

OPTIMASI METODA PENGEMUDIAN UNTUK MEMINIMALKAN KONSUMSI BBM DENGAN GABUNGAN PEMODELAN KARAKTERISTIK KENDARAAN DENGAN KARAKTERISTIK LINTASAN

Witantyo¹, Sudiyono², Sutikno³, Diva Aulia⁴

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, ITS Surabaya
Kampus ITS Keputih Sukolilo Surabaya 60111 Telp 031 592 2941

Email: witantyo@me.its.ac.id, sudiskr@gmail.com, sutikno@me.its.ac.id, divaulia@gmail.com

Abstrak

Kelangkaan energi merupakan permasalahan dunia. Tim Sapu angin ITS menawarkan solusi alternatif dengan merancang dan membuat kendaraan yang lebih hemat energi. Walaupun pada kelas Urban Concept mobil-mobil Sapu angin selalu menjadi juara SEM Asia dalam tiga tahun terakhir namun rekor yang dicapai masih dibawah juara SEM Eropa yang mencapai 350 km/liter BBM. Untuk memperbaiki capaian ini maka perlu dilakukan optimasi mode pengendalian yang dibuat berdasar pada karakter sirkit yang dipakai lomba. Seperti telah diketahui, setiap sirkit memiliki tikungan, tanjakan maupun turunan yang spesifik sehingga jika hanya mengandalkan feeling saja seorang driver akan sulit memutuskan kapan mobil harus diakselerasi, berapa kecepatan optimum disetiap segmen dan sebagainya. Optimasi pengendalian ini melibatkan pemodelan mobil dan pemodelan sirkit dengan perhitungan rumit yang melibatkan puluhan parameter dan variabel. Perhitungan yang efektif harus dibuat secara dinamis dan dilakukan mengikuti kurva lintasan yang dilewati oleh mobil. Penelitian ini bertujuan mengembangkan parameter disain mobil sapu angin dan parameter operasi mobil sapu angin untuk meningkatkan efisiensi operasi mobil sapu angin. Pengembangan dimulai dengan membuat model sirkit sepag yang dipakai lomba SEM Asia. Sirkit akan dimodelkan dalam beberapa segmen dan pada setiap segmen model harus mewakili semua karekteristiknya seperti radius tikungan, dan sudut tanjakan/turunan untuk garis lintasan lomba (race line) yang optimum. Model ini kemudian akan digabungkan dengan model mobil yang diwakili oleh karakteristik engine yaitu specific fuel consumption, torsi dan rpm dari engine; serta karakteristik kendaraan seperti perbandingan transmisi, berat mobil, drag force, rolling resistance roda. Gabungan kedua model akan dijalankan untuk mendapatkan metoda pengendalian yang paling optimal agar mobil dapat berjalan melintasi seluruh sirkit dengan konsumsi BBM minimum tetapi dengan waktu tempuh yang tidak melebihi persyaratan lomba.

Kata kunci: sapu angin; pemodelan; dinamika kendaraan

Pendahuluan

Kelangkaan energi merupakan permasalahan yang melanda semua masyarakat di berbagai negara dunia. Tim Sapu angin ITS menawarkan alternatif solusi lain untuk mengatasi permasalahan ini yaitu dengan merancang dan membuat mesin dan kendaraan yang lebih hemat energi. Mobil-mobil Sapu Angin telah memenangkan lomba Shell Eco-Marathon Asia (SEMA) mulai 2010, 2011, dan 2012 untuk kelas Urban Concept Car. Prinsip utama agar mobil ini hemat energi adalah terletak pada bobot yang ringan, beban terbagi merata, gesekan mekanis minimal, rolling resistance roda minimal, bentuk aerodinamik dan memiliki mesin dengan efisiensi tinggi serta perbandingan transmisi yang optimal.

