



TUGAS AKHIR - EE 184801

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

MUHAMMAD RASYENDRIA RANGGA BIJANA
NRP 0711184000047

Dosen Pembimbing
Eka Iskandar, ST, MT.
NIP 198005282008121001
Ir. Rusdhianto Effendie AK, MT.
NIP 195704241985021001

Program Studi Sarjana Teknik Elektro
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro Dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022



TUGAS AKHIR - EE 184801

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

MUHAMMAD RASYENDRIA RANGGA BIJANA

NRP 0711184000047

Dosen Pembimbing

Eka Iskandar, ST, MT.

NIP 198005282008121001

Ir. Rusdhianto Effendie AK, MT.

NIP 195704241985021001

Program Studi Sarjana Teknik Elektro

Departemen Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Elektro Dan Informatika Cerdas

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



FINAL PROJECT - EE 184801

Design and Simulation of Model Predictive Controller on Power Splitting System for Fuel Cell - Battery Hybrid Electric Vehicle

MUHAMMAD RASYENDRIA RANGGA BIJANA

NRP 07111840000047

Advisor

Eka Iskandar, ST, MT.

NIP 198005282008121001

Ir. Rusdhianto Effendie AK, MT.

NIP 195704241985021001

Electrical Engineering Undergraduate Program

Department of Electrical Engineering

Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

LEMBAR PENGESAHAN

DESAIN DAN SIMULASI MODEL PREDICTIVE CONTROL PADA SISTEM PEMBAGIAN DAYA UNTUK KENDARAAN LISTRIK HIBRIDA FUEL CELL DAN BATERAI

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Elektro
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **MUHAMMAD RASYENDRIA RANGGA BIJANA**

NRP. 0711184000047

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Eka Iskandar, ST, MT.
2. Ir. Rusdhianto Effendie AK, MT.
3. Dr. Ir. Ari Santoso, DEA.
4. Ir. Ali Fatoni, MT
5. Mohamad Abdul Hady, ST., MT.

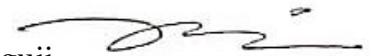
Pembimbing



Ko-pembimbing



Penguji



Penguji



Penguji



SURABAYA

Juni, 2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPROVAL SHEET

DESIGN AND SIMULATION OF MODEL MODEL PREDICTIVE CONTROLLER ON POWER SPLITTING SYSTEM FOR FUEL CELL – BATTERY HYBRID ELECTRIC VEHICLE

FINAL PROJECT

Submitted to full fil one of the requirements
For obtaining a bachelor's degree at
Undergraduate Study Program of Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : **MUHAMMAD RASYENDRIA RANGGA BIJANA**

NRP. 07111840000047

Approved by Final Project Examiner Team :

1. Eka Iskandar, ST, MT.

Advisor



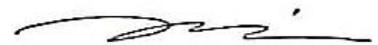
2. Ir. Rusdhianto Effendie AK, MT.

Co-Advisor



3. Dr. Ir. Ari Santoso, DEA.

Examiner



4. Ir. Ali Fatoni, MT

Examiner



5. Mohamad Abdul Hady, ST., MT.

Examiner



SURABAYA

Juni, 2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Muhammad Rasyendria Rangga Bijana /
07111840000047

Program studi : Teknik Elektro

Dosen Pembimbing / NIP : Eka Iskandar, ST, MT. / 198005282008121001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Implementasi Model Predictive Control pada Sistem Pembagian Daya untuk Kendaraan Listrik Hibrida Fuel Cell dan Baterai” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 7 Juli 2022

Mengetahui
Dosen Pembimbing



Eka Iskandar ST, MT.

NIP. 198005282008121001

Mahasiswa



Muhammad Rasyendria Rangga Bijana

NRP. 07111840000047

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ABSTRAK

DESAIN DAN SIMULASI MODEL PREDICTIVE CONTROL PADA SISTEM PEMBAGIAN DAYA UNTUK KENDARAAN LISTRIK HIBRIDA FUEL CELL DAN BATERAI

Nama Mahasiswa / NRP : **Muhammad Rasyendria Rangga Bijana / 0711184000047**

Departemen : **Teknik Elektro FTEIC - ITS**

Dosen Pembimbing : **Eka Iskandar, ST, MT.**
Ir. Rusdhianto Effendie AK, MT.

Abstrak

Penelitian Tugas Akhir 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: *Model Predictive Control, Kendaraan Listrik Hibrida Fuel Cell – Baterai, Sistem Manajemen Energi, Pembagian Daya, SOC*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ABSTRACT

DESIGN AND SIMULATION OF MODEL PREDICTIVE CONTROLLER ON POWER SPLITTING SYSTEM FOR FUEL CELL – BATTERY HYBRID ELECTRIC VEHICLE

Student Name / NRP : **Muhammad Rasyendria Rangga Bijana / 0711184000047**

Department : **Electrical Engineering Department ELECTICS - ITS**

Advisor : **Eka Iskandar, ST, MT.**
Ir. Rusdhianto Effendie AK, MT.

Abstract

This Final Project research investigates the performance of the implementation of Model Predictive Control (MPC) on Energy Management System (EMS) used in Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle (FCHEV). Simulation has been done with three MPC parameter variations which are horizon length variation, objective function variation, and weighting value variation. Simulation of the variation horizon length shows that the higher the horizon length used, the faster SOC get to the optimal SOC and the final SOC will be closer to optimal SOC that been determined in compensation of higher hydrogen consumption. Simulation of the variation of objective function showed that the objective function terms will affect the system response characteristic, the simulation of objective function for maximizing fuel cell efficiency showed that the output fuel cell power used is working on higher efficiency range which is 57% - 60% in comparison with other objective function which range on 49.2% - 57%. Lastly on Simulation of the variation of weighting value showed that the higher value used on one term in objective function the more penalized it will get by the solver, so the solver will minimize that term more on optimization process. That is why there is need to consider the system design in order to choose the right tuning value for MPC parameter. However, this final project research does not include speed prediction model, but it assumes that the speed is known without uncertainties.

Keywords: *Model Predictive Control, Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle, Energy Management System, Power Split, SOC.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena hanya dengan rahmat dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir judul “Desain Dan Simulasi Model Predictive Control Pada Sistem Pembagian Daya Untuk Kendaraan Listrik Hibrida Fuel Cell – Baterai” ini dapat diselesaikan dengan baik.

Adapun Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan menyelesaikan studi S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Terima kasih banyak penulis ucapkan kepada pihak-pihak berikut yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini:

1. Allah SWT. yang dengan rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan lancar.
2. Keluarga penulis yang selalu memberikan dukungan, semangat, nasihat dan doa kepada penulis.
3. Bapak Eka Iskandar, S.T., M.T., Alm. Bapak Ir. Rusdhianto Effendie AK, M.T. selaku dosen pembimbing I dan II serta Bapak Dr. Ir. Ari Santoso, DEA. selaku dosen pembimbing pengganti yang telah memberikan bimbingan, dan motivasi dalam pengerjaan tugas akhir ini.
4. Teman-teman kontrakan berkah dan penghuni kosan Bapak Muhammad yang menjadi tempat berdiskusi dan berkeluh kesah dalam proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
5. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu yang telah membantu dalam penyelesaian penulisan tugas akhir ini.

Besar harapan penulis menerima saran dan kritik untuk pengembangan serta perbaikan dari Tugas Akhir ini.

Surabaya, 10 Juni 2022



Muhammad Rasyendria Rangga Bijana

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
APPROVAL SHEET.....	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL	xvii
1 BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 RUMUSAN MASALAH.....	2
1.3 BATASAN MASALAH.....	2
1.4 TUJUAN PENELITIAN.....	2
1.5 MANFAAT PENELITIAN	3
2 BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 HASIL PENELITIAN DAN PERANCANGAN TERDAHULU	5
2.2 LANDASAN TEORI.....	6
2.2.1 Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle (FCHEV)	6
2.2.2 Energy Management System (EMS)	12
2.2.3 Model Predictive Controller	13
3 BAB 3 METODOLOGI	19
3.1 METODE YANG DIGUNAKAN	19
3.2 ALAT DAN BAHAN	19
3.2.1 HARDWARE	20
3.2.2 SOFTWARE.....	20
3.3 PELAKSANAAN PERANCANGAN.....	21
3.3.1 Permodelan Sistem	21
3.3.2 Desain dan Perancangan Kontroler MPC.....	28
3.3.3 Alur Pengujian Kontroler MPC.....	32
4 BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1 Pengujian Kontroler MPC	35
4.1.1 Simulasi dengan Memvariasikan Nilai NH	35
4.1.2 Simulasi Perbandingan <i>Objective Funtion</i>	43

4.1.3	Simulasi Kontroler MPC dengan Variasi Pembobotan	49
5	BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	55
5.1	Kesimpulan	55
5.2	Saran	56
	DAFTAR PUSTAKA.....	57
	LAMPIRAN	59
	BIODATA PENULIS.....	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Klasifikasi Algoritma Strategi Kontrol FCHEV (Das et al., 2017).....	5
Gambar 2.2 Arsitektur seri dan paralel pada HEV dengan ICE.....	7
Gambar 2.3 Arsitektur seri FCHEV	7
Gambar 2.4 Topologi sistem PEMFC	9
Gambar 2.5 Gaya-gaya yang bekerja pada kendaraan	12
Gambar 2.6 Struktur MPC dasar	14
Gambar 2.7 Strategi MPC dalam memprediksi respon sistem dalam rentang horizon N.....	14
Gambar 2.8 Perbandingan Referensi Trayektori pada MPC	16
Gambar 3.1 Diagram Blok Sistem Pengaturan Pembagian Daya pada Kendaraan Listrik Hibrida <i>Fuel Cell</i> – Baterai.....	22
Gambar 3.2 Grafik Daya Keluaran <i>Fuel Cell</i> dan Daya Hidrogen serta Grafik Efisiensi <i>Fuel Cell</i>	23
Gambar 3.3 Diagram Alir Daya pada Arsitektur Seri	27
Gambar 3.4 Blok Diagram Kontroler MPC Kendaraan Listrik Hibrida <i>Fuel Cell</i> – Baterai...28	
Gambar 3.5 Blok Diagram Simulink Permodelan Daya Traksi	31
Gambar 3.6 Alur Simulasi Pengujian Kontroler MPC	34
Gambar 4.1 Profil Kecepatan UDSS	35
Gambar 4.2 Profil Kecepatan NEDC	36
Gambar 4.3 Profil Kecepatan NEDC	36
Gambar 4.4 Plot Pembagian Daya untuk Nilai Horizon 10	38
Gambar 4.5 Plot Pembagian Daya untuk Nilai Horizon 25	38
Gambar 4.6 Plot Pembagian Daya untuk Nilai Horizon 50	39
Gambar 4.7 Perbandingan Daya <i>Fuel Cell</i> masing-masing variasi horizon.....	39
Gambar 4.8 Perbandingan SOC dari tiga variasi nilai horizon	40
Gambar 4.9 Distribusi Daya Keluaran Fuel Cell Variasi $NH = 10$	42
Gambar 4.10 Distribusi Daya Keluaran Fuel Cell Variasi $NH = 25$	42
Gambar 4.11 Distribusi Daya Keluaran Fuel Cell Variasi $NH = 50$	43
Gambar 4.12 Pembagian Daya Kontroler MPC dengan Implementasi <i>Objective Funtion 1</i> ...44	
Gambar 4.13 Pembagian Daya Kontroler MPC dengan Implementasi <i>Objective Funtion 2</i> ...45	
Gambar 4.14 Perbandingan Keluaran Daya <i>Fuel Cell</i> Variasi 1 dan Variasi 2	45
Gambar 4.15 Perbandingan SOC dari Kedua Variasi <i>Objective Funtion</i>	46
Gambar 4.16 Distribusi Pembagian Daya <i>Objective Function 1</i>	46
Gambar 4.17 Distribusi Pembagian Daya <i>Objective Function 2</i>	47

Gambar 4.18 Grafik Pembagian Daya pada Variasi 1.....	50
Gambar 4.19 Grafik Pembagian Daya pada Variasi 2.....	50
Gambar 4.20 Perbandingan Keluaran Daya <i>Fuel Cell</i> Variasi 1 dan Variasi 2	51
Gambar 4.21 Perbandingan Grafik SOC pada Simulasi Variasi 1 dan Variasi 2 dengan Profil Kecepatan UDDS	51
Gambar 4.22 Distribusi Daya Keluaran <i>Fuel Cell</i> Variasi 1	52
Gambar 4.23 Distribusi Daya Keluaran <i>Fuel Cell</i> Variasi 2.....	52

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Nilai Variasi Parameter Horizon Waktu Prediksi	19
Tabel 3.2 Tabel Spesifikasi Laptop yang Digunakan.....	20
Tabel 3.3 Tabel Parameter Fuel Cell	22
Tabel 3.4 Tabel Parameter Baterai	24
Tabel 3.5 Nilai Parameter Efisiensi	26
Tabel 3.6 Tabel Parameter pada Persamaan 3.8.....	27
Tabel 4.1 Nilai Parameter Profil Kecepatan UDDS	37
Tabel 4.2 Nilai Parameter Profil Kecepatan NEDC	37
Tabel 4.3 Nilai Parameter Profil Kecepatan NEDC	37
Tabel 4.4 Nilai Pembobotan <i>Objective Function</i> Minimalisasi Hidrogen	37
Tabel 4.5 Hasil Simulasi Pengujian Variasi Horizon	37
Tabel 4.6 Tabel Hasil Pembagian Distribusi Daya <i>Fuel Cell</i>	42
Tabel 4.7 Nilai Parameter <i>Tuning</i> Simulasi	43
Tabel 4.8 Hasil Simulasi dengan Variasi <i>Objective Function</i>	43
Tabel 4.9 Frekuensi Daya Keluaran <i>Fuel Cell</i> dan Efisiensi <i>Fuel Cell</i> pada Simulasi Variasi <i>Objective function</i>	48
Tabel 4.10 Parameter Variasi Pembobotan yang Digunakan dalam Simulasi	49
Tabel 4.11 Hasil Simulasi Variasi Pembobotan	49
Tabel 4.12 Frekuensi Daya Keluaran <i>Fuel Cell</i> dan Efisiensi <i>Fuel Cell</i> pada Simulasi Variasi Pembobotan	53

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1 PENDAHULUAN

Pada bagian ini dijelaskan mengenai latar belakang dari penelitian tugas akhir yang dilaksanakan, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan, sistematika, serta metode yang digunakan pada penelitian tugas akhir.

1.1 LATAR BELAKANG

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. Maka dari itu, upaya pengurangan emisi karbon menjadi salah satu tuntutan global untuk mengurangi permasalahan lingkungan tersebut dan mempercepat perkembangan teknologi transportasi ramah lingkungan yang berkelanjutan (Rudolf et al., 2021)

Berdasarkan permasalahan tersebut riset dan perkembangan mengenai *Electric Vehicle* (EV) kian berkembang pesat. Salah satu tantangan dalam pengembangannya adalah harga dari sumber tenaga yang digunakan dalam pengoperasiannya. *Hybrid Electric Vehicle* (HEV) adalah sarana transisi menuju penggunaan transportasi elektrik yang masif mengingat saat ini *Battery Electric Vehicle* (BEV) masih memiliki beberapa kekurangan yang dapat diatasi oleh HEV. Diantaranya adalah jarak tempuh BEV yang lebih pendek bila dibandingkan dengan HEV dan kebutuhan BEV terhadap infrastruktur *charging*.

Pada umumnya, EV dapat dibedakan menjadi tiga tipe berdasarkan konfigurasi dari EV tersebut yaitu, *Battery Electric Vehicle* (BEV) yang menggunakan baterai sebagai satu-satunya sumber tenaga utama, *Fuel Cell Electric Vehicle* (FCEV) yang menggunakan sel bahan bakar atau *fuel cell* untuk menghasilkan listrik sebagai satu-satunya sumber tenaga utama, serta *Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle* (FCHEV) yang menggunakan dua buah sumber tenaga yaitu baterai dan *fuel cell*. Saat ini terdapat banyak riset FCHEV dilakukan untuk menjadikan FCHEV populer pada pasar kendaraan listrik seperti riset tentang komponen FCHEV dan riset untuk meningkatkan efisiensi FCHEV (Das et al., 2017).

FCHEV Dalam aplikasinya menggunakan *hydrogen fuel cell*, pada kebanyakan kasus digunakan tipe *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) karena memiliki suhu dan tekanan operasi yang rendah, tidak memakan banyak ruang dalam kendaraan, serta memiliki densitas energi yang tinggi bila dibandingkan dengan tipe *hydrogen fuel cell* lainnya. Namun, PEMFC juga memiliki harga tinggi serta sistem yang kompleks sehingga dibutuhkan strategi kontrol yang berkaitan langsung dengan konsumsi hidrogen FCHEV. Dalam literatur yang ada terdapat dua strategi kontrol yang umum digunakan, strategi kontrol *offline* dan strategi kontrol *online*. Strategi kontrol *offline* umumnya digunakan untuk mengoptimasi penggunaan hidrogen dari kendaraan, strategi ini banyak digunakan untuk kendaraan listrik yang memiliki *driving cycle* yang diketahui atau konstan seperti bis dan kereta api. Strategi kontrol *online* digunakan untuk menentukan penggunaan hidrogen berdasarkan *Power Split Ration* (PSR) pada beberapa literatur strategi kontrol *online* dilakukan menggunakan metode *fuzzy*, *neural network*, dan *Model Predictive Control*. Strategi kontrol tersebut kemudian diimplementasikan dalam sistem manajemen energi atau *Energy Management System* (EMS) (Ravey et al., 2012).

Sistem manajemen energi diperlukan pada kendaraan listrik hibrida untuk melakukan tujuan tambahan yang dapat meningkatkan performansi kendaraan. Bila sistem *powertrain* kendaraan memiliki fungsi untuk memberikan motor listrik daya yang dibutuhkan oleh

kendaraan, maka sistem manajemen energi memiliki fungsi untuk tujuan tertentu seperti minimalisasi konsumsi bahan bakar, menjaga elemen penyimpanan energi dan sumber tenaga dari *overcharging* ataupun *overdischarging*, serta meningkatkan jarak tempuh. Hal ini dikarenakan terdapat satu karakteristik yang dimiliki kendaraan listrik hibrida *fuel cell* baik hidrogen maupun *Internal Combustion Engine* (ICE) adalah komponen penyimpan energi, baik itu baterai, kapasitor, maupun *super-capacitor* (Tazelaar et al., 2012a).

Pada penelitian Tugas Akhir ini akan dilakukan perancangan strategi kontrol dengan menggunakan metode *Model Predictive Control* (MPC) yang akan diimplementasikan pada sistem manajemen energi atau *Energy Management System* (EMS) pada FCHEV. Selain itu akan diujikan beberapa *objective function* dengan tujuan tertentu untuk dapat dibandingkan performansinya satu sama lain.

1.2 RUMUSAN MASALAH

Pada *Fuel Cell Hybrid Vehicle* (FCHEV) perlu diterapkan strategi kontrol untuk melakukan pengaturan pembagian daya yang nantinya akan diimplementasikan pada *Energy Management System* (EMS). Selain pengaturan daya, strategi kontrol tersebut juga dapat digunakan untuk tujuan meminimalkan penggunaan hidrogen, meningkatkan efisiensi penggunaan *fuel cell*, serta mengurangi resiko degradasi elemen penyimpanan energi.

Implementasi MPC pada EMS dengan *objective function* spesifik dapat mempengaruhi performansi sistem dan keluaran pembagian daya tergantung dari tujuan yang diekspresikan pada *objective function* tersebut. Maka dari itu disusun beberapa rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana melakukan implementasi strategi kontrol MPC pada sistem manajemen energi untuk sistem kendaraan hibrida *fuel cell* – baterai?
2. Bagaimana pengaruh *objective function*, nilai *horizon*, dan pembobotan pada *objective function* yang diimplementasikan pada strategi kontrol MPC mempengaruhi performansi sistem pembagian daya pada EMS?

1.3 BATASAN MASALAH

Pada penelitian Tugas Akhir ini terdapat beberapa batasan masalah yang ditentukan supaya dalam pengerjaan dan pembahasan Tugas Akhir tidak melebar dari fokus yang ditentukan. Batasan masalah tersebut yaitu:

1. Penelitian Tugas Akhir berfokus pada perancangan kontroler MPC sebagai strategi kontrol yang digunakan untuk menentukan *Power Split Ratio* (PSR).
2. Elemen aliran daya akan dimodelkan sebagai efisiensi
3. Pengujian dilakukan menggunakan *driving cycle* yang digunakan untuk pengujian kendaraan listrik yaitu UDDS, NEDC, dan MANHATTAN.
4. Kontroler MPC yang digunakan merupakan kontroler MPC linier.
5. Penelitian berfokus pada strategi offline dikarenakan *driving cycle* akan diketahui sepenuhnya oleh sistem.

1.4 TUJUAN PENELITIAN

Berikut merupakan tujuan dari penelitian Tugas Akhir yang dilakukan yaitu:

1. Mengaplikasikan *Model Predictive Controller* pada sistem manajemen energi mobil listrik hibrida *fuel cell* – baterai agar sesuai dengan spesifikasi desain yang diinginkan.
2. Mengetahui dan menganalisis perbandingan performansi antara masing-masing *objective function* yang diimplementasikan pada MPC pada sistem pembagian daya kendaraan listrik hibrida *fuel cell* – baterai.
3. Melakukan perbandingan performansi sistem terhadap perubahan parameter *tuning* pada MPC.

1.5 MANFAAT PENELITIAN

Berikut merupakan manfaat dari penelitian Tugas Akhir yang dilakukan

1. Memberikan kontribusi pada penelitian strategi kontrol pada sistem manajemen energi mobil hibrida *fuel cell* – baterai.
2. Memberikan hasil komparasi terhadap perubahan nilai parameter kontroler MPC yang diimplementasikan pada sistem manajemen energi mobil hibrida *fuel cell* – baterai.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

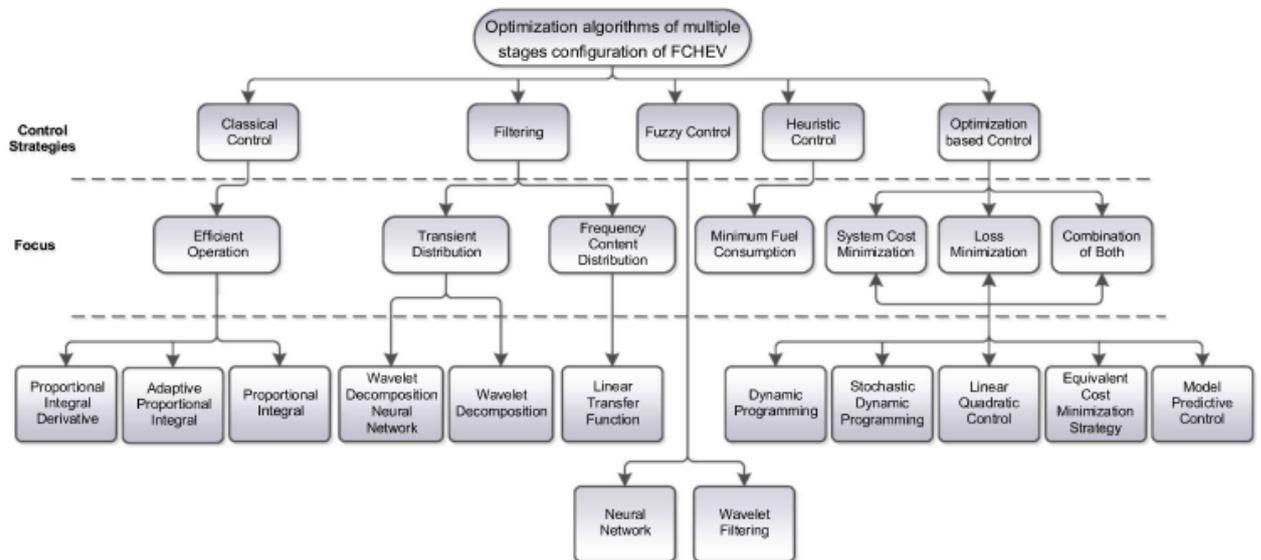
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Pada bagian ini akan dibahas mengenai penelitian terdahulu mengenai topik dari penelitian Tugas Akhir dan teori dasar permodelan sistem kendaraan listrik hibrida *fuel cell* – baterai dan algoritma kontrol *Model Predictive Control* (MPC) secara umum.

