



MODEL DINAMIKA DAN METODA KENDALI UNIT HIBRID PARALEL PENGGERAK KENDARAAN

Estiko Rijanto

Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik (Telimek) LIPI
Kompleks LIPI Gedung 20, Jl. Cisitua No.21/154D, Bandung 40135,
Tel: 022-250-3055; Fax: 022-250-4773,
Email: estiko@hotmail.com

ABSTRAK

Makalah ini menyajikan sebuah model dinamika dan ulasan beberapa metoda kendali unit hybrid paralel untuk penggerak kendaraan. Model dinamika unit hybrid paralel yang dibuat tersusun oleh model kendaraan berat setara dengan kendaraan bus atau truk, yang digerakkan oleh model transmisi daya, yang mendapat torsi dari mesin diesel dan motor listrik yang bekerja secara paralel. Mesin diesel dan motor listrik masing-masing memiliki pengendali lokal yang menerima perintah dari sebuah pengendali supervisor. Dua metoda kendali diulas yang bisa digunakan sebagai pengendali supervisor yaitu: kendali optimal statik ketat dan kendali optimal statik longgar. Pengendali supervisor menerima perintah kemudi dari sebuah model pengemudi. Model dinamika yang dibuat juga dilengkapi dengan model baterai dan model konverter torsi. Konverter torsi berfungsi sebagai penyalur daya dari mesin diesel ke transmisi. Baterai berfungsi ganda yaitu mencatu daya listrik ke motor listrik pada saat discharging dan menyimpan daya listrik baik pada saat charging maupun pada saat regenerative braking.

Kata kunci: model dinamika, metoda kendali, hybrid paralel, kendaraan, mesin diesel, motor listrik.

1. Pendahuluan

Untuk menghemat energi dan mengurangi emisi polutan udara dari kendaraan berbagai teknologi telah dikembangkan baik oleh akademisi, peneliti, dan industri otomotif di dunia.

Sementara di negara-negara maju yang memiliki industri otomotif penerapan teknologi untuk penghematan energi dan mengurangi emisi polutan terus melaju dengan cepat karena tekanan regulasi negara dan persaingan usaha, di Indonesia kesadaran akan pentingnya penghematan energi dan teknologi ramah lingkungan perlu terus dipertahankan dan ditingkatkan. Tekanan harga minyak bumi terhadap roda perekonomian Indonesia semakin berat dirasakan saat ini. Pemerintah Indonesia dalam hal ini Kementerian Negara Riset dan Teknologi RI telah mengeluarkan kebijakan penyediaan energi dalam Indonesia 2005-2025, buku putih energi "Penelitian, Pengembangan dan Penerapan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Bidang Sumber Energi Baru dan Terbarukan Untuk Mendukung Keamanan Ketersediaan Energi Tahun 2025" [1]. Sementara itu, peranan teknologi mekatronika untuk merealisasikan kendaraan yang hemat energi dan ramah lingkungan dapat diwujudkan misalnya dengan manajemen powertrain pada mesin hibrid [2].

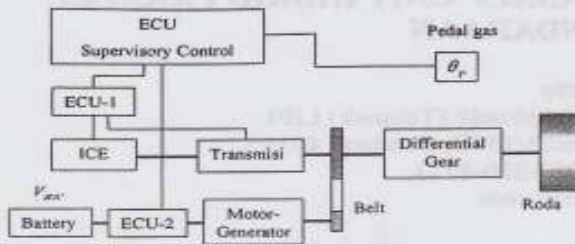
Penelitian tentang metoda kendali unit hibrid paralel di Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik (Telimek) LIPI dimulai tahun 2005 dan

dilakukan sesuai dengan kemampuan yang ada karena berbagai keterbatasan. Pendekatan penelitian telah dilakukan dengan prosedur: (1) studi pustaka, (2) pembuatan model dinamika, (3) pembuatan metoda kendali, (4) simulasi komputer. Salah satu prinsip penelitian adalah bahwa penelitian dimulai dari pustaka dan diakhiri dengan pustaka. Tujuan makalah ini adalah untuk melaporkan hasil awal penelitian tentang pemodelan dan metoda kendali unit hibrid paralel untuk kendaraan dengan harapan dapat dimanfaatkan lebih lanjut oleh pihak-pihak yang berkepentingan.