Walaupun pada kelas Urban Concept mobil-mobil Sapu angin selalu menjadi juara dalam tiga tahun belakangan ini namun rekor yang dicapai masih dibawah juara SEM Eropa yang mencapai 300-350 km/liter BBM. Berdasar pada survey dunia maya mengenai rahasia tim-tim Eropa didapatkan bahwa para juara disana melakukan optimasi mode pengendalian yang dirancang berdasar pada karakter sirkit yang dipakai lomba. Seperti telah diketahui, setiap sirkit memiliki tikungan, tanjakan maupun turunan yang spesifik sehingga jika hanya mengandalkan feeling saja seorang driver akan sulit memutuskan kapan mobil harus diakselerasi, berapa kecepatan optimum disetiap segmen dan sebagainya.

Dampak cara mengemudi terhadap konsumsi bahan bakar ternyata sudah menjadi perhatian peneliti sejak lama. Salah satu peneliti yang tertarik dengan masalah ini adalah Evans (1979). Evans melakukan penelitian tentang

cara mengemudi dan didapatkan bahwa dengan memperhalus akselerasi serta menghindari pengereman dengan memperkirakan kondisi lalu-lintas dapat menghemat penggunaan BBM sebesar 14% dengan jarak dan waktu tempuh yang sama. Peneliti lain mengenai moda berkendara adalah J.N. Hooker (1986). Hooker membuat analisa yang sangat terinci yang menghubungkan bagaimana cara mengemudi dengan konsumsi bahan bakar. Hooker berkesimpulan bahwa setiap kendaraan yang memiliki karakteristik yang berbeda dapat berbeda pula cara mengemudi yang hemat bahan bakarnya. Konsumsi BBM sangat di pengaruhi dengan akselerasi ke kecepatan cruising sehingga menaik turunkan kecepatan kendaraan sangat mempengaruhi penggunaan bahan bakar. Dari penelitiannya, Hooker memberikan saran-saran dalam berkendara sesuai dengan kapasitas engine kendaraan agar dapat mengemudi dengan hemat bahan bakar.

Sebuah pemodelan kendaraan pernah dibuat oleh Iswahyudi Rahmanu (2011). Pada model ini berat total kendaraan, drag koefisien, frontal area, rolling resistance roda, kecepatan, akselerasi, jumlah cycle akselerasi deselerasi, serta efisiensi mekanis (kerugian gesekan) bisa divariasikan untuk mendapatkan konsumsi BBM. Namun model yang dibuat belum memasukan karakteristik engine dan kecepatan disetiap drive cycle (masih dianggap konstan). Hasil konsumsi BBM yang didapatkan telah divalidasi dengan menguji kendaraan sebenarnya pada jalan yang rata dengan hasil yang cukup baik. Hasil simulasi menggunakan model ini menunjukkan bahwa kecepatan merupakan faktor yang paling dominan dalam memboroskan konsumsi BBM. Faktor kedua yang juga dominan adalah berat kendaraan dan factor ketiga adalah jumlah siklus akselerasi deselerasi yang dilakukan. Pada model ini besar akselerasi belum mempengaruhi konsumsi BBM karena karakteristik engine yang masih dianggap konstan. Selain itu nilai drag koefisien dan frontal area juga tidak terlalu berpengaruh karena tidak banyak diubah mengingat sangat kecil kemungkinan membuat mobil dengan model yang sangat tidak aerodinamis dan berbadan lebar.

Pengembangan Model

Dalam sebuah pemodelan, umumnya dihasilkan suatu bentuk atau sistem persamaan matematis. Model matematis yang terbentuk harus memenuhi aliran logika dan mampu menggambarkan diagram aliran informasi dasar dari permasalahan yang dimaksudkan. Pada pemodelan konsumsi bahan bakar Sapu Angin terhadap cara berkendara di sirkuit Sepang, hal pertama yang harus dilakukan adalah menjabarkan komponen-komponen yang berkaitan dan berpengaruh secara matematis. Perumusan matematis ini kemudian dijadikan blok-blok dan dirangkai sesuai logika dan alur perhitungan. Persamaan matematis yang digunakan dalam pemodelan diuraikan satu persatu sebagai berikut.

