

Pengaturan Kecepatan pada Simulator *Parallel Hybrid Electric Vehicle* Menggunakan Metode PID–*Linear Quadratic* *Regulator*

Fanniesha Hamada, 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—*Hybrid Electric Vehicle* (HEV) merupakan suatu kendaraan dengan konsep ramah lingkungan dan hemat energi yang diharapkan menjadi salah satu alternatif menanggulangi efek rumah kaca dan krisis energi. HEV menggabungkan kinerja *Internal Combustion Engine* (ICE) atau mesin bakar dan motor listrik. Pada HEV dengan konfigurasi paralel, ICE dan motor listrik dapat bekerja bersama-sama. Pada Tugas Akhir ini digunakan Simulator *Parallel Hybrid Electric Vehicle* (PHEV). Simulator ini merepresentasikan kondisi nyata HEV namun dalam skala yang lebih kecil. Simulator ini terdiri dari mesin bakar 2 tak sebagai penggerak utama, motor DC sebagai penggerak pembantu, dan beban berupa rem magnetik arus *eddy*. Ketika terjadi permasalahan regulator akibat pembebanan lebih pada kendaraan, kecepatan putar pada ICE menurun sehingga kecepatan HEV tidak sesuai dengan *output* yang diharapkan. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu kontroler untuk melakukan pengaturan kerja dari motor listrik agar bekerja sesuai dengan kebutuhan yang diinginkan. Kontroler PID – *Linear Quadratic Regulator* (PID-LQR) digunakan untuk memperbaiki performansi kerja HEV agar mampu membantu ICE mencapai kecepatan putar yang seharusnya. Berdasarkan hasil pengujian secara simulasi didapatkan motor DC menggunakan kontroler PID-LQR mampu membantu kinerja ICE sehingga dapat mengembalikan respon sistem menuju nilai *steady state* ketika terjadi pembebanan pada rentang arus beban rem nominal 0.56 A-1.14 A. Berdasarkan hasil pengujian secara implementasi, motor DC dapat membantu kinerja ICE, namun masih terdapat *error steady state*.

Kata Kunci — *Hybrid Electric Vehicle*, ICE, Motor Listrik, Motor DC, PID-LQR

I. PENDAHULUAN

Seiring berkembangnya isu efek rumah kaca karena pencemaran udara dan krisis energi, maka pengembang teknologi terus melakukan inovasi. Sektor transportasi juga melakukan inovasi dibidang teknologi kendaraan. *Hybrid Electric Vehicle* (HEV) merupakan suatu kendaraan dengan konsep ramah lingkungan dan hemat energi yang diharapkan menjadi salah satu alternatif menanggulangi efek rumah kaca dan krisis energi.

Kendaraan *Hybrid Electric Vehicle* (HEV) dengan mesin *hybrid* adalah kendaraan yang menggunakan dua atau lebih tenaga sebagai sumber penggerak [1], yang merupakan gabungan antara mesin bakar dan motor listrik. Pada mesin *hybrid*, tenaga yang digunakan untuk menggerakkan kendaraan bisa berasal dari ICE, motor listrik, maupun gabungan diantara keduanya [1]. Kelebihan dari mesin *hybrid* adalah saat ICE tidak mampu mempertahankan

kecepatan maka motor listrik akan membantu memberikan tenaga [2]. Ketidakmampuan dalam mempertahankan kecepatan tersebut biasanya muncul saat terjadi pembebanan lebih pada kendaraan.

Metode *PID-Linear Quadratic Regulator* (PID-LQR) digunakan untuk mengatur kecepatan motor listrik, sehingga dapat membantu ICE saat terjadi pembebanan lebih yang dapat menurunkan kecepatan pada kendaraan. Metode PID-LQR merupakan metode PID optimal dengan pendekatan LQR untuk menentukan parameter K_p , K_i dan K_d pada kontroler PID. Dengan menggunakan metode ini diharapkan terjadinya penurunan kecepatan akibat efek pembebanan berlebih dapat diatasi dengan adanya pembagian kerja antara dua tenaga sebagai sumber penggerak.

Pada penelitian sebelumnya telah dihasilkan sebuah simulator HEV dengan konfigurasi paralel yang juga digunakan dalam Tugas Akhir ini [3].

