

Perancangan Pengaturan Kecepatan pada Simulator *Parallel Hybrid Electric Vehicle (PHEV)* Menggunakan Metode *State Dependent –* *Linear Quadratic Regulator*

Anisa Eandarwati, Rusdhianto Effendie A.K., dan Ali Fatoni

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: rusdhi@elect-eng.its.ac.id, fatoni@ee.its.ac.id

Abstrak—Teknologi *Hybrid Electric Vehicle (HEV)* menggabungkan kinerja *Internal Combustion Engine (ICE)* dan motor listrik. ICE berlaku sebagai penggerak utama, dan motor listrik berlaku sebagai penggerak pembantu. Tetapi, pengembangan pada teknologi HEV masih sulit untuk dikembangkan karena konfigurasi sangat kompleks. Selain itu terjadi permasalahan pada pembagian kerja antara ICE dengan motor DC pada saat akselerasi ataupun pada permasalahan regulasi. Permasalahan regulasi dapat terjadi pada saat terjadi pembebanan lebih pada kendaraan berupa rem mekanik yang akan mempengaruhi penurunan kecepatan mesin bakar sehingga terjadi penurunan kecepatan pada HEV. Oleh karena itu perlu adanya suatu kontroler yang dapat dengan segera mengembalikan kecepatan HEV dengan mengatur kecepatan putar dari motor DC sebagai penggerak pembantu. Pada tugas akhir ini, digunakan kontroler *State Dependent – Linear Quadratic Regulator (SD-LQR)* untuk pengaturan kecepatan yang akan diimplementasikan pada simulator *Parallel Hybrid Electric Vehicle (PHEV)*. Berdasarkan hasil pengujian, motor DC dapat membantu kinerja mesin bakar mempertahankan set point hingga e_{ss} dapat mencapai 0,05%. Berdasar hasil implementasi masih terdapat e_{ss} hingga 11,1%

Kata Kunci—*Hybrid Electric Vehicle, Linear Quadratic Regulator, State Dependent Riccati Equation, Optimal Control*

I. PENDAHULUAN

Teknologi HEV ini dianggap sebagai solusi yang sangat menjanjikan untuk permasalahan krisis energi dan polusi udara khususnya pada daerah perkotaan. Dua permasalahan tersebut merupakan dua permasalahan serius dalam industri kendaraan modern. Sistem konfigurasi sumber daya pada HEV dapat dibagi menjadi dua yaitu *Parallel Hybrid Electric Vehicle (PHEV)* dan *Series Hybrid Electric Vehicle (SHEV)*, dimana konfigurasi ini berpengaruh terhadap pembagian kerja antara dua motor yaitu ICE dan motor DC sebagai motor listriknya.

Penggunaan teknologi ini masih sulit diterapkan karena setidaknya terdapat dua set sistem propulsi yang menyebabkan pemasangan konfigurasi menjadi sangat kompleks. Selain itu terdapat beberapa permasalahan dalam pembagian kerja antara ICE dan motor DC. Pembagian kerja pada HEV dibedakan berdasar konfigurasi sumber dayanya. HEV yang digunakan dalam tugas akhir ini merupakan simulator jenis PHEV dimana kinerja antara ICE dan motor DC dapat digunakan bersama ataupun sendiri - sendiri.

Simulator HEV memadukan dua buah pembangkit torsi untuk menanggung beban yang terjadi, dimana ICE bertindak sebagai penggerak utama dan motor DC bertindak sebagai penggerak pembantu [1]. Simulator HEV yang digunakan terdiri dari mesin pemotong rumput sebagai ICE, motor DC paralel sebagai motor listrik, rem elektromagnetik sebagai beban pengereman yang dirancang sebelumnya pada Tugas Akhir tahun 2010 [2]. Permasalahan lain terjadi pada saat akselerasi atau pada saat regulasi.

Saat terjadi pembebanan lebih pada ICE, performansi kecepatan putar pada ICE akan menurun sehingga kecepatan PHEV tidak sesuai dengan yang diharapkan. Hal ini menyebabkan performansi sistem menurun sehingga *output* kecepatan yang diharapkan tidak sesuai serta mempengaruhi indeks performansi dari sistem. Timbulnya rem mekanik secara berlebihan pada PHEV dapat terjadi saat PHEV bekerja pada saat tanjakan, atau saat dibutuhkan akselerasi yang cepat, sehingga adanya efek pembebanan lebih tidak dapat dihilangkan pada PHEV. Oleh karena itu dibutuhkan suatu kontroler yang dapat menjaga performansi kecepatan putar dari PHEV yaitu dengan mengatur kecepatan putar motor DC untuk membantu kinerja ICE agar memiliki energi yang cukup untuk mencapai kecepatan output sistem sesuai yang diharapkan.

