

Traction Control pada Parallel Hybrid Electric Vehicle dengan Metode Generalized Predictive Control

Ilmiyah Elrosa C.R., Rusdhianto Effendi AK., dan Eka Iskandar

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

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: rusdhi@elect-eng.its.ac.id, iskandar@elect-eng.its.ac.id

Abstrak— Dalam *Hybrid Electric Vehicle*, terutama pada *Parallel Hybrid Electric Vehicle* (PHEV) terdapat suatu masalah, yaitu lambatnya respon *Internal Combustion Engine* (ICE) apabila terjadi peningkatan kecepatan. Saat keadaan akselerasi ICE membutuhkan bantuan dari motor listrik. Karena jika tidak ada bantuan dari motor listrik dan terjadi secara terus menerus dapat mengurangi kinerja dari ICE. Oleh karena itu dibutuhkan pengaturan traksi motor listrik untuk membantu ICE dalam mencapai tingkat akselerasi yang diinginkan. Pada Tugas Akhir ini digunakan metode *Generalized Predictive Control* untuk mengatasi masalah kenaikan kecepatan. Dengan metode ini yang memanfaatkan informasi masa depan, dapat menghasilkan respon yang mendekati model referensi. Dengan itu dapat membantu ICE dalam menanggung beban yang diberikan. Berdasarkan hasil pengujian sistem pengaturan dengan metode GPC dapat memperbaiki respon yaitu peningkatan *rise time* dari 0,624s ke 0,35s, hal ini membuktikan bahwa kontroler GPC sesuai untuk mempercepat respon transien dari suatu palnt

Kata Kunci— *Generalized Predictive Control, Parallel Hybrid Electric Vehicle, Traction Control.*

I. PENDAHULUAN

DALAM kehidupan nyata, terdapat berbagai macam masalah yang sampai saat ini belum bisa diselesaikan. Salah satu masalah tersebut adalah masalah transportasi. Semakin meningkatnya jumlah alat transportasi mengakibatkan peningkatan tingkat emisi gas yang diakibatkan oleh asap asap kendaraan bermotor. Hal ini mengakibatkan memburuknya iklim di dunia (*global warming*). Ditambah lagi dengan penggunaan bahan bakar minyak (BBM) yang tergolong sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui, sehingga jika digunakan secara terus menerus akan terjadi kelangkaan..

Kendaraan listrik muncul untuk menyelesaikan permasalahan tersebut. Keunggulan kendaraan ini yaitu tidak mengeluarkan emisi karbon, tidak menggunakan BBM, dan tidak bising. Kelemahan kendaraan ini yaitu rendahnya kapasitas baterai, sehingga membuat waktu berkendara rendah dan membutuhkan waktu pengisian yang lama.

Salah satu solusi untuk menyelesaikan permasalahan diatas adalah dengan menggunakan kendaraan hybrid (*Hybrid Electric Vehicle*). Kendaraan hybrid merupakan kendaraan yang bekerja dengan menggunakan dua jenis penggerak. Pada umumnya penggerak yang digunakan adalah *Internal*

Combustion Engine (ICE) dan motor listrik. Motor listrik didesain untuk membantu motor bakar pada keadaan transien dan membantu ICE beroperasi lebih konstan, sehingga dapat meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar dan rendah emisi.

Dalam penggunaannya, kendaraan tidak terlepas dari adanya kenaikan atau penurunan kecepatan. Oleh karena itu dibutuhkan pengaturan traksi untuk mengatasi kenaikan kecepatan. Ketika kecepatan dinaikkan ICE akan meningkatkan kinerjanya sehingga untuk menstabilkan kinerja ICE motor listrik aktif untuk membantu motor bakar mencapai kecepatan yang diinginkan.

Metode GPC akan digunakan untuk pengaturan traksi dalam penelitian ini, metode ini digunakan untuk memprediksi adanya error sehingga dapat menghasilkan sinyal kontrol yang sesuai. Selain itu metode ini berguna untuk menjaga kestabilan motor bakar dalam mencapai kecepatan yang diinginkan.