Makalah ini tersusun oleh bagian-bagian sebagai berikut: pendahuluan, model dinamika hibrid paralel, metoda kendali optimal statik, hasil dan pembahasan, dan kesimpulan.

2. Model Dinamika Hibrid Paralel

Gambar 1 menunjukkan ilustrasi mekanisme unit hibrid paralel untuk kendaraan pada makalah ini.



Gambar 1. Model Unit Hibrid Paralel Kendaraan.

Pada unit hibrid ini daya mekanik yang bekerja pada roda-roda yang menggerakkan kendaraan dikirim lewat *differential gear* secara paralel oleh mesin disel dan oleh motor-generator. Kopling antara mesin disel dan motor-generator dilakukan oleh sabuk dan puli. Kecepatan melaju kendaraan diatur oleh bukaan pedal gas yang dikendalikan oleh model pengemudi sesuai dengan kecepatan referensi yang diinginkan. Pengendali supervisor menerima sinyal komando dari pedal gas dan mendistribusikan daya kepada pengendali mesin disel dan motor listrik. Metoda kendali supervisor menentukan distribusi daya secara optimal.

Torsi final drive τ_{FD} yang menggerakkan roda-roda diberikan oleh persamaan torsi di bawah ini.

$$\tau_{FD} = (\eta_j N_j \tau_{ico} + \eta_p N_p \tau_m) \eta_{FD} N_{FD} \quad (1.1)$$

η_j, η_p dan η_{FD} masing-masing adalah konstanta efisiensi transmisi mesin, puli motor listrik, dan final drive. N_j, N_p dan N_{FD} masing-masing adalah rasio gigi transmisi mesin, puli motor listrik, dan final drive. τ_{ico} dan τ_m adalah torsi keluaran konverter torsi dan torsi keluaran motor listrik.

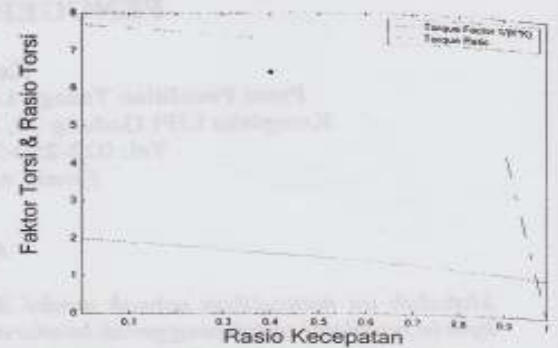
Konverter torsi yang berfungsi menyalurkan torsi dari mesin ke transmisi mesin memiliki persamaan torsi τ_{ico} dan kecepatan rotasi ω_{ico} sebagai berikut.

$$\tau_{ico} = \gamma \left(\frac{1}{K^2} \right) \omega_e^2 \quad (2.1)$$

$$\omega_{ico} = r_\omega \omega_e \quad (2.2)$$

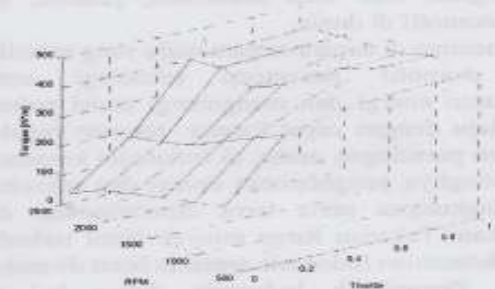
$$\omega_e, r_\omega, \left(\frac{1}{K^2} \right)$$

dan γ masing-masing adalah kecepatan rotasi mesin, rasio kecepatan, faktor kapasitas torsi, dan rasio torsi. Bentuk tipikal kurva faktor kapasitas torsi dan rasio torsi ditunjukkan pada gambar di bawah ini [3].



Gambar 2. Karakteristik konverter torsi, [solid = rasio torsi; terputus = kapasitas torsi].

