



Desain dan Simulasi Model Predictive Control pada Sistem Pembagian Daya untuk Kendaraan Listrik Hibrida Fuel Cell – Baterai

Design and Simulation of Model Predictive Control for Power Distribution in Hybrid Fuel Cell - Battery Electric Vehicles

Arini Latifah¹, Kusnuri Aditya², Satrio Sarwo Mumpuni³, Muhammad Aqifur Rohman⁴

^{1,2,3,4} Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Gresik, Jl. Sumatra 101 GKB, Gresik, 61121
¹arinilatifah16@gmail.com*

Abstract

This research examines the performance of implementing Model Predictive Control (MPC) in the energy management system of fuel cell – battery hybrid electric vehicles. Three parameter variations were carried out on the MPC controller, namely variations in the horizon value, objective function, and weighting in the objective function. In testing variations in the horizon value of the designed MPC controller, it shows that the higher the horizon value used, the SOC and the final SOC are faster and closer to the optimal SOC determined by compensating for higher hydrogen consumption. Testing of objective function variations shows that the objective function implemented on the MPC controller influences the system response characteristics. It was found in objective function testing that optimal use of fuel cell power produces fuel cell power output with a working efficiency range of 57% - 60% when compared to other objective functions that work in the efficiency range of 49.2% - 57%. Finally, in testing variations in weighting values, it was found that the higher the weighting of an expression in the objective function, the more the optimizer will penalize the expression so that the solver will minimize the expression in the optimization process. Therefore, the MPC controller parameter values need to be paid attention to so that the response characteristics are in accordance with the design, which are desired. It should be noted that this research does not use a speed prediction model so it is assumed that the speed is known without any uncertainty.

Keywords: Battery, Fuel Cell, Hybrid, Model Predictive Control, Power Sharing, SOC.

Abstrak

Penelitian ini meneliti performansi implementasi Model Predictive Control (MPC) pada sistem manajemen energi dari kendaraan listrik hibrida fuel cell – baterai. Dilakukan tiga variasi parameter pada kontroler MPC yaitu variasi nilai horizon, objective function, dan pembobotan pada objective function. Pada pengujian variasi nilai horizon kontroler MPC yang didesain menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai horizon yang digunakan SOC dan SOC akhir semakin cepat dan semakin mendekati SOC optimal yang ditentukan dengan kompensasi konsumsi hidrogen yang lebih tinggi. Pengujian variasi objective function menunjukkan bahwa objective function yang diimplementasikan pada kontroler MPC mempengaruhi karakteristik respon sistem. Ditemui pada pengujian objective function penggunaan daya fuel cell optimal menghasilkan keluaran daya fuel cell dengan jangkauan efisiensi kerja 57% - 60% bila dibandingkan dengan objective function lainnya yang bekerja pada jangkauan efisiensi 49.2% - 57%. Terakhir pada pengujian variasi nilai pembobotan ditemui bahwa semakin tinggi pembobotan pada sebuah ekspresi pada objective function maka optimizer akan semakin mempenalisasi ekspresi tersebut sehingga solver akan meminimalkan ekspresi tersebut dalam proses optimasi. Maka dari itu pemberian nilai parameter kontroler MPC perlu diperhatikan agar karakteristik respon sesuai dengan desain yang diinginkan. Perlu diketahui pada penelitian ini tidak digunakan model prediksi kecepatan sehingga diasumsikan bahwa kecepatan telah diketahui tanpa adanya ketidakpastian.

Kata kunci: Baterai, Fuel Cell, Hybrid, Model Predictive Control, Pembagian Daya.

1. Pendahuluan

Sektor transportasi menjadi salah satu sektor penyumbang emisi karbon dioksida utama dimasa ini akibat penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama. Penggunaan bahan bakar fosil yang masif mengakibatkan beberapa permasalahan lingkungan seperti pemanasan global, polusi udara, serta penipisan ozon [1]. Berdasarkan permasalahan tersebut, riset dan perkembangan mengenai kendaraan listrik berkembang pesat

dengan salah satu tantangannya merupakan harga dari sumber tenaga yang digunakan dalam pengoperasiannya. Kendaraan listrik hibrida merupakan salah satu sarana transisi menuju penggunaan transportasi elektrik secara masif mengingat saat ini kendaraan listrik baterai masih memiliki beberapa kekurangan yang dapat diatasi oleh kendaraan listrik hibrida, diantaranya adalah jarak tempuh kendaraan listrik baterai yang lebih pendek, serta kebutuhan kendaraan listrik baterai terhadap infrastruktur. Beberapa jenis kendaraan listrik hibrida diantaranya adalah kendaraan listrik hibrida *Internal Combustion Engine* – baterai dan kendaraan listrik hibrida *Fuel Cell* – baterai, dimana saat ini kendaraan listrik hibrida *fuel cell* – baterai marak diimplementasikan pada kendaraan berat karena densitas energinya yang tinggi [2].

Dalam aplikasinya, kendaraan listrik hibrida *fuel cell* – baterai atau FCHEV menggunakan *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) karena memiliki suhu dan tekanan operasi yang rendah dengan densitas energi yang tinggi bila dibandingkan dengan tipe *fuel cell* lainnya. Namun, PEMFC juga memiliki *energy cost* yang tinggi serta sistem yang kompleks beserta batasan-batasan fisiknya sehingga dibutuhkan sistem manajemen energi dengan strategi kontrol yang berkaitan langsung dengan konsumsi hidrogen PEMFC [3], [4]. Sehingga, bila sistem *powertrain* kendaraan memiliki fungsi untuk memberikan motor listrik suplai daya yang dibutuhkan oleh kendaraan dengan tujuan ketercapaian daya maka sistem manajemen energi berfungsi untuk meminimalisasi konsumsi bahan bakar, meningkatkan durabilitas dan reliabilitas elemen penyimpanan energi dan sumber energi, serta meningkatkan jarak tempuh [3], [5].

Pada FCHEV sistem manajemen energi sistem pembagian daya atau *Power Split Ratio* (PSR) menjadi *upper-level controller* yang menentukan utilisasi daya dari masing-masing sumber energi berdasarkan *State of Charge* (SOC) dan permintaan daya traksi kendaraan. *Low-level controller* yang berada pada sistem *powertrain* yaitu konverter DC-DC menerima PSR sebagai masukan referensi, dimana dalam hal ini *low-level controller* berfungsi untuk mencapai ketercapaian daya referensi dari sistem manajemen energi [6].

Pada penelitian ini akan dilakukan perancangan strategi kontrol sebagai *upper-level controller* yang akan diimplementasikan pada sistem manajemen energi kendaraan listrik hibrida *fuel cell* – baterai dengan menggunakan metode *Model Predictive Control* (MPC) linier dengan mengujikan beberapa *objective function* dengan tujuan spesifik dan akan dibandingkan performansinya satu sama lainnya.

2. Metodologi

2.1 Permodelan Kendaraan Listrik Hibrida Fuel Cell Baterai

Untuk mengetahui daya traksi yang dibutuhkan oleh kendaraan dengan kecepatan dan akselerasi tertentu, dibutuhkan pengetahuan mengenai struktur kendaraan, gaya-gaya, serta parameter-parameter yang mempengaruhi daya traksi kendaraan. Pada penelitian ini digunakan mobil tipe SUV yaitu Toyota Mirai yang merupakan salah satu FCHEV yang telah beredar di pasaran menjadikan parameter-parameter dari Toyota Mirai cocok karena didesain sebagai FCHEV yang ditenagai oleh *fuel cell* dan baterai.