2.1 HASIL PENELITIAN DAN PERANCANGAN TERDAHULU

Penelitian strategi kontrol pada EMS untuk kendaraan listrik hibrida baik FCHEV maupun ICE-HEV telah dilakukan pada beberapa tahun terakhir, Pada sub-bab ini akan dijelaskan beberapa hasil penelitian terdahulu mengenai strategi kontrol yang diterapkan pada FCHEV baik dalam berupa *review* maupun berupa perancangan kontroler-nya.

Pada literatur berjudul “*Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles Review: A review on power conditioning units and topologies*” dilakukan penelitian berbasis *review* terhadap arsitektur FCHEV dan topologi dari FCHEV dijelaskan juga klasifikasi algoritma optimasi dan algoritma strategi kontrol yang dapat diimplementasikan pada FCHEV. Klasifikasi dari strategi kontrol FCHEV dapat dibagi menjadi lima yaitu, Algoritma kontrol klasik, algoritma *filtering*, algoritma kontrol *fuzzy*, algoritma heuristik, dan algoritma kontrol berbasis optimasi. Masing-masing algoritma kontrol memiliki fokus dan karakteristik masing-masing, dimana kontrol klasik lebih berfokus kepada operasi yang efisien, algoritma kontrol berbasis optimasi berfokus pada minimasi *losses* dan minimasi *cost* dari sistem, Sedangkan *filtering* lebih berfokus pada distribusi transien. Klasifikasi dari algoritma-algoritma tersebut dapat dilihat pada gambar 2.1 (Das et al., 2017).



Gambar 2.1 Klasifikasi Algoritma Strategi Kontrol FCHEV (Das et al., 2017).

Pada literatur berjudul “*Toward Holistic Energy Management Strategies for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles in Heavy-Duty Applications*” dibahas mengenai strategi manajemen energi dengan mengimplementasikan beberapa algoritma kontrol yang telah disebutkan diatas. Dimana pada literatur tersebut strategi-strategi diatas dibagi menjadi tiga klasifikasi yaitu *rule-based strategy*, *optimization-based strategy*, dan *learning-based strategy* dimana strategi berbasis aturan atau *rule-based* merupakan strategi yang berbasis aturan-aturan yang telah dideklarasikan terhadap variabel yang telah ada, strategi berbasis aturan melakukan pembagian

tegangan berdasarkan nilai SOC dari baterai, dimana ketika SOC berada pada jangkauan tertentu maka daya dari *fuel cell* dan baterai akan keluar sesuai dengan aturan yang telah dibuat. Strategi berbasis optimasi merupakan strategi yang memanfaatkan teknik optimisasi untuk menentukan keluaran daya *fuel cell* dan baterai dengan memperhatikan SOC dari baterai, beberapa contoh strategi kontrol berbasis optimasi adalah pengimplementasian MPC pada sistem manajemen energi. Terakhir strategi berbasis *learning* adalah strategi yang menggunakan metode pembelajaran mesin atau *machine learning* dimana metode membutuhkan data *mapping* masukan dan keluaran dari sistem untuk dilakukan proses *learning* yang akan menghasilkan model sistem dan model kontroler, beberapa metode yang telah digunakan adalah *reinforcement learning* dan *supervised learning* (Rudolf et al., 2021).

Pada literatur berjudul “*Analytical Solution of the Energy Management for Fuel Cell Hybrid Propulsion Systems*” dilakukan penelitian mengenai solusi analitik tentang permasalahan strategi kontrol *Equivalent Consumption Minimization Strategy* (ECMS) berbasis model, dimana dilakukan permodelan FCHEV dengan semua komponen termasuk *fuel cell* dan baterai dengan parameter yang digunakan adalah parameter dari kendaraan sedan 10kW. *Cost function* yang digunakan pada kerangka pengerjaan ECMS merupakan *cost function* yang meminimalkan penggunaan daya keluaran *fuel cell* dan memaksimalkan efisiensi kerja penggunaan *fuel cell*. Dari hasil yang didapat, strategi kontrol yang didesain dari literatur tersebut mempunyai performansi yang lebih baik dari strategi ECMS umum dengan perbedaan 3% konsumsi hidrogen (Tazelaar et al., 2012).

Pada literatur berjudul “*Energy Management of Heavy-Duty Fuel Cell Electric Vehicles: Model Predictive Control for Fuel Consumption and Lifetime Optimization*” dilakukan desain dan komparasi dari strategi kontrol *Pontryagin’s Minimum Principle* (PMP) dan *Model Predictive Control* (MPC). Pada *objective function* yang diterapkan pada MPC digunakan ekspresi untuk meningkatkan efisiensi kerja dari *fuel cell*, pendekatan SOC baterai terhadap SOC referensi yang ditentukan, dan meminimalan kenaikan daya *fuel cell* tiap waktu sampling. *Objective function* tersebut digunakan untuk meminimalkan konsumsi hidrogen, meminimalkan degradasi *fuel cell*, dan menurunkan kecepatan perubahan daya keluaran *fuel cell*. Dari hasil yang didapatkan, strategi kontrol MPC memiliki perbedaan konsumsi hidrogen lebih banyak 1.5% dari PMP, Namun MPC memiliki rata-rata perubahan daya keluaran *fuel cell* yang lebih kecil yaitu 3.9 kW/s bila dibandingkan dengan PMP yaitu 10.4kW/s. SOC akhir yang dihasilkan juga mempunyai nilai yang sama baik PMP maupun MPC yaitu 0.44 (Ferrara et al., 2020).

2.2 LANDASAN TEORI

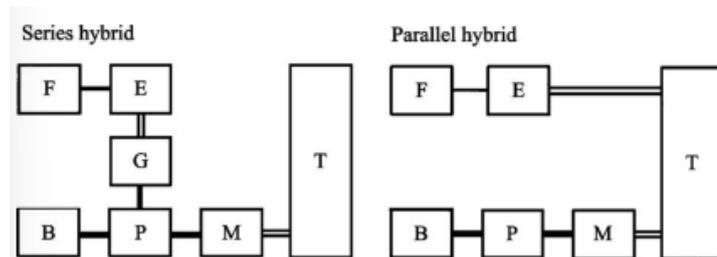
Pada bagian ini akan dijelaskan landasan teori yang digunakan dalam pengerjaan Tugas Akhir permodelan sistem kendaraan listrik hibrida *fuel cell* – baterai dan algoritma kontrol MPC secara umum.

2.2.1 Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle (FCHEV)

Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle (FCHEV) *powertrain* merupakan modifikasi dan pengembangan dari *Fuel Cell Electric Vehicle* (FCEV) dimana arsitektur dari *powertrain* FCHEV terdapat tambahan *Energy Storage System* (ESS) atau elemen penyimpan energi yang digunakan untuk membantu *fuel cell* baik sebagai *buffer* energi maupun sebagai penyuplai energi sekunder. Umumnya ESS yang digunakan dalam arsitektur FCHEV adalah baterai dan

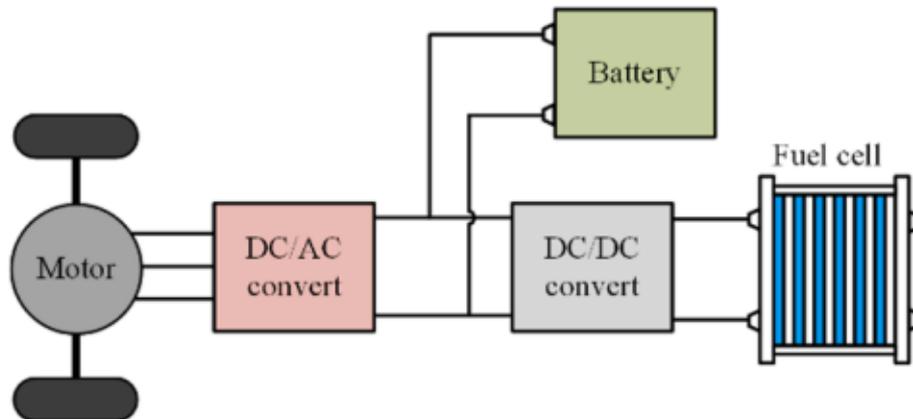
ultra-capacitor yang dapat dilakukan *charging* dan *discharging* berdasarkan daya yang dibutuhkan dan yang disuplai (Das et al., 2017).

Secara umum, *Hybrid Electric Vehicle* (HEV) baik yang menggunakan ICE maupun *fuel cell* hidrogen memiliki beberapa arsitektur dengan masing-masing arsitektur digunakan berdasarkan desain dan rating dari komponen yang digunakan. Pada dasarnya terdapat dua arsitektur HEV yaitu arsitektur seri dan arsitektur paralel. Pada arsitektur seri sumber energi primer baik ICE maupun *fuel cell* hidrogen menghasilkan listrik yang akan menyuplai beban motor listrik, atau melakukan *charging* pada baterai. Sedangkan pada arsitektur paralel, sumber energi primer dan sekunder akan menyuplai beban motor listrik yang digunakan kendaraan secara bersamaan pada gambar 2.2, terlihat perbedaan antara peletakan komponen pada arsitektur seri dan arsitektur paralel pada kendaraan HEV dengan sumber energi ICE (Chan, 2007).



Gambar 2.2 Arsitektur seri dan paralel pada HEV dengan ICE

Pada penelitian Tugas Akhir yang dilakukan, digunakan arsitektur *powertrain* seri yang menggunakan PEMFC sebagai sumber energi utama dan baterai sebagai sumber energi sekunder serta *buffer*. Pada arsitektur seri pengaturan daya hanya dapat dilakukan dengan melakukan pengaturan terhadap daya *fuel cell*, yang nantinya dapat diatur melalui *DC/DC converter* arsitektur seri dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Arsitektur seri FCHEV

Seperti yang terlihat pada gambar 2.2 baterai disambungkan secara paralel dengan *DC/DC converter* lalu daya gabungan ataupun daya *fuel cell* akan disalurkan ke motor listrik melalui *DC/AC converter* atau *inverter*. Daya dari baterai merupakan perbedaan antara daya motor yang dibutuhkan dan daya yang disuplai dari *fuel cell*, dan pada beberapa desain, komponen motor listrik dapat digunakan sebagai penyuplai energi tersier dengan metode *regenerative braking*. Namun, pada Tugas Akhir ini, desain dari sistem diasumsikan tidak

memiliki kemampuan tersebut. Dengan memasukan konstanta parameter efisiensi maka didapatkan persamaan kesetimbangan daya pada *DC bus* sebagai berikut.

$$\eta_{BAT} \cdot P_{bat} + \eta_{BOOST} \cdot P_{fc} - \frac{P_{traksi}}{\eta_{em} \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{drive}} = 0 \quad [2.1]$$

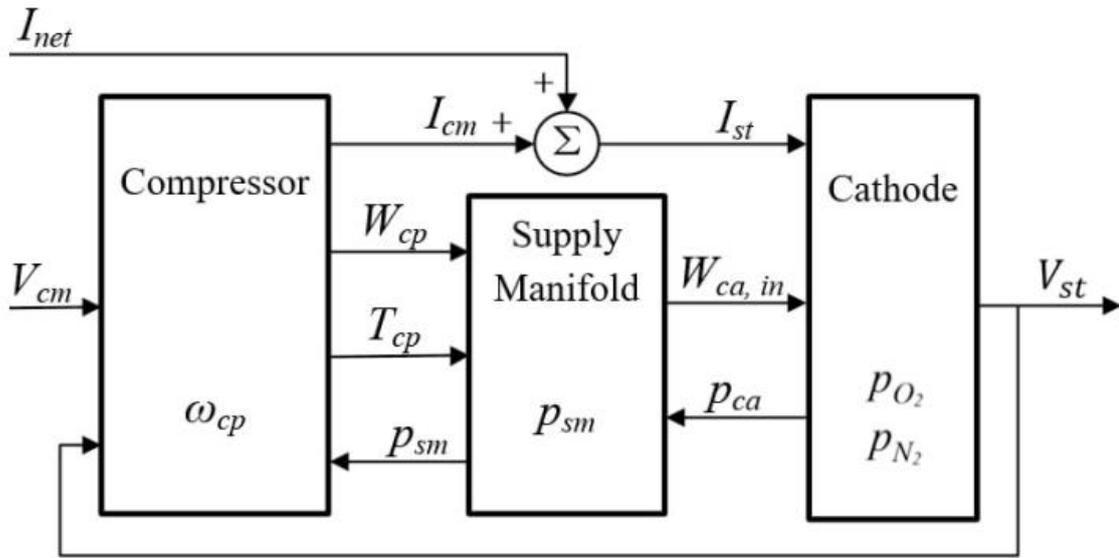
Pada persamaan 2.1 η_{BAT} merupakan efisiensi dari baterai, η_{BOOST} merupakan efisiensi dari *DC/DC converter*, η_{em} merupakan efisiensi dari motor listrik yang digunakan, η_{inv} merupakan efisiensi dari *DC/AC converter* atau *inverter*, dan η_{drive} merupakan efisiensi dari kendaraan yang melaju sedang melaju. Pada permodelannya, arsitektur seri terdiri dari beberapa komponen yang dapat dimodelkan secara matematis yaitu baterai, PEMFC, dan *DC/DC converter* (Pereira et al., 2021). Pada sub-bab berikutnya akan dijelaskan landasan teori dari masing-masing komponen FCHEV pada arsitektur seri.

2.2.1.1 Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) merupakan komponen utama dari FCHEV yang berfungsi sebagai penyuplai daya utama dalam arsitektur seri FCHEV yang digunakan. PEMFC memiliki prinsip kerja yang sama dengan baterai dalam memproduksi energi yaitu prinsip elektrokimia, Pada prinsip ini terjadi perubahan energi dari reaksi kimia menjadi energi listrik dalam bentuk perpindahan elektron. Pada PEMFC listrik dihasilkan dari reaksi pemecahan hidrogen oleh katalis sehingga menjadi konfigurasi proton dan elektron, elektron kemudian ditangkap oleh komponen *current collector* untuk dialirkan kepada komponen elektronika daya atau komponen beban dalam bentuk arus listrik DC. Proses ini dapat dituliskan dengan persamaan (Nur Malasari et al., n.d.; Soumeur et al., 2020).



Sistem PEMFC sendiri dapat dibagi menjadi tiga sub-komponen utama yaitu katoda, pipa suplai, dan kompresor topologi dari sistem PEMFC dapat dilihat pada gambar 2.4



Gambar 2.4 Topologi sistem PEMFC

Pada gambar 2.4 P_{O_2} , P_{N_2} , P_{sm} , P_{ca} adalah tekanan gas oksigen, nitrogen, tekanan gas dari pipa suplai sebelum mengarah ke katoda, dan tekanan gas pada katoda. Sedangkan ω_{cp} merupakan kecepatan rotasional dari motor kompresor. $W_{ca,in}$ dan W_{cp} adalah *flow rate* massa dari gas ke katoda dan ke kompresor secara berurutan. T_{cp} merupakan suhu dari *flow* kompresor. I_{cm} , I_{net} , I_{st} adalah arus dari beban kompresor, arus net PEMFC, dan arus dari *stack* PEMFC (Liu et al., 2018).

Sistem PEMFC memiliki beberapa permodelan tergantung dengan objektif dari permodelan tersebut, pada (Liu et al., 2018) 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 (Zhou et al., 2021) digunakan permodelan berdasarkan korelasi antara daya keluaran *fuel cell*, daya hidrogen yang digunakan, serta efisiensi dari *fuel cell* dimana didapatkan korelasi tersebut berdasarkan data yang didapatkan melalui eksperimen dan simulasi pada *software* ADVISOR. Dari data korelasi tersebut kemudian dilakukan proses *fitting* untuk mendapatkan permodelan korelasinya, kemudian korelasi tersebut digunakan pada *objective function* MPC yang diimplementasikan pada sistem manajemen energi kendaraan listrik hibrida *fuel cell* – baterai.

Konsumsi hidrogen yang digunakan *fuel cell* untuk menghasilkan listrik dapat dicari dengan menggunakan persamaan,

$$M_{H_2} = \int_0^t \frac{P_{fc}(t)}{\eta_{FC}(P_{fc}) \cdot LHV_{H_2}} dt \quad [2.3]$$

Dengan $\eta_{fc} = P_{fc}/P_{H_2}$ merupakan efisiensi dari PEMFC, P_{H_2} adalah daya yang disuplai oleh H_2 dan LHV_{H_2} atau *Lower Heating Value* adalah batas bawah nilai pemanasan hidrogen yaitu $120,000 J/g$. Persamaan [2.3] digunakan dalam melakukan analisis konsumsi hidrogen

nantinya yang digunakan untuk melakukan pengukuran performansi dari kontroler yang telah didesain (Liu et al., 2018; Zhou et al., 2021).

2.2.1.2 Baterai

Saat ini perkembangan baterai sekunder semakin pesat sehingga terdapat banyak jenis yang ditemui seperti *Lithium-Ion*, *Lithium-Polymer*, dan *Solid-state*. Perkembangan pesat ini dikarenakan baterai sekunder merupakan salah satu komponen penting pada perkembangan kendaraan listrik, baterai sekunder dianggap sebagai sumber energi yang andal dan *compact* bila dibandingkan dengan sumber energi terbarukan lainnya. Pada penelitian Tugas Akhir ini digunakan jenis baterai *Lithium-Ion* atau Li-ion, Saat ini baterai Li-ion marak digunakan pada riset kendaraan listrik meskipun baterai Li-ion memiliki harga yang terbilang mahal. Hal ini dikarenakan baterai Li-ion memiliki densitas energi yang lebih besar bila dibandingkan dengan jenis baterai lainnya. Selain itu, baterai Li-ion juga memiliki beberapa fitur yang menonjol seperti efisiensi baterai yang tinggi, siklus hidup baterai yang lama, serta laju *discharge* yang rendah.

Dalam penggunaannya baterai memiliki beberapa *state* yang harus diperhatikan agar baterai dapat bekerja dengan aman dan andal. *State of Charge* (SoC) merupakan *state* penting yang harus diperhatikan dalam penggunaan baterai, SoC dapat didefinisikan sebagai presentasi kapasitas sisa dalam baterai terhadap kapasitas maksimal baterai, definisi tersebut dapat diekspresikan secara matematis sebagai persamaan 2.4

$$SOC(t) = \frac{C_s}{C_{max}} \times 100\% \quad [2.4]$$

Dimana C_s adalah kapasitas sisa dan C_{max} adalah kapasitas maksimal baterai. *State* kedua yang penting untuk diperhatikan dalam penggunaan baterai adalah *State of Health* (SoH). Dalam penggunaannya baterai akan mengalami degradasi baik dari segi kimiawi dan mekanis, degradasi tersebut menyebabkan bertambahnya nilai hambatan dalam dan berkurangnya kapasitas baterai. Maka dari itu, SoH dapat didefinisikan sebagai rasio antara nilai *state* pada saat itu dan nilai *state* awal pada baterai, definisi tersebut dapat diekspresikan secara matematis pada persamaan 2.5

$$SOH(t) = \frac{C_a}{C_{rated}} \times 100\% \quad [2.4]$$

Dimana C_a dan C_{rated} adalah kapasitas aktual dan kapasitas rating dari baterai.

SoC merupakan besaran yang tidak dapat diukur namun dapat diestimasi berdasarkan *state* lain yang ada pada baterai seperti arus, kapasitas rating, dan tegangan *open circuit*. Maka dari itu, dibutuhkan *software* estimasi SoC pada *Energy Management System* (EMS) dan *Battery Management System* (BMS) untuk memperkirakan *state* SoC pada setiap saat. Terdapat beberapa macam metode estimasi SoC mulai dari metode tradisional, metode aplikasi filter adaptif, dan metode *learning algorithm*. Tiap-tiap metode memiliki keunggulan dan kelemahan, pemilihan metode estimasi SoC harus dilakukan dengan memperhitungkan beberapa aspek seperti *hardware* yang digunakan, keakuratan estimasi, kecepatan komputasi, dan lain-lain.

Pada estimasi SoC tradisional salah satu metode yang paling mudah untuk melakukan estimasi SoC adalah metode *coulomb counting*. Metode *coulomb counting* sangat mudah untuk

diimplementasikan pada *hardware* yang memiliki tingkat komputasi yang rendah. Estimasi dilakukan berdasarkan integral dari arus baterai terhadap waktu ketika baterai sedang *charging* maupun *discharging*. Metode *coulomb counting* dapat diekspresikan sebagai persamaan matematis 2.5

$$SOC(t + \tau) = SOC(t) + \frac{1}{Cn} \int_t^{t+\tau} I_{bat}(d\tau) \times 100\% \quad [2.5]$$

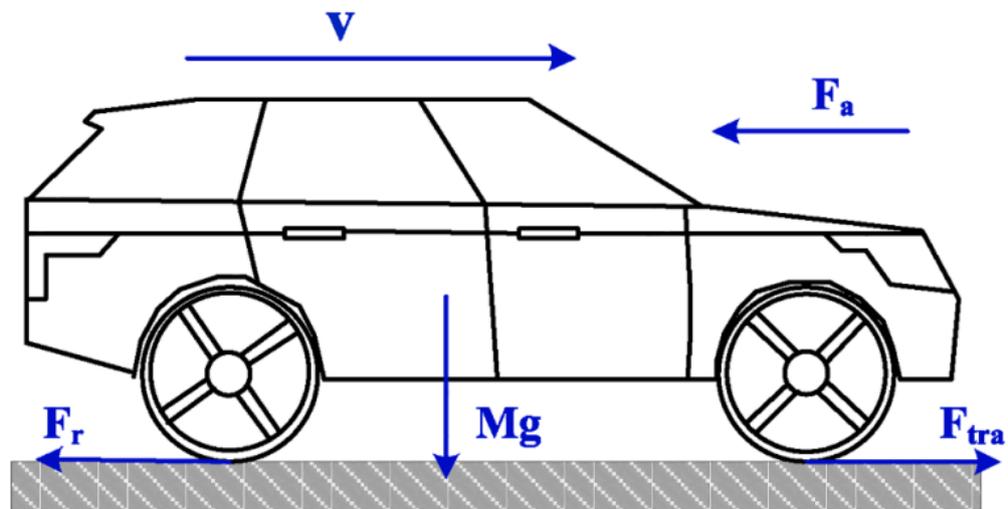
Kemudian terdapat estimasi SoC dengan aplikasi filter adaptif, dimana salah satu contohnya adalah estimasi SoC dengan menggunakan *Kalman Filter* atau *Extended Kalman Filter* yang merupakan filter berbasis model. Metode estimasi tersebut dapat digunakan secara *real-time* atau *online*, dibutuhkan *hardware* komputasi dengan daya tinggi untuk implementasi *software* estimasi SoC dengan menggunakan KF maupun EKF.