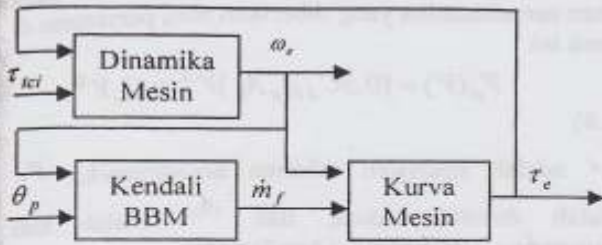
Sebagai model mesin disel digunakan model berupa *look-up table* yang menyediakan kurva 3 dimensi dimana torsi mesin τ_e merupakan fungsi dari kecepatan rotasi mesin ω_e dan laju injeksi bahan bakar \dot{m}_f (*mass per cylincer per cycle*). Laju injeksi bahan bakar adalah fungsi dari bukaan pedal gas (*throttle*) θ_p . Gambar 3 menunjukkan ilustrasi kurva 3 dimensi model mesin yang digunakan. Pada kurva ini sumbu pedal gas bernilai 0 sampai dengan 1, sumbu kecepatan rotasi mesin bernilai 700 RPM sampai dengan 2400 RPM, dan sumbu 50 Nm sampai dengan 500 Nm.



Gambar 3. Kurva 3 Dimensi Model Mesin

Untuk mengekspresikan dinamika yang penting di dalam model mesin maka dinamika sistem kendali injeksi bahan bakar dimasukkan ke dalam model mesin seperti ditunjukkan pada gambar 4. Dinamika mesin diberikan oleh persamaan diferensial sebagai berikut.

$$\frac{d\omega_e}{dt} = \frac{1}{J_e} (\tau_e - \tau_{ict}) \quad (3.1)$$



Gambar 4. Model Mesin

Motor listrik dan baterai dimasukkan dalam pemodelan dinamika unit hibrid, namun dinamika elektronika daya tidak dimasukkan ke dalam dinamika unit hibrid karena waktu tanggapnya yang diasumsikan sangat cepat. Sebagai contoh, mesin disel yang digunakan memiliki 6 silinder dengan daya 117 KW. Motor listrik dengan daya 42 KW dipilih untuk menambah puncak total daya menjadi sebesar 140% dari daya mesin disel. Dinamika ideal motor listrik beserta pengendalinya diberikan oleh fungsi alih di bawah ini.

$$\tau_m(s) = \frac{\lambda_m}{s + \lambda_m} \tau_{mr}(s) \quad (4.1)$$

τ_{mr} adalah nilai referensi torsi motor yang dikirim sebagai sinyal komando dari pengendali supervisor ke

sistem kendali motor listrik, dan $\frac{1}{\lambda_m}$ adalah waktu tanggap sistem kendali torsi motor listrik.

Dari hasil eksperimen diperoleh bahwa efisiensi daya motor listrik merupakan fungsi torsi dan kecepatan rotasi seperti diilustrasikan pada gambar 5 [4]. Dari gambar ini diketahui bahwa pada kecepatan kurang dari 200 [rad/sec] efisiensi kurang dari 90%, sedangkan pada kecepatan lebih dari 300 [rad/sec] dan torsi lebih dari 50 [Nm] efisiensi daya motor listrik lebih dari 93%. Oleh karena ada batasan besar nilai daya motor listrik dan daya baterai, maka dinamika motor listrik perlu direvisi seperti di bawah ini.

Kasus torsi motor positif:

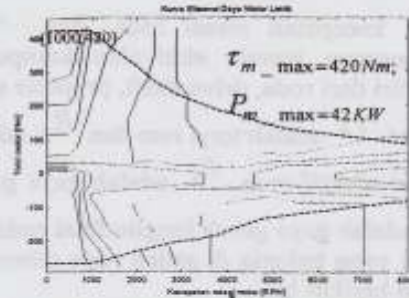
$$\tau_m(s) = \min(\tau_{mr}, \tau_{m-max}, \tau_{m-bat}) \frac{\lambda_m}{s + \lambda_m} \quad (4.2)$$

Kasus torsi motor negatif:

$$\tau_m(s) = \max(\tau_{mr}, \tau_{m-max}, \tau_{m-bat}) \frac{\lambda_m}{s + \lambda_m} \quad (4.3)$$

τ_{m-max} adalah torsi motor listrik maksimal yang dapat diproduksi saat kecepatan tertentu, dan τ_{m-bat}

adalah torsi motor maksimal karena batasan baterai.