Digunakan permodelan daya kendaraan sehingga daya traksi pada kendaraan dihitung berdasarkan referensi kecepatan dan dijadikan sebagai daya yang dibutuhkan oleh motor listrik, daya traksi dapat dicari melalui persamaan (1).

$$P_{traksi} = v \cdot F_{traksi} \quad (1)$$

Dimana v merupakan kecepatan kendaraan dan F_{traksi} adalah gaya dengan arah terbalik melawan kendaraan. F_{traksi} dapat dijabarkan sebagai persamaan (2).

$$v \cdot F_{traksi} = v \cdot (c_r \cdot M \cdot g \cdot \cos(\theta) + 0.5 \cdot \rho_{air} \cdot S_f \cdot c_d \cdot v^2 + M \cdot \dot{v}) \quad (2)$$

Dimana c_r , M , g , ρ_{air} , S_f , c_d , dan \dot{v} adalah koefisien gesek jalan, massa kendaran, konstanta akselerasi gravitasi, nilai densitas udara, area depan kendaraan, konstanta gesekan gravitasi, dan diferensial kecepatan kendaraan. Parameter kendaraan tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Kendaraan

S_f	c_r	M	c_d	ρ_{air}
1.746 m^2	0.3	1360	0.0135	1.2 kg/m^3

Motor listrik pada umumnya dapat bekerja pada dua mode yaitu mode motor dan mode generator yang menyebabkan motor dapat menghasilkan daya listrik, hal ini terjadi ketika motor menyerap daya mekanikal motor ketika terjadi penurunan kecepatan fenomena tersebut biasa disebut sebagai *regenerative braking*. Namun pada

penelitian ini sistem *powertrain* diasumsikan tidak mempunyai kemampuan *regenerative braking*. Untuk menjalankan motor diperlukan konverter DC-AC yang dapat dimodelkan sebagai *losses* berupa efisiensi. Selain itu *losses* motor listrik, baterai, dan konverter DC-DC juga dimodelkan dengan koefisien efisiensi sehingga kesetimbangan daya pada DC Bus dapat dimodelkan dengan persamaan (3).

$$\frac{P_{tra}}{\eta_{em} \cdot \eta_{AC/DC}} = \eta_{BAT} \cdot P_{bat} + \eta_{DC/DC} \cdot P_{fc} \quad (3)$$

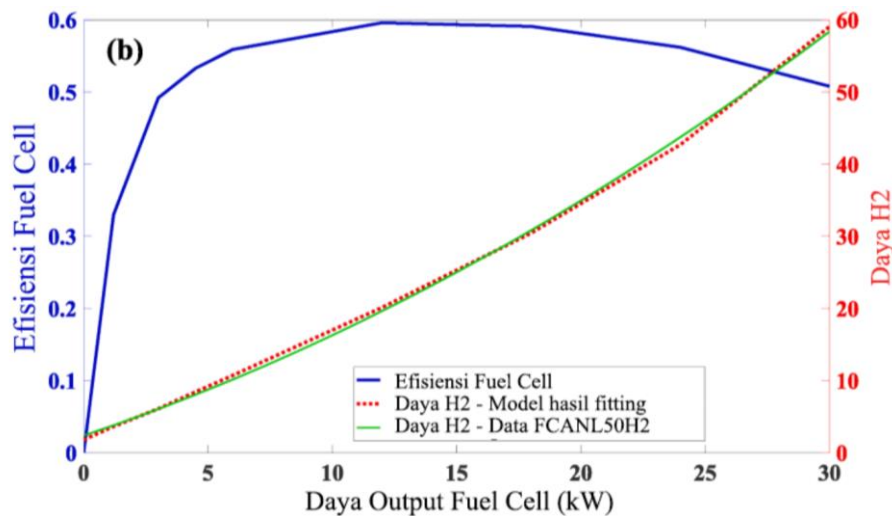
Dengan $\eta_{em}, \eta_{AC/DC}, \eta_{BAT}, \eta_{DC/DC}$ adalah efisiensi motor listrik, efisiensi konverter AC-DC atau *inverter*, efisiensi baterai, dan efisiensi konverter DC-DC. Nilai parameter koefisien efisiensi akan ditunjukkan pada tabel 2 bersamaan dengan parameter sistem *powertrain* lainnya.

2.1.1 Permodelan Sistem Fuel Cell

PEMFC merupakan komponen penyuplai daya utama dari FCHEV, PEMFC bekerja menggunakan prinsip kerja elektrokimia yang mengubah reaksi kimia menjadi arus listrik. Arus listrik berasal dari elektron hasil reaksi pemecahan hidrogen yang kemudian ditangkap oleh *current collector* dan dialirkan kepada komponen elektronika [7], [8]

Sistem PEMFC memiliki beberapa permodelan tergantung dengan objektif dari permodelan tersebut, pada [9] terdapat dua permodelan, pada *lower-level controller* digunakan permodelan yang merepresentasikan keseluruhan komponen dari PEMFC dan pada *upper-level controller* digunakan permodelan berdasarkan daya PEMFC dan arsitektur *powertrain* yang digunakan. Pada [10] digunakan permodelan berdasarkan korelasi antara daya keluaran *fuel cell*, daya hidrogen yang digunakan, serta efisiensi dari *fuel cell* dengan data yang didapatkan melalui *software* ADVISOR [11].

Pada penelitian ini digunakan permodelan berdasarkan korelasi efisiensi, daya keluaran, dan daya hidrogen yang digunakan. Permodelan tersebut digunakan dengan tujuan desain *upper-level controller* dari sistem manajemen energi yang berfokus pada meminimumkan konsumsi hidrogen dan mengoptimalkan efisiensi kerja hidrogen, grafik korelasi dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Grafik Korelasi Daya Keluaran *Fuel Cell*, Daya Hidrogen, dan Efisiensi *Fuel Cell*

Dilakukan fitting terhadap daya hidrogen berdasarkan daya keluaran *fuel cell* untuk menentukan konsumsi hidrogen dari PEMFC, hasil model *fitting* dituliskan pada persamaan (4).

$$P_{H_2} = 0.0238 \cdot P_{fc}^2 + 1.2065 \cdot P_{fc} + 2.3931 \quad (4)$$

Konsumsi hidrogen dari PEMFC dapat dicari melalui persamaan (5) dengan LHV_{H_2} adalah titik bawah pemansan ($120MJ/kg / 33.3 kWh/kg$) dan η_{fc} adalah efisiensi *fuel cell*.

$$M_{H_2} = \int_0^t \frac{P_{H_2}(t)}{\eta_{FC} \cdot LHV_{H_2}} dt \quad (5)$$

2.1.2 Permodelan Sistem Baterai

Dalam penggunaannya, baterai memiliki beberapa variabel *state* yang harus diperhatikan agar baterai memiliki realibilitas dan durabilitas yang tinggi, dua diantaranya adalah *State of Charge* (SOC) dan *State of Health* (SOH) yang dapat didefinisikan sebagai presentasi kapasitas sisa dalam baterai terhadap kapasitas maksimal baterai dan rasio antara nilai *state* pada saat itu dan nilai *state* awal pada baterai. Secara matematis SOC dan SOH dapat dituliskan pada persamaan (6) dan (7).

$$SOC(t) = \frac{c_s}{c_{max}} \times 100\% \quad (6)$$

$$SOH(t) = \frac{c_a}{c_{rated}} \times 100\% \quad (7)$$

Karena SOC tidak dapat diukur maka diperlukan metode estimasi untuk menentukannya, terdapat beragam metode estimasi seperti metode *coloumb counting*, metode *filtering*, dan metode *learning* [12]–[14].

Dalam penelitian ini digunakan metode estimasi berdasarkan *coulomb counting* yang mendapatkan SOC dengan membagi hasil integral arus selama dt dengan kapasitas baterai. Metode *coulomb counting* dapat dituliskan dengan persamaan (8).

$$SOC(t) = SOC_{ini} - \int_0^t \frac{\eta_{BAT} \cdot i(t)}{Q_{BAT}} dt \quad (8)$$

Dengan SOC_{ini} , Q_{BAT} , η_{BAT} , i merupakan SOC inisial dari baterai, kapasitas maksimal baterai, efisiensi baterai, dan arus dari baterai. Ketika arus bernilai negatif maka baterai akan memasuki mode *charging* dan SOC akan bertambah, sebaliknya ketika arus bernilai positif maka baterai akan memasuki mode *discharging* dan SOC akan berkurang.