Hukum kekekalan energi

Energi di dalam sebuah sistem tertutup tidak dapat dibuat atau hilang, hanya dapat berubah dari suatu bentuk energi ke bentuk energi lainnya, sesuai dengan hukum kekekalan energi. Energi kinetik adalah energi yang dibutuhkan untuk memindahkan sebuah masa dengan jarak tertentu dan waktu tertentu. Adapun persamaan energi kinetik adalah,

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

dimana,

E_k = energi kinetik (j)

m = massa yang dipindahkan (kg)

v = kecepatan gerak (m/s^2)

Energi potensial adalah suatu bentuk energi yang tersimpan di dalam benda yang diam akibat gaya gravitasi dan memiliki ketinggian tertentu. Adapun persamaan energi potensial yang dimiliki oleh suatu benda adalah,

$$E_p = mgh \quad (2)$$

dimana,

E_p = energi potensial (j)

m = massa benda (kg)

h = ketinggian (m)

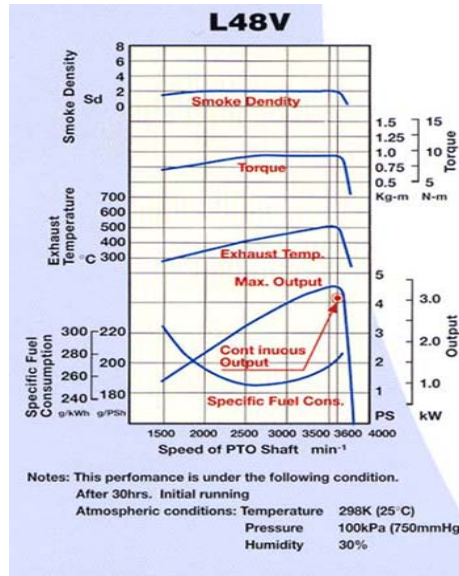
Dengan menggunakan hukum kekekalan energi saat kendaraan melaju maka persamaan energi diatas menjadi,

$$E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2} \quad (3)$$

Karakteristik Engine

Engine yang di model kan adalah engine diesel empat langkah. Pemodelan engine ini dilakukan untuk mengetahui specific fuel consumption, torsi, putaran, dan daya yang dapat dicapai mesin pada kondisi tertentu.

Tidak ada perhitungan yang benar-benar mampu menggambarkan kondisi *engine* secara riil. Perhitungan dan pemodelan menggunakan perumusan berdasarkan pendekatan dan kombinasi antara persamaan empiris dan persamaan dasar termodinamika mengikuti grafik karakteristik engine seperti pada gambar 1 berikut.



Gambar 1. Grafik karakteristik engine diesel L48V (sumber : www.yanmar.com)

Dalam pengukuran efisiensi bahan bakar dari mesin dengan poros berputar dikenakan satuan BSFC (Brake specific fuel consumption). BSFC adalah laju penggunaan bahan bakar dibagi dengan daya yang dihasilkan oleh mesin tersebut, BSFC juga biasa disebut dengan power-specific fuel consumption. BSFC dapat digunakan untuk mengkomparasi secara langsung efisiensi dari berbagai mesin berputar lainnya. Mesin memiliki specific fuel consumption yang menyatakan berapa gram BBM per kW. Sfc ini memiliki grafik yang tidak konstan tetapi merupakan kurva yang merupakan fungsi beban dan putaran mesin. Untuk menghitung BSFC, digunakan formulasi,

$$BSFC = \frac{\dot{m}}{P} \tag{4}$$

dimana,

\dot{m} = laju penggunaan bahan bakar dalam gram per detik (g/s)

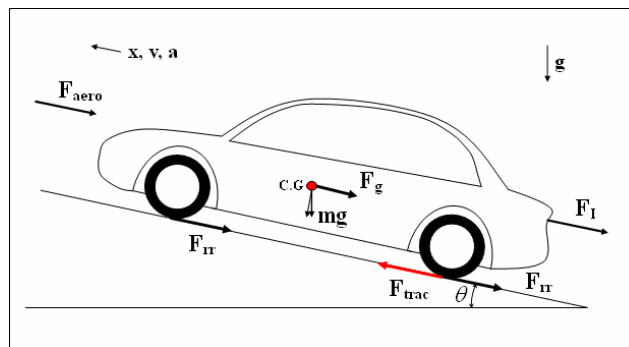
P = daya yang dihasilkan dalam watts dimana $P = \tau \omega$