Gambar 5. Efisiensi daya motor listrik.

Efisiensi motor listrik diberikan oleh persamaan di berikut ini.

$$\eta_m = \frac{\tau_m \omega_m}{e_{ib} i_{ib}} \quad (4.4)$$

e_{ib} adalah tegangan listrik terminal baterai, dan i_{ib} adalah arus listrik yang mengalir keluar (ke dalam) baterai. Untuk kasus torsi motor positif berlaku:

$$i_{ib} = \frac{\tau_m \omega_m}{\eta_m^+ e_{ib}} ; \tau_m > 0 \quad (4.5)$$

Untuk kasus torsi motor negatif berlaku:

$$i_{ib} = \frac{\eta_m^- \tau_m \omega_m}{e_{ib}} ; \tau_m < 0 \quad (4.6)$$

Efisiensi arah positif η_m^+ tidak sama dengan efisiensi arah negatif η_m^- .

Kondisi kapasitas charging baterai diekspresikan dalam variabel state of charge (SOC) yang bernilai 0 sampai dengan 1.

$$SOC(t) = \frac{q(t)}{q_m} \quad (4.7)$$

q_m adalah kapasitas baterai maksimal dalam [Ampere detik]. Oleh karena itu dinamika baterai diberikan oleh persamaan berikut ini.

$$\frac{dSOC(t)}{dt} = - \frac{i_{ib}(t)}{q_m} \quad (4.8)$$

Arus listrik $i_{ib}(t)$ bernilai positif jika mengalir keluar dari baterai dan bernilai negatif jika mengalir ke dalam baterai.

Model dinamika kendaraan tersusun oleh dinamika rotasi roda dan dinamika translasi badan kendaraan. Persamaan dinamika rotasi roda diberikan oleh persamaan diferensial berikut ini.

$$\frac{d\omega_w(t)}{dt} = \frac{1}{J_{TW}} \{ \tau_{FD} - B_w \omega_w - \tau_B - R_w (F_x + F_r) \} \quad (5.1)$$

$\omega_w(t)$ adalah kecepatan rotasi roda, dan J_{TW} adalah total momen inersia ekuivalen komponen rotasi yang terdiri dari roda, drive shaft, propeler shaft dan poros motor. τ_B adalah torsi rem dan R_w adalah panjang jari-jari efektif roda. F_r adalah gaya gesek putar dan F_x adalah gaya gesek longitudinal roda.

Torsi rem yang bekerja di setiap roda diberikan oleh persamaan berikut ini.

$$\tau_B = \mu_B R_c P_B A_c \quad (5.2)$$

μ_B adalah koefisien gaya gesek antara piringan cakram dan kapiler, R_c adalah lengan efektif dari gaya tekan rem, P_B adalah tekanan rem, dan A_c adalah luas cakram efektif.

Gaya gesek putar dan gaya gesek longitudinal diberikan oleh persamaan berikut ini.

$$F_r = C_r N \quad (5.3)$$

$$F_x = \mu_w (S) N \quad (5.4)$$

C_r adalah koefisien gaya gesek putar, N adalah gaya normal, μ_w adalah koefisien gaya gesek jalan dan roda, dan S adalah longitudinal slip antara roda dan permukaan jalan. Longitudinal slip S didefinisikan sebagai perbandingan antara selisih kecepatan kendaraan V dan kecepatan translasi roda $R_w \omega_w$ dengan kecepatan kendaraan V atau kecepatan translasi roda $R_w \omega_w$.

$$S = \frac{|V - R_w \omega_w|}{\max(V, R_w \omega_w)} \quad (5.5)$$

Hubungan antara longitudinal slip S dan koefisien gesek μ_w dapat diekspresikan dalam bentuk persamaan sebagai berikut [3].

$$\mu_w = \mu_0 \sin(C \tan^{-1}(BS)) \quad (5.6)$$

μ_0 adalah nilai maksimum koefisien gaya gesek, B dan C adalah parameter. Nilai μ_0 , B , dan C ditentukan dari hasil eksperimen dan tergantung pada kondisi jalan dan kondisi roda (misal: jalan aspal kering, aspal basah, dll.). Gambar 6 menunjukkan sebuah contoh kurva $\mu_w - S$. Pengendalian nilai longitudinal slip dapat dilakukan dengan mengatur pedal gas [5].