II. PENGENALAN *PLANT* DAN KONTROLER

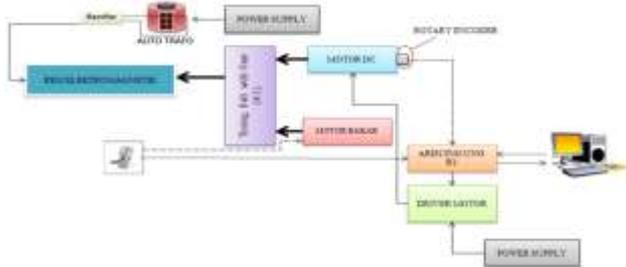
A. Simulator *Parallel Hybrid Electric Vehicle* (PHEV) [4]

Simulator PHEV terdiri dari ICE 2 tak sebagai penggerak utama, motor DC sebagai penggerak pembantu dan beban berupa rem elektromagnetik. ICE mengubah energi bahan bakar (bensin) menjadi energi putar dan beroperasi berdasarkan prinsip satu siklus yang bekerja secara terus menerus. Motor DC yang digunakan adalah motor DC konfigurasi paralel karena memiliki karakteristik non linear. Beban yang digunakan berupa rem elektromagnetik yang memanfaatkan gesekan dua permukaan untuk menghasilkan gaya lawan terhadap gaya gerak sehingga tidak menimbulkan panas yang berlebihan. Karena putaran ICE 4 kali lebih cepat dari motor DC, maka diberi pula *timing belt* dengan perbandingan *gear* 1:4 untuk menyamakan kecepatan putar kedua motor. Motor DC memerlukan *supply* tegangan DC untuk beroperasi. Sumber tegangan DC tersebut didapatkan dengan memanfaatkan tegangan jala-jala dari PLN, yang merupakan tegangan AC, kemudian diubah menjadi tegangan DC menggunakan *rectifier*. Selain itu untuk pembacaan kecepatan dari simulator menggunakan sensor *rotary encoder* yang dipasangkan pada poros motor DC. Hasil pembacaan kecepatan melalui *rotary encoder* kemudian dikirimkan ke komputer melalui proses akuisisi data oleh Arduino untuk dapat ditampilkan dalam bentuk grafik pada HMI yang telah dirancang pada LabView. Simulator PHEV dapat dilihat pada Gambar 1 dan

konfigurasi perangkat keras simulator PHEV dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Simulator PHEV



Gambar 2. Konfigurasi Perangkat Keras Simulator PHEV

B. Metode PID-Linear Quadratic Regulator (PID-LQR) [5]

Metode PID-LQR merupakan metode PID optimal dengan pendekatan LQR untuk menentukan parameter K_p , K_i dan K_d pada kontroler PID. Diagram blok PID-LQR dapat ditunjukkan pada Gambar 3.

Pada metode PID-LQR terdapat beberapa prosedur yang dilakukan untuk mendapatkan parameter kontroler PID. Langkah-langkah perancangan sistem kontrol PID-LQR dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Fungsi alih yang didapatkan dari proses identifikasi *plant* harus diubah dalam representasi *state space*. Diketahui bahwa *plant* merupakan orde dua dengan *input* $u(t)$, *output* $y(t)$, dan fungsi alih *plant* seperti pada (1).

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{a}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{-E(s)}{U(s)} \tag{1}$$

Selanjutnya dimisalkan sebuah *state* :

$$x_0 = \int e(t)dt, \quad x_1 = e(t), \quad x_2 = \frac{de(t)}{dt} \tag{2}$$

Representasi *plant* dalam *state space* dapat dibentuk sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -a \end{bmatrix} u \tag{3}$$

sehingga diperoleh parameter *plant* sebagai berikut :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -a \end{bmatrix} \tag{4}$$

2. Menentukan matriks pembobot \mathbf{Q} dan \mathbf{R}
Matriks \mathbf{Q} merupakan koefisien pembobot yang digunakan untuk menentukan lebar area *state*, sedangkan matriks \mathbf{R} digunakan untuk menentukan lebar area sinyal kontrol u . Adapun syarat dari matriks pembobot adalah :
a. Matriks simetri

- b. Matriks \mathbf{Q} adalah matriks $n \times n$ simetri harus semi definit positif.
- c. Matriks \mathbf{R} adalah matriks $m \times m$ simetri harus definit positif.

Penentuan matriks pembobot \mathbf{Q} dan \mathbf{R} berpedoman pada :

- a. Semakin besar harga matriks \mathbf{Q} , maka akan memperbesar harga elemen matriks *gain* kontrol dan mempercepat sistem mencapai *steady state*.
- b. Semakin besar harga matriks \mathbf{R} , maka akan memperkecil harga elemen matriks *gain* kontrol dan memperlambat sistem mencapai *steady state*.

3. Menyelesaikan persamaan *Algebraic Riccati Equation* (ARE).

Persamaan *Algebraic Riccati Equation* (ARE) seperti ditunjukkan pada (5) :

$$\mathbf{A}^T \bar{\mathbf{P}} + \bar{\mathbf{P}} \mathbf{A} - \bar{\mathbf{P}} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \bar{\mathbf{P}} + \mathbf{Q} = 0 \tag{5}$$

Penyelesaian ini digunakan untuk memperoleh matriks Riccati \mathbf{P} dengan bantuan matriks \mathbf{A} , matriks \mathbf{B} , dan matriks pembobot \mathbf{Q} dan \mathbf{R} .