Selain itu juga terdapat estimasi SoC berdasarkan algoritma *learning* dimana estimasi SoC dilakukan berdasarkan data hasil uji coba yang dimasukkan kedalam algoritma *learning* seperti *Artificial Neural Network (ANN)*, *Deep Learning*, dan *Recurrent Neural Network (RNN)*. Algoritma *learning* membutuhkan data yang banyak dan baik untuk menghasilkan model yang baik juga, dalam proses pembuatan model memang dibutuhkan daya komputasi yang besar, Namun bila model sudah mencapai kriteria performansi yang diinginkan, model dapat diimplementasikan pada *hardware* yang memiliki komputasi sedang-rendah (Hannan et al., 2017; Rivera-Barrera et al., 2017; Wang et al., 2021).

2.2.1.3 Struktur Kendaraan

Untuk mengetahui daya yang dibutuhkan kendaraan untuk bisa melaju dengan kecepatan dan akselerasi tertentu, dibutuhkan pengetahuan mengenai struktur kendaraan serta parameter-parameter yang mempengaruhi daya traksi dari kendaraan. Pada penelitian ini, mobil SUV yaitu Toyota Mirai, kendaraan tersebut akan digunakan sebagai objek pada penelitian ini. Toyota Mirai digunakan karena Toyota Mirai merupakan salah satu FCV yang telah beredar dipasaran, menjadikan parameter-parameter dari Toyota Mirai didesain khusus untuk ditenagai oleh *fuel cell* dan baterai.

Guna mendapatkan daya traksi dari *driving cycle* yang digunakan, maka perlu diketahui gaya traksi yang bekerja pada kendaraan F_{tra} dan kecepatan kendaraan pada saat tersebut, terlihat pada gambar 2.5 dari gaya-gaya yang bekerja pada kendaraan listrik.



Gambar 2.5 Gaya-gaya yang bekerja pada kendaraan

Dimana F_{tra} , F_r , dan F_a merupakan gaya traksi kendaraan, gaya gesekan kendaraan dengan jalan, serta gaya gesekan aerodinamik kendaraan dengan udara, sedangkan M , g , dan v adalah massa kendaraan, konstanta akselerasi gravitasi, dan kecepatan kendaraan pada saat itu. Dari gambar 2.4 dapat diekspresikan persamaan untuk mencari nilai daya traksi sebagai berikut

$$P_{tra} = v \cdot F_{tra} = [C_r M g \cos(\theta) + 0.5 \rho_{air} S_f c_d v^2 + Mv] \quad [2.6]$$

2.2.2 Energy Management System (EMS)

Dalam aplikasi kendaraan listrik dengan *fuel cell* terdapat kelemahan pada lambatnya dinamika pemberian daya terhadap beban sehingga *fuel cell* tidak mampu untuk mengikuti perubahan daya beban yang sering terjadi, maka dari itu digunakan sebuah *buffer* energi seperti baterai atau *super capacitor* untuk menjadi penyeimbang antara daya yang dihasilkan *fuel cell* dan daya dari beban sehingga kendaraan dapat dikatakan sebagai kendaraan *hybrid* yang dikenal sebagai *Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle* (FCHEV). Karena terdapat dua buah sumber energi pada kendaraan distribusi daya keluaran antara *fuel cell* dan baterai harus dikontrol dengan baik untuk meminimalkan hidrogen serta *cost* yang dikeluarkan (Wu et al., 2020).

Bila sistem *powertrain* pada kendaraan listrik hibrida memiliki fungsi untuk menyuplai motor listrik dengan daya yang setara dengan daya yang dibutuhkan, maka sistem manajemen energi (EMS) mempunyai fungsi untuk melakukan pengaturan terhadap pembagian daya dari masing-masing sumber energi, meminimalkan *cost* dari bahan bakar yang digunakan, memaksimalkan *lifetime* dari masing-masing sumber tenaga, meningkatkan efisiensi sumber energi, sampai menyimpan data *state* dari sistem *powertrain* dari kendaraan listrik. Bisa dikatakan bahwa EMS merupakan penambahan fitur dari sistem *powertrain* yang ada.

Secara umum dalam EMS terdapat dua strategi kontrol yang dapat diimplementasikan dalam pengaturan pembagian daya antara sumber energi yaitu strategi kontrol *rule-based* dan strategi kontrol *optimization-based*.

- a. Strategi kontrol *rule-based*

Pada strategi kontrol *rule-based* titik pengoperasian kendaraan ditentukan berdasarkan seperangkat aturan tertentu yang terdiri dari beberapa parameter seperti kecepatan, torsi, dan lain sebagainya. *Rule-based strategy* terbilang strategi yang simpel karena sederhana dalam aplikasinya sehingga membutuhkan kekuatan komputasi yang rendah. Namun, biasanya performa dari strategi ini masih terbilang jauh dari optimal karena ketidakfleksibelan aturan yang telah ditentukan sebelumnya. Dalam pengembangan EMS dengan *rule-based* adalah dengan mengadopsi *fuzzy logic* untuk memberi kefleksibelan pada desain EMS dengan aturan-aturan yang telah ditentukan.

b. Strategi kontrol *optimization-based*

Strategi kontrol *Optimization-based* menggunakan teknik optimisasi untuk melakukan kalkulasi pembagian energi yang optimal pada sistem dengan memberikan batasan-batasan fisik pada kalkulasi tersebut. Salah satu pengembangan *optimization-based strategy* adalah EMS dengan adopsi MPC, MPC merupakan teknik kontrol efektif pada EMS karena dapat melakukan kontrol terhadap input dengan memberikan batasan-batasan pada parameter yang ditentukan, sehingga MPC dapat memberikan rasio keseimbangan yang tepat antara objektif kontrol dan batasan yang ada. Salah satu kelemahan dari *optimization-based strategy* adalah membutuhkan kekuatan komputasi yang besar karena harus memecahkan beberapa persamaan optimasi dalam satu waktu, selain itu dibutuhkan model sistem yang akurat untuk mendapatkan hasil yang baik (M. Sabri et al., 2016; Zhou et al., 2021).

2.2.3 Model Predictive Controller

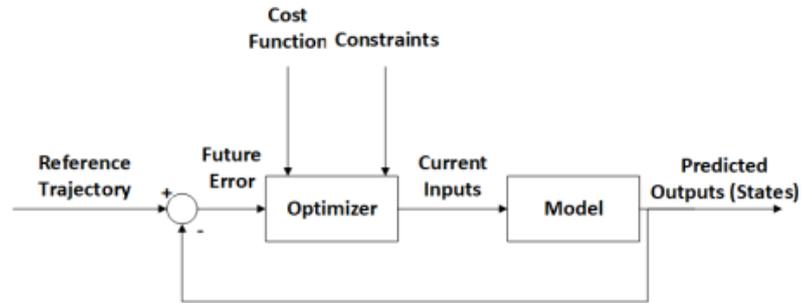
Model Predictive Control (MPC) adalah algoritma kontrol berbasis model dan aplikasi optimasi secara *real-time* (Han et al., 2018). Setelah adanya pengembangan yang cukup lama, saat ini MPC memiliki dasar ilmu teori dan praktik yang luas pada komunitas akademis (Putra Amiruddin et al., n.d.). Pada beberapa tahun terakhir, aplikasi MPC pada beberapa bidang seperti kesehatan, energi, aeronautika dan dirgantara dalam menyelesaikan permasalahan optimasi dengan batasan semakin luas. MPC memiliki tiga elemen utama yaitu model prediksi, fungsi tujuan atau permasalahan, dan metode untuk mendapatkan sinyal kontrol.

Terdapat beberapa macam algoritma MPC dalam pengembangannya seperti Dynamic Matrix Control (DMC), Model Algorithmic Control (MAC), Generalized Predictive Control (GPC), Predictive Functional Control (PFC), Nonlinear Model Predictive Control (NMPC). Masing-masing algoritma memiliki kegunaan masing-masing pada sistem yang dikendalikan (Han et al., 2018).

Beberapa kelebihan utama MPC dalam mendesain sebuah sistem pengaturan adalah MPC dapat memberikan batasan fisik dalam perumusan masalah pengaturan dan mengikutsertakan batasan tersebut pada algoritma optimisasi, selain itu, kemudahan dalam melakukan konfigurasi ulang pada MPC dan pengadaptasian terhadap perubahan dalam sistem juga merupakan salah satu kelebihan MPC. Namun, MPC juga memiliki beberapa kekurangan seperti waktu komputasi yang lama bila dibandingkan dengan algoritma kontrol lainnya, hal ini dikarenakan komputasi algoritma optimasi pada MPC dilakukan pada horizon waktu yang telah ditentukan, sehingga beban komputasi MPC juga semakin besar (Putra Amiruddin et al., n.d.).

Pada konsep MPC, MPC akan menghitung sebuah nilai yang akan menjadi masukan sistem sebagai sebuah solusi dari permasalahan optimasi. MPC akan memprediksi keluaran sistem pada time sampling selanjutnya dalam horizon waktu yang sudah ditentukan serta menggunakan masukan dan keluaran sebelumnya dari sistem. Setelah itu, perhitungan sinyal

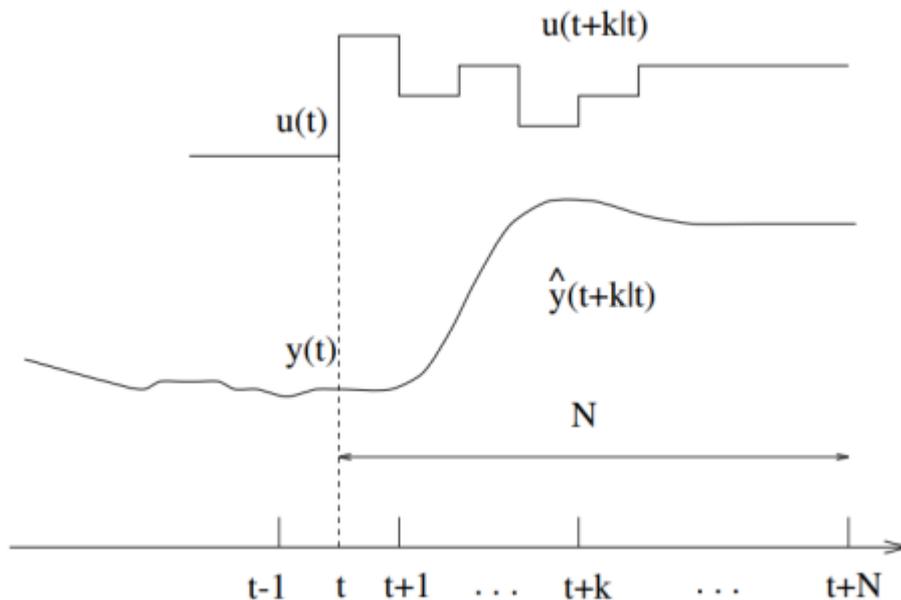
kontrol yang berada pada rentang horizon waktu dan optimasi akan dilakukan (Institute of Electrical and Electronics Engineers & IEEE Control Systems Society, n.d.). Gambar 2.6 menunjukkan struktur dari algoritma dasar MPC.



Gambar 2.6 Struktur MPC dasar

Akurasi prediksi dari kontroler MPC bergantung pada akurasi model sistem, hal ini dikarenakan MPC akan mengkalkulasi sinyal kontrol optimal dari setiap input yang juga memperhatikan batasan dari model sistem. Respon sinyal kontrol untuk horizon H kemudian akan diselesaikan sesuai dengan elemen pertama dari respon sinyal kontrol optimal akan digunakan sebagai masukan sinyal input pada sistem pada waktu sampling selanjutnya, dan elemen lain hasil optimasi tidak digunakan.

Setelah itu, waktunya akan bergeser sebesar waktu sampling yang ditentukan dan masukan sistem akan dikomputasi ulang untuk mendapatkan sinyal kontrol optimal hingga horizon H dan akan menghasilkan sinyal kontrol input baru bagi sistem yang akan digunakan pada siklus komputasi berikutnya. Proses yang terjadi bersifat rekursif dan sinyal kontrol yang dikeluarkan tetap optimal (Putra Amiruddin et al., n.d.). Gambar 2.6 menunjukkan ilustrasi strategi MPC yang sedang digunakan untuk memprediksi respon sistem pada horizon waktu N dengan melakukan *previewing* sinyal referensi,



Gambar 2.7 Strategi MPC dalam memprediksi respon sistem dalam rentang horizon N

Algoritma MPC memiliki *objective function* yang berbeda tergantung dengan tujuan penggunaan kontroler itu sendiri. Secara umum *objective function* dapat didefinisikan sebagai keluaran selanjutnya dari sistem y dalam horizon waktu yang ditentukan harus mengikuti referensi yang telah ditentukan w dan pada saat yang bersamaan, beda sinyal kontrol Δu harus diminimalkan atau dihilangkan (Putra Amiruddin et al., n.d.). Persamaan [2.7] menunjukkan *objective function* umum yang diimplementasikan pada MPC,

$$J(N_p, N_{p2}, N_c) = \sum_{j=N_{p1}}^{N_{p2}} \hat{\delta}(j) [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=N_{p1}}^{N_{p2}} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \quad [2.7]$$

Dengan,

- N_{p1} : Horizon waktu minimum prediksi
- N_{p2} : Horizon waktu maksimum prediksi
- N_c : Horizon waktu kontrol
- $\hat{\delta}(j)$: Koefisien pembobotan galat
- $\lambda(j)$: Koefisien pembobotan kontrol

Untuk mendapatkan $\hat{\delta}(j)$ dapat digunakan persamaan 2.8 sebagai berikut

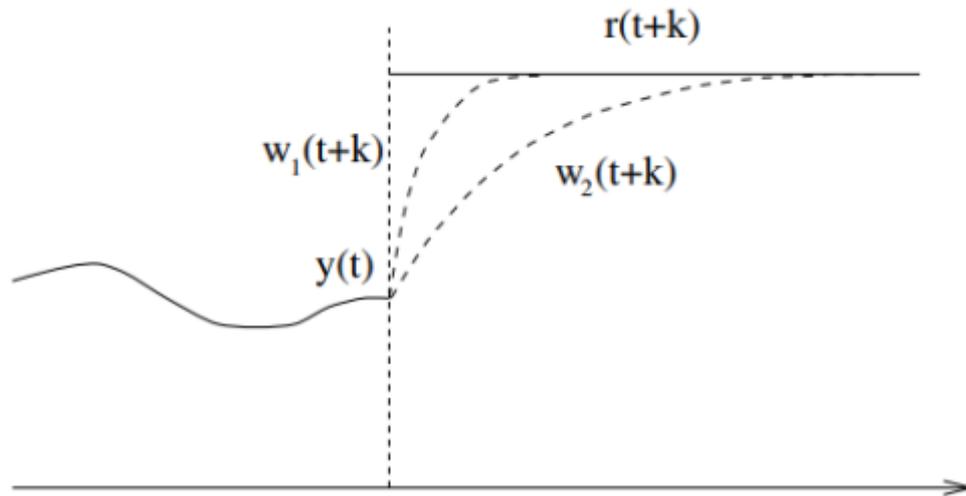
$$\hat{\delta}(j) = \alpha^{N_2-j} \quad [2.8]$$

Jika nilai α berada pada jangkauan 0 sampai 1, galat terjauh dari waktu t akan dihilangkan dibandingkan dengan yang lebih dekat dengan waktu t , dengan demikian akan dihasilkan sinyal kontrol yang lebih halus. Namun, jika $\alpha > 1$ maka galat pada awal waktu akan dihilangkan sehingga menghasilkan sinyal kontrol yang lebih ketat. Dalam meminimalkan persamaan [2.6], umumnya digunakan referensi trayektori $w(t+k)$ yang mana nilai tidak harus langsung bersamaan dengan referensi aslinya $r(t+k)$. Referensi yang digunakan umumnya merupakan sebuah perkiraan dari keluaran sistem saat ini $y(t)$ menuju ke referensi yang diketahui dengan sistem persamaan orde satu seperti pada persamaan [2.9] berikut:

$$w(t) = y(t), w(t+k) = \alpha w(t+k-1) + (1-\alpha)r(t+k) \quad [2.9]$$

$$k = 1 \dots N$$

Dimana α adalah parameter dengan nilai antara 0 dan 1, Gambar 2.4 berikut menunjukkan ketika referensi $r(t+k)$ adalah konstan dan untuk nilai α yang berbeda, w_1 menunjukkan ketika nilai α kecil sehingga trayektori yang dihasilkan cepat, w_2 menunjukkan ketika nilai α besar sehingga trayektori yang dihasilkan lebih halus.



Gambar 2.8 Perbandingan Referensi Trayektori pada MPC

Dalam memperoleh nilai dari sinyal kontrol $u(t + k|t)$ perlu dilakukan langkah untuk meminimalkan nilai fungsi tujuan J pada Persamaan [2.6]. Untuk melakukan ini nilai dari keluaran terprediksi $\hat{y}(t + k|t)$ dihitung sebagai fungsi dari nilai lampau masukan dan keluaran serta sinyal kontrol di masa depan, dengan menggunakan model yang dipilih dan disubstitusikan pada fungsi tujuan, akan didapatkan sebuah persamaan yang jika diminimalkan akan menghasilkan nilai yang akan dicari.

Solusi analitis dapat diperoleh dari kriteria kuadratik jika model yang digunakan linier dan tidak ada batasannya, jika tidak maka sebuah langkah metode optimasi iteratif akan diperlukan. Apabila solusi eksplisit tidak ada ketika terdapat batasan pada model, maka metode pemrograman kuadratik harus digunakan (Levine et al., n.d.).

Selanjutnya untuk mendapatkan input sinyal kontrol diasumsikan bahwa terdapat sistem Linear Time Invariant (LTI) diskrit yang memiliki persamaan state pada [2.10] – [2.11].

$$X_m(k + 1) = A_m X_m(k) + B_m U(k) \quad [2.10]$$

$$Y(k) = C_m X_m(k) \quad [2.11]$$

Dengan menghitung persamaan beda dari persamaan state tersebut maka diperoleh [2.12] – [2.13]

$$\Delta X_m(k + 1) = X_m(k + 1) - X_m(k) \quad [2.12]$$

$$\Delta U = U(k) - U(k - 1) \quad [2.13]$$

Sehingga dapat diperoleh representasi state yang baru $X(k) = [\Delta X_m(k + 1)^T \ Y(k)^T]$, dan digunakan untuk mengkombinasikan [2.10] – [2.11] dengan [2.12] – [2.13] sehingga diperoleh,

$$\begin{bmatrix} \Delta X_m(k + 1) \\ Y(k + 1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m & O_m^T \\ C_m A_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_m(k) \\ Y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix} \Delta U(k) \quad [2.12]$$

$$Y(k) = [O_m^T \quad 1] \begin{bmatrix} \Delta X_m(k) \\ Y(k) \end{bmatrix} \quad [2.13]$$

Dimana O_m^T merupakan vektor dengan nilai semua elemen nol. Selanjutnya state di masa depan dapat diketahui dengan melakukan prediksi sejauh N_p sampel dan nilai sinyal kontrol pada masa depan direpresantikan dalam N_c sampel. Sehingga dapat dituliskan bentuk matriks baru pada [2.14] - [2.17].

$$Y = FX(k) + \phi \Delta U \quad [2.14]$$

$$F = [CA \dots CA^{N_p}] \quad [2.15]$$

$$\phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ CA^2B & CAB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix} \quad [2.16]$$

Selanjutnya didefinisikan fungsi tujuan yang sesuai dengan permasalahan kontrol yang ada pada [2.17]

$$J = (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T R \Delta U \quad [2.17]$$

Dengan nilai R adalah matriks diagonal bernilai $RI_{n_c} \times I_{n_c}$, R merupakan bootan untuk tuning kontroler dengan nilai skalar positif semi definit. Selanjutnya untuk memperoleh nilai optimal dari *objective function* maka perlu dicari turunan parsial pertama dari J terhadap ΔU .

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta U} = -2\phi^T (R_s - FX(k)) + 2(\phi^T \phi + R)\Delta U = 0 \quad [2.18]$$

Sehingga, dari [2.18] diperoleh nilai sinyal kontrol optimal yang diekspresikan pada [2.19] (Levine et al., n.d.).

$$\Delta U = (\phi^T \phi + R)^{-1} \phi^T (R_s - FX(k)) \quad [2.19]$$

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 3 METODOLOGI

Pada bab ini dijelaskan dan diuraikan tentang alur dan kerangka perancangan serta desain kontroler MPC untuk pengaturan Power Split Ratio (PSR) atau pembagian daya pada kendaraan listrik hibrida fuel cell – baterai, juga alur simulasi dan parameter sistem kendaraan listrik hibrida fuel cell – baterai yang digunakan pada penelitian ini.

3.1 METODE YANG DIGUNAKAN

Strategi kontrol yang digunakan pada penelitian Tugas Akhir yang dilakukan dalam menyelesaikan permasalahan penentuan *Power Split Ration* (PSR) atau pembagian daya pada kendaraan listrik hibrida *fuel cell* – baterai adalah *Model Predictive Control* (MPC). Metode MPC digunakan pada penelitian ini dengan mempertimbangkan beberapa hal. Pertama MPC dapat mengakomodasi batasan-batasan dari sistem dengan adanya *constraints* atau batasan, *constraints* atau batasan ini dimodelkan dengan *equality constraints* atau batasan persamaan serta *inequality constraints* atau batasan pertidaksamaan yang dapat diaplikasikan pada *state* sistem maupun aksi kontrol yang digunakan pada sistem. Kedua, MPC menggunakan prediksi sehingga mampu melakukan *previewing state* dan aksi kontrol selama jumlah horizon N_H yang ditentukan, hal ini akan mempengaruhi aksi kontrol u dari sistem. Ketiga, MPC dalam prosesnya akan meminimalkan *objective function* yang ditentukan, Sehingga *objective function* dapat dimodifikasi sedemikian rupa untuk keperluan tertentu seperti meminimalkan konsumsi bahan bakar, memaksimalkan penggunaan hidrogen berdasar efisiensi *fuel cell*, dan lain-lain. MPC yang digunakan pada penelitian ini merupakan MPC linier dikarenakan permodelan yang dilakukan pada penelitian ini adalah permodelan linier.

Dalam MPC terdapat paramter yang dapat menentukan respon sistem yang dikontrol yaitu N_H yaitu nilai horizon dan pembobotan bagi tiap-tiap ekspresi *objective function*. Pada penelitian Tugas Akhir ini nilai tersebut akan divariasikan nilai parameter N_H dan pembobotan tiap-tiap *objective function* untuk mengetahui pengaruh nilai parameter terhadap respon sistem. Nilai variasi N_H dapat dilihat pada tabel 3.1, sedangkan untuk *objective function* yang diimplementasikan pada MPC akan dijelaskan secara detail pada sub-bab selanjutnya dan nilai parameter untuk variasi pembobotan-nya akan dijelaskan pada bab empat.

Nilai Variasi Parameter N_H		
N_{H_1}	N_{H_2}	N_{H_3}
10	50	150

Tabel 3.1 Nilai Variasi Parameter Horizon Waktu Prediksi

3.2 ALAT DAN BAHAN

Pada penelitain Tugas Akhir ini digunakan beberapa alat dan bahan untuk melakukan simulasi, pada sub-bab ini akan dijelaskan alat dan bahan yang digunakan baik *hardware* maupun *software* yang digunakan.