Metode *State Dependent – Linear Quadratic Regulator (SD-LQR)* digunakan untuk mengatur kecepatan putar dari motor DC sehingga dapat mengurangi efek penurunan kecepatan yang ditimbulkan akibat adanya pembebanan lebih. Selain itu motor DC yang digunakan merupakan motor DC dengan konfigurasi paralel, dimana motor DC tersebut memiliki karakteristik yang non linier terhadap arus yang menyebabkan adanya *state* yang bersifat *dependent* sehingga diperlukan kontroler SD-LQR. Prinsip kerja dari metode SD-LQR adalah dengan menentukan matriks pembobot Q dan R yang optimal, lalu digunakan untuk menghitung aljabar Riccati dan yang bersifat *dependent* karena perhitungannya melibatkan beberapa matriks *state* yang juga *dependent*. Dengan menggunakan metode ini diharapkan adanya penambahan rem elektromekanik tidak memberikan efek besar terhadap performansi kecepatan putar PHEV dengan mengatur kecepatan motor DC saat energi ICE menurun sehingga PHEV dapat mencapai kecepatan yang diinginkan dengan adanya pembagian kerja antara kedua motor.

II. DASAR TEORI

A. Kendaraan Hybrid

Kendaraan Hybrid atau lebih dikenal *Hybrid Electric Vehicle* (HEV) terdiri dari dua sumber daya yaitu sebuah *Electric Motor* (EM) atau motor listrik dengan *Internal Combustion Engine* (ICE) atau motor bakar/ diesel [3]. Teknologi ini dianggap sebagai solusi yang sangat menjanjikan untuk permasalahan krisis energi dan polusi udara khususnya pada daerah perkotaan. Secara umum konfigurasi dari HEV terdiri dari sebuah ICE, sebuah generator, beberapa baterai dan sebuah motor listrik [4]. Sistem konfigurasi sumber daya pada HEV dapat dibagi menjadi dua yaitu *Parallel Hybrid Electric Vehicle* (PHEV) *Series Hybrid Electric Vehicle* (SHEV), dan *Series-Parallel Hybrid Electric Vehicle* (SPHEV) dimana konfigurasi ini berpengaruh terhadap pembagian kerja antara dua motor yaitu ICE dengan motor DC sebagai EM [5].

- a. SHEV dapat dikatakan sebagai konfigurasi *hybrid* yang paling sederhana. Dalam konfigurasi seri digunakan generator ICE untuk mengubah energi dari pembakaran menjadi listrik dan dialirkan ke baterai (aki) dan motor listrik dalam menggerakkan roda kendaraan [4].
- b. Dalam PHEV, ICE langsung terhubung dengan roda kendaraan dan dapat langsung memberi energi untuk memutar roda bersamaan dengan motor listrik. Penggunaan energi dapat digunakan secara bersama sama untuk menggerakkan roda ataupun bekerja secara bergantian [4].
- c. Konfigurasi SPHEV menggabungkan ICE dan motor listrik untuk langsung memutar roda.. Dimana dengan menggunakan dua penggerak ini kendaraan lebih sering bekerja mendekati titik efisiensi optimumnya. Pada kecepatan rendah, kendaraan bekerja seperti SHEV sedangkan pada kecepatan tinggi kendaraan bekerja seperti PHEV [6].

B. Metode Identifikasi Strejc [7]

Metode Strejc melakukan pendekatan pada sistem yang tidak stabil tanpa ada penundaan waktu dengan bantuan perhitungan waktu T_U dan T_N dengan membuat garis singgung yang memotong/ bersinggungan dengan respon sistem (Dapat dilihat pada **Gambar 1**). Parameter perbandingan waktu ini diberikan pada parameter τ (**Persamaan (2.5)**).

$$\tau = \frac{T_U}{T_N} \tag{1}$$

Berdasar nilai τ , perkiraan pendekatan dari permodelan sistem dapat ditentukan sebagai berikut:

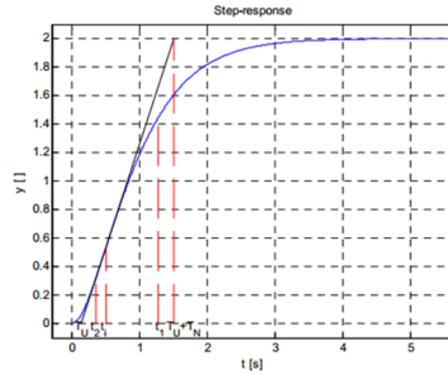
- a. Jika nilai $\tau < 0$, maka pada sistem dapat dilakukan pendekatan model orde ke-2 seperti pada (2).

$$G_{ST1}(s) = \frac{K}{(\tau_{ST1}s + 1)(\tau_{ST2}s + 1)} \tag{2}$$

dengan nilai τ_{ST1} dan τ_{ST2} dapat ditentukan dengan cara berikut:

- 1) Cari parameter t_1 dengan mencari waktu pada saat respon sistem mencapai 72% dari y_{ss} (Gambar 1), lalu tentukan jumlah dari τ_{ST1} dan τ_{ST2} menurut (3).

$$\tau_{ST1} + \tau_{ST2} = \frac{t_1}{1,2564} \tag{3}$$



Gambar 1. Respon Step Sistem dengan t_1 , t_2 , t , T_U , dan T_N [7]

Tabel 1. Nilai Konstan Rasio T

$Y(t_2)$	T	$Y(t_2)$	T
0,30	0,000	0,22	0,183
0,29	0,023	0,21	0,219
0,28	0,043	0,20	0,264
0,27	0,063	0,19	0,322
0,26	0,084	0,18	0,403
0,25	0,105	0,17	0,538
0,24	0,128	0,16	1,000
0,23	0,154		

Tabel 2 Taksiran dari Orde Ke-n dan Nilai Titik Singgung

n	τ	y_i	n	τ	y_i
2	0,014	0,264	7	0,57	0,394
3	0,218	0,327	8	0,642	0,401
4	0,319	0,359	9	0,709	0,407
5	0,41	0,371	10	0,773	0,413
6	0,493	0,384			

- 1) Tentukan parameter t_2 dari (4).

$$t_2 = 0,3574(\tau_{ST1} + \tau_{ST2}) \tag{4}$$

- 2) Temukan nilai dari $y(t_2)$ dari respon sistem menurut Tabel 1 dan tentukan rasio T untuk (5).

$$T = \frac{\tau_{ST1}}{\tau_{ST2}} \tag{5}$$

- 3) Tentukan nilai untuk τ_{ST1} dan τ_{ST2} dengan pedoman (3) dan (5).

- b. Jika nilai $\tau \geq 0$, maka pada sistem dapat dilakukan pendekatan model orde ke-n seperti pada **Persamaan (6)**.

$$G_{ST2}(s) = \frac{K}{(\tau_{ST} s + 1)^n} \tag{6}$$

dengan nilai τ_{ST} dapat ditentukan dengan cara berikut:

- 1) Tentukan rasio τ seperti pada (1).
- 2) Berdasar pada nilai τ , temukan orde dari pendekatan model yang tepat dan koordinat titik y_i yang merupakan titik singgung antara respon sistem dengan garis singgung yang tepat berdasar Tabel 2.
- 3) Berdasar koordinat y_i yang telah ditemukan, cari t_i yang merupakan waktu saat respon sistem mencapai y_i (Dapat dilihat pada Gambar 3).
- 4) Tentukan waktu konstan τ_{ST} menurut (7).

$$\tau_{ST} = \frac{t_i}{n-1} \tag{7}$$

C. Identifikasi Fisik Motor DC

Konfigurasi motor DC paralel memiliki karakteristik non linier terhadap arus jangkar, arus medan, dan torsi motor. Dimana dari konfigurasi tersebut dapat dicari pemodelan motor DC seperti pada (8), (9), dan (10).

a. Rangkaian arus medan

$$I_f = \frac{1}{L_{fs} + R_f} E_{in}$$

$$\dot{I}_f = -k_1 I_f + k_2 E_{in} \tag{8}$$

dengan $k_1 = \frac{R_f}{L_f}$ dan $k_2 = \frac{1}{L_f}$

b. Rangkaian arus jangkar

$$I_a = \frac{1}{L_{as} + R_a} (E_{in} - E_{ggl})$$

dimana $E_{ggl} = K_{ggl} I_f \omega_m$, maka:

$$\dot{I}_a = -k_3 I_a + k_4 E_{in} - k_5 I_f \omega_m \tag{9}$$

dengan $k_3 = \frac{R_a}{L_a}$, $k_4 = \frac{1}{L_a}$, dan $k_5 = \frac{1}{L_a} K_{ggl}$

c. Rangkaian torsi motor

$$\omega_m = \frac{(T_m - T_l)}{J_{ms} + B_m}$$

$$(J_{ms} + B_m)\omega_m = T_m - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 (J_{ls} + B_l)\omega_m$$

$$\left\{ \left(J_m + \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 J_l \right)_s + \left(B_m + \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 B_l \right) \right\} \omega_m = T_m$$

dimisalkan $\left(J_m + \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 J_l \right) = J_T$ dan $\left(B_m + \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 B_l \right) = B_T$, maka:

$$\dot{\omega}_m = -k_6 \omega_m + k_7 I_a I_f \tag{10}$$

dengan $k_6 = \frac{B_T}{J_T}$ dan $k_7 = \frac{K_m}{J_T}$

D. Metode State Dependent – Linear Quadratic Regulator

Seluruh metode kontrol non-linear dengan penerapan rentang rendah menggunakan teknik linierisasi lokal untuk memodelkan sebuah plant. Meskipun teknik ini menghasilkan permodelan yang sederhana, proses linierisasi harus sangat sering dilakukan agar sistem tidak meninggalkan wilayah linierisasi yang sangat kecil selama operasi berlangsung. Metode kontrol yang lebih maju seperti kontrol adaptif dan *Gain scheduling* menggunakan linierisasi global yang lebih kompleks. Pendekatan *State Dependent - Linear Quadratic Regulator* (SD-LQR) atau yang lebih dikenal *State Dependent Riccati Equation* (SDRE) menggunakan linierisasi semi - global untuk mengkrompomi permasalahan aplikasi dan kompleksitas yang terjadi. Kedua permasalahan tersebut ditangani oleh pendekatan SD-LQR karena hubungannya dengan *Linear Quadratic Regulator* (LQR). Hal ini merupakan dua keuntungan utama dari metode SD-LQR. Pada dasarnya SD-LQR memperlakukan input non-linier sistem sebagai sistem linier. Selanjutnya hasil simulasi menunjukkan bahwa pendekatan SD-LQR memiliki karakteristik *robustness* seperti pada LQR. Pendekatan SD-LQR pertama kali diajukan oleh Pearson (1962) dan setelahnya dikembangkan

oleh Wernli dan Cook (1975). Mracek dan Cloutier (1998) juga mempelajari secara bebas dan disinggung oleh Friedland (1996) [8].

Ehler dan Vadali telah melakukan penelitian terhadap permasalahan regulator non-linier dan menunjukkan bahwa penyelesaian masalah algebra Riccati yang berkembang menurut waktu memberikan sebuah cara untuk memperoleh solusi suboptimal dari permasalahan masa depan yang tiak terbatas. Pada intinya, SDRE dilakukan dengan bergantung pada waktu nya dan kebergantungan terhadap *state* nya tidak diakui dan dianalisis secara tegas. SDRE dapat diaplikasikan pada keadaan regulasi non linier, H_∞ non linier, dan H_2 non linier [9].

Keuntungan dari metode SDRE adalah adanya proses perhitungan kontroler yang berkelanjutan secara sistematis. Hal ini yang harus diperhatikan sebagai kemiripan antara pendekatan SDRE dan LQR [10].

SDRE memulai dengan model persamaan input non-linier sesuai (11) [10].

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \tag{11}$$

dengan persamaan indeks performansi (IP) :

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty x^T Q(x)x + u^T R(x)u dt \tag{12}$$

dimana :

- $x \in R^n, u \in R^m$
- $f(x) \in C^k, g(x) \in C^k, Q(x) \in C^k, R(x) \in C^k, k \geq 1,$
- $Q(x) = C^T(x)C(x) \geq 0,$ dan $R(x) > 0$ untuk semua x
- Dan diasumsikan bahwa $f(0) = 0$ dan $g(x) \neq 0$ untuk semua x

Diasumsikan bahwa $f(0)$ dan $g(x)$ tidak nol untuk semua nilai x . Sekarang permasalahannya dapat diformulasikan sebagai persoalan minimalisasi yang dihubungkan dengan indeks performansi (12).

$$\min \frac{1}{2} \int_0^\infty x^T Q(x)x + u^T R(x)u dt$$

subject to $\dot{x} = f(x) + g(x)u$

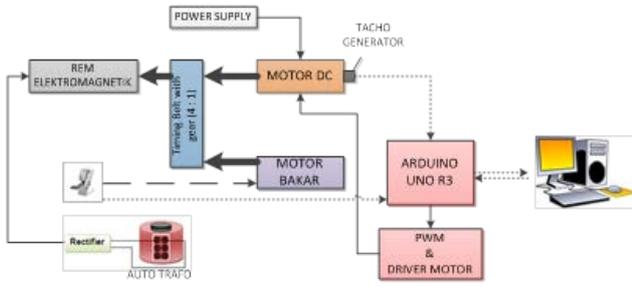
$$x(0) = x_0 \tag{13}$$

Solusi dari masalah ini setara dengan penyelesaian dengan menggunakan *Hamiltonian Jacobi Equation* (HJE). Namun, karena menyelesaikan permasalahan non-linier menggunakan HJE sangat sulit dilakukan, oleh karena itu digunakanlah pendekatan SDRE/ SD-LQR (11). Hal ini menyebabkan permasalahan dapat diselesaikan dengan mudah walaupun menggunakan kontroler sub-optimal [9].