4. Mendapatkan parameter PID berdasarkan persamaan Kalman *gain*.

Persamaan Kalman *gain* ditunjukkan pada (6) sebagai berikut :

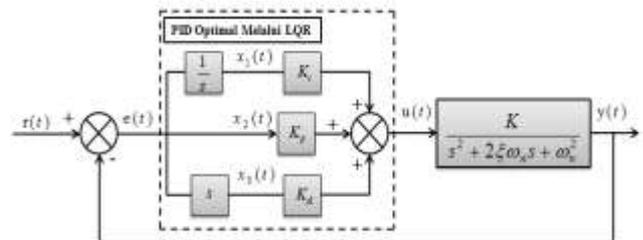
$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \bar{\mathbf{P}} \tag{6}$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{12} & P_{22} & P_{23} \\ P_{13} & P_{23} & P_{33} \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\mathbf{K} = -\mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} a \\ P_{12} & P_{22} & P_{23} \\ P_{13} & P_{23} & P_{33} \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\mathbf{K} = -[a\mathbf{R}^{-1}P_{13} : a\mathbf{R}^{-1}P_{23} : a\mathbf{R}^{-1}P_{33}] \tag{9}$$

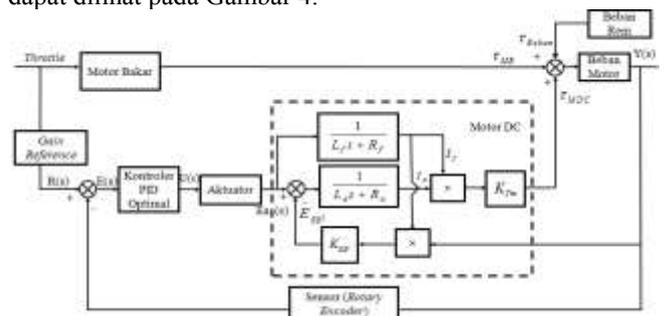
$$\mathbf{K} = -[K_i : K_p : K_d] \tag{10}$$



Gambar 3. Diagram Blok PID-LQR

III. IDENTIFIKASI DAN PERANCANGAN KONTROLER

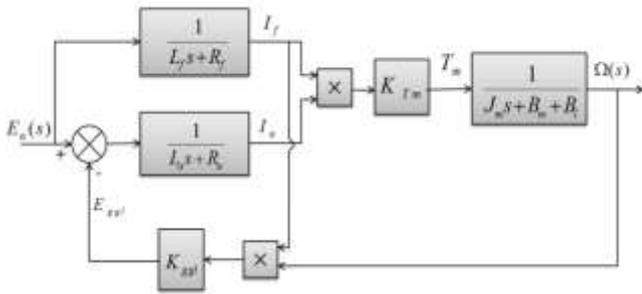
Diagram blok sistem pengaturan kecepatan pada PHEV dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Blok Sistem Pengaturan Kecepatan pada PHEV

A. Identifikasi dan Pemodelan Motor DC

Pada Tugas Akhir ini identifikasi motor DC dilakukan menggunakan identifikasi fisik dengan mencari parameter-parameter pada motor DC seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Blok Fisik Motor DC Konfigurasi Paralel

Parameter-parameter yang diperoleh akan digunakan untuk mendapatkan model matematika dari motor DC. Berdasarkan Gambar 5 parameter-parameter yang diperlukan untuk pemodelan motor DC yaitu konstanta gaya gerak listrik balik motor DC (K_{ggl}), konstanta torsi motor DC (K_{TMDC}), induktansi kumparan jangkar (L_a), resistansi kumparan jangkar (R_a), induktansi kumparan medan (L_f), resistansi kumparan medan (R_f), dan parameter beban (J_m , B_m , dan B_l).

Parameter konstanta ggl balik motor DC (K_{ggl}) diperoleh berdasarkan (11).

$$K_{ggl} = \frac{E_a}{I_f \omega} \tag{11}$$

Parameter K_{TMDC} diperoleh berdasarkan (12) dan nilai $\Delta\tau_{mdc}$ diperoleh berdasarkan (13).

$$K_{TMDC} = \frac{\Delta\tau_{mdc}}{(I_{a\ max} \times I_{f\ max}) - (I_{a\ nom} \times I_{f\ nom})} \tag{12}$$

$$\Delta\tau_{mdc} = \frac{V_{in\ max}(I_{amax} + I_{fmax}) - V_{in\ nom}(I_{anom} + I_{fnom})}{\omega} \tag{13}$$

Pengukuran parameter induktansi, dan reaktansi motor DC dilakukan dengan menggunakan alat LCR meter.

Beban pada simulator HEV terbagi menjadi beban rem elektromagnetik dan beban komponen penghubung antara ICE dengan motor DC. Parameter beban yang diperlukan yaitu parameter koefisien gesek viskos motor (B_m), parameter koefisien gesek viskos rem (B_l), dan parameter momen inersia (J_m).