Arus dari baterai dihitung bila daya baterai, hambatan internal baterai, dan tegangan *open-circuit* dari baterai diketahui, dimana tegangan *open-circuit* dan hambatan internal dari baterai bervariasi terhadap SOC dan temperatur dari baterai, sehingga persamaan untuk menghitung arus baterai dapat dituliskan pada persamaan (9).

$$i = \frac{V_{oc}(SOC) - \sqrt{V_{oc}(SOC)^2 - 4 \cdot R_{int}(SOC) \cdot P_{bat}}}{2 \cdot R_{int}(SOC)} \quad (9)$$

Dengan menggunakan persamaan (9) pada notasi i untuk persamaan (8) maka estimasi SOC baterai dapat dimodelkan dengan persamaan (10).

$$SOC(k+1) = SOC(k) - \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4 \cdot R_{int} \cdot P_{bat}(k)}}{2 \cdot R_{int}} \cdot \frac{\eta_{BAT}}{Q_{bat}} \Delta k \quad (10)$$

Pada penelitian ini akan diasumsikan bahwa V_{oc} , R_{int} dari baterai adalah konstan dan tidak berubah terhadap SOC dari baterai untuk memudahkan komputasi dari kontroler yang didesain.

Δk merupakan waktu sampling yang digunakan, dimana pada penelitian ini akan digunakan waktu sampling sebesar 1 detik. Namun, persamaan (10) tidak dapat diimplementasikan pada YALMIP dikarenakan terdapat kalkulasi akar yang bersifat *sigmoid*. Sehingga dilakukan pendekatan dengan menggunakan daya dari baterai, sehingga untuk estimasi digunakan persamaan berikut,

$$SOC(k+1) = SOC(k) - \frac{P_{BAT} \cdot \eta_{BAT}}{V_{DC}(k) \cdot Q_{bat}} \Delta k \quad (11)$$

Dimana V_{DC} dapat dicari menggunakan persamaan,

$$V_{DC} = V_{oc} - \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4 \cdot R_{int} \cdot P_{bat}(k)}}{2} \quad (12)$$

2.1.3 Batasan Sistem

Pada penelitian ini ditentukan batasan-batasan dari sistem *powertrain* sehingga simulasi sistem dapat berjalan sesuai dengan batasan fisik dari sistem asli. Pertama-tama digunakan batasan dari keluaran daya *fuel cell* dimana *fuel cell* memiliki daya maksimal dan daya minimal, daya minimal diberikan untuk menghindari siklus *on-off* yang menyebabkan degradasi dari *fuel cell*. Kemudian, *State of Charge* (SOC) berada pada batas 0 dan 1, Namun ada baiknya SOC berada pada batas maksimal dan minimal yang ditentukan agar baterai bekerja secara aman dan andal, Terakhir, daya keluaran juga dibatasi untuk menghindari *over charging* maupun *over discharging*. Parameter-parameter baik dari *fuel cell*, baterai, dan sistem *powertrain* dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Sistem *Powertrain*

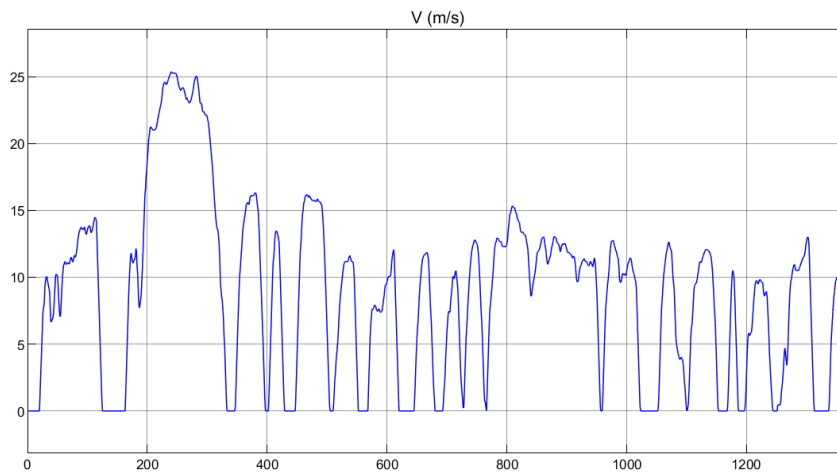
Parameter	Nilai	R_{int}	0.378 Ohm
η_{em}	0.97	Q_{bat}	6.5 Ah
η_{AC-DC}	0.95	$P_{fc,min}$	2 kW
η_{BAT}	0.97	$P_{fc,max}$	30 kW
η_{DC-DC}	0.87	$P_{bat,min}$	13 kW
V_{OC}	286 V	$P_{bat,max}$	-6.5 kW
$SOC_{inisial}$	0.4	SOC_{min}	0.1
		SOC_{max}	0.9

2.1.4 Profil Kecepatan

Pada pengujian digunakan profil kecepatan UDSS, dimana profil kecepatan UDSS sering digunakan dalam pengujian performansi kendaraan listrik. Pada penelitian ini diasumsikan tidak ada turunan atau tanjakan sehingga pada jalan tidak ada variasi elevasi serta diasumsikan kendaraan pada jalan yang lurus tanpa adanya belokan. Karakteristik profil kecepatan UDSS dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Karakteristik profil kecepatan UDSS

Kecepatan Rata-Rata (m/s)	Kecepatan Maksimal (m/s)	Waktu Profil Kecepatan (s)
8.0507	33.3333	1368

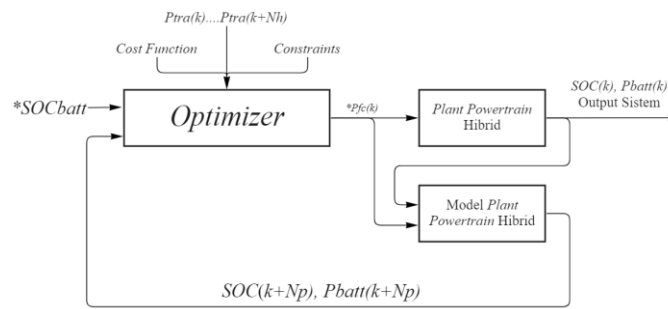


Gambar 2. Grafik Kecepatan Profil UDSS

2.2 Perancangan Model Predictive Controller

Dalam penelitian ini, digunakan *toolbox* YALMIP yang diimplementasikan pada program MATLAB untuk melakukan proses permodelan dan perancangan MPC. YALMIP merupakan *toolbox open-source* yang digunakan untuk melakukan permodelan dan optimasi, pada YALMIP pengguna dapat menggunakan *solver* internal maupun eksternal tergantung permasalahan optimasi yang dilakukan. *Solver* yang digunakan pada penelitian ini adalah *solver* GUROBI yang mampu menyelesaikan permasalahan *Quadratic Programming*. *Solver* GUROBI dipilih dikarenakan mempunyai performa komputasi yang lebih cepat bila dibandingkan dengan *solver* lain seperti SDPT3 dan SEDUMI.

Terlihat pada gambar 3 yang merupakan blok diagram dari desain sistem pengaturan pembagian daya dengan MPC yang telah dirancang. Pada diagram blok input dari optimizer merupakan referensi daya traksi yang dihasilkan kendaraan dari *time step* k hingga $k + N_H$, kemudian batasan-batasan atau *constraints*, serta *objective function*. Optimizer kemudian akan melakukan optimasi untuk meminimalkan *objective function* menggunakan *solver* GUROBI dengan memperhatikan batasan-batasan atau *constraints* yang telah dideklarasikan, optimasi dilakukan pada *time step* k hingga $k + N_H$ atau hingga jumlah horizon yang ditentukan. Model sistem yang digunakan dalam memprediksi model merupakan sistem yang didiskritisasi menggunakan teknik diskritisasi euler dengan waktu *sampling* sebesar 0.1 detik.