3.2.1 HARDWARE

Hardware yang digunakan pada penelitian ini adalah laptop dengan spesifikasi yang dapat dilihat pada tabel 3.2

Processor	Intel Core i7-9750H
RAM	DDR4 16GB 3200Mhz Dual Channel
GPU	NVIDIA GeForce GTX 1650
Storage	512GB SSD PCIe M.2

Tabel 3.2 Tabel Spesifikasi Laptop yang Digunakan

3.2.2 SOFTWARE

Untuk mendukung pengerjaan Tugas Akhir ini terdapat beberapa *software* yang digunakan pada penelitian ini yaitu,

3.2.2.1 MATLAB

MATLAB adalah platform pemrograman yang menggunakan bahasa pemrograman berbasis matriks sehingga umumnya digunakan untuk analisa data, membuat algoritma, serta melakukan permodelan dan aplikasi. Pada MATLAB banyak dijumpai *library* dari MATLAB maupun komunitas *open-source* yang menjadikan MATLAB dapat digunakan dalam banyak aplikasi. Pada *penelitian* ini, MATLAB digunakan berdampingan dengan beberapa *library open source* dan *library official* seperti YALMIP, GUROBI, dan *Control System Toolbox*.

Penggunaan MATLAB lazim digunakan pada kalangan mahasiswa teknik, khususnya teknik sistem pengaturan karena MATLAB memiliki banyak fitur yang berkaitan dengan keilmuan tersebut, Selain itu MATLAB juga menyediakan banyak video yang dapat dilihat untuk meningkatkan pengetahuan dari *user* dalam mengimplementasikan fitur-fitur yang ada pada MATLAB.

3.2.2.2 SIMULINK

Simulink merupakan salah satu komponen dari MATLAB yang berperan sebagai pemrograman grafis, Kegunaan utama dari Simulink adalah untuk membuat simulasi sistem dinamik. Proses simulasi dilakukan menggunakan diagram fungsional yang meliputi blok yang terhubung dengan fungsinya masing-masing secara ekuivalen. Simulink dapat digunakan sebagai sarana permodelan, simulasi dan analisis dari sistem dinamik dengan menggunakan antarmuka pengguna grafis.

Simulink terdiri dari beberapa kumpulan kotak perkakas yang dapat digunakan untuk analisis sistem linier dan non-linier. Pada penelitian ini, Simulink digunakan untuk memodelkan daya traksi kendaraan listrik dengan input profil kecepatan yang dapat digunakan ketika sudah memasang *Powertrain Toolbox* pada MATLAB dan Simulink.

3.2.2.3 YALMIP

YALMIP merupakan salah satu *toolbox open source* dari MATLAB untuk memodelkan permasalahan optimasi, Dimana YALMIP awalnya dikhususkan untuk komunitas akademisi teknik sistem pengaturan dan berfokus pada *semidefinite programming*. Namun saat ini

YALMIP memiliki banyak pilihan dalam melakukan optimasi seperti dengan varian fitur seperti *cone programming*, *non-convex semifinite programming*, *mixed integer programming*, dan lain-lain.

YALMIP memiliki beberapa *solver* yang telah disertakan pada paket instalasinya, Namun *user* dapat menambahkan *solver* eksternal sesuai permasalahan yang akan diselesaikan dalam kerangka kerja YALMIP. Pada penelitian ini YALMIP digunakan untuk membuat kerangka kerja dari *Model Predictive Control* (MPC) yang akan diimplementasikan pada sistem manajemen energi kendaraan listrik hibrida *fuel cell* – baterai.

3.2.2.4 GUROBI

GUROBI merupakan *solver* eksternal yang dapat digunakan dan kompatibel dengan kerangka kerja YALMIP. GUROBI dikembangkan oleh perusahaan GUROBI OPTIMIZATION. *Solver* GUROBI yang dipasangkan pada YALMIP memiliki banyak tipe pemrograman sehingga dapat digunakan dalam berbagai macam permasalahan optimasi.

Pada penelitian Tugas Akhir ini, GUROBI digunakan sebagai *solver* utama karena dianggap memiliki waktu komputasi paling cepat dibandingkan dengan beberapa *solver* internal yang disediakan oleh YALMIP. Selain itu hasil *solver* GUROBI lebih baik bila dibandingkan dengan *solver* lain sehingga GUROBI menjadi salah satu *solver* yang direkomendasikan dalam komunitas.

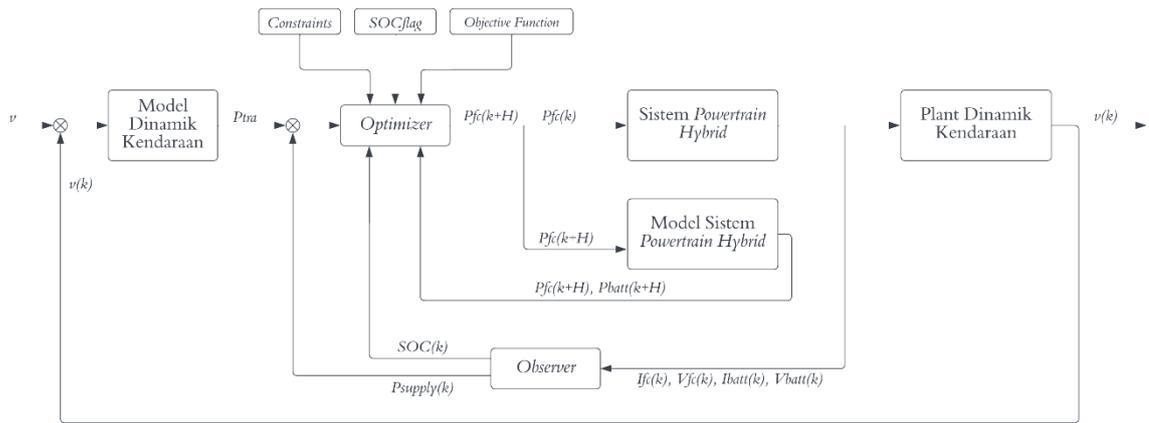
3.3 PELAKSANAAN PERANCANGAN

Dalam melaksanakan penelitian Tugas Akhir ini dilakukan beberapa tahapan dimulai dari permodelan sistem, perancangan kontroler MPC, simulasi dan pengujian kontroler MPC, dan yang terakhir adalah analisa data hasil simulasi dan pengujian. Pada sub-bab ini akan dijelaskan secara rinci tahapan-tahapan tersebut dilakukan pada penelitian ini.

3.3.1 Permodelan Sistem

Dalam sub-bab ini akan dijelaskan permodelan dari komponen-komponen yang ada pada kendaraan listrik hibrida *fuel cell* – baterai yaitu, *fuel cell* dan baterai serta permodelan *powertrain* kendaraan secara keseluruhan, Seperti yang dijelaskan pada bab 2 mengenai model-model *powertrain* kendaraan listrik hybrid, disini dalam desain sistem dan kontrolernya akan digunakan model *powertrain* seri sehingga memiliki 1 derajat kebebasan, serta model kendaraan yang digunakan untuk mengakuisisi data daya traksi adalah model kendaraan longitudinal.

Hal ini dilakukan mengingat bahwa objektif dari penelitian ini hanya terbatas oleh pengaturan *Power Split Ratio* (PSR) atau pembagian daya yang akan digunakan pada kendaraan listrik, sehingga diasumsikan pada modelnya daya traksi kendaraan akan bergantung pada kecepatan kendaraan, diasumsikan pula bahwa kendaraan berjalan pada jalan lurus tanpa ada tanjakan maupun turunan, kemudian daya *regenerative* pada saat penurunan kecepatan juga akan dianggap nol karena kendaraan tidak di desain menggunakan *regenerative braking*. Diagram blok sistem keseluruhan dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Blok Sistem Pengaturan Pembagian Daya pada Kendaraan Listrik Hibrida *Fuel Cell* – Baterai

3.3.1.1 Permodelan *Fuel Cell*

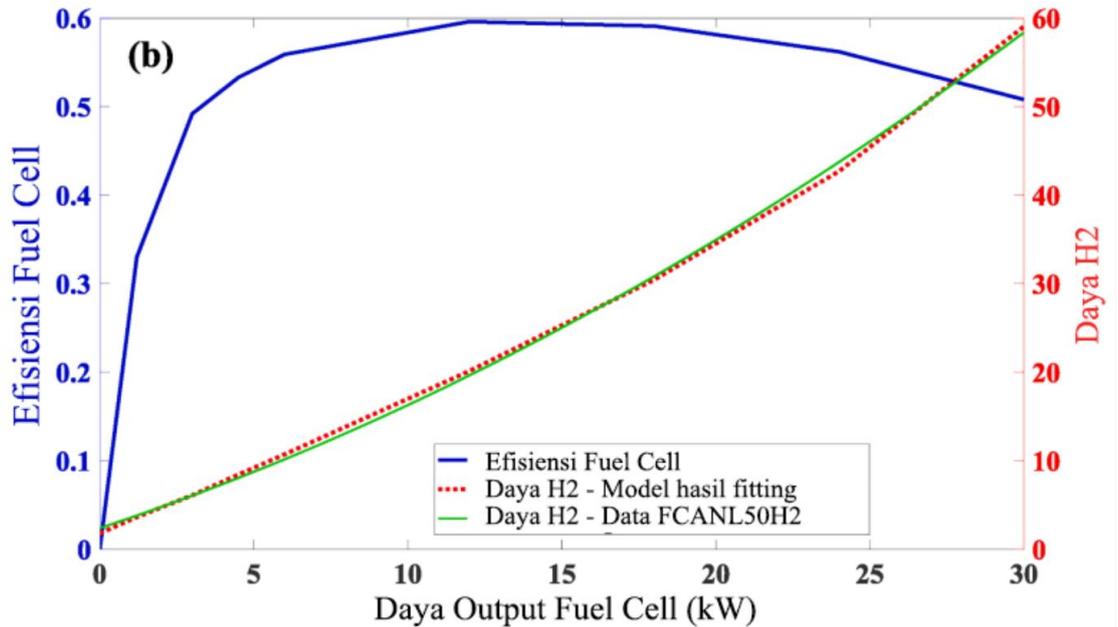
Seperti yang telah dijelaskan pada bab 2, sistem fuel cell yang lengkap terdiri dari beberapa sub-sistem, sehingga untuk mendesain kontroler secara akurat maka model fuel cell yang digunakan harus selaras antara keakuratan model dan komputasi yang ringan. Dimana secara umum, model dari sistem fuel cell yang digunakan pada pengaturan daya dapat berdasarkan dari dua hal, yang pertama adalah model fuel cell yang merpresentasikan sistem fuel cell secara keseluruhan dengan memetakan daya keluaran dengan efisiensi sistem dan kedua, dengan model yang direpresentasikan oleh *polarization curve* yang memetakan konsumsi hidrogen dengan jumlah sel pada satu stack fuel cell.

Dengan objektif pada penelitian ini yaitu desain sistem manajemen energi maka model yang digunakan adalah simplifikasi dari model fuel cell secara keseluruhan berdasarkan konsumsi hidrogen yang digunakan untuk mencari relasi antara daya keluaran dari fuel cell P_{fc} dan jumlah hidrogen yang digunakan yang direpresentasikan oleh daya hidrogen P_{H_2} . Data yang digunakan untuk memodelkan sistem diambil dari ADVISOR dengan model fuel cell FC_ANL50H2 yang telah diskala ulang untuk fuel cell dengan daya 30kW. Parameter fuel cell 30kW yang digunakan adalah parameter fuel cell yang dimiliki oleh horizon sebagai berikut.

Parameter Sistem dan Nomenklatur	Nilai Parameter
Rating Daya (kW)	30
Daya Maksimal (kW)	33
Jumlah Sel	100
Tegangan (V)	≥ 60

Tabel 3.3 Tabel Parameter Fuel Cell

Untuk mempercepat simulasi dengan akurasi yang tepat dilakukan fitting melalui regresi pada grafik daya hidrogen dan daya output fuel cell sehingga diperoleh grafik sebagai berikut.



Gambar 3.2 Grafik Daya Keluaran *Fuel Cell* dan Daya Hidrogen serta Grafik Efisiensi *Fuel Cell*

Proses fitting dilakukan melalui *excel* dengan menggunakan fungsi *trendline* dengan pilihan persamaan orde-2 dan didapatkan persamaan orde-2 yang memetakan antara daya output fuel cell dan daya hidrogen yang dibutuhkan sebagai persamaan berikut:

$$P_{H_2} = a_0 P_{fc}^2 + a_1 P_{fc} + a_2 \quad (3.1)$$

Dimana,

P_{H_2} = Daya hidrogen yang dibutuhkan

P_{fc} = Daya output dari fuel cell dalam kW

a_0, a_1, a_2 = Konstan hasil fitting dengan nilai 0.0238, 1.2065, dan 2.3931

P_{fc} nantinya akan dijadikan sebagai state kontrol pada sistem karena berbanding proporsional dengan P_{H_2} . Untuk analisa lanjutan maka dibutuhkan persamaan untuk menghitung massa hydrogen yang digunakan untuk menyuplai fuel cell, perhitungan tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan

$$M_{H_2} = \int_0^t \frac{P_{H_2}(t)}{\eta_{FC} \cdot LHV_{H_2}} dt \quad (3.2)$$

Dimana,

M_{H_2} = Massa Hidrogen yang dibutuhkan untuk menyuplai fuel cell

η_{FC} = Efisiensi fuel cell

LHV_{H_2} = Lower Heating Value dari hidrogen (120.000 J/g)

Persamaan tersebut nantinya digunakan untuk menghitung total hidrogen yang digunakan selama kendaraan menjalani *driving cycle* yang ditentukan, sehingga nantinya dapat dilakukan analisa performa kontroler dalam melaksanakan tugasnya.

3.3.1.2 Permodelan Baterai

Pada penelitian ini digunakan baterai *Lithium Ion* atau baterai Li-on sebagaimana yang digunakan pada Toyota Mirai generasi kedua, dimana baterai Li-on memiliki densitas daya yang tinggi serta bobot yang ringan, hal ini menjadikan baterai Li-on sangat cocok untuk digunakan sebagai baterai dari kendaraan listrik. Baterai Li-on yang digunakan pada penelitian ini mempunyai parameter sebagai berikut.

Parameter Sistem dan Nomenklatur	Nilai Parameter
Tegangan Nominal (V)	310.8
Kapasitas (Ah)	4.0
Jumlah Sel	84
Berat (kg)	44.6

Tabel 3.4 Tabel Parameter Baterai

Salah satu state yang akan digunakan dalam sistem adalah *State of Charge* atau SOC dari baterai, dimana terdapat banyak metode guna melakukan estimasi dari SOC, pada penelitian ini digunakan metode *columb counting* dimana SOC dapat diestimasi dengan menggunakan persamaan:

$$SOC(t) = SOC_{ini} - \int_0^t \frac{\eta_{BAT} \cdot i(t)}{Q_{BAT}} dt \quad (3.3)$$

Dimana,

SOC = *State of Charge* baterai

η_{BAT} = Efisiensi baterai

Q_{BAT} = Kapasitas Baterai (Ah)

$i(t)$ = Arus yang *charge* atau *discharge* baterai

Ketika baterai berada pada mode *charging* maka arus akan bernilai negatif dan ketika baterai pada mode *discharging* maka arus akan bernilai positif. 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 sebagai:

$$i = \frac{V_{oc}(SOC) - \sqrt{V_{oc}(SOC)^2 - 4 \cdot R_{int}(SOC) \cdot P_{bat}}}{2 \cdot R_{int}(SOC)} \quad (3.4)$$

Dimana,

V_{oc} = Tegangan *open circuit* baterai

R_{int} = Hambatan internal baterai

P_{bat} = Daya dari baterai

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.

Dikarenakan kontroler yang digunakan pada penelitian ini merupakan kontroler MPC, maka akan dilakukan diskritisasi pada model. Diskritisasi euler digunakan pada permodelan perhitungan SOC baterai, sebagai berikut.

$$SOC(k+1) = SOC(k) - \frac{\eta_{BAT} \cdot i(k)}{Q_{bat}} \Delta k \quad (3.5)$$

Dan arus dari baterai dimodelkan sebagai berikut.

$$i(k) = \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4 \cdot R_{int} \cdot P_{bat}(k)}}{2 \cdot R_{int}} \quad (3.6)$$

Sehingga,

$$SOC(k+1) = SOC(k) - \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4 \cdot R_{int} \cdot P_{bat}(k)}}{2 \cdot R_{int}} \cdot \frac{\eta_{BAT}}{Q_{bat}} \Delta k \quad (3.7)$$

Δk merupakan waktu sampling yang digunakan, dimana pada penelitian ini akan digunakan waktu sampling sebesar 1 detik. Namun, persamaan (3.7) 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,

$$SOC(k+1) = SOC(k) - \frac{P_{BAT}(k) \cdot \eta_{BAT}}{V_{DC}(k) \cdot Q_{bat}} \Delta k \quad (3.8)$$

Dimana V_{DC} dapat dicari menggunakan persamaan,

$$V_{DC} = V_{oc} - \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4 \cdot R_{int} \cdot P_{bat}(k)}}{2} \quad (3.9)$$

3.3.1.3 Permodelan Powertrain dan Daya Traksi Kendaraan

Pada penelitian ini digunakan konfigurasi *powertrain* seri seperti yang dapat dilihat pada gambar 3.2. Pada arsitektur ini fuel cell digunakan sebagai sumber tenaga utama pada kendaraan dan baterai sebagai sumber sekunder. Pada arsitektur ini PEMFC disambungkan pada DC/DC converter untuk meregulasi arus dari PEMFC menuju *DC bus*, sehingga pada kasus ini sistem mempunyai satu variabel yang akan dikontrol yaitu daya dari fuel cell P_{fc} . Baterai Li-on terhubung langsung pada *DC bus* dan tidak terhubung pada DC/DC converter sehingga *charging* baterai hanya dapat dilakukan melalui PEMFC.

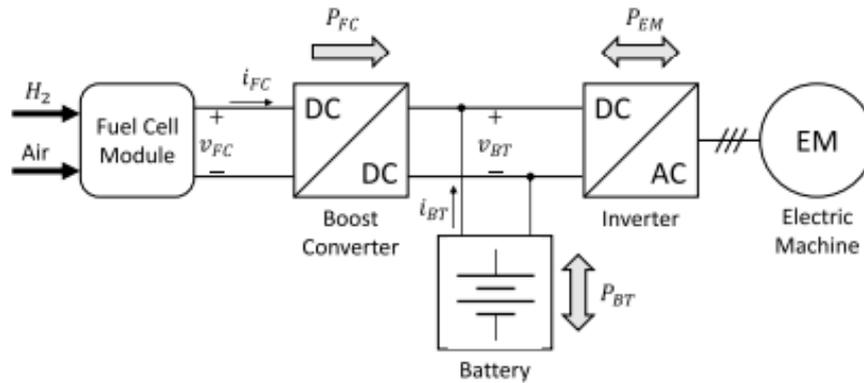
Parameter komponen dari baterai dan PEMFC telah dibahas pada sub-bab sebelumnya, sedangkan untuk sistem DC-DC Converter, DC-AC *Inverter* dan motor listrik akan direpresentasikan melalui efisiensi yaitu η_{BOOST} , η_{inv} , dan η_{em} . Daya yang keluar dari baterai juga akan direpresentasikan dengan efisiensi, dimana pada umum-nya efisiensi baterai dibagi menjadi 2 yaitu efisiensi saat *charging* dan *discharging*. Namun untuk permodelan kali ini efisiensi baterai akan dijadikan sebagai satu parameter yaitu η_{BAT} . Serta efisiensi dari kendaraan yang melaju juga diperhitungkan dengan parameter η_{drive} . Semua nilai parameter efisiensi diasumsikan pada tabel 3.5. Asumsi tersebut didapatkan berdasarkan studi literatur yang membahas tentang topik yang diangkat pada penelitian ini.

Parameter	Nilai
η_{BAT}	0.97
η_{BOOST}	0.87
η_{em}	0.97
η_{inv}	0.95
η_{drive}	0.91

Tabel 3.5 Nilai Parameter Efisiensi

Pada konfigurasi seri didapatkan persamaan kesetimbangan energi dimana bila diketahui P_{em} adalah daya yang dibutuhkan motor untuk traksi pada kecepatan tertentu, P_{fc} daya output dari fuel cell melalui converter DC/DC, dan P_{bat} daya yang keluar dari baterai, dimana bila pada mode *charging* maka P_{bat} bernilai negatif dan pada mode *discharging* P_{bat} bernilai positif.

$$\eta_{BAT} \cdot P_{bat} + \eta_{BOOST} \cdot P_{fc} - \frac{P_{traksi}}{\eta_{em} \cdot \eta_{inv}} = 0 \quad (3.10)$$



Gambar 3.3 Diagram Alir Daya pada Arsitektur Seri

Daya traksi kendaraan yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan *driving cycle* yang diujikan akan dicari dan digunakan sebagai parameter input dalam komputasi kontroler, dimana daya traksi dimodelkan dengan persamaan matematika berikut:

$$P_{traksi} = v \cdot F_{traksi} = v \cdot (c_r \cdot M \cdot g \cdot \cos(\theta) + 0.5 \cdot \rho_{air} \cdot S_f \cdot c_d \cdot v^2 + M \cdot \dot{v}) \quad (3.11)$$

Dimana v merupakan kecepatan kendaraan, c_r merupakan koefisien gesekan jalan, M merupakan massa total dari kendaraan, g merupakan konstanta akselerasi gravitasi, ρ_{air} merupakan konstanta densitas udara, S_f merupakan luasan depan kendaraan, c_d merupakan koefisien gesekan aerodinamis. Nilai dari parameter diatas diambil dari parameter kendaraan hibrida fuel cell – baterai, Toyota mirai generasi kedua. Sedangkan untuk parameter koefisien digunakan asumsi yang didapatkan melalui studi literatur pada referensi.