ω = kecepatan engine dalam radian per detik (rad/s)

τ = torsi mesin dalam newton meters (N.m)

Dinamika Kendaraan

Jeongwoo Lee (2009) menjelaskan bahwa gaya-gaya yang bekerja pada sebuah kendaraan yang sejajar dengan arah akselerasi dapat dijabarkan dalam gambar 2.



Gambar 2. Dinamika Kendaraan (Jeongwoo Lee, 2009)

F_{traksi} adalah gaya dorong kendaraan oleh mesin pada roda penggerak. Dalam tujuannya memenuhi *driver demand*, gaya ini dihambat oleh gaya hambat kendaraan. Gaya hambat pada kendaraan dapat dijabarkan dalam tiga macam gaya. Pertama adalah gaya hambat karena udara. Gaya ini disebut *drag force*. Besarnya gaya ini dipengaruhi oleh *massa jenis udara* (ρ), *luasan frontal area* (A), koefisien drag (C), dan kecepatan kendaraan (V).

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot V^2 \tag{5}$$

Gaya yang kedua adalah *rolling resistant*. Yaitu gaya hambat karena gesekan ban dengan jalan. Besarnya gaya ini dipengaruhi oleh koefisien *rolling* (C_{rr}), *massa* kendaraan (m), percepatan gravitasi (g), dan sudut tanjakan kendaraan (θ).

$$F_{rr} = C_{rr} \cdot m \cdot g \cdot \cos(\theta) \tag{6}$$

Gaya yang ketiga adalah gaya hambat karena sudut kemiringan trek. Besar gaya ini dipengaruhi oleh berat kendaraan dan sudut kemiringan trek.

$$F_{grad} = m \cdot g \cdot \sin(\theta) \tag{7}$$

Akselerasi memiliki pengaruh besar pada performa kendaraan. Untuk melakukan akselerasi, diperlukan gaya lebih karena harus melawan gaya inersia kendaraan. Gaya inersia karena akselerasi ini dipengaruhi oleh besar akselerasi (a) dan massa kendaraan.

$$F_{inertia} = m \cdot a \tag{8}$$

Pada sebuah kendaraan yang dipacu dengan akselerasi tertentu, gaya traksi yang harus dicapai oleh mesin dapat dijabarkan sebagai penjumlahan dari gaya-gaya hambat dan inersia akibat percepatan. Daya traksi merupakan perkalian gaya (F) dengan kecepatan (V).

$$F_{traksi} = F_{drag} + F_{rr} + F_{grad} + F_{inertia} \tag{9}$$

$$P_{traksi} = (F_{drag} + F_{rr} + F_{grad} + F_{inertia})V \tag{10}$$

$$V(t) = V_0 + at \tag{11}$$

P_{traksi} digunakan sebagai referensi daya yang harus dihasilkan *engine* agar kendaraan mampu beregerak sesuai dengan *driver demand*. Daya engine yang dihasilkan harus sama dengan atau lebih besar dari daya traksi dibagi efisiensi transmisi.

$$P_{engine} \geq \frac{P_{traksi}}{Eff_{transmisi}} \tag{12}$$

Jika diasumsikan tidak ada slip kopling, maka putaran roda, dapat diperoleh dengan menghitung rasio transmisi. Putaran roda didapat dari perhitungan kecepatan kendaraan. Kecepatan putaran engine merupakan inputan pada model *engine* agar didapat nilai tingkat konsumsi bahan bakar kendaraan.

$$V_{kendaraan} = N_{roda} \cdot 2 \cdot \pi \cdot D_{roda} \tag{13}$$

$$N_{roda} = N_{engine} \cdot r_{transmisi} \tag{14}$$

dimana,

N =kecepatan putaran (rpm)

