," *IEEE Transactions of Intelligent Transportation System*, Vol. 6, No. 2, hal. 138–146, Juni, 2005.
16. Keputusan Menteri Perhubungan no. 14 tahun 2006 tentang Manajemen dan Rekayasa Lalu Lintas di Jalan, diunduh 14 Juni 2013, <http://hubdat.dephub.go.id/km/220-tahun-2006>