Parameter	Nilai
Massa total kendaraan / M (kg)	1360
Area depan kendaraan / S_f (m^2)	1.746
Koefisien gesek / c_r	0.0135
Koefisien aerodinamis / c_d	0.3
Konstanta akselerasi gravitas / g (m/s^2)	9.81
Densitas udara / ρ_{air}	1.29

Tabel 3.6 Tabel Parameter pada Persamaan 3.8

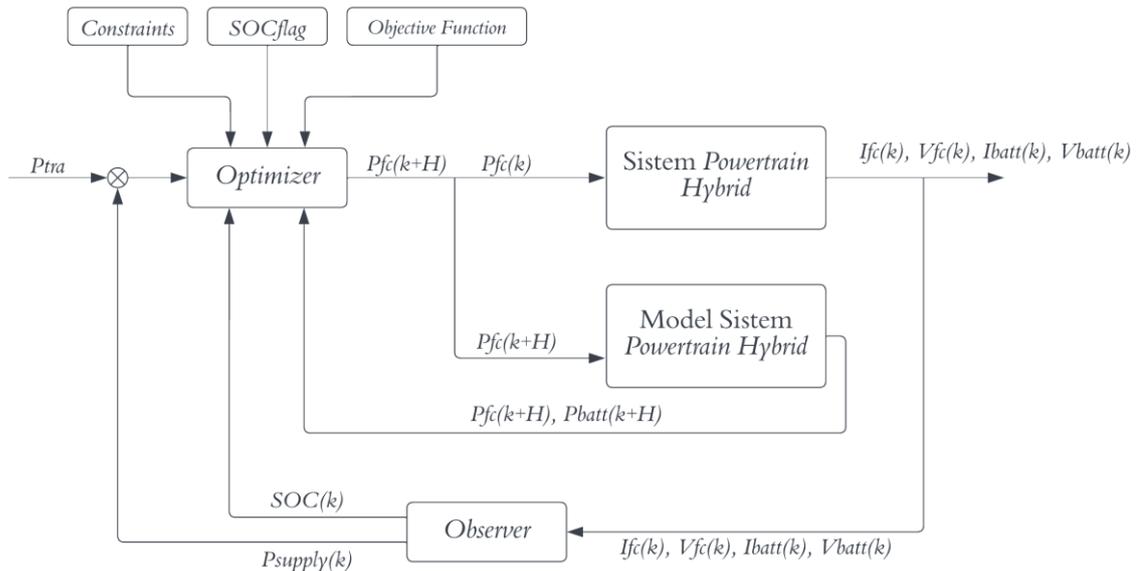
Daya traksi kendaraan kemudian akan dikompensasi dengan daya keluaran dan fuel cell dan baterai sebagai kebutuhan daya dari *DC Bus*. Yang dapat dituliskan melalui persamaan (3.8). Sehingga persamaan (3.8) berkorelasi dengan persamaan kesetimbangan daya yang telah dituliskan pada persamaan (3.9).

$$P_{DCbus} = \frac{P_{tra}}{\eta_{em} \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{drive}} = \eta_{BAT} \cdot P_{bat} + \eta_{BOOST} \cdot P_{fc} \quad (3.12)$$

3.3.2 Desain dan Perancangan Kontroler MPC

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 3.3 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 3.4 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 sebagai berikut,

$$x(k + 1) = A(k)x(k) + B_u(k)u(k) + B_w(k)w(k) \quad (3.13)$$

$$y(k) = Cx(k) + D_u u(k) \quad (3.14)$$

$$x(k) = [SOC(k) \ P_{fc}(k-1)]^T \quad (3.15)$$

$$u(k) = \Delta P_{fc}(k) = \frac{P_{fc}(k) - P_{fc}(k-1)}{\Delta T} \quad (3.16)$$

$$y(k) = [SOC(k) \ P_{fc}(k-1)]^T \quad (3.17)$$

$$w(k) = P_{tra}(k) \quad (3.18)$$

$$r(k) = SOC_{opt} \quad (3.19)$$

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 (3.12) dan persamaan dari SOC didapatkan dari persamaan (3.5), (3.7), dan (3.8). Selain itu, dikarenakan pada proses pembuatan kode pada MATLAB dan YALMIP digunakan metode *multiple shooting*, maka persamaan kesetimbangan daya akan dijadikan sebagai *equality constraints*.

Berdasarkan persamaan (3.13) – (3.19) serta (3.5), (3.7) dan (3.8) persamaan *state space* dalam bentuk matriks dapat dituliskan sebagai berikut,

$$A(k) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\eta_{BAT} \Delta k}{V_{DC}(k) \cdot Q_{bat}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$B_u(k) = \begin{bmatrix} \frac{\eta_{BAT} \Delta k}{V_{DC}(k) \cdot Q_{bat}} & 1 \end{bmatrix}^T \quad (3.21)$$

$$B_w(k) = \begin{bmatrix} -\frac{\eta_{BAT} \Delta k}{V_{DC}(k) \cdot Q_{bat}} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (3.22)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$D_u = [0 \ 1]^T \quad (3.24)$$

Objective function pada MPC yang didesain pada MATLAB merupakan fungsi kuadrat 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.

(3.25)

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

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

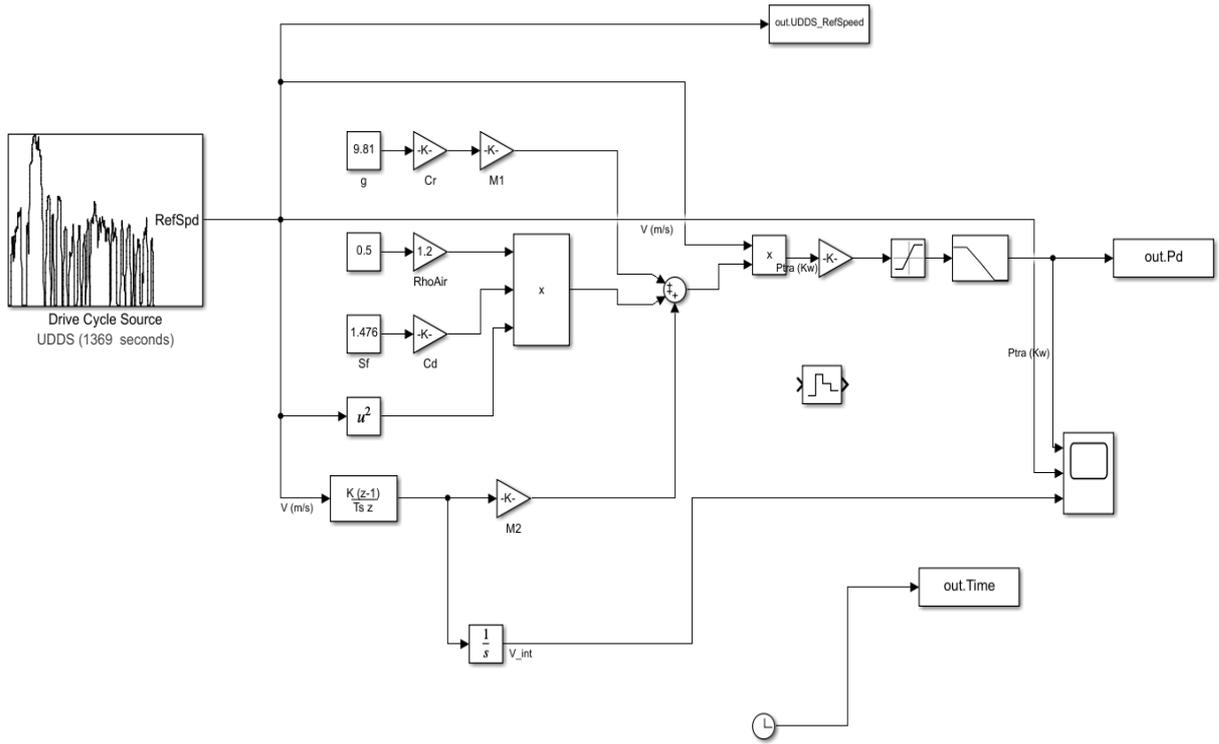
$$U_{min} \leq U \leq U_{max}, Y_{min} \leq Y \leq Y_{max}$$

Dimana Q merupakan pembobotan untuk *error* dari sistem dan R merupakan pembobotan untuk sinyal kontrol. Secara umum *optimizer* akan memecahkan permasalahan optimasi berdasarkan pembobotan yang kita berikan pada *objective function*, semakin besar pembobotan maka semakin besar penalisasinya. Contohnya bila pada *objective function* diberikan nilai pembobotan Q yang lebih besar daripada R , maka *optimizer* akan mencari nilai U yang dapat meminimalkan *error* daripada meminimalkan energi aktuasi U . Namun, bila pemberian nilai pembobotan R lebih besar daripada Q , maka *optimizer* akan mencari nilai U yang lebih minimal sehingga energi aktuasi yang digunakan juga akan lebih diminimalkan. Hal ini menjadikan Q dan R sebagai parameter *tuning* pada MPC, selain jumlah *horizon* yang akan digunakan. Pada sub-bab selanjutnya akan dibahas beberapa *objective function* yang akan digunakan pada penelitian ini beserta pembobotan yang digunakan pada masing-masing fungsinya.

Setelah pasangan sinyal kontrol $U(k) \dots U(k + N_H)$ diperoleh dari *optimizer*. Kemudian, sinyal input kontrol yang diberikan pada sistem pembagian daya kendaraan listrik hibrida *fuel cell* – baterai pada kasus ini hanya pada *time step* k saja atau sinyal kontrol pertama saja sedangkan lainnya tidak digunakan. Namun, untuk sinyal kontrol yang digunakan pada masukan model yang digunakan untuk menentukan prediksi digunakan dari *time step* $U(k)$ hingga $U(k + N_H)$.

Selanjutnya, pada tahap ini, dilakukan desain kontroler pada perangkat lunak MATLAB dan *Simulink*, dimana kontroler MPC akan didesain melalui *script* MATLAB menggunakan *framework* YALMIP. Sedangkan *Simulink* digunakan untuk mendapatkan referensi untuk daya traksi yang dibutuhkan oleh kendaraan atau P_{tra} . Dimana diagram blok *Simulink* untuk mendapatkan daya traksi dapat dilihat pada gambar 3.3, lalu untuk *script* MATLAB dapat dilihat pada lampiran. Terlihat pada gambar 3.3, Digunakan *block driving cycle source* yang digunakan untuk menentukan *driving cycle* yang digunakan untuk pengujian, terdapat beberapa *driving cycle* yang nantinya akan diujikan, diantaranya adalah UDDS dan NEDC. Diagram blok *Simulink* didesain berdasarkan persamaan 3.8, dimana persamaan tersebut digunakan untuk menentukan daya traksi. Digunakan waktu sampling sebesar 0.1 detik untuk akuisisi data yang akan digunakan nantinya pada *script* MATLAB. Selain itu, parameter konstan yang digunakan pada diagram blok *Simulink* pada gambar 3.3 terdapat pada sub-bab sebelumnya, yaitu pada tabel 3.4.

Pada penelitian ini digunakan beberapa *objective function* yang diimplementasikan pada MPC yang nantinya akan dibandingkan performa satu dengan lainnya. Pada penelitian ini



Gambar 3.5 Blok Diagram Simulink Permodelan Daya Traksi

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.

3.3.2.1 Objective Function Minimalisasi Penggunaan Hidrogen

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.

$$\begin{aligned}
 J(SOC_{P_{fc}}, P_{fc}) = & \min_{u_k \dots u_{k+N_C}} \sum_{j=0}^{N_H} A_1 (a_0 P_{fc}^2(k+j) + a_1 P_{fc}(k+j) + a_2) \\
 & + A_2 \left(\frac{R_{int}}{V_{OC}^2} \cdot P_b(k+j)^2 + P_b(k+j) \right) + A_3 (SOC(k+j) - SOC_{OPT})^2 \\
 & + A_3 \left(\frac{P_{tra}(k+j)}{\eta_{em} \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{drive}} = P_{fc}(k+j) \cdot \eta_{BOOST} + P_{bat}(k+j) \cdot \eta_{BAT} \right)^2 \quad (3.26)
 \end{aligned}$$

s. t.

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

$$\begin{aligned}
SOC_{min} &\leq SOC(k+j) \leq SOC_{max} \\
P_{fcmin} &\leq P_{fc}(k+j) \leq P_{fcmax} \\
P_{bmin} &\leq P_b(k+j) \leq P_{bmax}
\end{aligned}$$

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

3.3.2.2 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 3.1 bahwa titik tertinggi efisiensi hidrogen terdapat pada jangkauan penggunaan daya 13.5 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,

$$\begin{aligned}
J(SOC_{P_{fc}}, P_{fc}) &= \min_{u_k \dots u_{k+N_C}} \sum_{j=0}^{N_H} A_1 [P_{fc}(k+j) - P_{fc_{OPT}}]^2 \\
&+ A_2 [SOC(k+j) - SOC_{OPT}]^2 \\
&+ A_3 \left[\frac{P_{tra}(k+j)}{\eta_{em} \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{drive}} - P_{fc}(k+j) \cdot \eta_{BOOST} + P_{bat}(k+j) \cdot \eta_{BAT} \right]^2
\end{aligned} \tag{3.27}$$

s. t.

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

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

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

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

3.3.3 Alur Pengujian Kontroler MPC

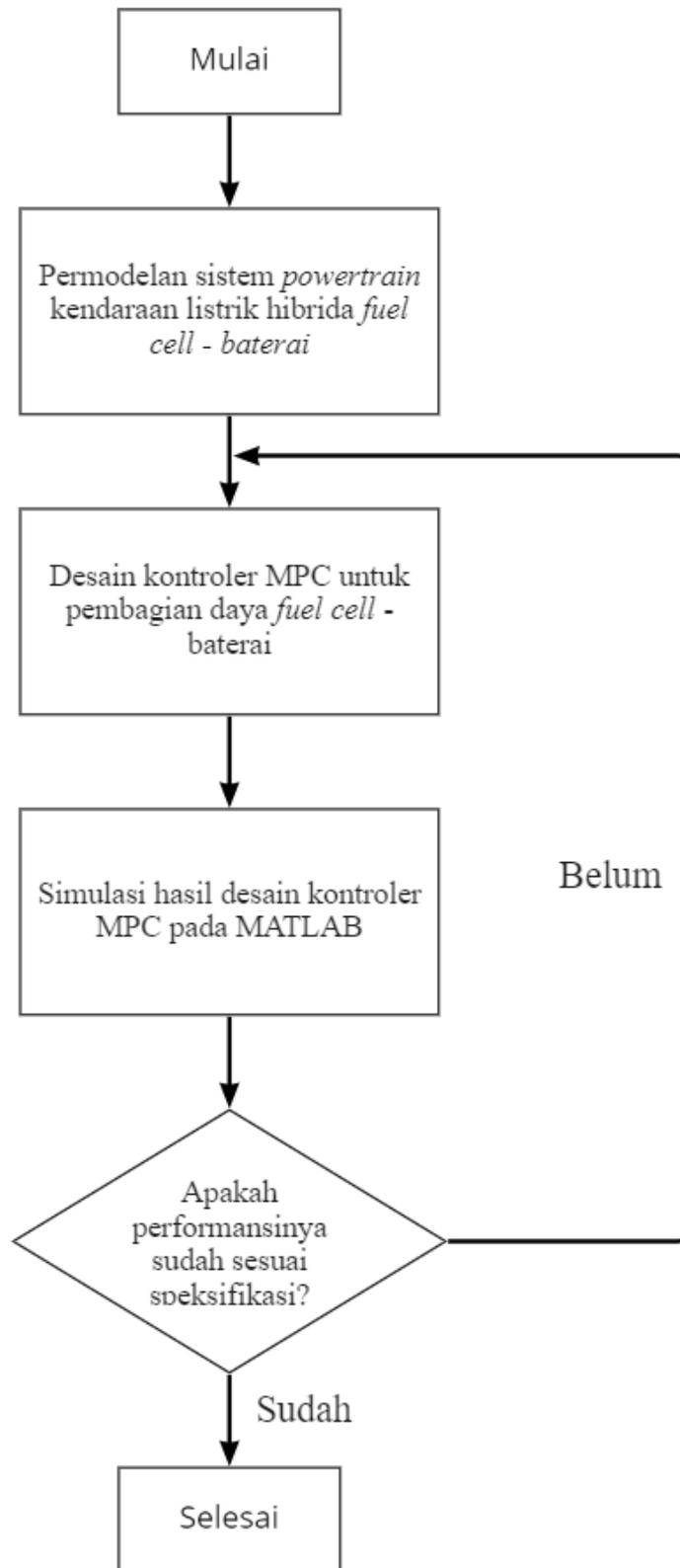
Agar respon sistem yang dihasilkan memenuhi kriteria yang sudah dispesifikan, maka pada sub-bab ini dijelaskan langkah-langkah yang telah dilakukan dalam perancangan dan desain kontroler MPC untuk pembagian daya kendaraan listrik hibrida fuel cell – baterai.

Dalam perancangan dan desain kontroler MPC, hasil desain yang telah dilakukan akan disimulasikan kemudian diuji performa dari hasil pembagian dayanya. Jika hasil simulasi yang diperoleh sudah memenuhi performansi yang diinginkan maka simulasi dapat dicukupkan, sebaliknya bila belum memenuhi maka simulasi akan diulang dan dilakukan evaluasi sehingga memenuhi kriteria yang diinginkan. Pada penelitian ini spesifikasi desain yang diinginkan adalah nilai $SOC, P_{fc},$ dan P_b tidak melewati batas yang telah ditentukan, dimana untuk SOC

diterapkan batas maksimal 0.8 dan minimal 0.2 ($0.2 < SOC < 0.8$), kemudian untuk P_{fc} diterapkan batas maksimal 2kW dan 30kW ($2kW \leq P_{fc} \leq 30kW$), batas bawah P_{fc} bernilai 2kW digunakan untuk menghindari *cycle on-off* yang mengakibatkan degradasi performa *fuel cell*. Untuk P_b diterapkan batas -20kW dan 40kW ($-20kW \leq P_b \leq 40kW$), batas bawah bernilai negatif mengindikasikan daya maksimal *charging* baterai dan batas atas mengindikasikan daya maksimal *discharging* baterai. Kemudian dikarenakan P_{tra} harus memenuhi *equality constraint* yang telah diimplementasikan pada *objective function* tidak ada error yang menjadi indikasi performansi. Semua batasan diatas diimplementasikan guna menjamin sistem *powertrain* kendaraan aman dan berjalan sesuai spesifikasi serta menghindari degradasi dari komponen-komponen didalamnya.

Performa lain yang akan diamati adalah penggunaan hidrogen fuel cell yang dapat dicari melalui persamaan [2.3]. Kemudian juga akan dilihat performa efisiensi penggunaan daya fuel cell sehingga dapat diketahui seberapa efisien kontroler mengakomodasi daya fuel cell dalam satu kali *driving cycle*. Performa yang disebutkan digunakan untuk mengidentifikasi performansi antar *objective function* yang diimplementasikan kedalam kontroler MPC. Selain itu akan diamati efek dari perubahan horizon dengan melakukan variasi nilai dari jumlah horizon yang digunakan N_H . Berikutnya, dilakukan juga variasi nilai pembobotan untuk memperoleh efek dari perubahan bobot terhadap performansi sistem. Terakhir, sistem akan diuji menggunakan beberapa *driving cycle* yaitu *driving cycle* UDDS, NEDC, dan MANHATTAN cycle. *Driving cycle* tersebut memiliki profil kecepatan yang berbeda-beda dengan waktu yang berbeda-beda.

Kemudian untuk kendaraan listrik hibrida yang disimulasikan akan memiliki SOC inisial sebesar 0.8 untuk skenario ketika kendaraan setelah dilakukan charging bila dianggap batas aman SOC atas adalah 0.8 simulasi kedua adalah ketika kendaraan listrik memiliki SOC inisial 0.4 untuk skenario ketika kendaraan telah menempuh beberapa waktu dalam perjalanan dan akan menempuh perjalanan lagi sehingga SOC baterai dalam keadaan tengah-tengah. Kemudian *driving cycle* diasumsikan diketahui sehingga prediksi dari daya traksi memiliki keakuratan 100% sehingga tidak diperlukan permodelan untuk melakukan prediksi kecepatan.



Gambar 3.6 Alur Simulasi Pengujian Kontroler MPC

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah pada bab sebelumnya dilakukan proses mulai dari identifikasi sistem hingga perancangan kontroler *Model Predictive Control* (MPC) linier untuk implementasi pada sistem manajemen energi untuk kendaraan listrik hibrida *fuel cell* – baterai. Selanjutnya, pada bab ini dijelaskan mengenai hasil simulasi yang telah dilakukan serta analisis dan evaluasi perbandingan performansi dari hasil simulasi yang didapatkan.

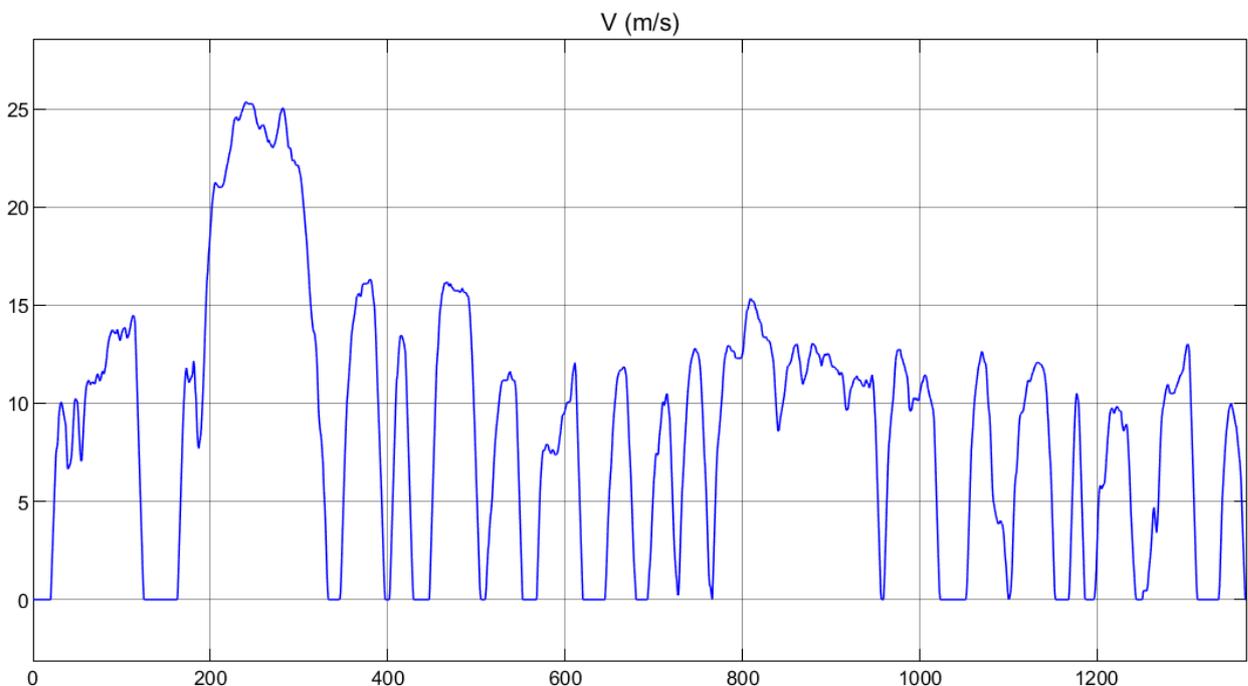
4.1 Pengujian Kontroler MPC

Pada sub-bab ini akan dijelaskan hasil simulasi pengaturan pembagian daya pada FCHEV untuk beberapa skenario simulasi yaitu dengan memvariasikan nilai N_H , memvariasikan nilai pembobotan bagi tiap-tiap *objective function*, dan perbandingan performa antara tiap-tiap *objective function* yang telah dijelaskan pada bab tiga.