D =diameter (m)

r =rasio transmisi

Kondisi gelinding adalah kondisi dimana kendaraan melaju tanpa menggunakan dorongan tenaga dari engine. Laju kendaraan hanya mengandalkan inersia. Dalam kondisi ini gaya traksi kendaraan besarnya adalah nol. Pada saat gelinding, kendaraan dapat mengalami akselerasi maupun deselerasi tergantung dari lintasan yang sedang dilalui.

$$F_{traksi} = 0$$

$$F_{inertia} = -(F_{drag} + F_{grad} + F_{rr}) \tag{15}$$

$$0 = F_{drag} + F_{rr} + F_{grad} + F_i \Rightarrow F_i = -(F_{drag} + F_{grad} + F_{rr}) \Rightarrow m_i a = -(F_{drag} + F_{grad} + F_{rr}) \tag{16}$$

$$a = -\frac{1}{m}(F_{drag} + F_{grad} + F_{rr}) \tag{17}$$

$$P_{engineout} = P_{fuel} = P_{engine\,loss} = P_{f,\,loss} = 0 \tag{18}$$

Pada kondisi kecepatan konstan, gaya inersia diabaikan karena percepatan bernilai nol.

$$P_{trac,\,wheel} = (F_{drag} + F_{grad} + F_{rr})V \tag{19}$$

Kendaraan dapat berada dalam kondisi deselerasi baik saat mesin dimatikan maupun saat mesin hidup. Saat kondisi mesin mati, mesin tidak tersambung dengan roda penggerak sehingga tidak menimbulkan kerugian daya karena engine brake. Untuk dapat terus bergerak dan melawan gaya hambat, kendaraan hanya digerakkan oleh inersia kendaraan itu sendiri. Nilai perlambatan dapat dihitung dengan perumusan.

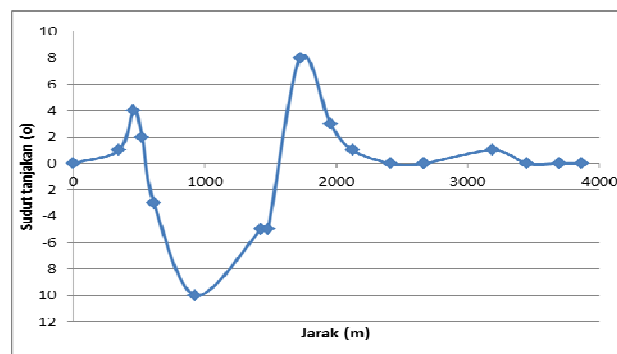
$$m.a = F_{drag} + F_{rr} + F_{grad} - F_{trac} \tag{20}$$

Pemodelan Sirkuit

Pemodelan sirkuit bisa dilakukan dengan cara meng-identifikasi variabel yang terdapat pada sirkuit yaitu elevasi, radius tikungan, dan panjang lintasan. Kondisi lingkungan sirkuit juga mempunyai pengaruh yang signifikan seperti: kecepatan angin, arah angin, dan kondisi udara pada lintasan yaitu kelembaban dan suhu. Pada pemodelan ini pengaruh lingkungan masih diabaikan. Kemiringan trek diset titik-titik tertentu dari keseluruhan panjang trek seperti yang tergambar pada gambar 2.6. Agar vektor kecepatan sesaat bisa diketahui, tentunya sangat penting untuk mengetahui posisi kendaraan selama simulasi. Berapa jarak yang telah ditempuh kendaraan, maupun bagaimana kondisi lintasan saat waktu tertentu harus diketahui. Properti lain seperti sudut belok lintasan diabaikan karena dianggap tidak akan banyak berpengaruh pada performa kendaraan seperti pada pemodelan menurut Assanis dkk (2000).