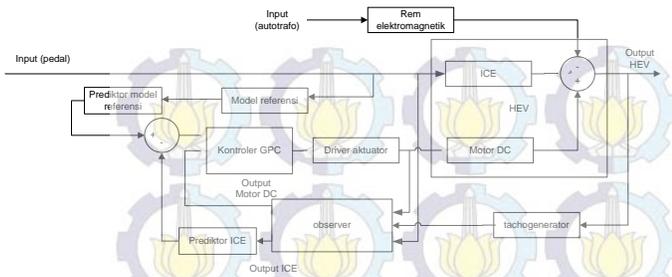
II. PENGENALAN PLANT DAN METODE KONTROL

A. Simulator HEV [1][2]

Simulator HEV menggunakan penggerak yang terdiri dari ICE dan motor DC. Bentuk fisik simulator HEV ditunjukkan pada Gambar 1. ICE digunakan sebagai penggerak utama dan motor DC digunakan untuk membantu ICE dalam meningkatkan torsi kendaraan. Selain itu digunakan rem elektromagnetik untuk memberikan efek pembebanan. Pembebanan ini digunakan untuk menguji pengaruh motor DC dalam membantu ICE meningkatkan akselerasi. Diagram blok sistem ditunjukkan pada Gambar 2.



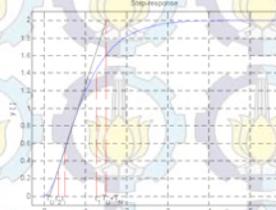
Gambar 1 Bentuk Fisik Simulator HEV



Gambar 2 Diagram Blok Sistem

B. Identifikasi Strejc [3]

Metode Strejc merupakan metode untuk identifikasi *plant* dengan cara menarik garis singgung pada titik belok respon step *plant* dalam domain waktu. Penarikan garis ini ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Penarikan garis pada Metode Strejc

Pada metode strejc penarikan garis berdasar pada titik belok (inflection point) dari grafik respons. Dengan ini didapatkan nilai T_u dan T_N . T_u merupakan waktu tunda sistem dan T_N merupakan waktu saat respons melewati waktu tunda hingga mencapai batas penarikan garis terhadap titik belok respons. Nilai T_u dan T_N ini berpengaruh terhadap orde pant dan untuk memodelkan respon *plant* berdasarkan tabel Strejc. Dengan diketahui nilai T_u dan T_N , maka dapat dicari nilai τ ,

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

Untuk $\tau \geq 0$ sistem didekati dengan orde ke n dengan persamaan

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

Berdasarkan nilai τ dapat ditentukan nilai y_t berdasarkan nilai yang ada pada Tabel 2. Dengan nilai y_t , maka nilai t_i dapat ditemukan dengan melihat respon sistem. Jika nilai t_i sudah diketahui maka dapat ditemukan nilai τ_{ST} .

$$\tau_{ST} = \frac{t_i}{n - 1} \tag{3}$$

Tabel 1. Parameter identifikasi Metode Strejc

n	τ	y_t
2	0.104	0.264
3	0.218	0.327
4	0.319	0.359
5	0.41	0.371
6	0.493	0.384
7	0.57	0.394
8	0.642	0.401
9	0.709	0.407
10	0.773	0.413

C. Generalized Predictive Control (GPC)[4][5]

GPC yang telah diperkenalkan oleh Clarke *et al* [4] telah banyak digunakan pada proses dalam industri. Hal ini disebabkan karena kemampuan pengaturan yang stabil untuk sistem dengan parameter, *dead time*, dan orde model yang berubah ubah.

Ketika memperhatikan titik operasi, *plant* non linier umumnya menggunakan model linier pada daerah tertentu. Salah satu permodelan yang umum digunakan adalah model CARMA (Controlled Auto-Resgresive Moving Average),

$$A(q^{-1}) = B(q^{-1})u(t - 1) + C(q^{-1})\xi(t) \tag{4}$$

dengan $u(t)$ *input* kontrol, $y(t)$ variabel yang terukur atau *output*, dan $\xi(t)$ gangguan. Dimana A dan B adalah polinomial

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_naq^{-na} \\ B(q^{-1}) &= b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_nbq^{-nb} \\ C(q^{-1}) &= 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_ncq^{-nc} \end{aligned}$$

Sinyal *output* prediksi $\hat{y}(k + d + 1 + n_c)$ dituliskan sebagai penjumlahan dari *free response* dan *force response*.

$$\hat{y} = \hat{y}_{force} + \hat{y}_{free} \tag{5}$$

Free Response merupakan respon hasil pengaruh dari *input* lampau, *output* yang akan datang dengan asumsi aksi kontrol dari waktu saat ini. *Force response* merupakan respon hasil pengaruh *input* saat ini dan yang akan datang terhadap *output* yang akan datang. Persamaan *force response* adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \hat{y}_{force}(k + d + 1 + n_c|k) &= \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})}u(k + 1 + n_c|k) \\ &= G(q^{-1})u(k + 1 + n_c|k) \end{aligned} \tag{6}$$

atau

$$\hat{y}_{force} = Gu_f$$

di mana

$$u_f = [u(k|k), u(k + 1|k), \dots, u(k + n_{c2} - 1|k)]^T,$$

$G(q^{-1})$ adalah fungsi alih pulsa dari proses tanpa *dead time* fisik.