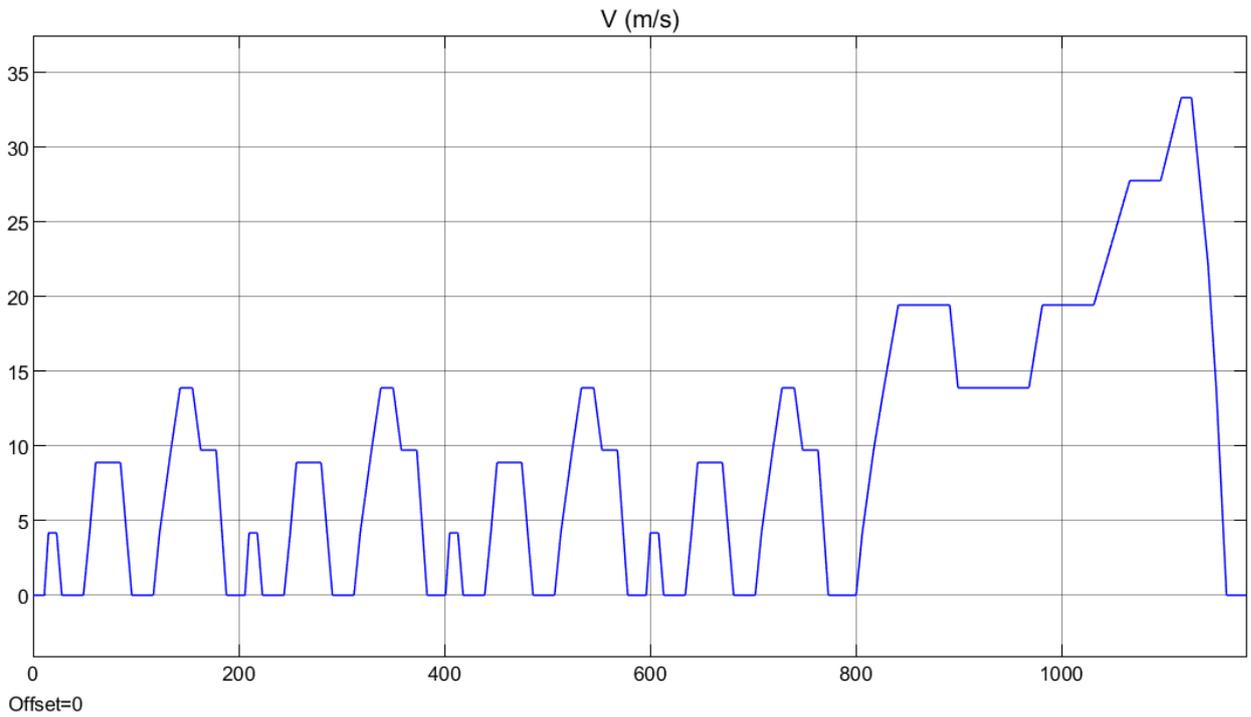
4.1.1 Simulasi dengan Memvariasikan Nilai N_H

Pada simulasi variasi nilai horizon N_H digunakan tiga profil kecepatan yaitu UDDS, NEDC, dan MANHATTAN yang telah disediakan pada *powertrain toolbox* di Simulink tiga profil kecepatan tersebut dapat dilihat pada gambar 4.1, 4.2, dan 4.3. Ketiga profil kecepatan tersebut dipilih karena merupakan profil kecepatan yang umum digunakan dalam pengujian kendaraan listrik. Parameter-parameter seperti kecepatan maksimal, kecepatan rata-rata, dan waktu profil kecepatan dapat dilihat pada tabel 4.1, 4.2, dan 4.3.

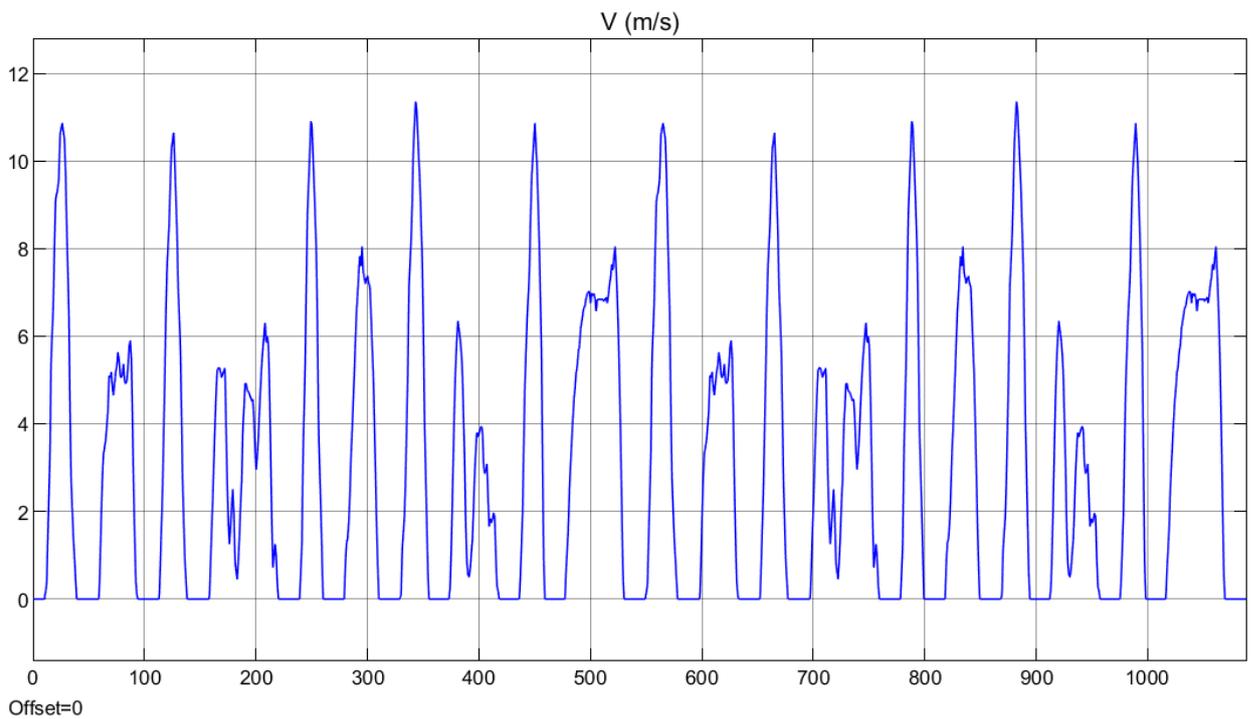
Kemudian, digunakan *objective function* minimalisasi penggunaan hidrogen, ditentukan nilai pembobotan $A_1 = 0.2$, $A_2 = 0.2$, dan $A_3 = 1000$. Pada pembobotan A_3 digunakan nilai 1000 dikarenakan nilai dari variabel *state* SOC berada pada 0 dan 1 ($0 \leq SOC \leq 1$). Simulasi dilakukan dengan inisiasi awal SOC yaitu 0.4 dan dideklarasikan SOC optimal yaitu 0.5



Gambar 4.1 Profil Kecepatan UDDS



Gambar 4.2 Profil Kecepatan NEDC



Gambar 4.3 Profil Kecepatan NEDC

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

Tabel 4.1 Nilai Parameter Profil Kecepatan UDDS

Kecepatan Rata-Rata (m/s)	Kecepatan Maksimal (m/s)	Waktu Profil Kecepatan (s)
9.4147	33.3333	1180

Tabel 4.2 Nilai Parameter Profil Kecepatan NEDC

Kecepatan Rata-Rata (m/s)	Kecepatan Maksimal (m/s)	Waktu Profil Kecepatan (s)
3.4963	11.3548	1089.1

Tabel 4.3 Nilai Parameter Profil Kecepatan NEDC

Saat nilai horizon divariasikan digunakan *objective function* minimalisasi konsumsi hidrogen dengan pembobotan yang dapat dilihat pada tabel 4.4

A_1	A_2	A_3
500	0.05	100

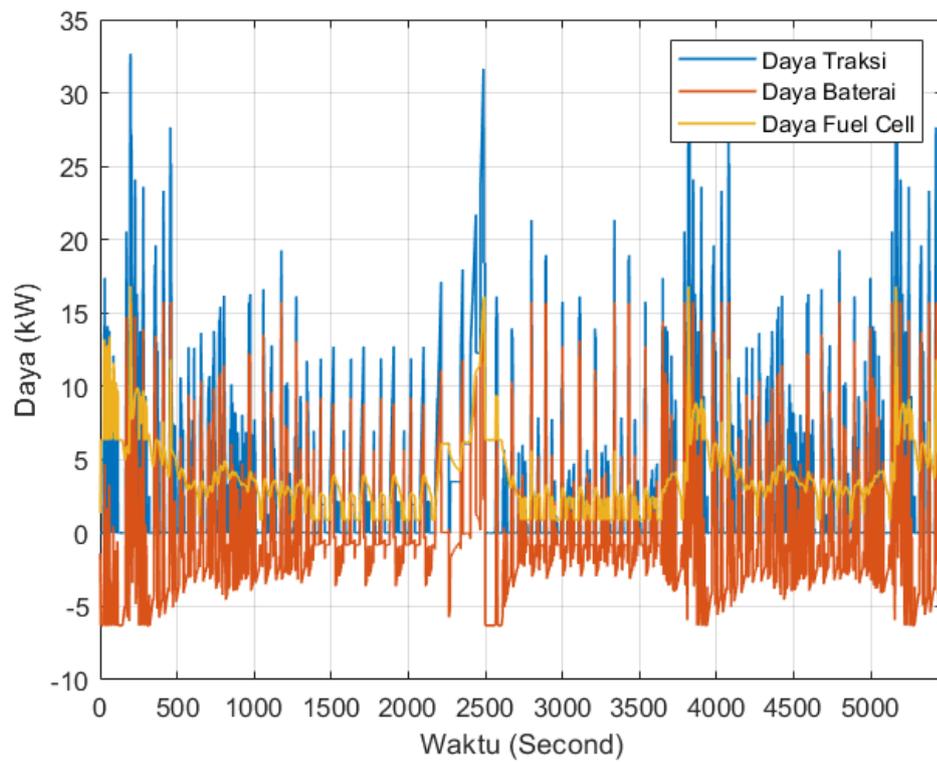
Tabel 4.4 Nilai Pembobotan *Objective Function* Minimalisasi Hidrogen

Kemudian digunakan variasi 10,25, dan 50. Hasil simulasi dengan profil kecepatan gabungan UDDS, NEDC, dan MANHATTAN dapat dilihat pada tabel 4.5, dan Hasil respon sistem berupa pembagian daya, SOC, dan daya keluaran *fuel cell* dapat dilihat pada gambar 4.4 – 4.10.

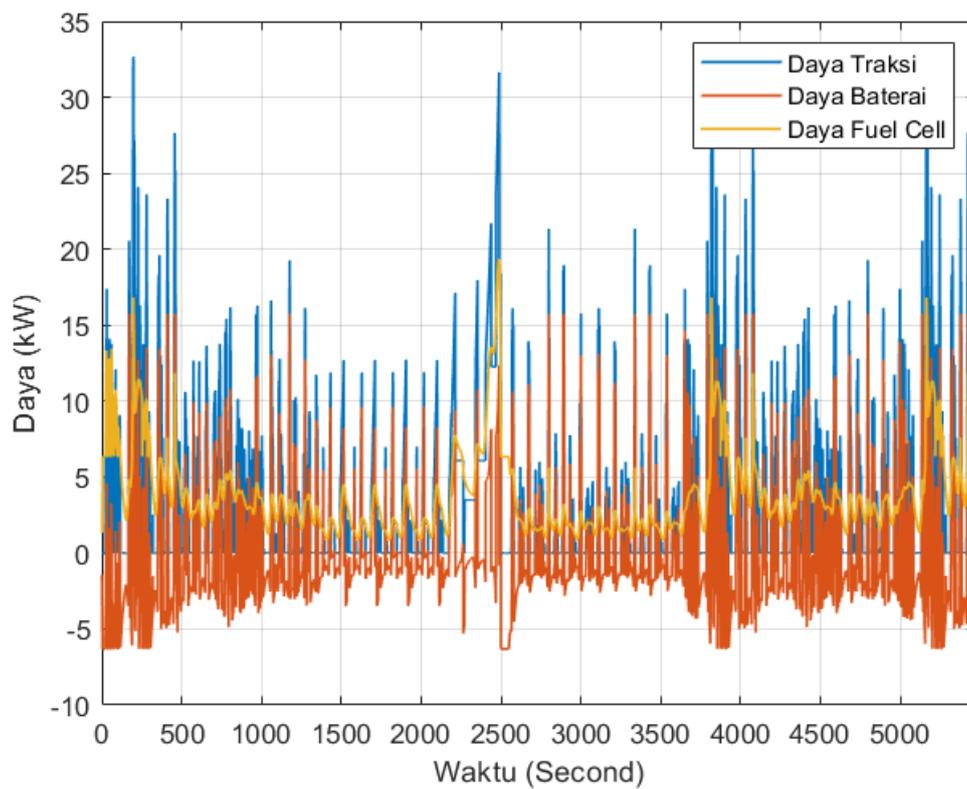
Variasi Nilai Horizon (N_H)	Konsumsi Massa Hidrogen (M_{H_2}/Kg)	SOC Minimal	SOC Maksimal	SOC Akhir	Rata-Rata Daya Keluaran <i>Fuel Cell</i> (\overline{P}_{fc} / kW)	Daya <i>Fuel Cell</i> Maksimal (kW)	Daya <i>Fuel Cell</i> Minimal (kW)	RMSE Daya
10	0.371	0.3	0.7945	0.73652	4.3127	18.68	0.0528	0.0528
25	0.3686	0.3	0.6413	0.6235	4.265	21.486	0.053	0.053
50	0.3677	0.4	0.5014	0.4919	5.7645	20.676	0.0522	0.0522

Tabel 4.5 Hasil Simulasi Pengujian Variasi Horizon

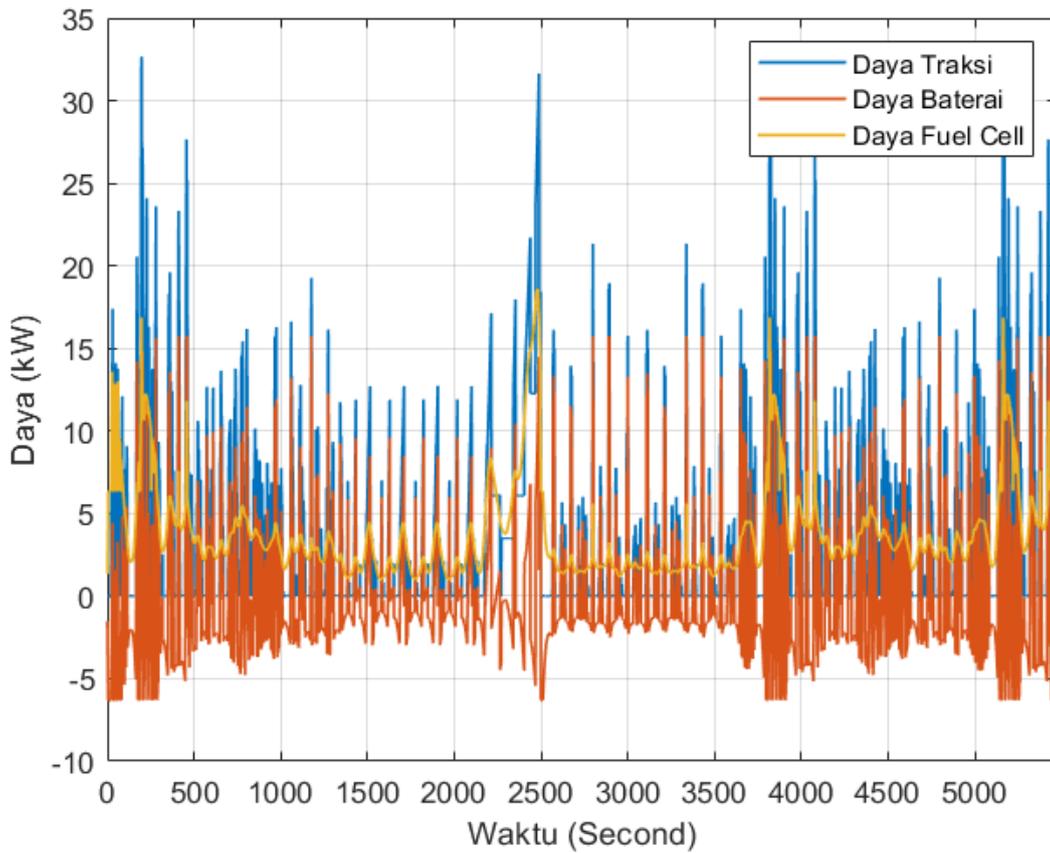
Dari tabel 4.5 terlihat semakin besar nilai horizon maka SOC maksimal semakin mendekati SOC optimal yang ditentukan yaitu 0.5. Hal ini dikarenakan semakin tinggi nilai horizon maka prediksi *previewing* juga semakin lama menyebabkan sinyal kontrol pertama untuk tiap *previewing* sinyal semakin agresif untuk mendekati SOC optimal. Plot pembagian daya dapat dilihat pada gambar 4.4 – 4.11.



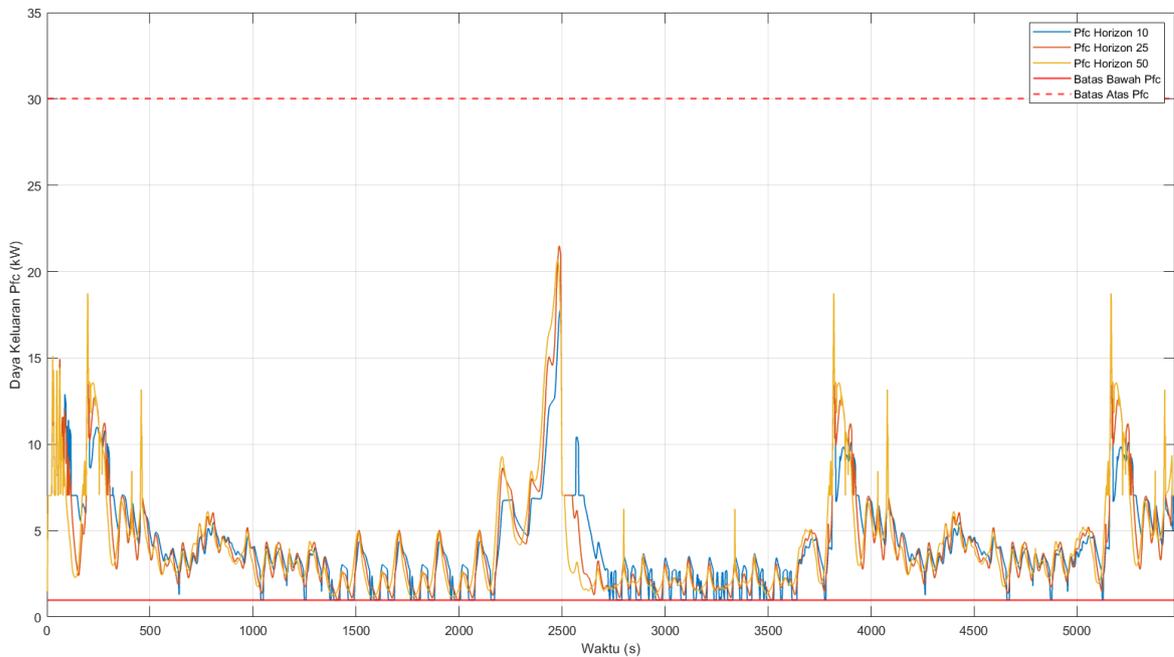
Gambar 4.4 Plot Pembagian Daya untuk Nilai Horizon 10



Gambar 4.5 Plot Pembagian Daya untuk Nilai Horizon 25

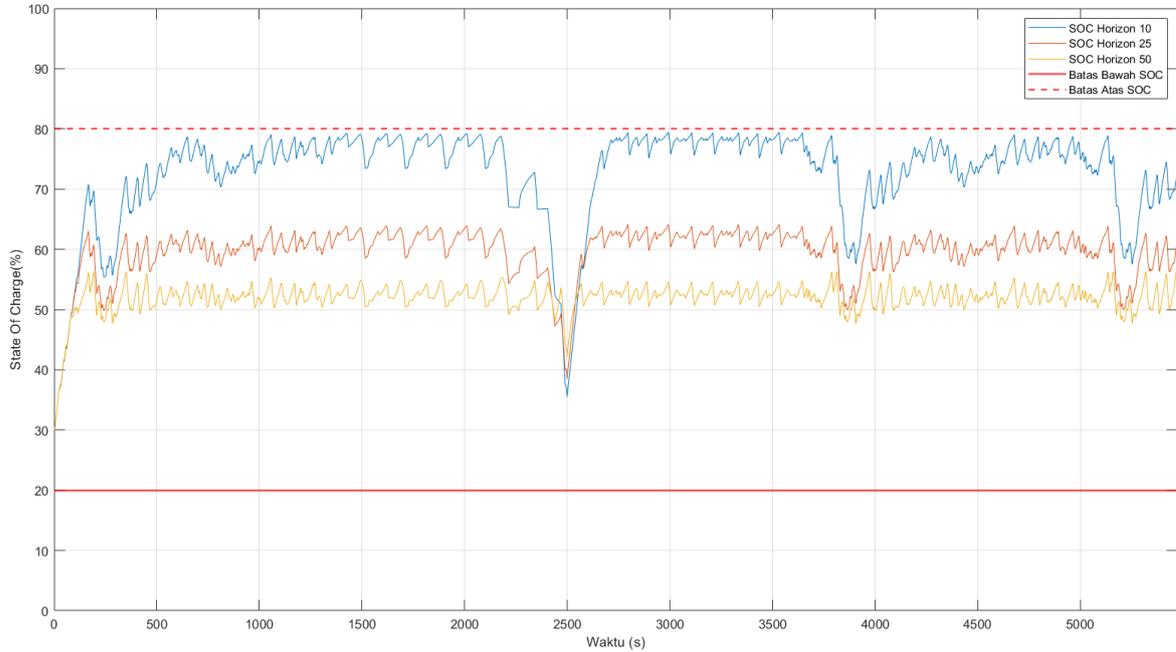


Gambar 4.6 Plot Pembagian Daya untuk Nilai Horizon 50



Gambar 4.7 Perbandingan Daya *Fuel Cell* masing-masing variasi horizon

Terlihat pada gambar 4.4 – 4.6, bahwa semakin tinggi nilai horizon maka utilisasi *fuel cell* akan semakin menyesuaikan dengan SOC *flag* yang telah ditentukan diawal *driving cycle* guna mempercepat SOC untuk mencapai SOC optimal yaitu 0.5. Sembari mencapai ketercapaian daya yang dibutuhkan oleh motor listrik.



Gambar 4.8 Perbandingan SOC dari tiga variasi nilai horizon

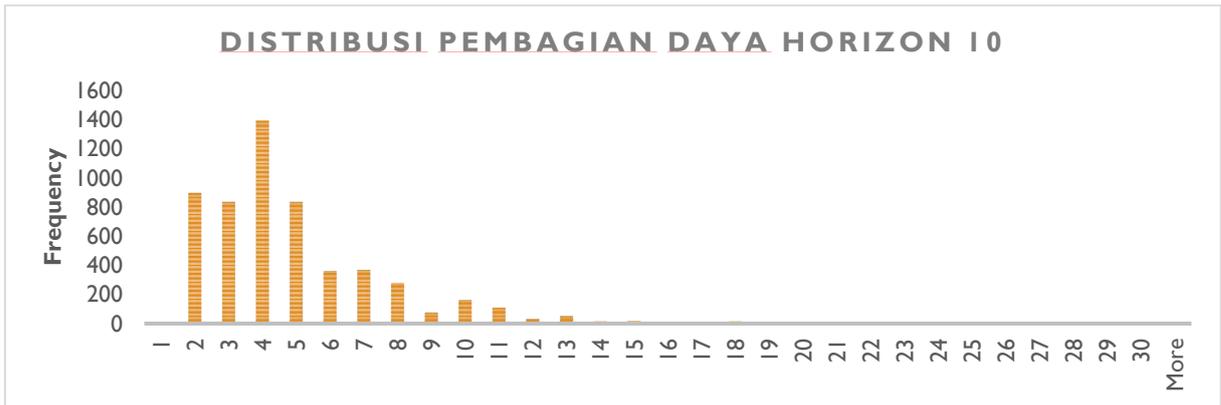
Dari gambar 4.8 terlihat bahwa kontroler MPC dengan $N_H = 50$ merupakan yang paling cepat mencapai SOC optimal yang telah ditentukan, sedangkan kontroler MPC dengan $N_H = 10$ dan $N_H = 25$ tidak mencapai SOC optimal yang ditentukan. Kontroler MPC dengan $N_H = 10$ mencapai dan $N_H = 25$ berada pada jangkauan kerja SOC 60% dan 80%.