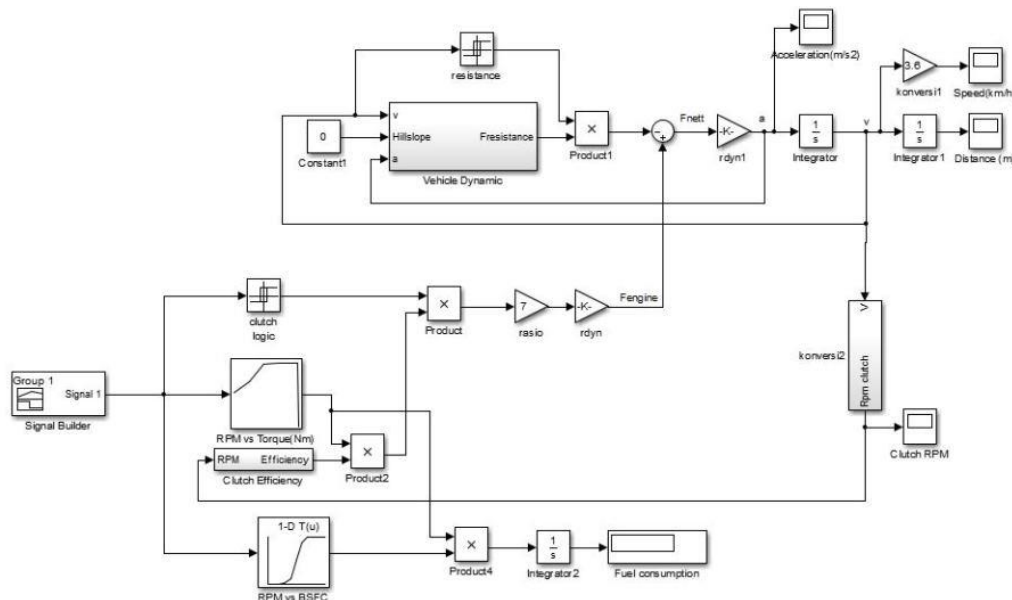
Gambar 3. Sirkuit Sepang dengan titik-titik ukur (Iswahyudi rahmanu, 2010)



Gambar 4. Kemiringan lintasan fungsi Jarak di Sirkuit Sepang (Iswahyudi rahmanu, 2010)

Gabungan Model

Pemodelan lintasan dan pemodelan kendaraan keduanya akan digabungkan dalam satu model besar untuk kemudian digunakan untuk menentukan mode pengendalian yang sesuai dengan kinerja mobil Sapu Angin dan kondisi lintasan yang akan digunakan untuk kompetisi. Beberapa variasi model simulasi akan dilakukan. Dari variasi-variasi tersebut akan diketahui mode pengendalian yang paling efektif dan sesuai dengan kondisi mobil dan lintasan sirkuit. Sehingga bisa didapatkan konsumsi bahan bakar yang minimal untuk jarak tempuh dan durasi tertentu sesuai dengan regulasi pada saat kompetisi.



Gambar 5. Gabungan Model Kendaraan dan Sirkuit.

Hasil dan Pembahasan

Berdasar pada simulasi berbagai macam variasi design kendaraan maupun mode pengemudian yang dilakukan menggunakan gabungan model kendaraan dan sirkuit diperoleh hasil-hasil sebagai berikut.