Pada pendekatan SDRE, sinyal kontrol u juga merupakan sinyal umpan balik seperti pada LQR, tetapi umpan balik pada SDRE bergantung pada solusi dari SDRE itu sendiri. Metode ini disebut parameterisasi SDC, yaitu proses memfaktorkan sistem non linier menjadi semi linier dengan matriks *state* yang *dependent* seperti terlihat pada (14).

$$\dot{x} = A(x)x + B(x)u \tag{14}$$

Dimana $f(x) = A(x)x$ dan $B(x) = g(x)$. Persamaan ini dikenal sebagai persamaan *State Dependent Coefficient* (SDC). Perhatikan bahwa matriks $A(x)$ dan $B(x)$ merupakan fungsi *state* dari *plant*, dan kemudian menjadi koefisien dalam persamaan *Riccati*



Gambar 2. Konfigurasi Perangkat Keras Simulator HEV



Gambar 3. Simulator HEV

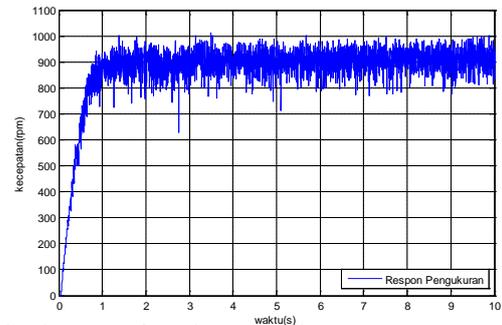
III. PERANCANGAN SISTEM

A. Simulator HEV

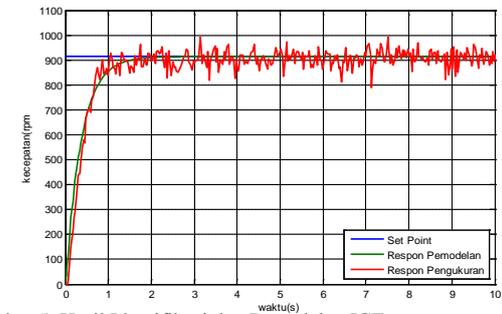
Simulator HEV yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari ICE 2 tak sebagai penggerak utama dan motor DC sebagai penggerak pendukung dan beban berupa rem elektromekanik. ICE mengubah energi bahan bakar (bensin) menjadi energi putar dan beroperasi berdasar prinsip satu siklus yang bekerja secara terus menerus. ICE 2 tak menyelesaikan keempat tahap siklus (*intake stroke, compression stroke, power stroke, dan exhaust stroke*) dalam dua tahap kayuhan saja. Motor DC yang digunakan adalah motor DC konfigurasi paralel karena memiliki karakteristik nonlinier terhadap arus dengan *state* yang bersifat *dependent*. Beban yang digunakan berupa rem elektromagnetik yang memanfaatkan gesekan dua permukaan untuk menghasilkan gaya lawn terhadap gaya gerak sehingga tidak menimbulkan panas yang berlebihan. Rem elektromagnetik ini ditempatkan pada Karena putaran ICE yang 4 kali lebih cepat dari motor DC, maka diberi pula timing belt dengan perbandingan *gear* 1:4 untuk menyamakan kecepatan putar kedua motor. Selain itu untuk pembacaan kecepatan dari simulator menggunakan *tacho generator* yang dipasangkan pada poros motor DC. Konfigurasi simulator HEV dapat dilihat pada Gambar 2. sedangkan bentuk fisik dari simulator Hev dapat dilihat pada Gambar 3.

B. Identifikasi ICE

Identifikasi ICE dilakukan dengan identifikasi *open loop* respon ICE dengan memberi sinyal uji step dan diidentifikasi dengan menggunakan metode Strejc. Identifikasi dilakukan dengan 3 metode pembebanan yaitu beban minimal, beban nominal dan beban maksimal. Metode pembebanan minimal dilakukan dengan melihat respon *open loop* ICE tanpa diberi beban tambahan berupa rem elektromagnetik. Metode pembebanan nominal



Gambar 4. Respon ICE Beban Nominal



Gambar 5. Hasil Identifikasi dan Pemodelan ICE

dilakukan dengan memberi beban pada ICE berupa rem elektromagnetik dengan ketentuan ICE masih dapat mencapai *set point* awal sebelum adanya beban saat *throttle* dibuka penuh, atau pada saat motor bakar sudah mulai membutuhkan motor DC untuk membantu kinerja ICE karena telah mencapai kinerja maksimalnya. Metode pembebanan maksimal dilakukan dengan ketentuan ICE sudah tidak dapat mencapai *set point* seperti saat diberi beban nominal sebelum adanya beban saat *throttle* dibuka penuh.

$$G(s) = \frac{1}{(0,1848s+1)^2} \quad (15)$$

Identifikasi yang digunakan adalah pada pembebanan nominal, dimana pada permasalahan regulasi dengan asumsi akan diberikan beban pada motor bakar sehingga perlu diberikan bantuan dari motor DC. Identifikasi dilakukan dengan perhitungan metode Strejc dari respon ICE pada Gambar 4. sehingga didapat model matematika pada (15) dan repon hasil pemodelan pada Gambar 5.