Persamaan dinamika translasi badan kendaraan diberikan oleh persamaan diferensial di bawah ini.

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{1}{M} \left\{ F_x - \frac{V}{|V|} F_a(V) \right\}$$

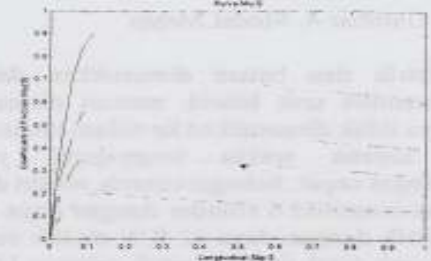
(5.7)

M adalah masa kendaraan, dan F_a adalah gaya tahan aerodinamika yang diberikan oleh persamaan di bawah ini.

$$F_a(V) = \{0.5 C_d \rho_a A_v\} V^2 = C_a V^2$$

(5.8)

C_d adalah koefisien tahanan aerodinamika, ρ_a adalah densitas udara, dan A_v adalah luas penampang aerodinamika kendaraan.



Gambar 6. Kurva $\mu_w - S$.

Model pengemudi dibuat untuk mengendalikan agar kecepatan kendaraan mengikuti nilai kecepatan referensi. Model pengemudi yang dibuat tersusun oleh pengendali proporsional dan integral, dan untuk menghindari saturasi dari aksi integral maka ditambahkan elemen anti wind-up. Elemen ini juga efektif untuk menghindari overshoot yang besar dan settling time yang lama saat kendaraan mengikuti referensi berbentuk step (misalnya saat uji percepatan).

3. Metoda Kendali Hibrid Paralel.

Metoda kendali optimal statik yang dimaksud di dalam makalah ini adalah sebuah metoda untuk mengatur distribusi daya antara 2 sumber energi yang memberikan kinerja optimal pada keadaan tunak. Kinerja optimal yang dimaksud adalah bahwa kendaraan dapat melakukan kerja sesuai perintah pengemudi dengan mengkonsumsi jumlah energi yang minimal (emisi polutan minimal) dengan tetap mempertahankan nilai SOC pada batas-batas nilai yang ditetapkan.

Kinerja optimal pada keadaan tunak diketahui dari hasil analisis efisiensi 2 sumber energi yang digunakan. Kurva efisiensi mesin disel dan kurva efisiensi motor listrik masing-masing diperoleh melalui eksperimen uji prestasi pada keadaan tunak. Pada prinsipnya metoda kendali optimal statik mendistribusikan daya untuk menggerakkan kendaraan ke mesin disel dan ke motor listrik sedemikian rupa sehingga kombinasi kerja mesin disel dan motor listrik berada pada titik operasi yang memberikan efisiensi maksimal.

Pada makalah ini dipikirkan 2 metoda kendali optimal statik yaitu: (1) metoda optimal statik ketat dan (2) metoda optimal statik longgar. Di bawah ini dijelaskan tentang 2 metoda tersebut.

Pada metoda optimal statik ketat distribusi daya diformulasikan dalam bentuk persamaan torsi sebagai berikut [6].

$$\tau_{FD}^*(\omega_w) = \tau_e^* + \tau_m^* = \{\tau_e(\omega_e) + \Delta\} + \{\tau_m(\omega_m) - \Delta\} \quad (6.1)$$

ω_w adalah kecepatan rotasi roda, $\tau_{FD}^*(\omega_w)$ adalah nilai torsi referensi yang dikirim oleh pengemudi pada kecepatan rotasi roda ω_w , τ_e^* adalah torsi mesin pada kecepatan rotasi mesin ω_e yang memberikan efisiensi optimal berdasarkan basis data efisiensi, τ_m^* adalah torsi motor listrik pada kecepatan rotasi motor ω_m yang memberikan efisiensi optimal berdasarkan basis data efisiensi, τ_e adalah torsi mesin nyata saat itu, τ_m adalah torsi motor nyata saat itu, dan Δ adalah nilai geser torsi yang dikirim oleh pengendali supervisor ke pengendali lokal mesin dan ke pengendali lokal motor listrik.