Parameter koefisien gesek viskos motor (B_m) didapatkan berdasarkan (14).

$$\omega \times B_m - \omega \times I_l \times K_d = K_{TMDC} \times I_a \times I_f \tag{14}$$

Nilai konstanta piringan rem didapatkan berdasarkan (15) :

$$K_d = \frac{K_{TMDC}(I_{a\ max} I_{f\ max} - I_{a\ nom} I_{f\ nom})}{(\omega_{l\ nom} - \omega_{l\ max})} \tag{15}$$

Koefisien gesek viskos rem didapatkan berdasarkan (16).

$$B_l = -K_d \times I_l \tag{16}$$

Parameter momen inersia motor (J_m) didapatkan dari respon sistem motor DC saat diberikan sinyal *step*. Momen inersia motor didapatkan berdasarkan (17).

$$J_m = \tau \times B_m \tag{17}$$

Dari hasil perhitungan didapatkan nilai parameter-parameter motor DC seperti pada Tabel 2

Tabel 2. Nilai Parameter-Parameter Motor DC

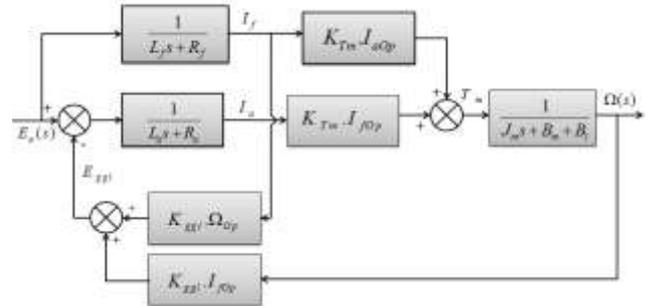
Parameter	Besaran (satuan)	Nilai
K_{ggl}	Konstanta gaya gerak listrik balik motor (V s/rad)	0,71546
K_{TMDC}	Konstanta torsi motor (N-m/A)	0,624
L_a	Induktansi kumparan jangkar (H)	0,09116
R_a	Reakta kumparan medan (Ω)	19,748
L_f	Induktansi medan (H)	23,34
R_f	Reaktansi medan (Ω)	2377,12
J_m	Momen Inersia ($kg \cdot m^2$)	$1,231 \times 10^{-5}$
B_m	Koefisien gesek viskos motor (N-m/rad/sec)	$2,462 \times 10^{-5}$
B_l	Koefisien gesek viskos rem (N-m/rad/sec)	0,000091616

Pada Tugas Akhir ini digunakan Motor DC dengan konfigurasi paralel. Motor DC dengan konfigurasi paralel memiliki karakteristik non linear terhadap arus jangkar, arus medan, dan torsi motor. Karena terdapat beberapa parameter pada konfigurasi motor DC paralel memiliki karakteristik non linear, untuk keperluan perancangan kontroler yang memerlukan model linear maka beberapa persamaan pada motor DC harus dilinearisasi yaitu T_m dan E_{ggl} . Hasil linearisasi persamaan T_m dan E_{ggl} dapat dilihat pada (18) dan (19).

$$\tilde{T}_m = K_{TM} I_{fop} I_a + K_{TM} I_{aop} I_f \tag{18}$$

$$\tilde{E}_{ggl} = K_{ggl} I_f \Omega_{op} + K_{ggl} I_{fop} \Omega \tag{19}$$

Diagram blok fisik motor DC hasil linearisasi dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram Blok Fisik Motor DC Hasil Linearisasi

Hubungan *input-output* motor DC hasil linearisasi dalam fungsi alih dapat dilihat pada (20).

$$\frac{\Omega}{E_a} = \frac{K_{TM} I_{aop} (L_a s + R_a) + K_{TM} I_{fop} (L_f s + R_f) - K_{ggl} \Omega_{op} K_{TM} I_{fop}}{(L_f s + R_f)(L_a s + R_a)(J_m s + B_m + B_l)} \tag{20}$$

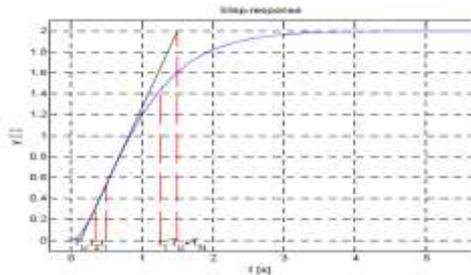
Dengan memasukkan nilai parameter pada Tabel 2 ke dalam (20), didapatkan model matematika motor DC adalah sebagai berikut :

$$G(s) = \frac{\Omega}{E_a} = \frac{12295,58}{s^2 + 76,4785s + 635,9768} \tag{21}$$

B. Identifikasi dan Pemodelan ICE

Untuk mendapatkan permodelan ICE, dilakukan identifikasi statis menggunakan metode Strejc. Metode Strejc merupakan salah satu metode identifikasi dengan penarikan garis singgung pada respon *plant*. Pada metode Strejc penarikan garis berdasarkan pada titik belok dari grafik respon seperti pada Gambar 7. Dengan ini didapatkan nilai T_U dan T_N . T_U merupakan waktu tunda sistem dan T_N merupakan waktu saat respon melewati waktu tunda hingga mencapai batas penarikan garis terhadap titik belok respon. Nilai T_U dan T_N berpengaruh terhadap orde *plant* dan untuk memodelkan respon *plant* berdasarkan tabel Strejc. Dengan diketahui nilai T_u dan T_N , maka dapat dicari nilai τ berdasarkan (22).