C. Identifikasi Motor DC

Identifikasi motor DC dilakukan dengan identifikasi fisik motor DC konfigurasi paralel untuk mendapatkan persamaan non linier seperti pada (8), (9) dan (10). Untuk mencari nilai parameter $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7$ dilakukan dengan mengambil data langsung dari motor DC. Dimana dari perhitungan persamaan non linier motor DC tersebut didapat nilai $k_1 = -1.7272$, $k_2 = -0.0007$, $k_3 = -1.2515$, $k_4 = -0.0038$, $k_5 = 0.0059$, $k_6 = 1$, dan $k_7 = 44864$. Sehingga didapat persamaan non linier motor DC yang *dependent* pada (16), (17), dan (18).

$$\dot{I}_f = -1,7272 I_f + 0,0007 E_{in} \quad (16)$$

$$\dot{I}_a = -1,2515 I_a + 0,0059 E_{in} - 0,0038 I_f \omega_m \quad (17)$$

$$\dot{\omega}_m = -1 \omega_m + 44864 I_a I_f \quad (18)$$

D. Perancangan Kontroler State Dependent – Linear Quadratic Regulator

Bagian yang dikontrol dengan menggunakan kontroler

SD-LQR adalah kecepatan putar motor DC. Dimana pada metode SD-LQR dibutuhkan persamaan *state* non linier dari motor DC yang bersifat *dependent* yang selanjutnya akan dilakukan linierisasi sepotong – sepotong secara terus menerus seperti pada (16), (17), (18).

Dimana dimisalkan :

$$x_1 = I_f$$

$$\dot{x}_1 = \dot{I}_f$$

$$x_2 = I_a$$

$$\dot{x}_2 = \dot{I}_a$$

$$x_3 = \omega_m$$

$$\dot{x}_3 = \dot{\omega}_m$$

Jadi persamaan non linier dapat dituliskan sebagai persamaan *state* seperti pada (19), (20) dan (21).

$$\dot{x}_1 = -1,7272 x_1 + 0,0007 E_{in} \tag{19}$$

$$\dot{x}_2 = -1,2515 x_2 + 0,0059 E_{in} - 0,0038 x_1 x_3 \tag{20}$$

$$\dot{x}_3 = -1 x_3 + 44864 x_1 x_2 \tag{21}$$

Sehingga didapat parameterisasi *State Dependent Coefficient* (SDC) merujuk pada (14), dengan:

$$A(x) = \begin{bmatrix} -1,7272 & 0 & 0 \\ -0,0038x_3 & -1,2515 & -0,0038x_1 \\ 44864x_2 & 44864x_1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$B(x) = \begin{bmatrix} 0,0007 \\ 0,0059 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dan untuk pemilihan matriks pembobot dipilih nilai matriks pembobot **Q** dan **R** sebesar :

$$Q = \begin{bmatrix} 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0001 \end{bmatrix}$$

$$R = [10]$$

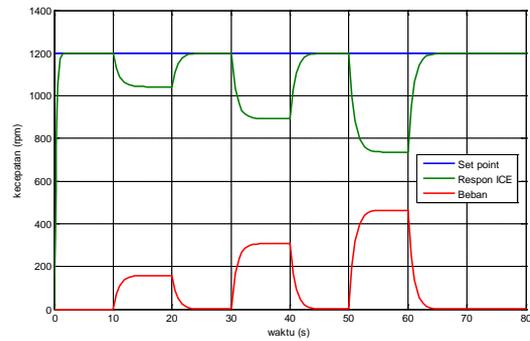
IV. HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pengujian terhadap sistem dilakukan dengan melihat pengaruh kinerja motor DC sebagai penggerak pembantu pada sistem *Hybrid Electric Vehicle* pada saat permasalahan regulasi. Pengujian dilakukan dengan melihat dua keadaan, yaitu pada saat ICE diberi beban tanpa bantuan motor DC dan pada saat ICE diberi beban dengan dibantu motor DC menggunakan kontroler *State Dependent-Linear Quadratic Regulator* pada saat simulasi maupun implementasi.

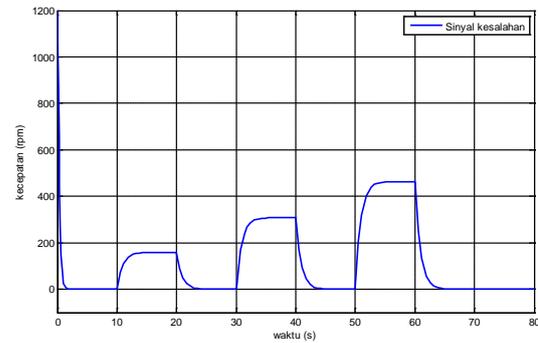
Pengujian pertama dilakukan secara simulasi dengan melihat respon ICE saja terhadap adanya efek beban yang menyebabkan penurunan kecepatan pada HEV. Respon ICE dapat dilihat pada Gambar 6, sedangkan sinyal kesalahan dari respon ICE dapat dilihat pada Gambar 7.