Gambar 3. Blok Diagram Kontroler MPC Kendaraan Listrik Hibrida Fuel Cell – Baterai

Sistem diskrit dapat dimodelkan menggunakan persamaan *state-space* berdasarkan permodelan-permodelan yang dibahas pada sub-bab sebelumnya pada persamaan (11)-(17).

$$x(k + 1) = A(k)x(k) + B_u(k)u(k) + B_w(k)w(k) \quad (13)$$

$$y(k) = Cx(k) + D_u u(k) \quad (14)$$

$$x(k) = [SOC(k) P_{fc}(k - 1)]^T \quad (15)$$

$$u(k) = \Delta P_{fc}(k) = \frac{P_{fc}(k) - P_{fc}(k-1)}{\Delta T} \quad (16)$$

$$y(k) = [SOC(k) P_{fc}(k - 1)]^T \quad (17)$$

$$w(k) = P_{tra}(k) \quad (18)$$

$$r(k) = SOC_{opt} \quad (19)$$

Dimana $x(k)$, $u(k)$, $y(k)$, $w(k)$ dan $r(k)$ merupakan variabel *state*, variabel kontrol, variabel keluaran, gangguan terukur, dan referensi. Dengan persamaan dari kesetimbangan daya dari P_{tra} dituliskan pada persamaan (3) dan persamaan dari SOC didapatkan dari persamaan (8)-(12).

Berdasarkan persamaan (13)–(19) serta (8)-(12) persamaan *state space* dalam bentuk matriks dapat dituliskan sebagai berikut,

$$A(k) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\eta_{BAT} \cdot \Delta k}{V_{DC}(k) \cdot Q_{bat}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$B_u(k) = \begin{bmatrix} \frac{\eta_{BAT} \cdot \Delta k}{V_{DC}(k) \cdot Q_{bat}} & 1 \end{bmatrix}^T \quad (21)$$

$$B_w(k) = \begin{bmatrix} -\frac{\eta_{BAT} \cdot \Delta k}{V_{DC}(k) \cdot Q_{bat}} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (22)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$D_u = [0 \quad 1]^T \quad (24)$$

Objective function pada MPC yang didesain pada MATLAB merupakan fungsi kuadratik yang akan diselesaikan menggunakan metode optimasi *Quadratic Programming* (QP) yang diselesaikan oleh solver GUROBI. Secara umum, MPC dapat diformulasikan dengan ekspresi matematis *Optimal Control Problem* (OCP) sebagai berikut,

$$J_N(x_0, u) = \min_{u_k \dots u_{k+N_C}} \sum_{j=0}^{N_H} Q \cdot \|X_U(k + j) - X^R\|^2 + R \cdot \|U(k + j)\|^2$$

s. t.

$$X_U(k + j + 1) = AX(k + j) + BU(k + j)$$

$$Y(k + j) = CX(k + j)$$

$$U_{min} \leq U \leq U_{max}, Y_{min} \leq Y \leq Y_{max} \quad (25)$$

Pada penelitian ini digunakan beberapa *objective function* yang diimplementasikan pada MPC yang nantinya akan dibandingkan performa satu dengan lainnya. Pada penelitian ini digunakan *objective function* LQR regulator secara general, *objective function* yang digunakan untuk guna meminimalkan hidrogen, dan *objective function* yang digunakan untuk menjaga penggunaan fuel cell pada zona optimal. Ketiga *objective function* tersebut akan dijelaskan pada sub-bab berikut.

2.2.1 Objective Function LQR

Merupakan *objective function* yang diimplementasikan pada kebanyakan kontroler MPC, dimana *objective function* LQR adalah pembobotan dari Q yang dikalikan dengan kuadrat error dan pembobotan R yang dikalikan dengan kuadrat nilai sinyal kontrol seperti pada persamaan (25). Pada kasus ini, error *setpoint* akan diekspresikan sebagai error *State of Charge* atau SOC terhadap SOC Optimal, dan nilai sinyal kontrol akan diekspresikan sebagai P_{fc} sehingga ekspresi matematika dari *objective function* tersebut dapat diekspresikan sebagai.

$$\begin{aligned}
 J(SOC_{P_{fc}}, P_{fc}) &= \min_{u_k \dots u_{k+N_c}} \sum_{j=0}^{N_H} Q \cdot \|SOC(k+j) - SOC_{OPT}\|^2 + R \cdot \|P_{fc}(k+j)\|^2 \\
 \text{s. t.} \\
 \frac{P_{tra}(k+j)}{\eta_{em} \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{drive}} &= P_{fc}(k+j) \cdot \eta_{BOOST} + P_{bat}(k+j) \cdot \eta_{BAT} \\
 SOC(k+j+1) &= SOC(k+j) - \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4 \cdot R_{int} \cdot P_{bat}(k+j)}}{2 \cdot R_{int}} \cdot \frac{\eta_{BAT}}{Q_{bat}} \Delta k \\
 SOC_{min} &\leq SOC(k+j) \leq SOC_{max} \\
 P_{fcmin} &\leq P_{fc}(k+j) \leq P_{fcmax} \\
 P_{bmin} &\leq P_b(k+j) \leq P_{bmax} \quad (26)
 \end{aligned}$$

2.2.2 Objective Function Minimalisasi Losses

Pada *objective function* yang digunakan untuk meminimalkan penggunaan hidrogen, digunakan beberapa persamaan. Persamaan pertama adalah persamaan (3.1) yang digunakan untuk mencari daya hidrogen P_{H_2} , kemudian digunakan persamaan untuk mereduksi daya baterai yang digunakan untuk meminimalkan daya rugi-rugi yang diekspresikan sebagai persamaan kuadratik, fungsi ketiga adalah fungsi galat SOC terhadap SOC optimal untuk menghindari SOC pada titik minimum dan maksimum. *Objective function* dapat diekspresikan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 J(SOC_{P_{fc}}, P_{fc}) &= \min_{u_k \dots u_{k+N_c}} \sum_{j=0}^{N_H} A_1 (a_0 P_{fc}^2(k+j) + a_1 P_{fc}(k+j) + a_2) + A_2 \left(\frac{R_{int}}{V_{oc}^2} \cdot P_b(k+j)^2 + P_b(k+j) \right) \\
 &\quad + A_3 (SOC(k+j) - SOC_{OPT})^2 \\
 \text{s. t.} \\
 \frac{P_{tra}(k+j)}{\eta_{em} \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{drive}} &= P_{fc}(k+j) \cdot \eta_{BOOST} + P_{bat}(k+j) \cdot \eta_{BAT} \\
 SOC(k+j+1) &= SOC(k+j) - \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4 \cdot R_{int} \cdot P_{bat}(k+j)}}{2 \cdot R_{int}} \cdot \frac{\eta_{BAT}}{Q_{bat}} \Delta k \\
 SOC_{min} &\leq SOC(k+j) \leq SOC_{max} \\
 P_{fcmin} &\leq P_{fc}(k+j) \leq P_{fcmax} \\
 P_{bmin} &\leq P_b(k+j) \leq P_{bmax} \quad (27)
 \end{aligned}$$

Dimana $A_1, A_2,$ dan A_3 merupakan pembobotan yang nilainya akan dilakukan *tuning* nantinya.