$$\tau = \frac{T_U}{T_N} \tag{22}$$



Gambar 7. Respon Step Sistem dengan waktu t_1, t_2, t_b, T_U , dan T_N

Jika dari perbandingan didapatkan nilai $\tau \geq 0$, sistem didekati dengan orde ke-n dengan berdasarkan (23) sebagai berikut:

$$G_{ST}(s) = \frac{K}{(\tau_{ST}s+1)^n} \tag{23}$$

Berdasarkan nilai τ dapat ditentukan nilai y_i (dapat dilihat pada Tabel 3). Setelah didapatkan nilai y_i , maka melalui respon sistem dapat ditemukan nilai t_i . Jika nilai t_i sudah diketahui maka dapat ditemukan nilai τ_{ST} seperti pada (24).

$$\tau_{ST} = \frac{t_i}{n-1} \tag{24}$$

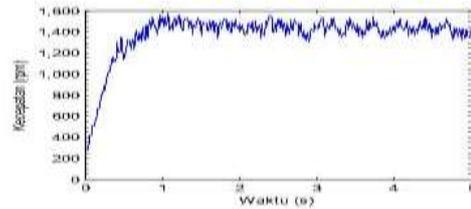
Tabel 3. Taksiran Orde ke-n dan Nilai Titik Singgung [5]

n	τ	y_i	n	τ	y_i
1	0,014	0,264	6	0,493	0,384
2	0,218	0,327	7	0,57	0,394
3	0,319	0,359	8	0,642	0,401
4	0,41	0,371	9	0,769	0,407
5	0,493	0,384	10	0,773	0,413

Hasil pemodelan dengan metode Strejc adalah pendekatan dari pemodelan ICE yang telah terhubung dengan beban. Model matematika ICE didapatkan berdasarkan (25).

$$G_{MB}(s) = \frac{G_{ST}(s)}{G_L(s)} \tag{25}$$

Pada Tugas Akhir ini digunakan model matematika hasil Strejc pada kondisi beban nominal. Hasil pemodelan untuk ICE berbeban nominal dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Respon Kecepatan Putar ICE Beban Nominal

Berdasarkan hasil perhitungan, pendekatan model dengan metode Strejc, didapat model orde ke-2 pada (26) sebagai berikut :

$$G_{ST}(s) = \frac{35.14}{(0,125s+1)^2} \tag{26}$$

Sehingga didapatkan model matematika ICE berdasarkan (25) :

$$G_{MB}(s) = \frac{G_{ST}(s)}{G_L(s)}$$

$$G_{MB}(s) = \frac{(43,25734 \times 10^{-5})s + 408,453304 \times 10^{-5}}{0,015625s^2 + 0,25s + 1} \tag{27}$$

C. Perancangan Kontroler PID-LQR

Model matematika motor DC dari proses identifikasi seperti ditunjukkan pada (21). Diketahui bahwa *plant* merupakan orde dua dengan *input* $u(t)$, *output* $y(t)$, dan fungsi alih *plant* sebagai berikut :

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{a}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{-E(s)}{U(s)} \tag{28}$$

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{12295,58}{s^2 + 76,4785s + 635,9768} = \frac{-E(s)}{U(s)} \tag{29}$$

$$E(s)[s^2 + 76,4785s + 635,9768] = -12295,58U(s) \tag{30}$$

$$\ddot{e} = -76,4785\dot{e} - 635,9768e - 12295,58u \tag{31}$$

Dimisalkan sebuah *state*,

$$x_0 = \int e(t)dt, \quad x_1 = e(t), \quad x_2 = \frac{de(t)}{dt} \tag{32}$$

$$\dot{x}_0 = e = x_1 \tag{33}$$

$$\dot{x}_1 = \dot{e} = x_2 \tag{34}$$

$$\dot{x}_2 = \ddot{e} \tag{35}$$

dengan,

$$x_0 = \text{Augmented state} \tag{36}$$

$$x_1 = \text{Kecepatan putar motor DC} \tag{37}$$

$$x_2 = \text{Percepatan motor DC} \tag{38}$$

Masukkan (31) ke (35), sehingga didapatkan (39) :

$$\dot{x}_2 = -635,9768x_1 - 76,4785x_2 - 12295,58u \tag{39}$$

Representasi *plant* dalam *state space* dapat dibentuk sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -635,9768 & -76,4785 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -12295,58 \end{bmatrix} u$$

Sehingga diperoleh parameter *plant* sebagai berikut :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -635,9768 & -76,4785 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -12295,58 \end{bmatrix}$$