Hal ini tidak sesuai yang diharapkan, yaitu pada permasalahan regulasi kecepatan motor akan tetap stabil pada kondisi *steady state* mencapai kesalahan nol meskipun ICE diberi beban. Tetapi pada ketiga pengujian yang telah dilakukan, ICE saja tidak mampu digunakan untuk mencapai kesalahan nol saat diberikan beban pada ICE sehingga perlu diberikan tenaga penggerak pembantu yaitu dari motor DC.

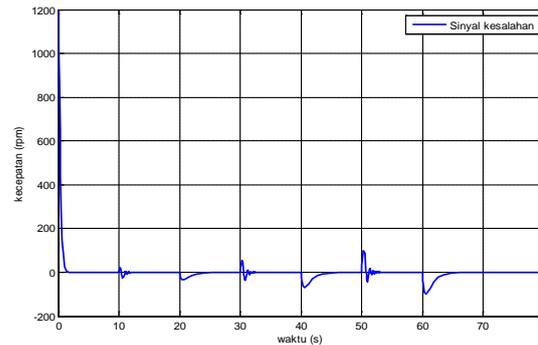
Pengujian kedua dilakukan secara simulasi dengan melihat respon ICE dengan bantuan motor DC pada simulator HEV saat terapat beban transien. Kontroler SD-LQR digunakan dalam pengujian untuk mengatur kecepatan



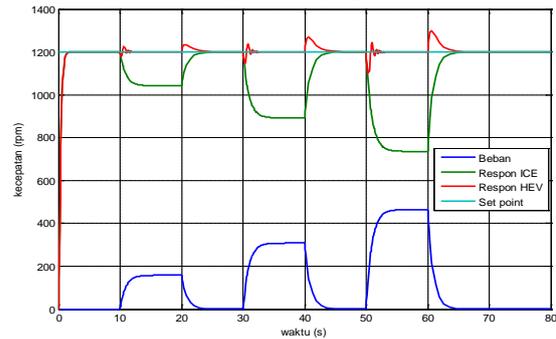
Gambar 6. Respon ICE dengan Beban Yang Berubah



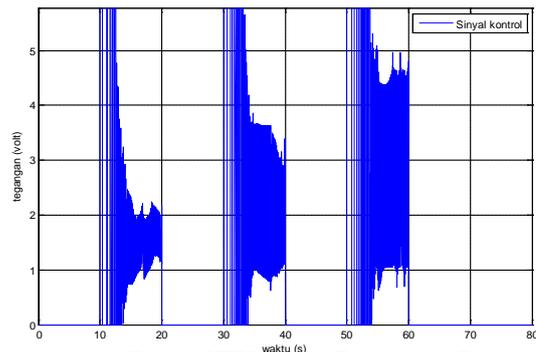
Gambar 7. Sinyal Kesalahan ICE dengan Beban Yang Berubah



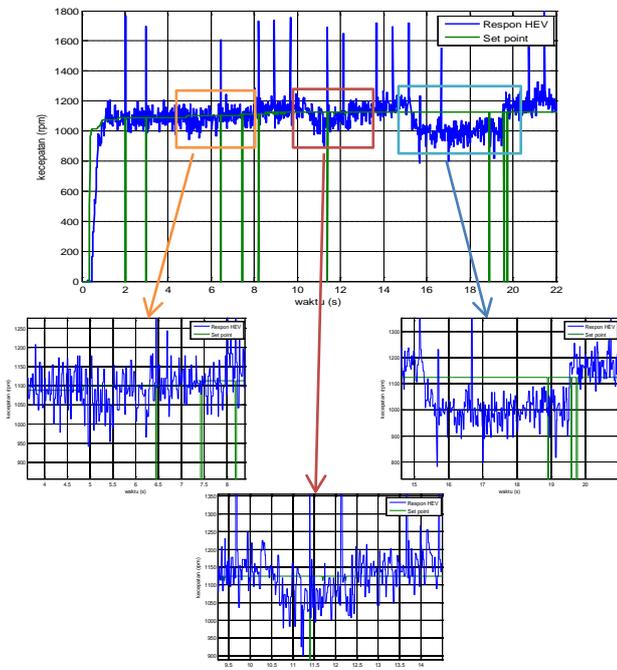
Gambar 8. Respon HEV dengan beban yang berubah



Gambar 9. Sinyal Kesalahan HEV dengan Beban yang Berubah



Gambar 10. Sinyal Kontrol HEV dengan Beban yang Berubah



Gambar 11. Respon HEV pada Implementasi

motor Dc sebagai penggerak pembantu untuk membantu ICE memperbaiki respon kecepatannya. Respon ICE dengan bantuan motor DC dapat dilihat pada **Gambar 8**, sedangkan untuk sinyal kesalahan ICE dapat dilihat pada **Gambar 9** dan sinyal kontrol motor DC dapat dilihat pada **Gambar 10**.