Bin Daya Keluaran Fuel Cell (kW)	Frekuensi pada Variasi Horizon 10	Presentase Pengguna an Daya	Frekuensi pada Variasi Horizon 25	Presentase Pengguna an Daya	Frekuensi pada Variasi Horizon 50	Presentase Pengguna an Daya	Efisiensi Fuel Cell
1	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	30.0%
2	899	16.4%	1088	19.9%	1095	20.0%	44.0%
3	837	15.3%	1143	20.9%	1237	22.6%	49.2%
4	1394	25.5%	1042	19.0%	1064	19.4%	53.0%
5	837	15.3%	855	15.6%	823	15.0%	55.0%

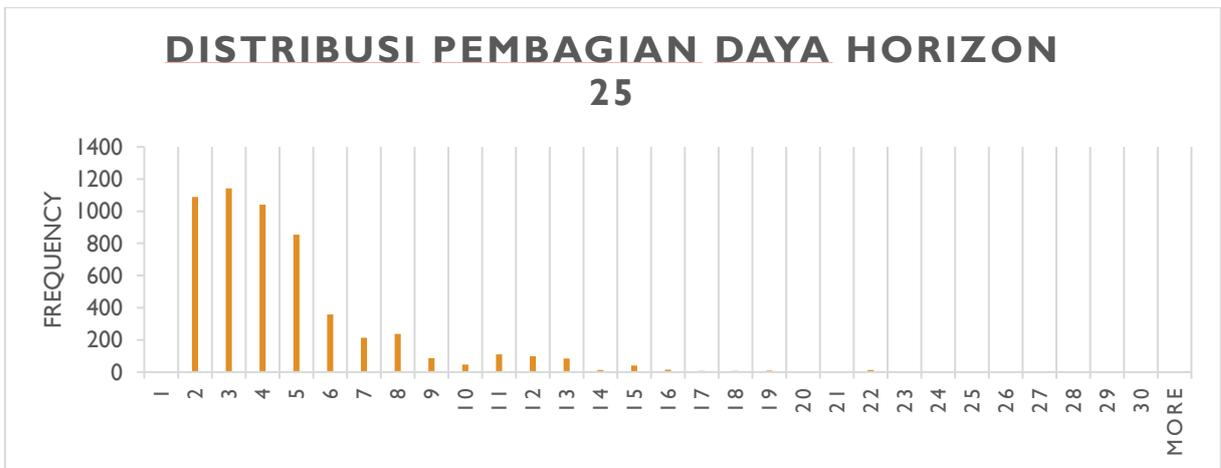
6	363	6.6%	359	6.6%	335	6.1%	55.9%
7	370	6.8%	213	3.9%	179	3.3%	57.0%
8	278	5.1%	237	4.3%	184	3.4%	57.8%
9	75	1.4%	86	1.6%	111	2.0%	58.5%
10	164	3.0%	47	0.9%	84	1.5%	59.2%
11	108	2.0%	110	2.0%	54	1.0%	59.4%
12	32	0.6%	99	1.8%	49	0.9%	59.8%
13	51	0.9%	84	1.5%	49	0.9%	60.0%
14	13	0.2%	13	0.2%	100	1.8%	60.0%
15	16	0.3%	40	0.7%	18	0.3%	60.0%
16	8	0.1%	14	0.3%	14	0.3%	60.0%
17	8	0.1%	7	0.1%	23	0.4%	59.8%
18	14	0.3%	6	0.1%	15	0.3%	59.5%
19	6	0.1%	9	0.2%	15	0.3%	59.0%
20	0	0.0%	5	0.1%	9	0.2%	58.8%
21	0	0.0%	4	0.1%	15	0.3%	58.2%
22	0	0.0%	12	0.2%	0	0.0%	57.5%
23	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	57.0%
24	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	56.2%
25	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	54.9%
26	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	53.8%
27	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	53.0%

28	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	52.2%
29	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	51.4%
30	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	50.8%

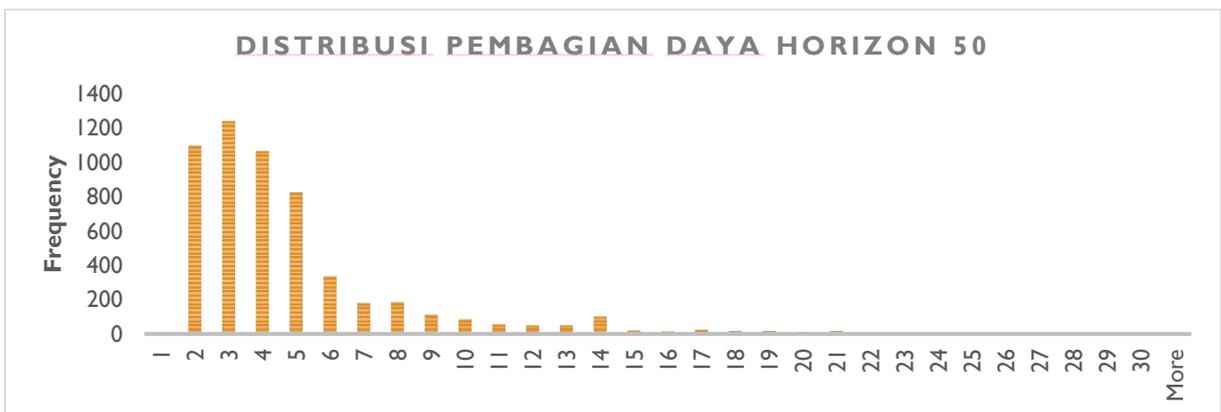
Tabel 4.6 Tabel Hasil Pembagian Distribusi Daya *Fuel Cell*



Gambar 4.9 Distribusi Daya Keluaran Fuel Cell Variasi $N_H = 10$



Gambar 4.10 Distribusi Daya Keluaran Fuel Cell Variasi $N_H = 25$



Gambar 4.11 Distribusi Daya Keluaran Fuel Cell Variasi $N_H = 50$

Pada histogram distribusi daya, terlihat bahwa seluruh variasi nilai horizon bekerja pada efisiensi *fuel cell* 44% – 53% tidak terdapat perbedaan yang signifikan terhadap

$N_H = 50$ dan $N_H = 150$ dominan bekerja pada efisiensi *fuel cell* 0.3 – 0.5 dan $N_H = 10$ bekerja pada efisiensi *fuel cell* 0.5. Hal ini disebabkan karena agresifitas respon pada $N_H = 50$ dan $N_H = 150$ yang disebabkan lamanya *pre-viewing* sinyal. Sehingga, ketika SOC terdapat pada nilai 50% maka terjadi *floating* yang menyebabkan penggunaan daya *fuel cell* yang rendah untuk menghindari kenaikan SOC, hal ini berakibat penggunaan daya *fuel cell* berada pada zona efisiensi yang rendah, yaitu sekitar 30%.

4.1.2 Simulasi Perbandingan *Objective Function*

Pada sub-bab ini akan dijelaskan hasil pengujian dan perbandingan dari *objective function* yang sudah dijelaskan pada bab tiga sebelumnya. Pengujian hanya dilakukan dengan nilai horizon tetap yaitu 30 serta profil kecepatan UDDS, NEDC, dan MANHATTAN. Parameter *tuning* yang akan digunakan pada pengujian ini terdapat pada tabel 4.8.

<i>Objective Function</i> Minimalisasi Hidrogen				<i>Objective Function</i> Penggunaan Daya <i>Fuel Cell</i> Optimal		
N_H	A_1	A_2	A_3	N_H	A_4	A_5
50	0.2	0.2	1000	50	0.1	1000

Tabel 4.7 Nilai Parameter *Tuning* Simulasi

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 $P_{fc_OPT} = 14.5$.

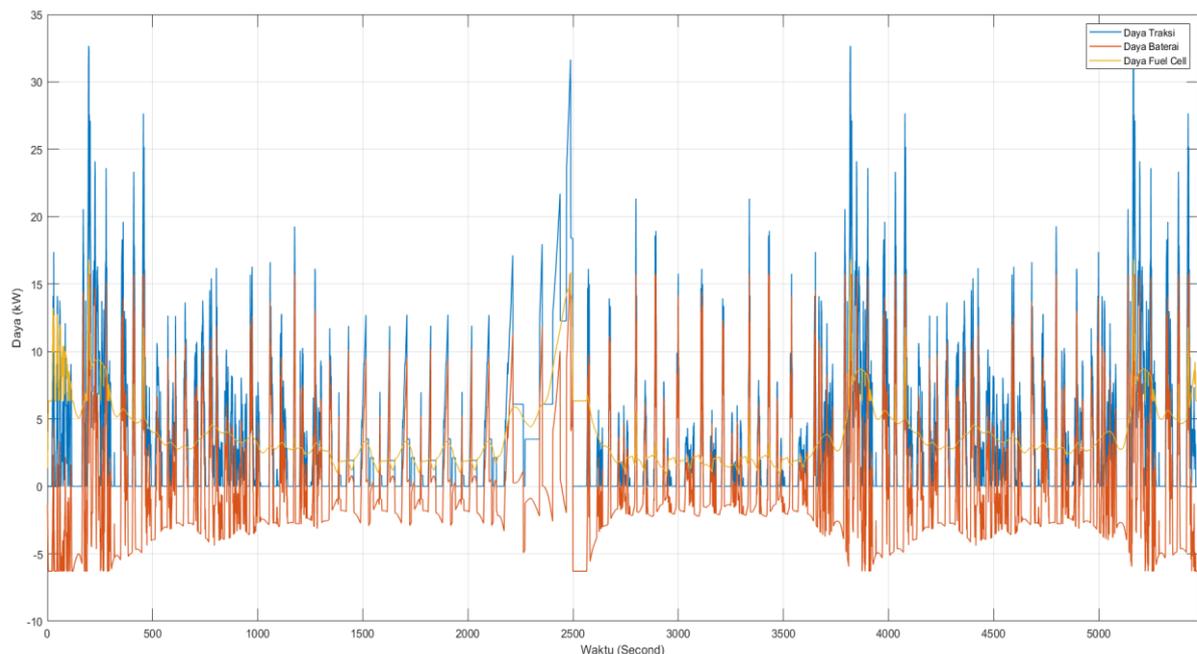
Pada simulasi ini digunakan tiga *objective function* yang telah dijelaskan pada bab tiga dengan menggunakan parameter pada tabel 4.7, Hasil simulasi menggunakan profil kecepatan UDDS dapat dilihat pada tabel 4.8. *Objective function* akan disebut sebagai *objective function* 1,2, dan 3 pada sub-bab ini.

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> ($\overline{P_{fc}}$ / kW)	Daya <i>Fuel Cell</i> Maksimal (kW)	RMSE
Variasi 1	0.3705	0.3	0.7345	0.7292	4.3084	18.695	0.051
Variasi 2	0.3535	0.2	0.3579	0.2054	4.0295	19.631	0.0104

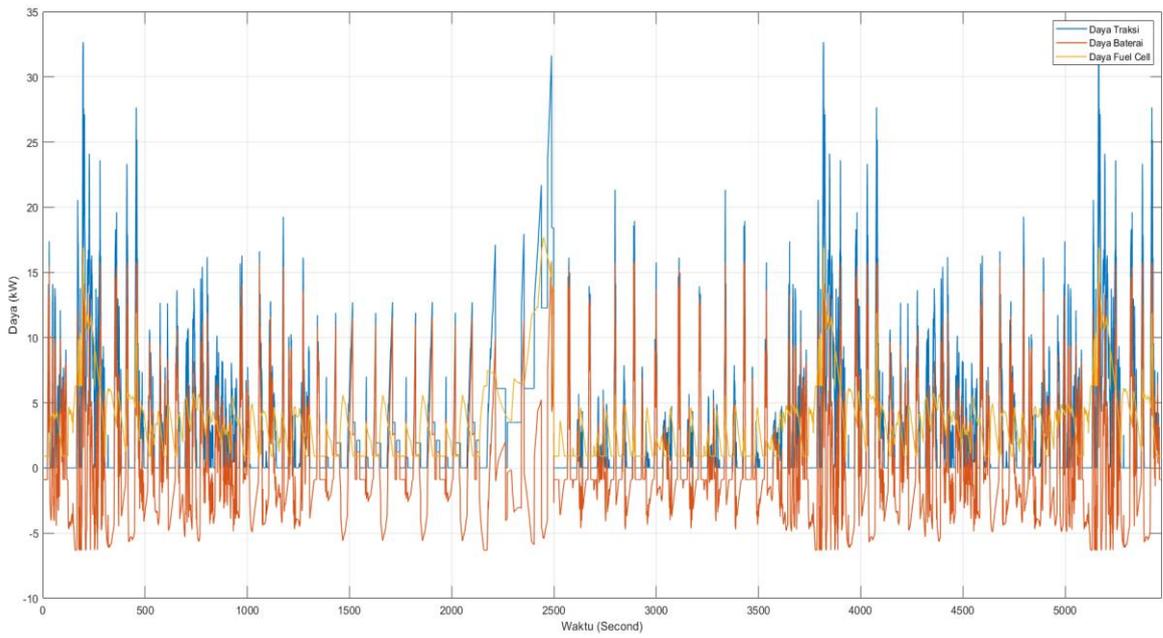
Tabel 4.8 Hasil Simulasi dengan Variasi *Objective Function*

Terlihat pada tabel 4.8 SOC akhir dan SOC maksimal tertinggi mempunyai perbedaan yang signifikan, dimana pada variasi 1, SOC pada akhir siklus mengemudi berada pada 72.92% dan pada variasi 2 terdapat pada 20.54%. Hal tersebut disebabkan karena pada variasi 1 digunakan daya keluaran *fuel cell* yang tinggi sehingga siklus *charging* dari baterai mempunyai frekuensi yang lebih tinggi dibandingkan siklus *discharging* sehingga SOC mengalami kenaikan hingga 80%. Sedangkan pada variasi 2 karena penggunaan daya keluaran *fuel cell* dijaga seminimal mungkin maka baterai memiliki siklus *discharging* yang lebih lama bila dibandingkan dengan siklus *chargingnya* sehingga SOC berada pada jangkauan kerja 20% - 30%. Selain itu dapat diamati bahwa konsumsi hidrogen pada variasi 2 lebih sedikit 4.58% bila dibandingkan dengan variasi 1 hal ini dikarenakan pada variasi 2 frekuensi penggunaan *fuel cell* lebih rendah bila dibandingkan dengan variasi 1, sehingga baterai lebih sering menyuplai motor bila dibandingkan dengan *fuel cell* dan menyebabkan konsumsi hidrogen lebih rendah.

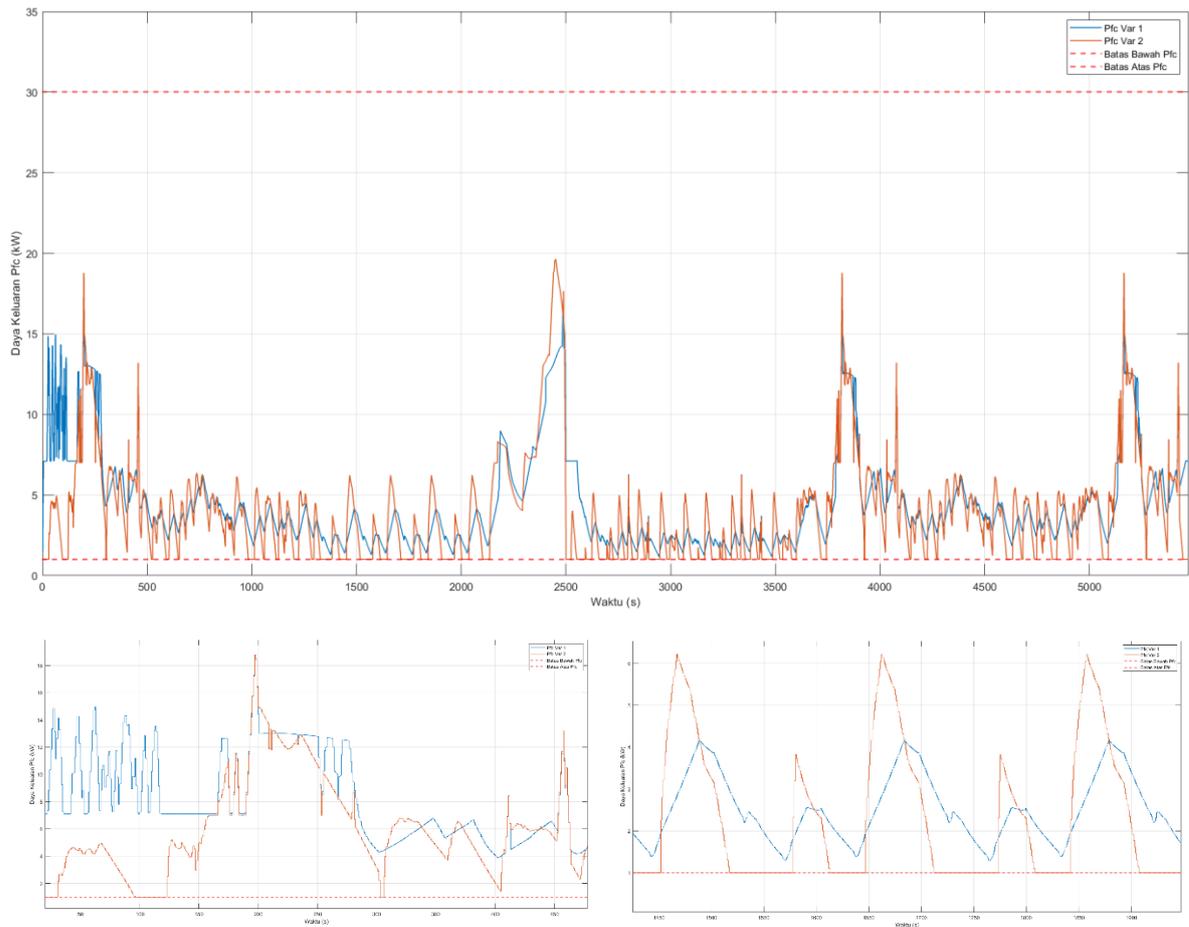
Pembagian daya untuk masing-masing *objective function* dapat dilihat pada gambar 4.12 dan 4.13. Terlihat pada gambar 4.12 pada awal siklus, Daya *fuel cell* yang digunakan pada variasi 1 lebih tinggi bila dibandingkan dengan variasi 2 yaitu pada jangkauan kerja 8 – 15 kW, pada variasi 2 daya *fuel cell* pada awal siklus digunakan berada pada jangkauan kerja 0 – 4 kW hal ini dapat dilihat lebih jelas pada gambar 4.13. Selain itu daya *fuel cell* pada variasi 2 cenderung berada pada batas bawah atau batas minimal bila dibandingkan dengan variasi 1. Selain itu daya baterai pada variasi 1 lebih banyak berada pada zona *charging* bila dibandingkan dengan variasi 2.



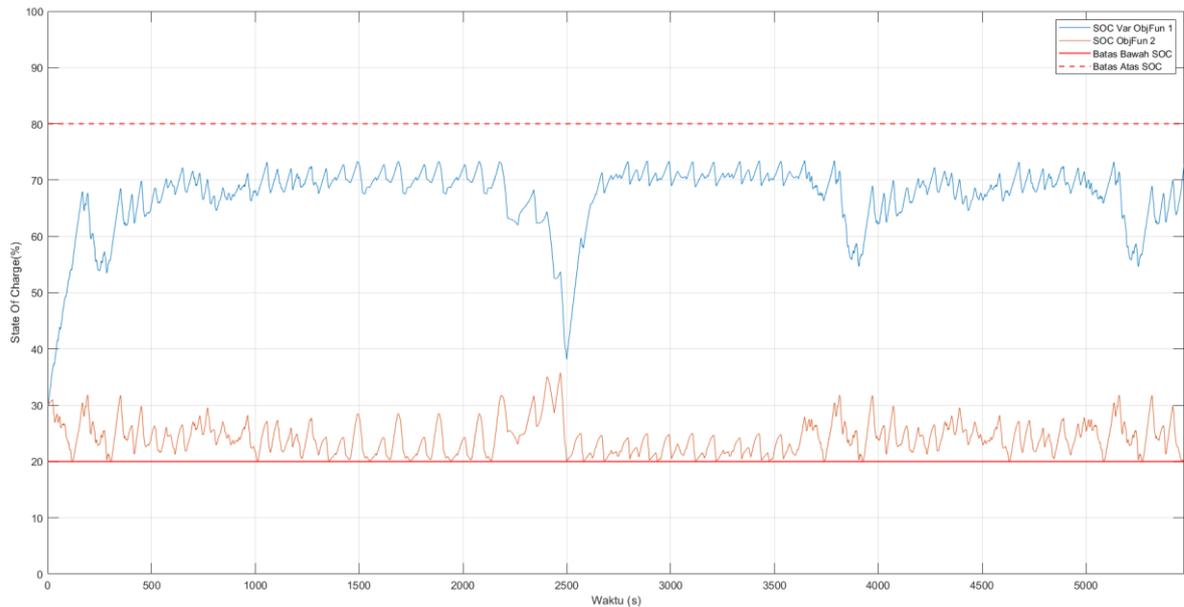
Gambar 4.12 Pembagian Daya Kontroler MPC dengan Implementasi *Objective Function 1*



Gambar 4.13 Pembagian Daya Kontroler MPC dengan Implementasi *Objective Funtion 2*

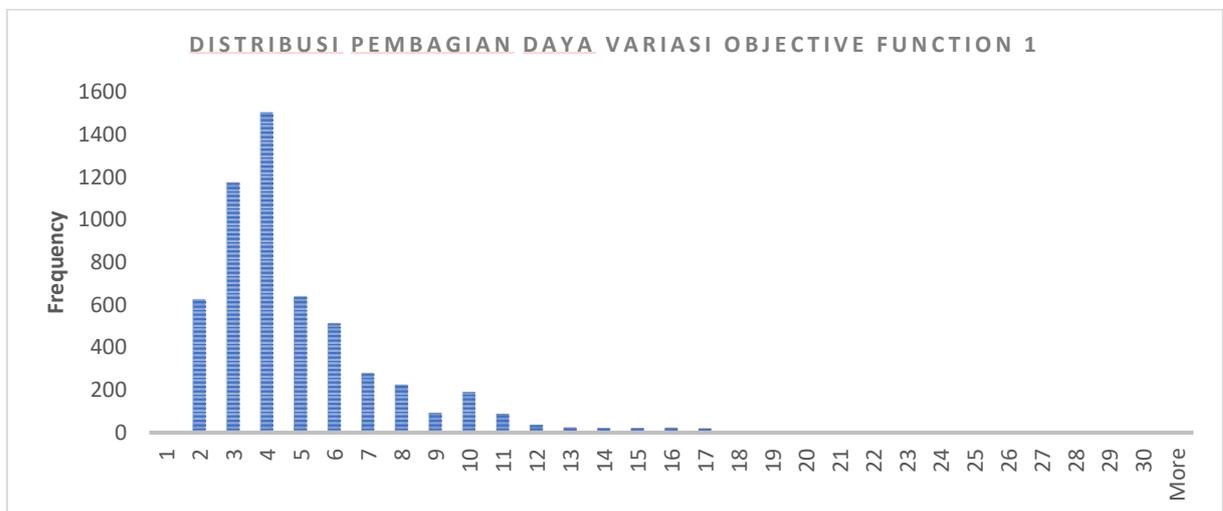


Gambar 4.14 Perbandingan Keluaran Daya *Fuel Cell* Variasi 1 dan Variasi 2

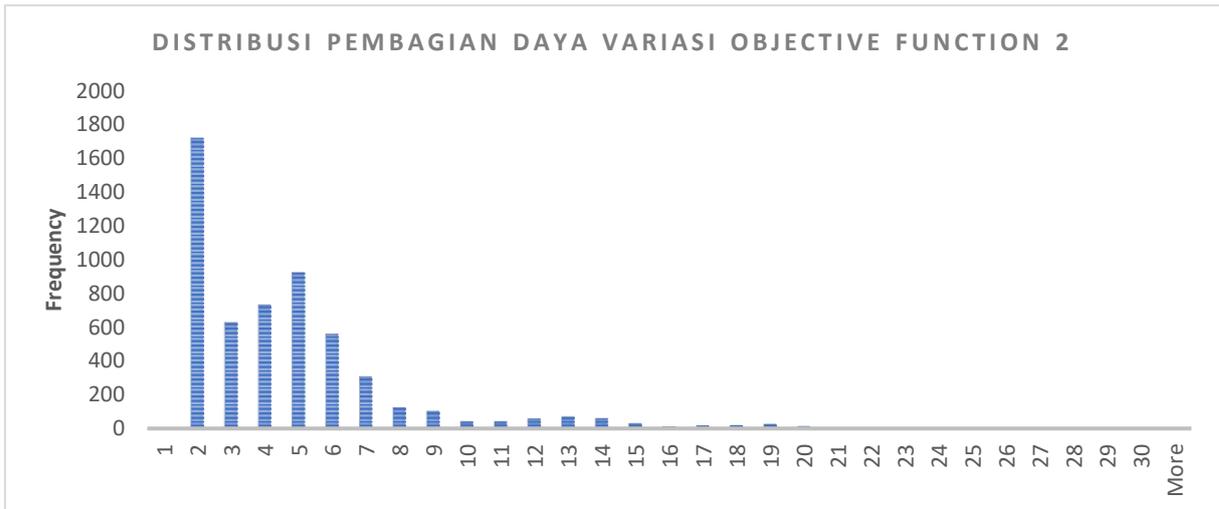


Gambar 4.15 Perbandingan SOC dari Kedua Variasi *Objective Funtion*

Terlihat, pada gambar 4.15 bahwa *objective function* variasi 1 menyebabkan sistem bekerja pada jangkauan SOC 50%-70% sedangkan pada variasi 2 menyebabkan sistem bekerja pada jangkauan SOC 20%-30%.