2.2.3 Objective Function Penggunaan Daya Fuel Cell Optimal

Penggunaan daya pada titik efisiensi optimal perlu diperhatikan untuk meminimalkan konsumsi hidrogen. Dengan menjaga daya fuel cell pada titik optimal maka fuel cell penggunaan fuel cell akan semakin efisien dan konsumsi hidrogen juga terjaga pada titik optimal. Terlihat pada grafik efisiensi hidrogen pada gambar 1 bahwa titik tertinggi efisiensi hidrogen terdapat pada jangkauan penggunaan daya 10 – 15 kW. *Objective function* yang digunakan adalah ekspresi dari perkalian pembobotan dan kuadrat daya fuel cell yang digunakan pada *time step*

$(k + j)$ dikurangi daya optimal ditambah dengan pembobotan dikali dengan kuadrat SOC pada *time step* $(k + j)$ dikurangi dengan SOC optimal, *objective function* tersebut dapat dituliskan dengan persamaan,

$$J(SOC_{P_{fc}}, P_{fc}) = \min_{u_k \dots u_{k+N_C}} \sum_{j=0}^{N_H} A_4 [P_{fc}(k + j) - P_{fc_{OPT}}]^2 + A_5 [SOC(k + j) - SOC_{OPT}]^2$$

s. t.

$$\frac{P_{tra}(k+j)}{\eta_{em} \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{drive}} = P_{fc}(k + j) \cdot \eta_{BOOST} + P_{bat}(k + j) \cdot \eta_{BAT}$$

$$SOC(k + j + 1) = SOC(k + j) - \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4 \cdot R_{int} \cdot P_{bat}(k+j)}}{2 \cdot R_{int}} \cdot \frac{\eta_{BAT}}{Q_{bat}} \Delta k$$

$$SOC_{min} \leq SOC(k + j) \leq SOC_{max}$$

$$P_{fcmin} \leq P_{fc}(k + j) \leq P_{fcmax}$$

$$P_{bmin} \leq P_b(k + j) \leq P_{bmax} \quad (28)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Simulasi Variasi Nilai Horizon dengan Profil UDDS

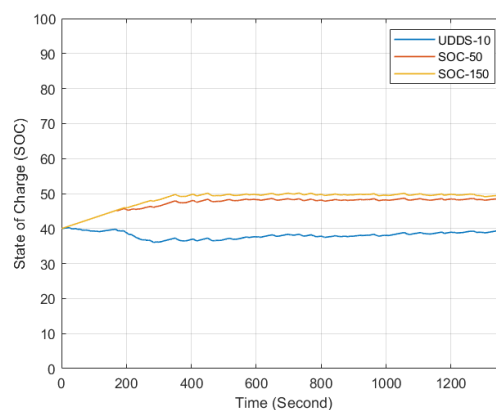
Saat nilai horizon divariasikan digunakan objective function minimalisasi konsumsi hidrogen dengan pembobotan $A_1=0.2, A_2=0.2, A_3=1000$. Kemudian digunakan variasi 10, 50, dan 150. Hasil simulasi dengan profil kecepatan UDDS dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Hasil Simulasi Pengujian Variasi Nilai Horizon dengan Profil UDDS

Variasi Nilai Horizon (N_H)	Konsumsi Massa Hidrogen (M_{H_2} / Kg)	SOC Minimal	SOC Maksimal	SOC Akhir	Rata-Rata Daya Keluaran Fuel Cell (P_{fc} / kW)	Daya Fuel Cell Maksimal (kW)	Daya Fuel Cell Minimal (kW)
10	0.0506	0.3604	0.4251	0.3918	4.2263	23.302	2
50	0.0653	0.4	0.4886	0.4823	5.6175	25.814	2
150	0.0680	0.4	0.5014	0.4919	5.7645	30	2

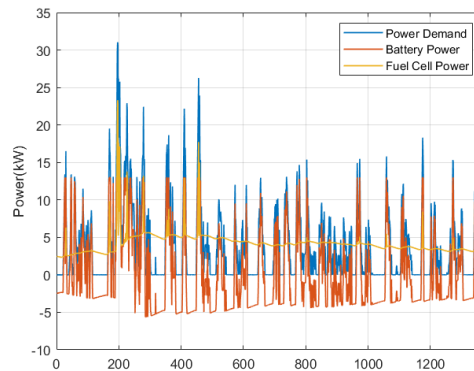
Dari gambar 4 terlihat bahwa kontroler MPC dengan $N_H = 150$ merupakan yang paling cepat mencapai SOC optimal yang telah ditentukan, sedangkan kontroler MPC dengan $N_H = 10$ dan $N_H = 50$ tidak mencapai SOC optimal yang ditentukan. Kontroler MPC dengan $N_H = 10$ hanya mencapai SOC maksimal sebesar 0.4251 dan $N_H = 50$ mencapai SOC maksimal sebesar 0.4886.

Namun bila ditinjau dari konsumsi hidrogen maka $N_H = 10$ memiliki konsumsi hidrogen paling minim yaitu sebesar 0.0506 Kg atau 25.58% lebih sedikit daripada konsumsi hidrogen $N_H = 150$ yang sebesar 0.068 Kg. Selain itu rata-rata daya keluaran *fuel cell* dari $N_H = 10$ juga yang paling kecil dibandingkan $N_H = 50$ dan $N_H = 150$ yaitu 4.2263 kW.

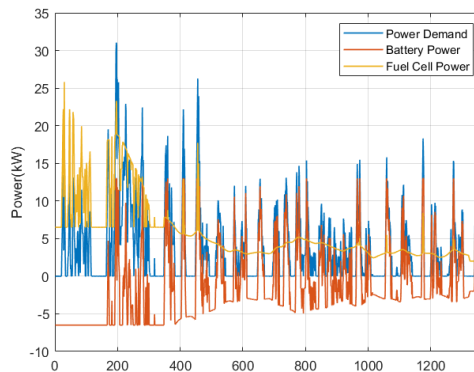


Gambar 4. Perbandingan SOC dari Variasi Nilai Horizon

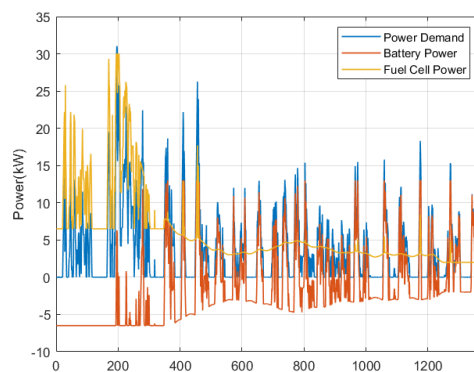
Bila ditinjau dari grafik pembagian daya pada gambar 5-7 maka terlihat semakin tinggi nilai *horizon* yang digunakan maka semakin besar daya keluaran *fuel cell* yang diutilisasikan untuk melakukan *charging* diawal profil kecepatan.



Gambar 5. Grafik Pembagian Daya untuk Nilai Horizon 10



Gambar 6. Grafik Pembagian Daya untuk Nilai Horizon 50



Gambar 7. Grafik Pembagian Daya untuk Nilai Horizon 150

3.2 Simulasi Variasi Objective Function

Pengujian hanya dilakukan dengan nilai horizon tetap yaitu 30 serta profil kecepatan UDDS. Parameter *tuning* pembobotan yang akan digunakan pada pengujian ini terdapat pada tabel 5 Kemudian ditentukan bahwa SOC inisial sebesar 40% atau 0.4, lalu pada *objective function* penggunaan daya *fuel cell* optimal ditentukan efisiensi terbesar terdapat pada penggunaan daya pada jangkauan 14-16 kW, sehingga dicari rata-rata untuk daya optimal dan digunakan $P_{fc_OPT} = 14.5$.