Variabel manipulasi untuk saat ini dan akan datang disebut $u(k + i), i \geq 0$ didesain dengan waktu diskrit, dan bisa ditulis $\Delta u(k + i|k)$. Untuk lebih mudahnya penulisan $\Delta u(k + i|k)$ hanya ditulis $\Delta u(k + i)$. G merupakan koefisien respon unit step

$$G = \begin{bmatrix} g_{nc1+1} & g_{nc1} & \dots & g_{nc1-n_u+2} \\ g_{nc1+2} & g_{nc1+1} & \dots & g_{nc1-n_u+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{nc2+1} & g_{nc1} & \dots & g_{nc2-n_u+2} \end{bmatrix}$$

Berdasarkan strategi *receding horizon* hanya *input* pertama $u(k)$ digunakan dan dihitung dan diulang ke langkah kontrol selanjutnya,

$$u(k) = [1, 0, \dots, 0][G^T G + \lambda_u I]^{-1} G^T (y_r - \hat{y}_{free}) \tag{7}$$

dimana vektor $[1, 0, \dots, 0]$ memiliki $n_u - 1$ nilai nol.

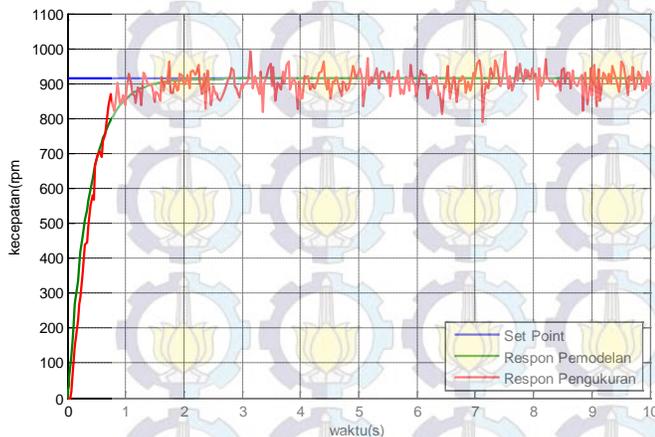
III. IDENTIFIKASI DAN PERANCANGAN KONTROLER

A. Identifikasi Plant

Identifikasi pada ICE dan motor DC dilakukan pada sistem open loop dengan identifikasi statis, yaitu dengan memberikan input berupa sinyal step. Pada ICE, sinyal step berupa injakan pedal yang langsung diarahkan kebatas maksimum pedal. Sedangkan pada motor DC dilakukan secara manual dengan memutar autotrafo. Pengambilan data ini dilakukan dengan menghubungkan tachogenerator dengan arduino yang telah terhubung ke software Simulink MATLAB.

B. Identifikasi ICE

Dalam perancangan kontroler, dilakukan identifikasi plant pada saat beban nominal. Permodelan dengan beban nominal dilakukan memberikan beban berupa rem elektromagnetik yang diberikan tegangan 60V. Grafik respon ICE dengan beban nominal dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil Identifikasi dan Pemodelan ICE Beban Nominal

Dari grafik tersebut ditemukan parameter permodelan Strejc seperti berikut : nilai K didapatkan dari

$$K = \frac{Y_{ss}}{X_{ss}} = \frac{914}{914} = 1$$

Selanjutnya dicari nilai T_U dan T_N yang didapatkan dengan menarik garis miring yang memotong titik belok respon saat transien. dari nilai T_U dan T_N didapatkan nilai τ .

$$\tau = \frac{T_U}{T_N} = \frac{0,06133}{0,5843} = 0,1049$$

Setelah nilai τ diketahui, dengan melihat Tabel 1., maka ditemukan nilai y_i . Nilai tersebut kemudian dikalikan dengan nilai Y_{ss} , dan ditemukan suatu nilai.