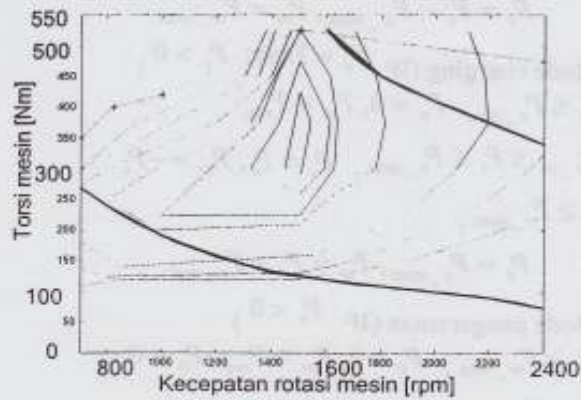
Mesin disel hanya bisa mengalirkan energi keluar maka τ_e hanya bisa bernilai positif atau nol.

Sedangkan τ_m bisa bernilai positif yang berarti mengeluarkan energi mekanik dari simpanan energi listrik di baterai (discharging), bisa bernilai negatif yang berarti menerima energi mekanik dan merubahnya menjadi energi listrik untuk dialirkan ke baterai (charging), dan nol saat istirahat.

Pada metoda optimal statik longgar distribusi daya ditentukan berdasarkan 2 kurva batas yang memisahkan daerah kerja mesin disel menjadi 3 zona yaitu zona efisiensi rendah bagian bawah, zona efisiensi tinggi, dan zona efisiensi rendah bagian atas pada peta prestasi efisiensi mesin disel. Gambar 7 menunjukkan sebuah contoh peta prestasi efisiensi mesin disel dimana dapat terlihat kurva tebal bagian bawah P_{e_on} dan kurva tebal bagian atas P_{m_a} . Garis berasteris adalah batas kapasitas daya mesin disel, sedangkan kurva melingkar-lingkar menunjukkan kurva efisiensi mesin disel. Kurva efisiensi melingkar paling kecil di tengah menunjukkan kurva operasi dengan efisiensi paling tinggi, dan semakin keluar kurva efisiensi menunjukkan semakin rendah nilai efisiensi mesin disel.

Penentuan 2 kurva pembatas menjadi masalah optimasi yang diteliti pada penelitian ini.

Contoh Kurva Efisiensi Mesin Disel BSFC [g/(kW*Hr)]



Gambar 7. Peta efisiensi mesin disel.

4. Hasil dan Pembahasan.

Tabel 1 menunjukkan nilai parameter model dinamika kendaraan hibrid paralel yang digunakan dalam simulasi pada makalah ini.

Tabel 1. Nilai parameter kendaraan hibrid

Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Masa M	7257.4 [kg]	N_p	3
C_d	2.08	η_p	0.98
μ_0	0.6	P_{m_max}	44 kW
J_{TW}	18.8 [kg*m ²]	τ_{m_max}	420 Nm
R_w	0.413 [m]	$1/\lambda_m$	0.01 [sec]
J_e	0.07 [kg*m ²]	e_{ib}	340 V
N_{FD}	3.21	q_m	2*3.6 Ah, 2448 Wh
η_{FD}	0.96		

Di bawah ini diuraikan algoritma yang digunakan pada metoda kendali optimal statik longgar [4].

IF $SOC < SOC_{min}$; $F_c = True$, $P_t = P_r + P_c$

IF $SOC > SOC_{max}$; $F_c = False$, $P_t = P_r$

(a) Mode normal (IF $F_c = False$; $P_r > 0$)