Tabel 5. Nilai Parameter Tuning Simulasi

Objective Funtion LQR			Objective Function Minimalisasi Hidrogen				Objective Funtion Penggunaan Daya Fuel Cell Optimal		
N_H	Q	R	N_H	A_1	A_2	A_3	N_H	A_4	A_5
25	0.04	1000	25	0.2	0.2	1000	25	0.1	1000

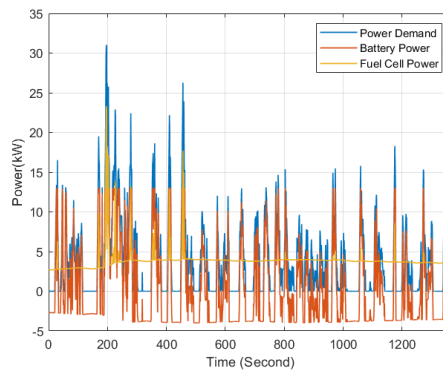
Hasil simulasi menggunakan profil kecepatan UDSS dapat dilihat pada tabel 6. *Objective function* akan disebut sebagai *objective function* 1,2, dan 3.

Tabel 6. Hasil Simulasi Variasi *Objective Function*

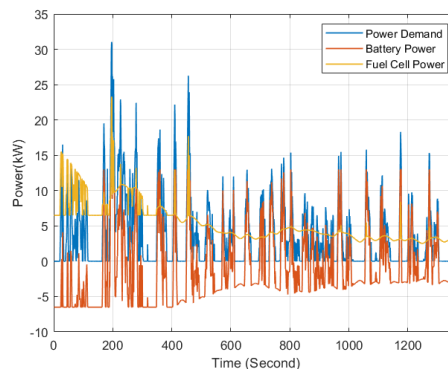
Variasi <i>Objective Function</i>	Konsumsi Massa Hidrogen (M_{H_2} / Kg)	SOC Minimal	SOC Maksimal	SOC Akhir	Rata-Rata Daya Keluaran Fuel Cell (P_{fc} /kW)	Daya Fuel Cell Maksimal (kW)	Daya Fuel Cell Minimal (kW)
<i>Objective function</i> 1	0.0475	0.3514	0.4027	0.3702	3.859	23.302	2
<i>Objective function</i> 2	0.0615	0.4	0.466	0.4635	5.3325	23.302	2
<i>Objective function</i> 3	0.099	0.4	0.7084	0.7084	9.1017	23.302	2

Terlihat pada tabel 4.9 SOC akhir dan SOC maksimal tertinggi dicapai oleh *objective function* 3 yang didesain untuk meningkatkan efisiensi keluaran daya *fuel cell*. SOC akhir *objective function* 3 lebih besar 33.7% dan 24.24% dari *objective function* 1 dan 2. Selain itu, *objective function* 3 juga mengkonsumsi hidrogen paling banyak diantara *objective function* lainnya yaitu sebanyak 0.099 Kg, 200.8% dan 160.09% lebih banyak bila dibandingkan dengan *objective function* 1 dan 2. Terakhir, daya rata-rata yang digunakan MPC dengan *objective function* 3 juga menjadi yang terbesar yaitu 9.1017 kW, Hal ini dikarenakan keluaran daya *fuel cell* dengan efisiensi tertinggi berada pada jangkauan 14 – 16 kW, Sehingga frekuensi daya keluaran *fuel cell* yang dihasilkan akan banyak berada pada jangkauan daya tersebut dan menaikkan rata-rata daya keluaran *fuel cell*.

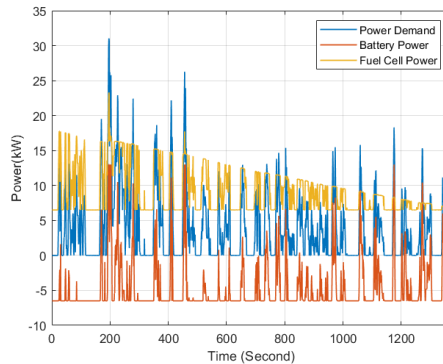
Pembagian daya untuk masing-masing *objective function* dapat dilihat pada gambar 8 – 10. Terlihat pembagian daya pada *objective function* 1 dihasilkan daya *fuel cell* yang lebih minimal berkisar pada rentang 2 – 4 kW, hal ini dikarenakan ekspresi dari *objective function* 1 hanya memuat ekspresi kuadrat dari P_{fc} yang digunakan dan kuadrat dari galat SOC terhadap SOC optimal. Pada *objective function* 2 terlihat frekuensi *charging* baterai cukup tinggi dengan diimbangi penggunaan daya *fuel cell* yang tidak terlalu tinggi. Sedangkan pada *objective function* 3 terlihat frekuensi *charging* lebih tinggi dan keluaran daya *fuel cell* juga lebih tinggi dibandingkan dengan *objective function* 1 dan 2.



Gambar 8. Pembagian Daya Kontroler MPC dengan Implementasi *Objective Funtion* 1

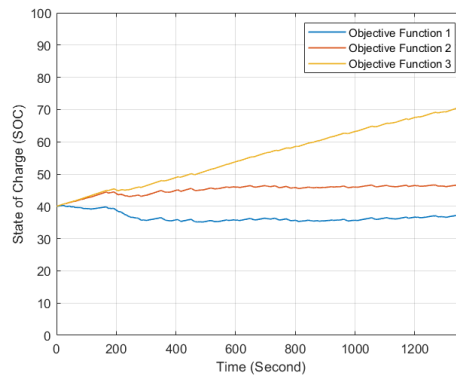


Gambar 9. Pembagian Daya Kontroler MPC dengan Implementasi *Objective Funtion* 2



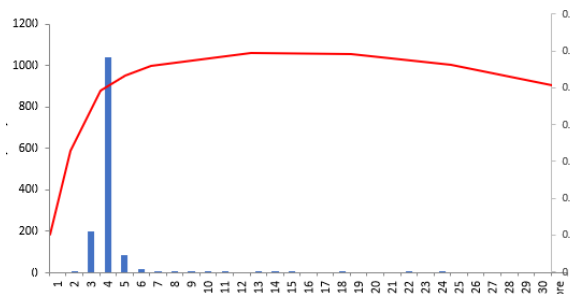
Gambar 10. Pembagian Daya Kontroler MPC dengan Implementasi *Objective Function 3*

Terlihat, pada gambar 11 bahwa *objective function 3* memiliki peningkatan SOC yang signifikan bila dibandingkan dari *objective function 1* dan 2, Sedangkan *objective function 1* dan 2 menyebabkan SOC pada mobil bersifat *floating* pada SOC 35% dan 45% yang artinya siklus *charging* dan *discharging* baterai terbilang singkat dan dapat divalidasi dari gambar 8-10.

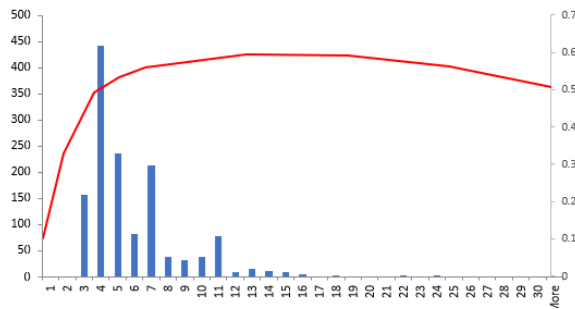


Gambar 11. Perbandingan SOC Ketiga *Objective Function*

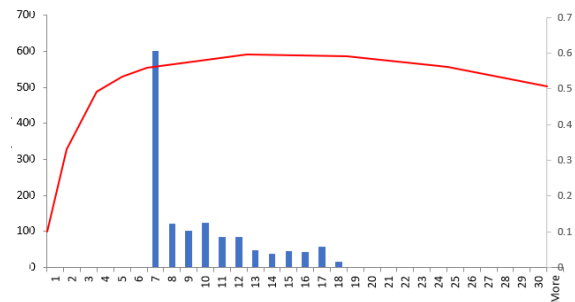
Dari gambar 12 – 14 terlihat bahwa *objective function 1* dominan menghasilkan daya pada efisiensi 49% - 55%, keluaran daya *fuel cell* terbanyak pada jangkauan 3.1 – 4 kW dengan lama penggunaan 1038 detik. Pada *objective function 2* dihasilkan keluaran daya *fuel cell* pada efisiensi kerja 49% - 57%, keluaran daya *fuel cell* terbanyak terdapat pada jangkauan 3.1 – 4 kW dengan lama penggunaan 441 detik, Sedangkan pada *objective function 3* dihasilkan keluaran daya *fuel cell* pada efisiensi kerja 57% - 60% yang merupakan daya keluaran tertinggi diantara ketiga *objective function* dengan utilisasi daya *fuel cell* terbanyak pada jangkauan 6.1 – 7 kW dengan lama penggunaan 601 detik.