$$y_i = 0,264(914) = 241,296$$

Dengan melihat grafik respon sistem yang ditunjukkan pada Gambar 4, maka ditemukan t_i saat y_i

$$t_i = 0,1848$$

Kemudian dengan menggunakan persamaan 3, didapatkan nilai τ_{ST}

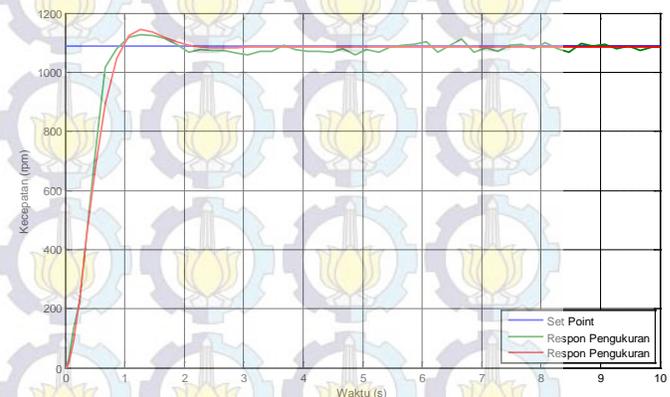
$$\tau_{ST} = 0,1848$$

Dari perhitungan di atas didapatkan fungsi alih ICE dengan beban nominal sebagai berikut.

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

C. Identifikasi Motor DC

Proses identifikasi motor DC melalui tahapan yang hampir sama dengan motor bakar. Motor DC diberikan tegangan 75V dc dari autotrafo. Grafik respon motor DC ditampilkan pada Gambar 5. Dari gambar tersebut terlihat bahwa terdapat overshoot pada respon sistem, sehingga dengan respon demikian permodelan Strejc tidak bisa dilakukan. Oleh karena itu dilakukan permodelan dengan pendekatan analitik sebagai berikut :



Gambar 5 Respon Kecepatan Motor DC

Menentukan besar overshoot maksimum (persen) dengan dengan nilai $c(t_p) = 1126$, dan $c(\infty) = 1090$

$$M_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% = 5,5\%$$

Selanjutnya adalah mencari nilai ω_d yang merupakan frekuensi alami teredam dengan persamaan berikut

$$\omega_d = \frac{\pi}{t_p} = \frac{3,14}{1,287} = 2,44$$

Untuk menemukan nilai koefisien peredaman (ξ), digunakan persamaan:

$$M_p = e^{-(\xi/\sqrt{1-\xi^2})\pi} = 0,678$$

Setelah mendapatkan nilai ξ , maka dapat ditemukan nilai ω_n dengan persamaan :

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \rightarrow \omega_n = 3,318$$

Respon sistem menunjukkan bahwa sistem tergolong redaman kurang atau *under damped* ($0 < \xi < 1$), maka fungsi alih sistem dapat dituliskan sebagai berikut

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{(s + \xi\omega_n + j\omega_d)(s + \xi\omega_n - j\omega_d)}$$

$$G(s) = \frac{11,01}{(s^2 + 4,5s + 11,056)}$$

D. Model Referensi

Model ini didesain dengan tidak memiliki *error steady state* dan memiliki *settling time* yang lebih cepat dibanding ICE. Dari fungsi alih ICE yang memiliki *settling time* ($\pm 5\%$) sebesar 1,2. Maka ditentukan *settling time* model referensi

lebih cepat yaitu 0,6s. Model referensi dirancang dengan model orde satu dengan nilai τ

$$T_s(\pm 5\%) = 3\tau$$

$$\tau = 0,2$$

Sehingga didapatkan model referensi sebagai berikut

$$G(s) = \frac{1}{0,2s + 1}$$

E. Perancangan Kontroler

Pada penelitian ini, *Generalized Predictive Control* (GPC) digunakan untuk mengatur motor DC. Pengaturan motor DC ini bertujuan untuk membantu motor bakar dalam meningkatkan akselerasi. Hal ini disebabkan karena respon motor bakar lambat.