Setelah diperoleh parameter *plant*, ditentukan matriks pembobot **Q** dan **R** melalui *trial and error*. Matriks **A**, matriks **B**, matriks pembobot **Q** dan **R** digunakan untuk memperoleh matriks Riccati **P** dengan menyelesaikan persamaan *Algebraic Riccati Equation* (ARE) seperti pada (5). Pada Tugas Akhir ini dilakukan pemilihan matriks **Q** dan **R** sebanyak 4 kali dengan matriks **Q** semidefinit positif dan matriks **R** definit positif sehingga menghasilkan 4 nilai matriks Riccati **P** yang berbeda-beda. Nilai matriks Riccati **P** melalui penyelesaian ARE ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 3. Nilai Matriks P Melalui Penyelesaian ARE

Matriks Pembobot		Matriks P
R	Q	
[0,1]	$\begin{bmatrix} 0,005 & 0 & 0 \\ 0 & 0,001 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,0028 & 0,0002 & 0,0000 \\ 0,0002 & 0,0001 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \end{bmatrix}$
[0,1]	$\begin{bmatrix} 0,01 & 0 & 0 \\ 0 & 0,01 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,0104 & 0,0003 & 0,0000 \\ 0,0003 & 0,0003 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \end{bmatrix}$
[0,1]	$\begin{bmatrix} 0,1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,1015 & 0,0014 & 0,0000 \\ 0,0014 & 0,0014 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \end{bmatrix}$
[0,1]	$\begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2,2732 & 0,0166 & 0,0001 \\ 0,0166 & 0,0075 & 0,0000 \\ 0,0001 & 0,0000 & 0,0000 \end{bmatrix}$

Melalui persamaan Kalman *gain* pada (6), (9) dan (10), maka diperoleh parameter PID yang nilainya ditunjukkan pada Tabel 4.

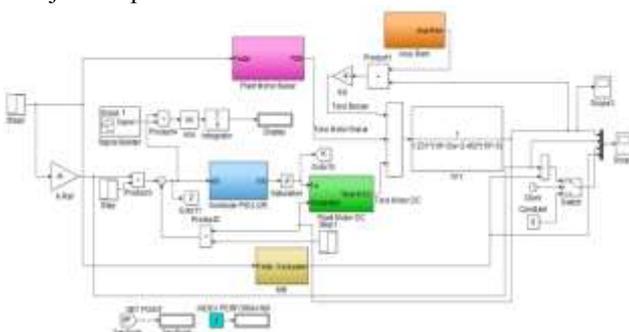
Tabel 4. Nilai K_p , K_i dan K_d

Parameter PID		
K_p	K_i	K_d
0,0742	0,2236	0,0009
0,2776	0,3162	0,0029
0,9635	1	0,0078
3,1631	7,0711	0,0173

Nilai Parameter K_p , K_i , dan K_d yang telah didapatkan kemudian diuji untuk ditentukan nilai parameter PID mana yang paling baik untuk menyelesaikan permasalahan regulator pada sistem HEV.

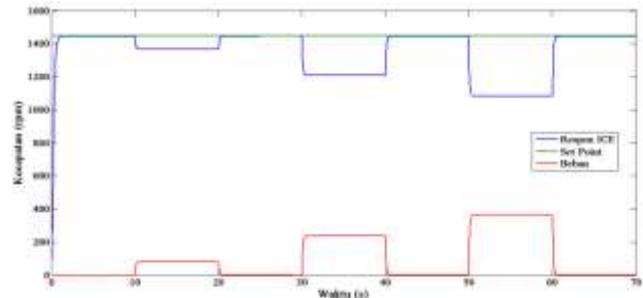
IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pengujian sistem dilakukan secara simulasi dan implementasi. Blok Simulink simulasi kontroler PID-LQR ditunjukkan pada Gambar 9.

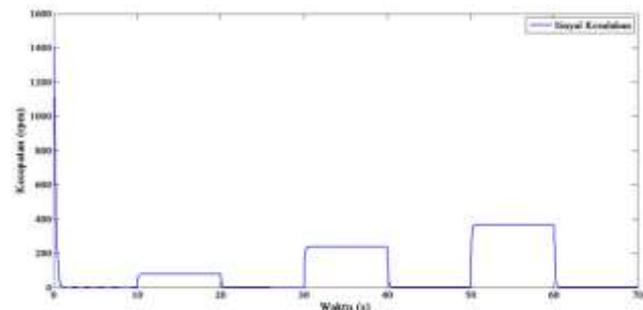


Gambar 9. Blok Simulink Simulasi Kontroler PID-LQR

Simulasi pertama merupakan simulasi ICE tanpa bantuan motor DC. Simulasi ini bertujuan untuk melihat respon ICE terhadap adanya efek beban. Pada proses pengujian, ICE akan diberi sinyal masukan berupa sinyal *step* sebesar 1448 rpm dengan diberi tiga macam beban transien yang berbeda. Klasifikasi beban untuk permasalahan regulator ini ditentukan dari arus yang diberikan pada rem elektromagnetik. Variasi beban yang diperbolehkan dalam pengujian kontroler harus sesuai dengan pemodelan nominal untuk ICE (d disesuaikan dengan *range* pembebanan nominal), sehingga dibatasi beban yang diperbolehkan adalah pada *range* arus beban 0,56 A– 1,14 A. Pada Tugas Akhir ini variasi arus beban yang diberikan adalah 0,6 A, 0,7 A, dan 0,8 A. Respon ICE dapat dilihat pada Gambar 10, sedangkan sinyal kesalahan dari respon ICE dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 10. Respon Kecepatan Putar ICE dengan 3 Variasi Beban