Dari pengujian kedua yang telah dilakukan dengan variasi beban yang berbeda, motor DC dapat membantu kinerja ICE untuk memperbaiki performansi nya mencapai *set point* saat ada beban. Hal ini berarti kontroler *State Dependent-Linear Quadratic Regulator* memiliki performansi yang baik untuk permasalahan regulasi sehingga dapat mengatur motor DC untuk membantu kinerja ICE mempertahankan kondisi *steady state* nya.

Pada pengujian berikutnya dilakukan secara implementasi dengan melihat respon ICE terhadap beban dengan adanya bantuan dari motor DC menggunakan kontroler SD-LQR. Respon HEV pada implementasi dapat dilihat pada Gambar 11.

V. KESIMPULAN

Dari hasil penggunaan kontroler *State Dependent – Linear Quadratic Regulator* (SD-LQR) untuk pengaturan kecepatan motor DC pada simulator PHEV, dapat ditarik kesimpulan bahwa motor DC yang diatur kecepatannya menggunakan kontroler dapat membantu kinerja *Internal Combustion Engine* (ICE) pada permasalahan regulasi. Dengan adanya matriks *state* yang bersifat *dependent*, menyebabkan nilai matriks *state* yang selalu berubah - ubah terhadap nilai proses sebelumnya sehingga dapat terus beradaptasi dengan keadaan saat ini dan memperbarui nilai *gain feedback K* dan sinyal kontrol *u* secara terus menerus. Pada permasalahan regulasi, saat nilai beban berubah – ubah, maka motor DC masih dapat membantu dengan *state* dari motor DC sendiri yang bersifat *dependent* atau bergantung terhadap keadaan yang ada sehingga dapat terus menyesuaikan hingga respon simulator PHEV kembali menuju *set point*. Terlihat bahwa dengan menggunakan kontroler, SD-LQR simulator HEV mampu mengurangi

steady state error yang terjadi hingga 0.05%. Pada implementasi sistem, respon masih memiliki *steady state error* terhadap *set point* nya, terutama saat rem elektromagnetik diberi tegangan sebesar 60 VDC, masih terdapat *steady state error* sebesar 11.1% terhadap *steady state set point* nya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ir. Rusdhianto Effendi A.K., MT. dan Ir. Ali Fatoni, MT. selaku dosen pembimbing dalam pengerjaan penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada orang tua penulis, rekan satu tim dalam pengerjaan penelitian ini yaitu Widhayaka, A.C, Ilmiyah Elrosa C.R, dan Bayu P.W, dan juga kepada seluruh teman angkatan e-50.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Galih Satriyo A.W, Desain dan Implementasi Kontroler Optimal Berbasis Neuro Fuzzy untuk Pengendalian Simulator Hybrid Electric Vehicle, *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2010.
- [2] Wahyu Sriwidodo, Perancangan dan Implementasi Pengendalian Traksi Berbasis Neuro Fuzzy untuk Simulator Kendaraan Hybrid pada Mode Akselerasi, *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2010.
- [3] Weimin Li, Guoqing Xu, Zhancheng Wang, and Yangsheng Xu, “A Hybrid Controller Design For Parallel Hybrid Electric Vehicle”, *Proceeding of the 2007 IEEE International Conference on Integration Technology*, March 20-24, 2007, Shenzhen, China
- [4] Xudong Liu, Yanping Wu, Jianmin Duan, “Optimal Sizing of a Series Hybrid Electric Vehicle Using a Hybrid Genetic Algorithm”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*, August 18-21, 2007, Jinan, China.
- [5] Fu Zhumu, HOU Gaolei and Gao Aiyun, “Modeling and Simulation for Parallel Hybrid Electric Vehicle Powertrain”, *Proceeding of the 2011 International Conference on Advanced Mechatronics Systems*, August 11-13, 2011, Zhengzhou, China
- [6] Mohammad A. P., “Desain dan Implementasi Kontroler Fuzzy PID Sliding mode untuk Pengendalian Simulator Hybrid Electric Vehicle”, *Tesis*, 2012, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
- [7] Ing. Pavel Jakoubek, “ Experimental Identification of Stable Nonoscillatory Systems from Step-Responses by Selected Methods”, *Konferensi Studenske Tyuurci-Cimosti*, 2009
- [8] Cimen,Tayfun, “State-Dependent Riccati Equation (SDRE) Control : A Survey”, *Proceedings of the 17th World Congress*, July 6-11, 2008, Seoul, Korea
- [9] James R. Cloutier, “State-Dependent Riccati Equation Techniques : An Overview”, *Proceedings of the American Control Conference*, June 1997, Albuquerque, New Mexico
- [10] Katsev, Sergey, “Streamlining of the State-Dependent Riccati Equation Controller Algorithm for an Embedded Implementation”, *Thesis*, November 2006, Departemen of Computer Engineering, Rochester Institut of Technology, Rochester, New York