Gambar 12. Distribusi Pembagian Daya *Objective Function 1*



Gambar 13. Distribusi Pembagian Daya *Objective Function 2*



Gambar 14. Distribusi Pembagian Daya *Objective Function 3*

Pada tabel 6 terlihat bahwa variasi *objective function 3* mengkonsumsi hidrogen paling besar yaitu sebesar 0.099 Kg dan *objective function 1* mengkonsumsi hidrogen paling sedikit yaitu sebesar 0.0475 Kg. Dimana variasi *objective function 1* dan 2 mengkonsumsi 47.98% dan 62.12% hidrogen lebih sedikit bila dibandingkan dengan *objective function 3*.

3.3 Simulasi Kontroler MPC dengan Variasi Pembobotan

Pada simulasi kontroler MPC dengan Variasi Pembobotan akan digunakan *objective function LQR* dan losses baterai atau *objective function 1* yang akan disimulasikan dengan ketiga profil kecepatan UDSS. Parameter yang akan digunakan dalam pengujian ini dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Parameter Variasi Pembobotan

Variasi	N_H	Q	R
1	25	0.01	1000
2	25	0.1	100

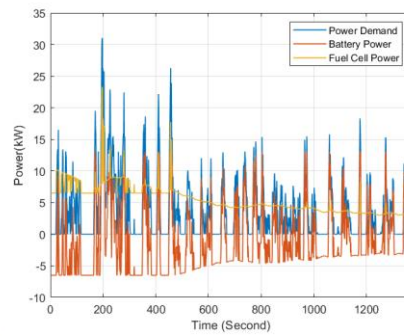
Kemudian kedua variasi tersebut disimulasikan menggunakan profil kecepatan UDSS, Hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Simulasi Variasi Pembobotan

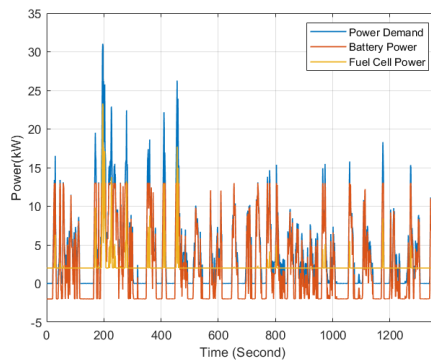
Variasi Nilai <i>Objective Function</i>	Konsumsi Massa Hidrogen (M_{H_2}/ Kg)	SOC Minimal	SOC Maksimal	SOC Akhir	Rata-Rata Daya Keluaran <i>Fuel Cell</i> (P_{fc} / kW)	Daya <i>Fuel Cell</i> Maksimal (kW)	Daya <i>Fuel Cell</i> Minimal (kW)
Variasi 1	0.0622	0.4	0.47364	0.4717	5.4572	23.3021	2
Variasi 2	0.0339	0.2676	0.4019	0.2676	2.3171	23.3021	2

Dari tabel 8 terlihat bahwa SOC maksimal dan SOC akhir memiliki perbedaan sebesar 7.17% dan 20.41%. Bila ditinjau dari keluaran daya rata-rata variasi 2 memiliki rata-rata daya yang lebih besar 3.1404 kW. Grafik pembagian daya dari kedua variasi dapat dilihat pada gambar 15 dan 16.

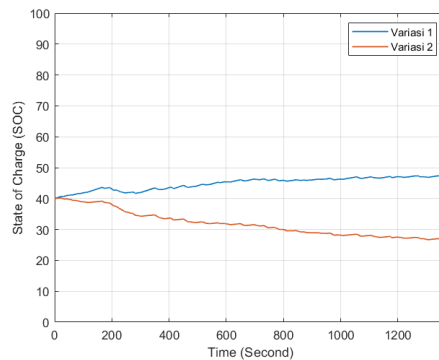
Dari grafik pembagian daya 15 dan 16 terlihat bahwa pada variasi 1 diawali dengan penggunaan daya yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan variasi 2 yaitu sebesar 6.5 kW bila dibandingkan dengan variasi 2 yang menggunakan daya awal sebesar 2 kW. Selain itu, utilisasi *fuel cell* untuk melakukan *charging* pada baterai dari variasi 1 juga lebih tinggi dibandingkan dengan variasi 2. Untuk mengamati lebih jelas maka ditampilkan grafik perbandingan SOC antara variasi 1 dan variasi 2 pada gambar 17.



Gambar 15. Grafik Pembagian Daya pada Variasi 1

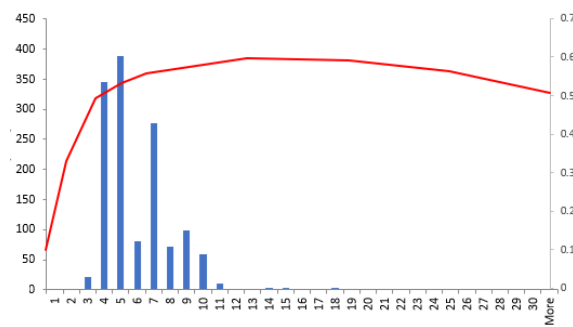


Gambar 16. Grafik Pembagian Daya pada Variasi 2

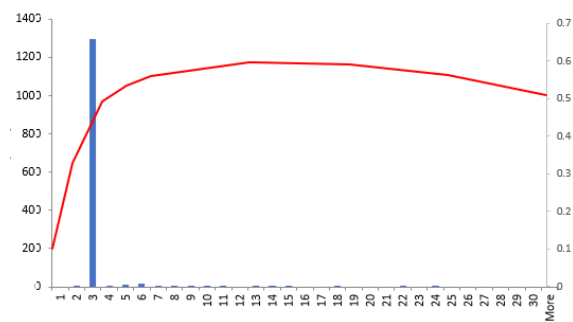


Gambar 17. Perbandingan Grafik SOC pada Simulasi Variasi 1 dan Variasi 2

Dari gambar 17 terlihat bahwa SOC dari variasi 1 semakin mendekati SOC optimal diakhir profil kecepatan sedangkan variasi 2 semakin menjauh dari SOC optimal untuk menganalisa lebih jauh distribusi pembagian daya pada gambar 18 dan 19. Pada variasi 1 distribusi keluaran *fuel cell* terdistribusi pada jangkauan efisiensi kerja 49.2% - 57.8 %, Sedangkan pada variasi 2 distribusi keluaran *fuel cell* dominan terdapat pada jangkauan kerja 49.2% dimana daya keluaran *fuel cell* dominan berada pada jangkauan 2.1 – 3 kW yang bekerja selama 1249 detik atau 94.7% waktu dari *driving cycle*. Apabila ditinjau dari konsumsi variasi 2 memiliki konsumsi hidrogen yang lebih rendah yaitu 54.5% lebih sedikit bila dibandingkan variasi 1, Hal ini dikarenakan penggunaan *fuel cell* pada variasi 2 berada pada jangkauan yang lebih kecil daripada variasi 1.