Kontroler ini disusun berdasarkan kinerja motor DC. Dari model matematika motor DC, maka dilakukan permodelan ARMA (*AutoRegressive Moving Average*). Bentuk ARMA didapatkan dari penyusunan blok identifikasi ARMAX pada simulink Matlab. Ditentukan nilai orde sistem adalah 2 dan orde *input* adalah 2 dan *time sampling* sebesar 0,1, dengan dijalankan selama 100s maka didapatkan hasil permodelan ARMA sebagai berikut:

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{0,047215z + 0,0406226}{z^2 - 1,548z + 0,63763}$$

$$y(k) = 1,548y(k - 1) - 0,63763y(k - 2) + 0,047215u(k - 1) - 0,0406226u(k - 2)$$

Dengan

$$A(q^{-1}) = a_1q^{-1} + a_2q^{-2}$$

$$= 0,047215q^{-1} + 0,0406226q^{-2}$$

$$B(q^{-1}) = 1 - b_1q^{-1} + b_2q^{-2}$$

$$= 1 - 1,548q^{-1} + 0,63763q^{-2}$$

Setelah model ARMA ditemukan, langkah selanjutnya yaitu menentukan panjang *prediction horizon*. Penentuan ini harus disesuaikan dengan respon yang diharapkan. Apabila panjang horizon terlalu pendek akan menimbulkan overshoot, sedangkan apabila terlalu panjang respon sistem akan lambat walaupun tidak terdapat overshoot. Dari model referensi yang telah ditentukan sebelumnya, diharapkan respon lebih cepat dari pada sebelumnya, sehingga ditentukan panjang *prediction horizon* sebesar 3.

$$y(k) = b_1y(k - 1) + b_2y(k - 2) + a_1u(k - 1) + a_2u(k - 2)$$

$$y(k + 1) = b_1y(k) + b_2y(k - 1) + a_1u(k) + a_2u(k - 1)$$

$$y(k + 2) = (b_1^2 + b_2)y(k) + b_1b_2y(k - 1) + a_1u(k + 1) + (b_1a_1 + a_2)u(k) + b_1a_2u(k - 1)$$

$$y(k + 3) = (b_1^3 + 2b_1b_2)y(k) + (b_1^2b_2 + b_2^2)y(k - 1) + a_1u(k + 2) + (b_1a_1 + a_2)u(k + 1) + (b_1^2a_1 + b_2a_1 + b_1a_2)u(k) + (b_1^2b_2 + b_2^2)u(k - 1)$$

Dari ketiga persamaan diatas maka dapat dibentuk matriks sebagai berikut

$$\hat{y} = \hat{y}_{force} + \hat{y}_{free}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{y}(k + 1) \\ \hat{y}(k + 2) \\ \hat{y}(k + 3) \end{bmatrix} = \mathbf{G} \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k + 1) \\ u(k + 2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{y}_{free}(k + 1) \\ \hat{y}_{free}(k + 2) \\ \hat{y}_{free}(k + 3) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} g_1 & 0 & 0 \\ g_2 & g_1 & 0 \\ g_3 & g_2 & g_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k + 1) \\ u(k + 2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{y}_{free}(k + 1) \\ \hat{y}_{free}(k + 2) \\ \hat{y}_{free}(k + 3) \end{bmatrix}$$

Dengan

$$\begin{bmatrix} g_1 & 0 & 0 \\ g_2 & g_1 & 0 \\ g_3 & g_2 & g_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 \\ b_1a_1 + a_2 & a_1 & 0 \\ b_1^2a_1 + b_2a_1 + b_1a_2 & b_1a_1 + a_2 & a_1 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \hat{y}_{free}(k + 1) \\ \hat{y}_{free}(k + 2) \\ \hat{y}_{free}(k + 3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & a_2 \\ b_1^2 + b_2 & b_1b_2 & b_1a_2 \\ b_1^3 + 2b_1b_2 & b_1^2b_2 + b_2^2 & b_1^2b_2 + b_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(k) \\ y(k - 1) \\ u(k - 1) \end{bmatrix}$$

Sinyal kontrol didapatkan dengan

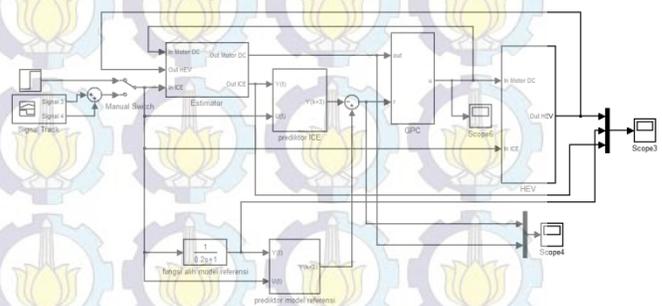
$$u(k) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [G^T G + \lambda_u I]^{-1} G^T (y_r - \hat{y}_{free})$$