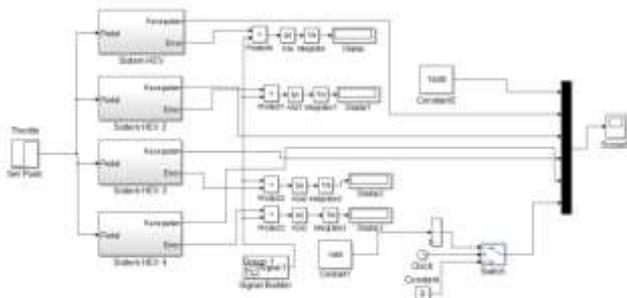


Gambar 11. Sinyal Kesalahan ICE dengan 3 Variasi Beban

Dari pengujian yang telah dilakukan dengan 3 variasi beban yang berbeda dapat dilihat bahwa kesalahan akan bertambah saat terdapat beban dan kembali nol saat beban sudah tidak ada. Hal ini tidak sesuai dengan yang diharapkan, yaitu pada permasalahan regulator kecepatan motor akan tetap stabil pada kondisi *steady state* mencapai kesalahan nol meskipun ICE diberi beban. Tetapi pada pengujian yang telah dilakukan, ICE saja tidak mampu digunakan mencapai kesalahan nol saat diberikan beban sehingga perlu diberikan tenaga penggerak pembantu yaitu motor DC.

Simulasi kedua merupakan simulasi ICE beban nominal dengan bantuan motor DC menggunakan kontroler PID-*Linear Quadratic Regulator*. Simulasi ini bertujuan untuk menyelesaikan permasalahan regulator dengan mengontrol motor DC agar dapat memberikan bantuan berupa torsi kepada ICE saat ada beban transien. Beban yang diberikan juga berupa arus rem terdapat 3 macam yaitu 0,6 A, 0,7, dan 0,8 A.

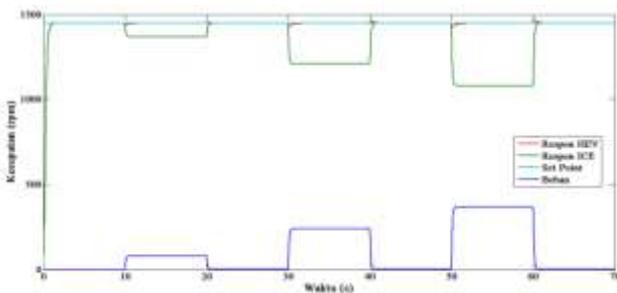
Pemilihan parameter PID untuk mempertahankan kecepatan pada permasalahan regulator berdasarkan nilai kesalahan terkecil, dilihat dari nilai IAE (*Integral Absolute Error*) yang terkecil. Berdasarkan hasil simulasi (simulink MATLAB dapat dilihat pada Gambar 12.) didapatkan nilai IAE saat arus beban 0,6 A, 0,7 A, dan 0,8 A.



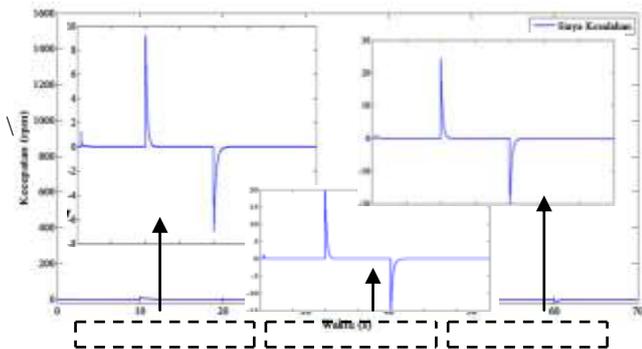
Gambar 12. Simulink Pencarian Nilai IAE

Nilai IAE terkecil didapat dengan parameter $K_p = 3,1631$, $K_i = 7,0711$, dan $K_d = 0,0173$ sehingga parameter PID tersebut dianggap paling baik untuk dapat membantu kinerja ICE memperbaiki performansinya mencapai *set point* ketika diberi beban.