1. Secara teoritis, mengemudi dengan kecepatan konstan akan menghasilkan konsumsi BBM yang paling hemat. Namun, hasil simulasi menunjukkan bahwa mode mengemudi dengan cara mengidupkan mesin, melakukan akselerasi dan mematikan mesin pada kecepatan puncak dengan memanfaatkan inersia mobil ternyata lebih hemat BBM dibanding dengan mengemudi dengan kecepatan rata-rata tertentu. Kecepatan puncak mobil perlu dibatasi untuk meminimalkan kerugian karena hambatan angin (drag). Perlu diperhatikan bahwa kecepatan puncak yang rendah akan membuat mobil di diskualifikasi dari lomba karena waktu tempuh yang melampaui persyaratan lomba. Kecepatan puncak yang rendah juga membuat jumlah cycle on-off engine meningkat sehingga kebutuhan BBM untuk menghidupkan mesin akan bertambah.
2. Tanjakan dan turunan pada lintasan sirkuit justru menguntungkan mobil dengan daya mesin yang besar. Saat menanjak, energi dari engine diubah menjadi energy potensial yang nanti termanfaatkan saat lintasan menurun. Kapan dan dimana posisi yang tepat untuk mengidupkan dan mematikan mesin serta berapa kecepatan puncak yang diijinkan disetiap segmen lintasan bisa didapatkan dari simulasi ini.
3. Daya engine yang terpasang pada mobil sebesar 4.5 kW ternyata sudah terlalu besar untuk berat mobil dan penumpangnya yang hanya 200 kg. Hal ini ditunjukkan dengan waktu akselerasi yang cukup singkat untuk mencapai kecepatan puncak yang diijinkan sehingga jumlah on-off cycle meningkat. Jika berat mobil dinaikkan maka inersia mobil bertambah sehingga waktu akselerasi meningkat tetapi waktu gelinding juga makin lama. Kerugian yang timbul dari mobil yang lebih berat adalah rolling resistance roda. Bentuk mobil yang lebih aerodinamis dengan frontal area yang lebih kecil membuat kecepatan puncak bisa ditingkatkan sehingga siklus hidup mati mesin bisa dikurangi jumlahnya.

Kesimpulan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa gabungan model kendaraan dan sirkuit dapat menjadi referensi penting untuk merepresentasikan performa dari desain kendaraan terhadap lintasan yang akan dilaluinya. Model ini akan terus dikembangkan untuk membantu pengembangan dan evaluasi desain mobil supaya dapat mencapai hasil yang lebih baik dimasa yang akan datang.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih terutama ditujukan pada LPPM ITS yang membiayai penelitian ini pada skema Penelitian Unggulan Laboratorium pada tahun anggaran 2013. Penulis juga mengucapkan terima kasih pada para reviewer dan semua rekan sejawat yang telah ikut mendukung pelaksanaan penelitian ini.

Daftar Pustaka

1. Evan, L., (1979), "Driver behavior effect in fuel consumption", *Human Factor* 21 (4), pp. 389-398.
2. Waters, M.H.L, Laker, I.B., (1980), "Research on fuel conservation on cars" Report no.921, Transport Research Laboratory, Crowthome, England
3. Hooker, J.N., (1986), "Optimal Driving For Single-Vehicle Fuel Economy", *Transportation Research. A*, Vol. 22A, pp.183-201.
4. Assanis, Dennis., et al., (2000), "Validation and Use of SIMULINK Integrated, High Fidelity, Engine-In-Vehicle Simulation of the International Class VI Truck", University of Michigan: Automotive Research Center.
5. Mascha van der Voort, et al, (2001), "A Prototype Fuel Efficiency Support Tool" *Transportation Research Part C* 9, pp. 279-296
6. C. Manzie *, Watson, H., Halgamuge, S., (2007), "Fuel Economy Improvements for Urban Driving Hybrid Vs. Intelligent Vehicles", *Transportation Research Part C* 15, pp. 1-16.
7. Grunditz & Jansson., (2009), "Modelling and Simulation of a Hybrid Electric Vehicle for Shell Eco-marathon and an Electric Go-kart", Department of Energy and Environment Swedia, Chalmers University of Technology.
8. Lee, Jeongwoo., (2009), "Vehicle Inertia Impact on Fuel Consumption of Conventional and Hybrid Electric Vehicles Using Acceleration and Coast Driving Strategy", Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, USA.
9. Rahmanu, Iswahyudi., (2010), "Pemodelan dan Simulasi Performa Sapu Angin 1 Menggunakan Matlab Simulink", Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya, Indonesia.
10. Wu, J.N., et al., (2011), "A fuel economy optimization system with applications in vehicles with human drivers and autonomous vehicles", *Transportation Research Part D* Vol. 16, pp. 515-524
11. YANMAR, (2013), "Yanmar L48V Performance Curve". <URL: http://www.yanmarengines.co.uk/detail.php?product_id=29>
12. Sepang International Circuit., (2013), "North Track". <URL: <http://www.sepangcircuit.com.my/story/sepang-circuits-north-track>>