Dengan

$$y_r = \begin{bmatrix} y_{r+1} \\ y_{r+2} \\ y_{r+3} \end{bmatrix}$$

IV. SIMULASI, IMPLEMENTASI, DAN ANALISA

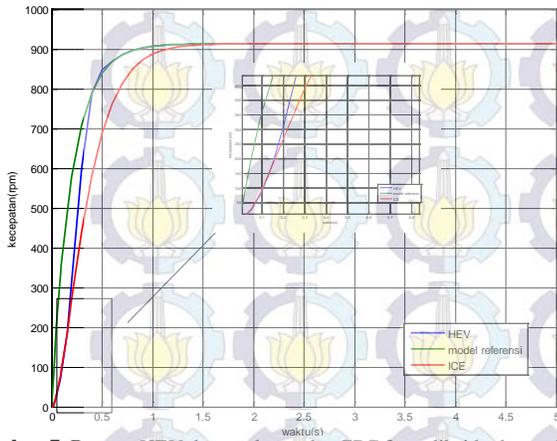
Sistem pengaturan traksi pada HEV melibatkan motor DC sebagai penggerak sekunder. Oleh karena itu motor DC akan bekerja ketika terdapat error antara kecepatan ICE dan model referensi. Blok diagram simulasi ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Blok Diagram Simulasi dengan Simulink

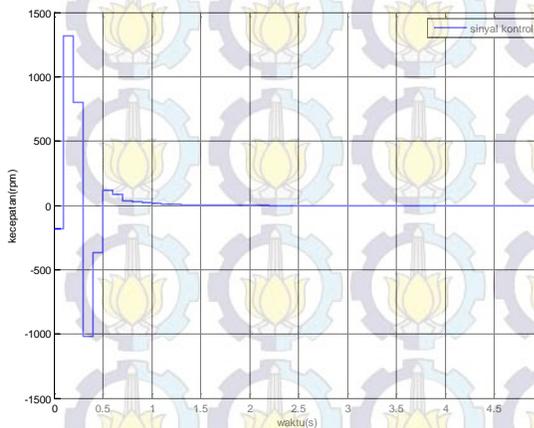
Respon HEV dengan kontroler GPC 3 prediksi kedepan ditunjukkan pada Gambar 7. Gambar tersebut menunjukkan bahwa kontrol GPC yang dirancang sudah dapat melaksanakan aksi kontrol setelah menjalani *satu time sampling* (0.1s). Setelah melalui 0,1s, kontroler bekerja mendekati model referensi. Walau tertinggal diawal, respon *plant* yang telah diberi kontroler dapat mendahului model

referensi setelah 0,4s dan mempunyai *rise time* sebesar 0,353s.



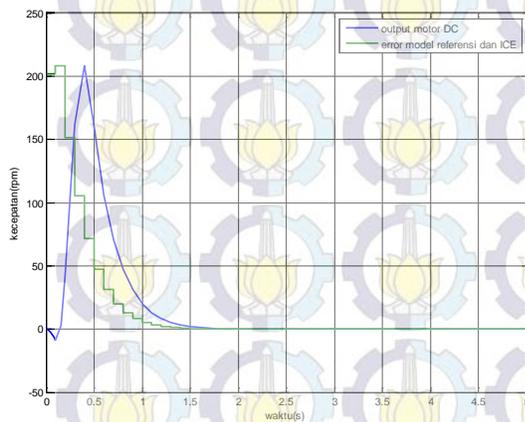
Gambar 7. Respon HEV dengan kontroler GPC 3 prediksi kedepan dengan *input* sinyal step

Dari kontroler GPC tersebut menghasilkan sinyal kontrol berbentuk diskrit seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8 Sinyal kontrol GPC 3 prediksi kedepan dengan *input* sinyal step