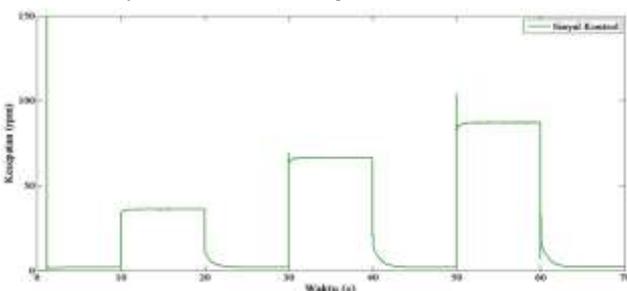
Ketika terjadi penurunan kecepatan, kontroler PID- LQR mampu mengontrol motor DC untuk membantu ICE agar dapat mempertahankan kecepatan menuju nilai *steady state* dari ICE seperti yang terlihat pada Gambar 13 sehingga menghilangkan kesalahan hingga 99,8 %. Sinyal kesalahan dari keseluruhan sistem terhadap *set point* seperti yang ditampilkan pada Gambar 14, dan sinyal kontrol pada Gambar 15.



Gambar 13. Respon Kecepatan Putar HEV dengan 3 Variasi Beban Menggunakan Kontroler PID-LQR



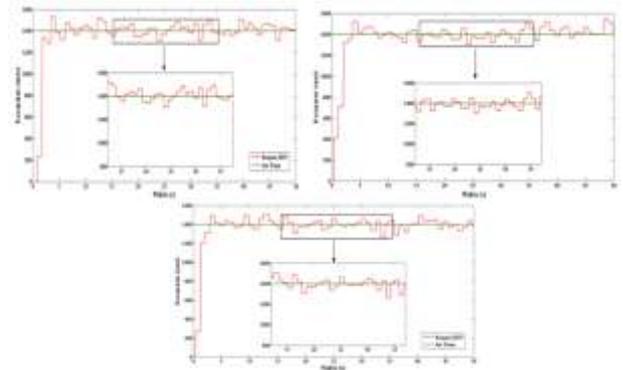
Gambar 14. Sinyal Kesalahan HEV dengan 3 Variasi Beban



Gambar 15. Sinyal Kontrol Motor DC dengan 3 Variasi Beban

Pengujian berikutnya dilakukan secara implementasi dengan melihat respon ICE terhadap beban berupa tegangan rem elektromagnetik dengan adanya bantuan dari motor DC

menggunakan kontroler PID-LQR. Berdasarkan hasil pengujian secara implementasi seperti dapat diamati pada Gambar 16, motor DC menggunakan kontroler PID-LQR mampu membantu ICE untuk mengembalikan kecepatan hingga mendekati *set point* pada saat terjadi pembebanan, meskipun masih terdapat *error steady state* hingga 28,8 %.



Gambar 16. Respon Kecepatan Putar HEV Menggunakan Kontroler PID-LQR dengan 3 Variasi Beban pada Implementasi

V. KESIMPULAN

Parameter kontroler PID berupa K_p , K_i , dan K_d yang optimal dapat dicari menggunakan pendekatan *Linear Quadratic Regulator* berdasarkan penerapan aturan tertentu yang sesuai. Motor DC dengan kontroler PID-LQR dapat membantu kinerja ICE pada permasalahan regulator dengan nilai parameter $K_p = 3,163$, $K_i = 7,0711$, dan $K_d = 0,0173$. Hasil pengujian secara simulasi menggunakan kontroler PID-LQR, motor DC mampu membantu kinerja ICE pada saat terdapat beban sehingga kecepatan yang diinginkan dapat dipertahankan dengan menghilangkan kesalahan hingga 99,8 %. Pada hasil implementasi, motor DC juga mampu membantu ICE pada saat terjadi pembebanan sehingga kecepatan putar HEV mendekati *set point*, meskipun masih terdapat *error steady state* hingga 28,8 %.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Mohebbi, M. Charkgard and M. Farokhi, "Optimal Neuro-Fuzzy Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles", *Vehicle Power and Propulsion, IEEE Conference*, pp.26-30, 7-9 Sept, 2005
- [2] W. A. Candra, Pengaturan Kecepatan pada Parallel Hybrid Electric Vehicle Menggunakan Linear Quadratic Regulator Berdasarkan Particle Swarm Optimization, Surabaya: Jurusan Teknik Elektro ITS, 2014.
- [3] G. Satrio Aji Wibowo, Desain dan Implementasi Kontroler Optimal Berbasis Neuro Fuzzy untuk Pengendalian Simulator Hybrid Electric Vehicle, Surabaya: Jurusan Teknik Elektro ITS, 2010.
- [4] A. Enderwati, Perancangan Sistem Pengaturan Kecepatan pada Simulator Parallel Hybrid Electric Vehicle (PHEV) Menggunakan Metode State Dependent-Linear Quadratic Regulator, Surabaya: Jurusan Teknik Elektro ITS, 2014.
- [5] I. Pavel Jakoubek, "Experimental Identification of Stable Nonoscillatory Systems from Step-Responses by Selected Methods," in *Konference Studenske Tvurci-Cinnosti*, 2009.
- [6] J. B. He, Q. G. Wang and T. H. Lee, "PI/PID Controller Tuning Via LQR Approach," *Proceedings of The 37th IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 1, pp. 1177-1182, 2005.