Gambar 18. Distribusi Daya Keluaran Fuel Cell Variasi 1



Gambar 19. Distribusi Daya Keluaran Fuel Cell Variasi 2

Dari hasil data dapat diindikasikan bahwa semakin besar pembobotan pada satu fungsi dalam *objective function* maka kontroler MPC akan mempenalisasi fungsi tersebut lebih tinggi sehingga *solver* dari kontroler MPC akan merendahkan hasil perkalian pembobotan dengan fungsi tersebut. Pada variasi 1, pembobotan SOC lebih tinggi daripada variasi 2, Sehingga dapat dilihat pada gambar 4.53 SOC dari variasi 1 semakin lama semakin meningkat mendekati SOC optimal yang ditentukan. Sedangkan pada variasi 2, pembobotan dari utilisasi daya *fuel cell* P_{fc} lebih tinggi dari variasi 1, Sehingga daya keluaran *fuel cell* dijaga dekat pada keluaran minimum *fuel cell* yaitu 2 kW. Maka dari itu dapat terlihat bahwa variasi 2 mengkonsumsi hidrogen yang lebih sedikit bila dibandingkan dengan variasi 1.

4. Kesimpulan

Perubahan nilai dari N_H atau *horizon* memiliki beberapa pengaruh yang signifikan terhadap respons dari sistem. Dimana pada pengujian dengan variasi nilai *horizon* didapatkan beberapa pengaruh yaitu,

1. Semakin tinggi nilai N_H maka nilai SOC ketika *driving cycle* berakhir akan mendekati SOC optimal yang telah ditentukan yaitu 0.5. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi nilai *horizon* maka semakin agresif variabel kontrol dikerahkan untuk mendekati referensi SOC optimal.
2. Agresifitas variabel kontrol berakibat tingginya konsumsi hidrogen yang digunakan, semakin tinggi nilai *horizon* yang digunakan, semakin tinggi konsumsi hidrogen yang digunakan. Kesimpulan tersebut berlaku pada semua skenario *driving cycle*.
3. Penentuan nilai *horizon* harus dilakukan berdasarkan desain dari karakteristik sistem yang diinginkan, tidak semata-mata dengan menaikkan nilai *horizon* akan meningkatkan performansi sistem, harus disesuaikan dengan desain yang diinginkan.

Kemudian pada pengujian variasi *objective function* didapati bahwa ekspresi dari masing-masing *objective function* yang diimplementasikan pada MPC berpengaruh terhadap karakteristik respon dari sistem yaitu,

1. *Objective function* LQR menghasilkan karakteristik respon sistem yang meminimalkan penggunaan daya *fuel cell* dikarenakan hanya terdapat dua ekspresi yaitu kuadrat dari daya *fuel cell* yang digunakan dan kuadrat dari galat SOC terhadap SOC optimal.
2. *Objective function* minimasi hidrogen dan *losses* baterai menghasilkan karakteristik respon sistem yang menyeimbangkan penggunaan *fuel cell* dan baterai dimana terlihat pada respon pembagian daya dan SOC

bahwa daya *fuel cell* dan baterai terbagi hampir setimbang dalam memenuhi permintaan daya traksi serta SOC yang juga mendekati SOC optimal pada akhir, mengindikasikan siklus *charging* baterai dilakukan lebih sering dibandingkan *objective function* LQR.

3. *Objective function* pengoptimalan efisiensi *fuel cell* menghasilkan karakteristik respon yang menjadikan daya *fuel cell* bekerja pada tingkat efisiensi yang tinggi bila dibandingkan dari kedua *objective function* lainnya, Dimana daya keluaran *fuel cell* bekerja pada tingkat efisiensi dengan jangkauan 57% - 60%, Lebih tinggi bila dibandingkan kedua *objective function* yang daya keluaran *fuel cell*-nya berada pada efisiensi kerja 49.2% - 55%.

Terakhir pada pengujian variasi pembobotan yang dilakukan pada *objective function* LQR menunjukkan bahwa parameter pembobotan juga berpengaruh terhadap karakteristik respon sistem. Dimana semakin tinggi pembobotan yang diberikan kepada sebuah ekspresi pada *objective function*, maka penalisasi yang diberikan kepada ekspresi tersebut akan semakin tinggi sehingga variabel pada ekspresi tersebut akan diminimalkan. Maka dari itu, pemilihan kombinasi parameter nilai *horizon*, pembobotan, dan implementasi *objective function* harus dilakukan dengan cermat dan teliti sehingga dapat diperoleh respon terbaik dari sistem yang dikendalikan.

Referensi

- [1] T. Rudolf, T. Schurmann, S. Schwab, and S. Hohmann, "Toward Holistic Energy Management Strategies for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles in Heavy-Duty Applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 6, pp. 1094–1114, Jun. 2021, doi: 10.1109/JPROC.2021.3055136.
- [2] H. S. Das, C. W. Tan, and A. H. M. Yatim, "Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 268–291, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.056.
- [3] E. Tazelaar, B. Veenhuizen, P. van den Bosch, and M. Grimminck, "Analytical solution of the energy management for fuel cell hybrid propulsion systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 5, pp. 1986–1998, 2012, doi: 10.1109/TVT.2012.2190630.
- [4] Ravey, B. Blunier, and A. Miraoui, "Control strategies for fuel-cell-based hybrid electric vehicles: From offline to online and experimental results," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 6, pp. 2452–2457, 2012. doi: 10.1109/TVT.2012.2198680.
- [5] L. Guo, X. Zhang, Y. Zou, N. Guo, J. Li, and G. Du, "Cost-optimal energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles with variable horizon speed prediction and adaptive state-of-charge reference," *Energy*, vol. 232, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120993.
- [6] A. Ferrara, M. Okoli, S. Jakubek, and C. Hametner, "Energy management of heavy-duty fuel cell electric vehicles: Model predictive control for fuel consumption and lifetime optimization," in *IFAC-PapersOnLine*, 2020, vol. 53, no. 2, pp. 14205–14210. doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1053.
- [7] N. Nur Malasari, H. Onggo, M. Rokhmat, F. Teknik Elektro Universitas Telkom, and P. Penelitian Fisika LIPI, "INTEGRASI POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE (PEM) FUEL CELL DAN ANALISIS PENGARUH JUMLAH SEL TERHADAP PERFORMANSI BERDASARKAN DATA KURVA KARAKTERISTIK."
- [8] M. A. Soumeur, B. Gasbaoui, O. Abdelkhalek, J. Ghouili, T. Toumi, and A. Chakar, "Comparative study of energy management strategies for hybrid proton exchange membrane fuel cell four wheel drive electric vehicle," *Journal of Power Sources*, vol. 462, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.228167.
- [9] S. Liu, Y. Bin, Y. Li, and B. Scheppat, "Hierarchical MPC Control Scheme for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles," in *IFAC-PapersOnLine*, Jan. 2018, vol. 51, no. 31, pp. 646–652. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.10.151.
- [10] Y. Zhou, A. Ravey, and M. C. Péra, "Real-time cost-minimization power-allocating strategy via model predictive control for fuel cell hybrid electric vehicles," *Energy Conversion and Management*, vol. 229, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113721.
- [11] T. Markel et al., "ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling," 2002. [Online]. Available: www.nrel.gov/transportation/analysis
- [12] M. A. Hannan, M. S. H. Lipu, A. Hussain, and A. Mohamed, "A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78. Elsevier Ltd, pp. 834–854, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.001.
- [13] J. P. Rivera-Barrera, N. Muñoz-Galeano, and H. O. Sarmiento-Maldonado, "Soc estimation for lithium-ion batteries: Review and future challenges," *Electronics (Switzerland)*, vol. 6, no. 4. MDPI AG, Dec. 01, 2017. doi: 10.3390/electronics6040102.
- [14] Z. Wang, G. Feng, D. Zhen, F. Gu, and A. Ball, "A review on online state of charge and state of health estimation for lithium-ion batteries in electric vehicles," *Energy Reports*, vol. 7. Elsevier Ltd, pp. 5141–5161, Nov. 01, 2021. doi: 10.1016/j.egyr.2021.08.113.