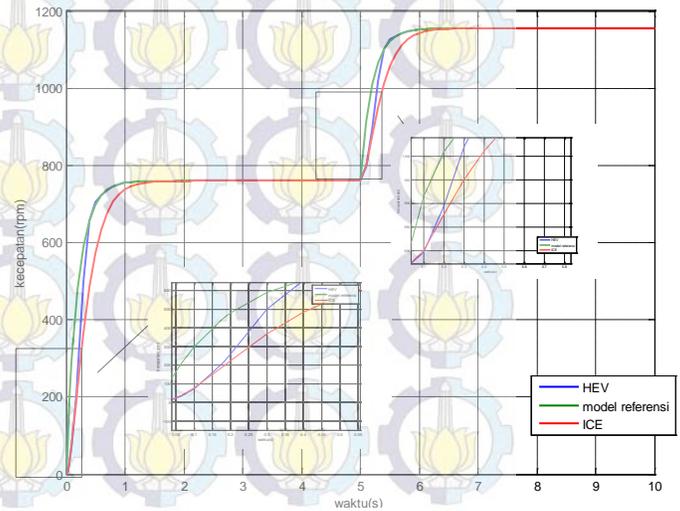
Sinyal kontrol menunjukkan bahwa kontroler memberikan *input* kecepatan sebesar 1288rpm pada motor DC saat 0,1s. Saat 0,3s kontroler menghasilkan sinyal kontrol sebesar -968,43rpm. Hal ini menunjukkan bahwa kontroler bekerja secara maksimal setelah dapat melakukan prediksi. *Output* motor DC ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9 *Output* Motor DC dengan kontroler GPC 3 prediksi kedepan dengan *input* sinyal step

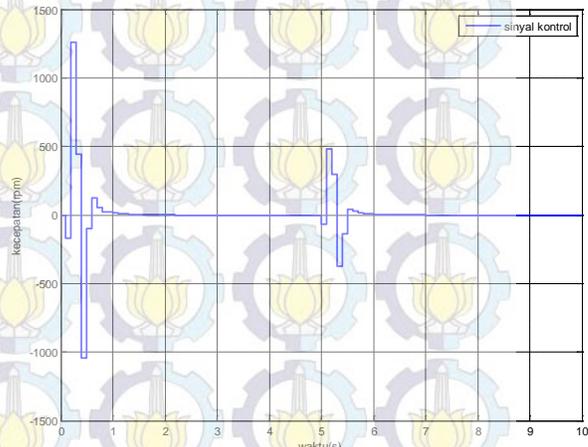
Gambar tersebut menunjukkan bahwa motor DC dapat mengikuti sinyal referensi dan motor DC akan berhenti saat kecepatan ICE sama dengan model referensi. Kecepatan maksimal yang dihasilkan motor DC sebesar 206,9s.

Saat diberikan sinyal uji berupa sinyal step dengan perubahan amplitudo, respon sistem ditunjukkan pada Gambar 10. Gambar tersebut menunjukkan bahwa sistem dapat mengikuti model referensi. Sama halnya ketika diberi sinyal uji step, setelah melalui 0,1s, kontroler bekerja mendekati model referensi. Walau tertinggal diawal, respon *plant* yang telah diberi kontroler dapat mendahului model referensi setelah 0,4s dan memiliki *rise time* sebesar 0,34s. Untuk kenaikan amplitudo *plant* yang telah diberi kontroler dapat mendahului model referensi setelah 0,4s dan memiliki *rise time* sebesar 0,35s sama seperti saat step pertama.



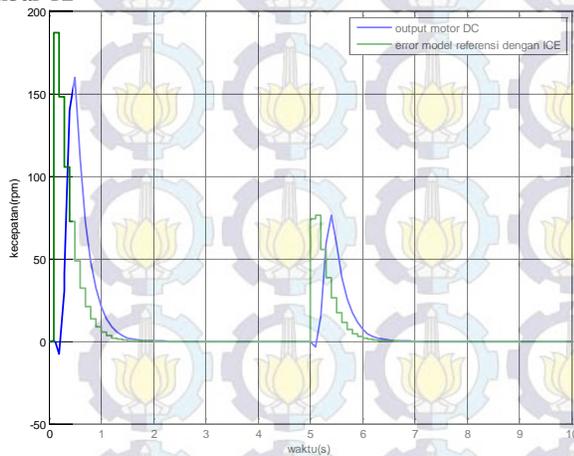
Gambar 10 Respon HEV dengan kontroler GPC 3 prediksi kedepan dengan perubahan amplitudo *input* sinyal step

Seperti halnya ketika diberikan sinyal uji step, saat diberikan sinyal step dengan amplitudo yang berbeda, sinyal kontrol akan menyesuaikan dengan kenaikan sinyal step. Sinyal kontrol mengalami kenaikan saat 0,1s setelah perubahan sinyal masukan dan bernilai 1071rpm. Saat 0,3s sinyal kontrol turun dan bernilai -805,26rpm. Sinyal kontrol ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11 Sinyal kontrol GPC 3 prediksi kedepan dengan perubahan amplitudo *input* sinyal step