IF $P_t \leq P_{e_on}$; $P_e = 0$, $P_m^* = P_t$

IF $P_{e_on} \leq P_t \leq P_{m_a}$; $P_e = P_t$, $P_m = 0$

IF $P_{m_a} \leq P_t \leq P_{m_a} + P_{m_max}$;

$$P_e = P_{m_a}, P_m = P_t - P_{m_a}$$

IF $P_t \geq P_{m_a} + P_{m_max}$;



$$P_e = P_t - P_{m_max}, P_m = P_{m_max}$$

(b) Mode charging (IF $F_c = True; P_r > 0$)

$$\text{IF } P_t \leq P_{e_on}; P_e = 0, P_m = P_{req}$$

$$\text{IF } P_{e_on} \leq P_t \leq P_{e_max}; P_e = P_t, P_m = -P_c$$

$$\text{IF } P_t \geq P_{e_max};$$

$$P_e = P_{e_max}, P_m = P_r - P_{e_max}$$

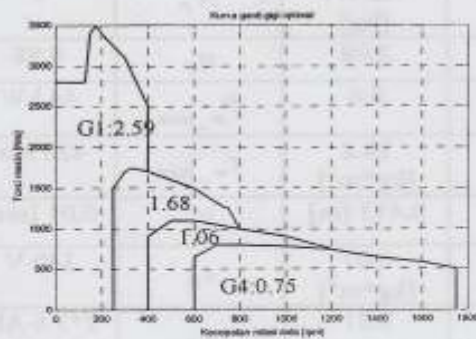
(c) Mode pengereman (IF $P_r < 0$)

$$\text{IF } P_r \geq P_{m_min}; P_e = 0, P_m = P_{req}, P_b = 0$$

$$\text{IF } P_r < P_{m_min};$$

$$P_e = 0, P_m = P_{m_min}, P_b = P_r - P_{m_min}$$

Pengendali supervisor mengatur perubahan rasio gigi transmisi berdasarkan hasil eksperimen yang memberikan efisiensi optimal [6]. Gambar 8 menunjukkan contoh kurva rasio gigi optimal yang digunakan pada makalah ini.



Gambar 8. Kurva ganti gigi optimal.

Tabel 2 menunjukkan hasil analisis numerik terhadap kecepatan rotasi roda ω_w , kecepatan rotasi power shaft ω_{PS} , kecepatan rotasi motor listrik ω_m , dan kecepatan rotasi engine ω_e pada $r_{\omega} = 1$.

Tabel 2. Hubungan kecepatan rotasi

ω_w [KPH]/[RPM]	ω_{PS} [RPM]	ω_m [RPM]	ω_e ($r_{\omega} = 1$) [RPM]
40/258.8	824	2473	G2:1384
80/513.6	1648.7	4946	G3: 1747.6
120/770	2472	7416	G4:1854

5. Kesimpulan

Dari hasil tahap awal studi ini dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Telah diperoleh model dinamika unit hibrid paralel untuk kendaraan.

2. Telah dipilih nilai-nilai parameter model dinamika kendaraan yang dapat digunakan untuk melakukan simulasi komputer lebih lanjut.
3. Telah dibahas dua metoda kendali optimal statik untuk mengatur distribusi daya pada unit hibrid paralel..

Daftar Pustaka

1. Kementerian Negara Riset dan Teknologi RI, Indonesia 2005-2025, buku putih energi "Penelitian, Pengembangan dan Penerapan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Bidang Sumber Energi Baru dan Terbarukan Untuk Mendukung Keamanan Ketersediaan Energi Tahun 2025, 2006.
2. Estiko Rijanto, "Aplikasi Teknologi Mekatronika Pada Otomotif: Motor Bakar dan Motor Hibrid", Berita IPTEK, LIPI, Tahun ke-43, No.3, 2002, hal.19-28.
3. H.J.Hong and H.Y.Jo, "Prediction of Friction Between Tire and Road Using Powertrain Model", Proceeding on AVEC, 1998, page.135-140.
4. Chan-Chiao Lin, et.al., "Integrated, Feed-Forward Hybrid Electric Vehicle Simulation in Simulink and Its Use for Power Management Studies", Society of Automotive Engineer, 2001-01-1334.
5. Jae-Bok Song, et.al., "Slip Control Systems Based on Engine Throttle Control Approach", Proceeding on AVEC, 1998, page.165-170.
6. Gino Paganelli, et.al., "A General Formulation for the Instantaneous Control of the Power Split in Charge-Sustaining Hybrid Electric Vehicles", Proceeding on AVEC, 2000, page.73-80.