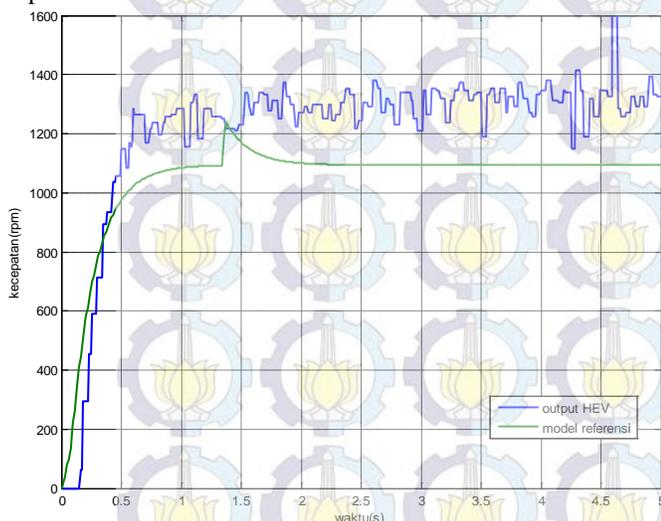
Hal ini menunjukkan bahwa kontroler membutuhkan waktu untuk menyesuaikan nilainya dengan model referensi. *Output* motor DC menunjukkan bahwa motor DC membantu ICE saat keadaan akselerasi. *Output* motor DC ini ditunjukkan pada Gambar 12



Gambar 12 *Output* Motor DC dengan kontroler GPC 3 prediksi kedepan dengan perubahan amplitudo *input* sinyal step

Setelah mensimulasikan kontroler, langkah selanjutnya adalah mengimplementasikan kontroler pada simulator HEV. Implementasi dilakukan dengan menghubungkan potensiometer dan tachometer pada mikrokontroler arduino. Mikrokontroler megolah data dan ditampilkan pada Simulink Matlab. Selanjutnya matlab akan mengirimkan sinyal kontrol melalui komunikasi serial arduino dan arduino akan mengeluarkan sinyal kontrol berupa *output* PWM. *Output* PWM kemudian dihubungkan dengan driver motor DC. Driver ini menggerakkan motor DC berdasarkan sinyal kontrol yang dikehendaki.

Pengujian dilakukan dengan memberikan kontroler GPC dengan prediksi 3 langkah ke depan. Respon hasil implementasi ditunjukkan pada Gambar 13. gambar tersebut menunjukkan bahwa *output* HEV dapat mengikuti model referensi pada saat transien. respon HEV memiliki *rise time* sebesar 0,29s dan memiliki error sebesar 11,5% terhadap setpoint.



Gambar 13. Implementasi 3 prediksi kedepan

V. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi maka dapat disimpulkan bahwa saat *plant* motor DC pada HEV diberikan kontroler GPC tanpa informasi masa depan saat start, mulai bekerja dengan baik setelah mencapai 0,1s (satu *time sampling*). Dan mulai mengikuti model referensi saat 0,4s. Saat diberikan *input* berupa sinyal step dengan perubahan amplitudo, respon HEV sama dengan saat diberikan *input* sinyal step, yaitu kontroler bekerja dengan baik setelah mencapai 0,1s dan mengikuti model referensi saat 0,4 s. Metode GPC dapat memperbaiki respon dengan peningkatan *rise time* dari 0,624s ke 0,35s. Hal ini membuktikan bahwa kontroler GPC sesuai untuk mempercepat respon *transien* dari suatu *plant*

Kontroler GPC cocok digunakan untuk *plant* yang memiliki pengetahuan terhadap *output* yang akan datang, karena sinyal kontrol yang dihasilkan dapat langsung mengikuti model referensi saat mulai start.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sriwidodo, Wahyu. "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.
- [2] Satrio, Galih. "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.
- [3] Ing. Pavel Jakoubek, "Experimental Identification of Stable Nonoscillatory Systems from Step-Responses by Selected Methods", *Konference Studenske Tvuurci-Cinnosti*, 2009.
- [4] Clarke, D.W., Mohtadi, C., Tuffs, P.S., "Generalized Predictive Control-Part I. The Basic Algorithm" *Automatica*, Vol. 23, No. 2, pp. 137-148 Pergamon Journals Ltd, 1987.
- [5] Haber, Robert., Bars, Ruth., Schmitz, Ulrich., "Predictive Control in Process Engineering", Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, 2011