Gambar 4.16 Distribusi Pembagian Daya *Objective Function 1*



Gambar 4.17 Distribusi Pembagian Daya *Objective Function 2*

Bin Daya Keluaran Fuel Cell (<i>kW</i>)	Frekuensi pada Variasi 1	Presentase Penggunaan Daya	Frekuensi pada Variasi Horizon 2	Presentase Penggunaan Daya	Efisiensi Fuel Cell
1	0	0.0%	0	0.0%	30.0%
2	625	11.4%	1721	31.4%	44.0%
3	1171	21.4%	627	11.5%	49.2%
4	1502	27.4%	733	13.4%	53.0%
5	638	11.7%	923	16.9%	55.0%
6	512	9.4%	558	10.2%	55.9%
7	279	5.1%	308	5.6%	57.0%
8	224	4.1%	123	2.2%	57.8%
9	92	1.7%	103	1.9%	58.5%
10	190	3.5%	41	0.7%	59.2%
11	88	1.6%	40	0.7%	59.4%
12	36	0.7%	58	1.1%	59.8%
13	24	0.4%	68	1.2%	60.0%

14	20	0.4%	59	1.1%	60.0%
15	20	0.4%	29	0.5%	60.0%
16	22	0.4%	11	0.2%	60.0%
17	19	0.3%	15	0.3%	59.8%
18	5	0.1%	18	0.3%	59.5%
19	6	0.1%	25	0.5%	59.0%
20	0	0.0%	13	0.2%	58.8%
21	0	0.0%	0	0.0%	58.2%
22	0	0.0%	0	0.0%	57.5%
23	0	0.0%	0	0.0%	57.0%
24	0	0.0%	0	0.0%	56.2%
25	0	0.0%	0	0.0%	54.9%
26	0	0.0%	0	0.0%	53.8%
27	0	0.0%	0	0.0%	53.0%
28	0	0.0%	0	0.0%	52.2%
29	0	0.0%	0	0.0%	51.4%
30	0	0.0%	0	0.0%	50.8%

Tabel 4.9 Frekuensi Daya Keluaran *Fuel Cell* dan Efisiensi *Fuel Cell* pada Simulasi Variasi *Objective function*

Dari gambar 4.16 dan 4.17 terlihat perbedaan distribusi daya antara variasi *objective function* 1 dan variasi *objective function* 2, Dimana pada variasi *objective function* 1 frekuensi daya keluaran *fuel cell* tertinggi berada pada $4kW$ sedangkan pada variasi *objective function* 2 frekuensi daya keluaran *fuel cell* tertinggi berada pada $2kW$. Pada jangkauan kerja efisiensi *fuel cell* 44% – 57% terdapat 86.37% daya *fuel cell* yang digunakan pada variasi *objective function* 1 dan 88.98% pada variasi *objective function* 2 dan pada jangkauan kerja efisiensi *fuel cell* 57% – 60% terdapat 7.31% dari frekuensi daya keluaran total yang dihasilkan dari variasi *objective function* 1 dan 5.59% dari *objective function* 2. Terlihat bahwa frekuensi daya keluaran *fuel cell* pada variasi *objective function* 2 adalah pada bin 1 – $2kW$ dengan jangkauan efisiensi kerja 30% – 44% sedangkan pada variasi *objective function* 2 terdapat pada bin 3 – $4kW$ yang bekerja pada efisiensi 49.2% – 53%.

4.1.3 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 UDDS. Parameter yang akan digunakan dalam pengujian ini dapat dilihat pada tabel 4.15.

Variasi	N_H	Pembobotan A_1	Pembobotan A_2	Pembobotan A_3
1	50	500	0.05	10
2	50	50	0.1	10

Tabel 4.10 Parameter Variasi Pembobotan yang Digunakan dalam Simulasi

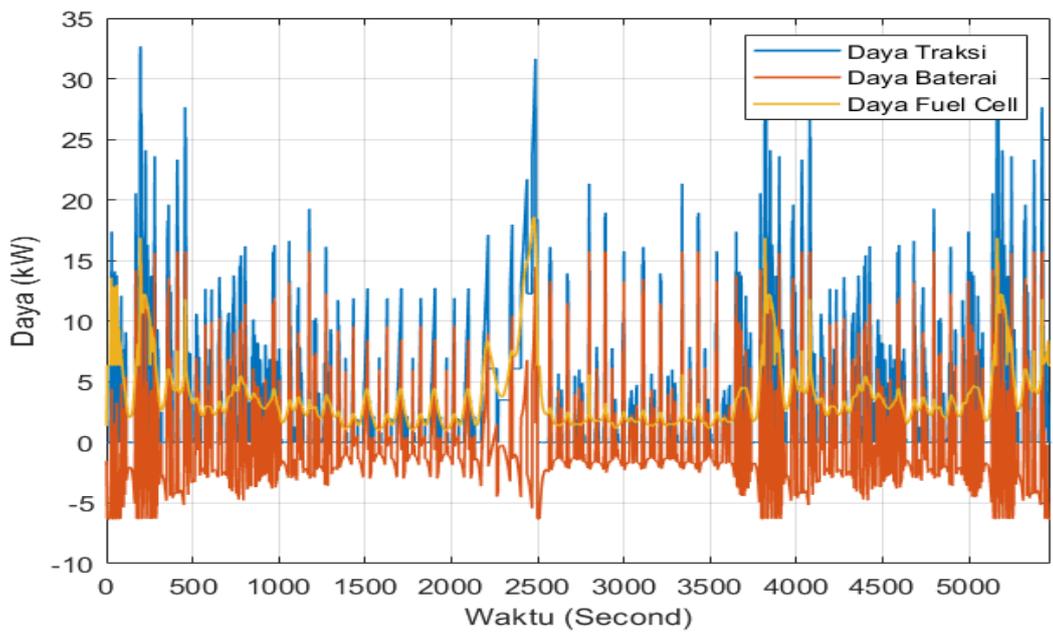
Kemudian kedua variasi tersebut disimulasikan menggunakan profil kecepatan UDDS, Hasil simulasi dapat dilihat pada tabel 4.16.

Variasi	Konsumsi Massa Hidrogen (M_{H_2}/Kg)	SOC Min	SOC Max	SOC Akhir	Rata-Rata Daya Keluaran <i>Fuel Cell</i> (\overline{P}_{fc} / kW)	Daya <i>Fuel Cell</i> Maksimal (kW)	Daya <i>Fuel Cell</i> Minimal (kW)	RMSE
1	0.3677	0.4	0.5014	0.4919	5.7645	30	2	0.052
2	0.378	0.3	0.8	0.8	4.4142	18.72	2	0.123

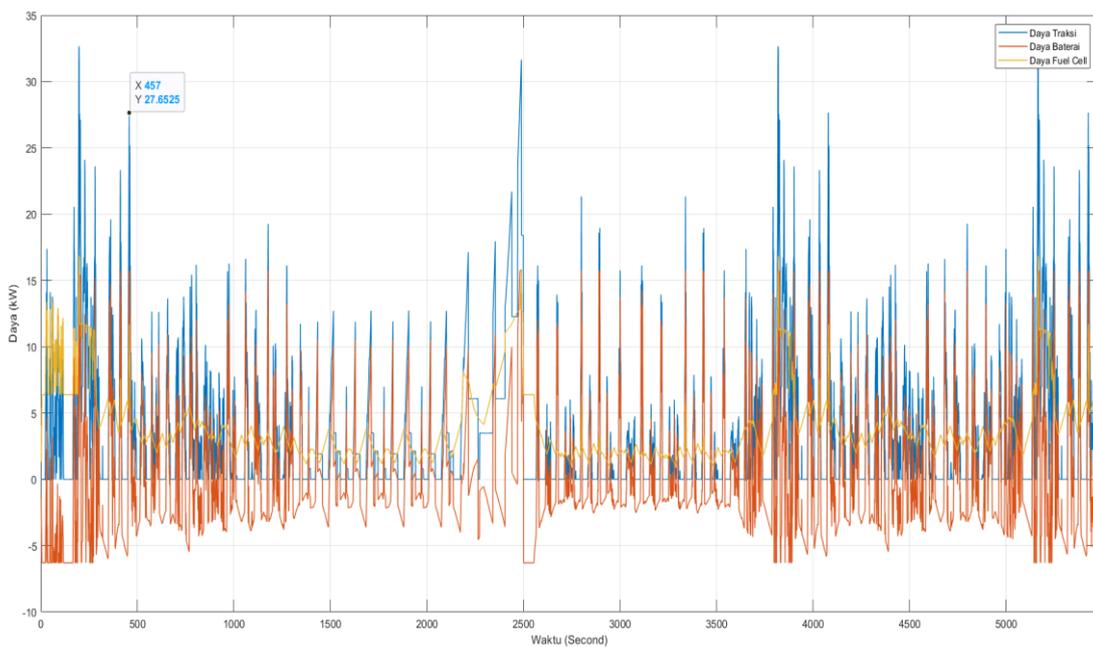
Tabel 4.11 Hasil Simulasi Variasi Pembobotan

Dari tabel 4.11 terlihat terdapat perbedaan SOC akhir sebesar 30.81% pada variasi 1 dan variasi 2. Selain itu, rata-rata daya keluaran *fuel cell* juga memiliki perbedaan 1.35 kW hal ini linear dengan konsumsi hidrogen yang dibutuhkan *fuel cell* dimana variasi 1 memiliki konsumsi hidrogen 2.7% lebih rendah bila dibandingkan dengan variasi 2. Terlihat juga bahwa SOC minimal memiliki perbedaan sebesar 10% dari variasi 1 dan variasi 2.

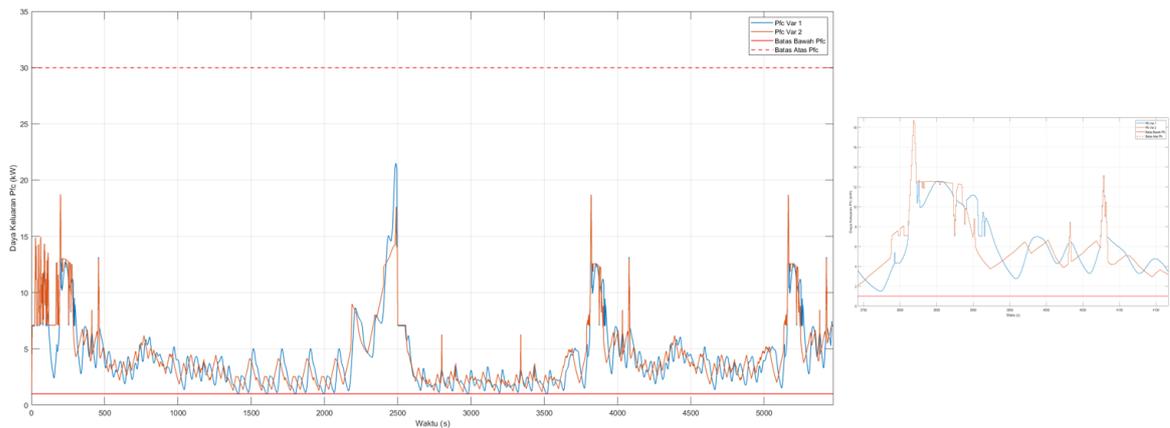
Dari grafik pembagian daya 4.18 dan 4.19 terlihat bahwa pada variasi 1 diawali dengan jangkauan daya 6.5 – 15 kW sama halnya seperti variasi 2. Namun pada penggunaan daya baterai, terlihat frekuensi *charging* pada variasi 2 terlihat lebih tinggi bila dibandingkan dengan variasi 1, menyebabkan baterai mencapai SOC yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan variasi 1, hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.21 yang merupakan grafik perbandingan SOC antara variasi 1 dan variasi 2. Pada gambar 4.20 terlihat variasi 1 lebih banyak menyentuh batas bawah bila dibandingkan dengan variasi 1 mengindikasikan pembobotan variasi 1 memiliki respon yang memprioritaskan keluaran daya *fuel cell* yang minimum.



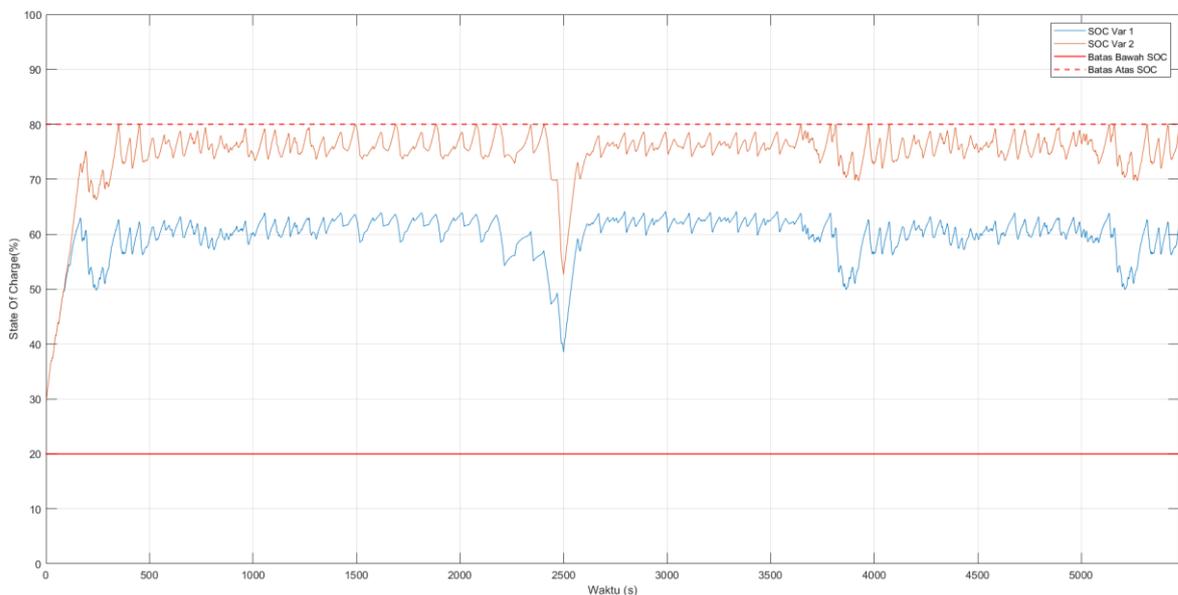
Gambar 4.18 Grafik Pembagian Daya pada Variasi 1



Gambar 4.19 Grafik Pembagian Daya pada Variasi 2



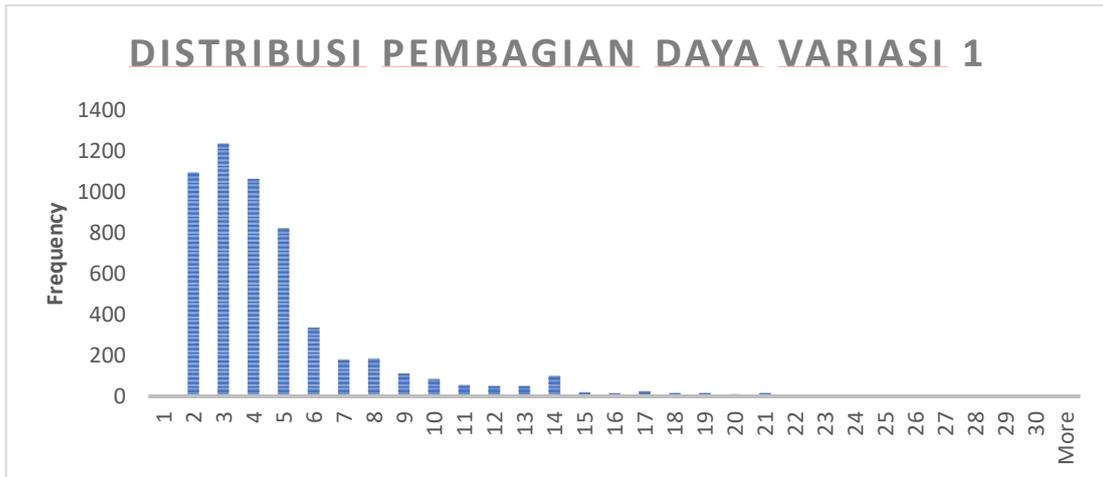
Gambar 4.20 Perbandingan Keluaran Daya *Fuel Cell* Variasi 1 dan Variasi 2



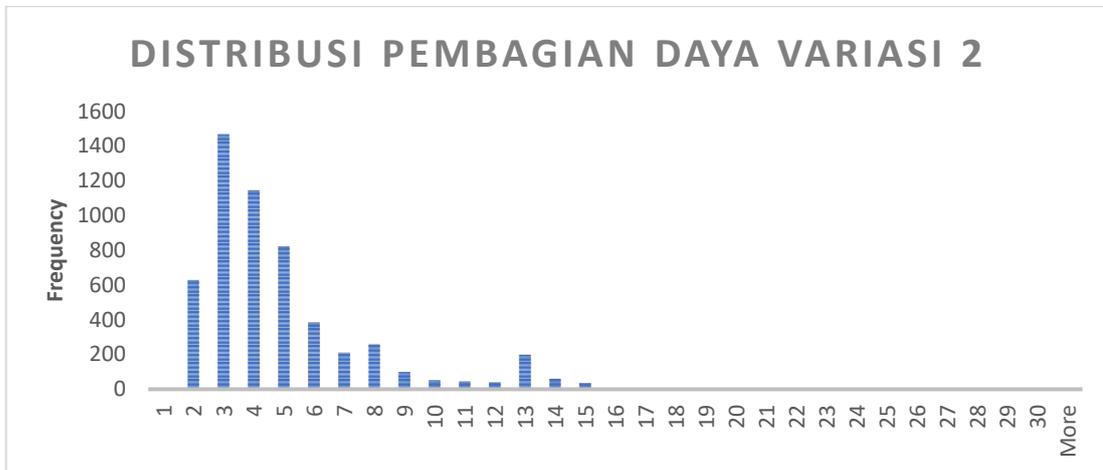
Gambar 4.21 Perbandingan Grafik SOC pada Simulasi Variasi 1 dan Variasi 2 dengan Profil Kecepatan UDDS

Dari gambar 4.21 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 4.22 dan 4.23 frekuensi keluaran daya *fuel cell* dapat dilihat pada tabel 4.12

Pada variasi 1 dan variasi 2 distribusi keluaran *fuel cell* terdistribusi pada jangkauan efisiensi kerja 44% - 60% namun terlihat pada variasi 1 memiliki daya keluaran *fuel cell* yang bekerja pada 44% sebesar 20% dari daya keseluruhan, lebih besar 8.5% bila dibandingkan dari variasi 2. Selain itu pada jangkauan efisiensi kerja 60% variasi 2 memiliki frekuensi daya yang lebih tinggi yaitu sebesar 5.5% dari total penggunaan daya keseluruhan sedangkan variasi 1 hanya terdapat 3.3% dari total penggunaan daya keseluruhan. Hal ini mengindikasikan bahwa pembobotan variasi 2 memiliki karakteristik respon sistem yang memaksimalkan efisiensi penggunaan daya *fuel cell*.



Gambar 4.22 Distribusi Daya Keluaran *Fuel Cell* Variasi 1



Gambar 4.23 Distribusi Daya Keluaran *Fuel Cell* Variasi 2

Bin Daya Keluaran <i>Fuel Cell</i> (kW)	Frekuensi pada Variasi 1	Presentase Penggunaan Daya	Frekuensi pada Variasi 2	Presentase Penggunaan Daya	Efisiensi <i>Fuel Cell</i>
1	0	0.0%	0	0.0%	30.0%
2	1095	20.0%	629	11.5%	44.0%
3	1237	22.6%	1465	26.8%	49.2%
4	1064	19.4%	1144	20.9%	53.0%
5	823	15.0%	821	15.0%	55.0%
6	335	6.1%	386	7.1%	55.9%
7	179	3.3%	212	3.9%	57.0%

8	184	3.4%	260	4.8%	57.8%
9	111	2.0%	99	1.8%	58.5%
10	84	1.5%	51	0.9%	59.2%
11	54	1.0%	46	0.8%	59.4%
12	49	0.9%	42	0.8%	59.8%
13	49	0.9%	199	3.6%	60.0%
14	100	1.8%	61	1.1%	60.0%
15	18	0.3%	36	0.7%	60.0%
16	14	0.3%	6	0.1%	60.0%
17	23	0.4%	5	0.1%	59.8%
18	15	0.3%	5	0.1%	59.5%
19	15	0.3%	6	0.1%	59.0%
20	9	0.2%	0	0.0%	58.8%
21	15	0.3%	0	0.0%	58.2%
22	0	0.0%	0	0.0%	57.5%
23	0	0.0%	0	0.0%	57.0%
24	0	0.0%	0	0.0%	56.2%
25	0	0.0%	0	0.0%	54.9%
26	0	0.0%	0	0.0%	53.8%
27	0	0.0%	0	0.0%	53.0%
28	0	0.0%	0	0.0%	52.2%
29	0	0.0%	0	0.0%	51.4%
30	0	0.0%	0	0.0%	50.8%

Tabel 4.12 Frekuensi Daya Keluaran *Fuel Cell* dan Efisiensi *Fuel Cell* pada Simulasi Variasi Pembobotan

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Setelah melakukan simulasi pada kontroler yang didesain dan analisis pada data simulasi yang diperoleh, maka dapat ditarik kesimpulan dan saran untuk penelitian selanjutnya sebagai berikut.

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian kali ini, diperoleh bahwa kontroler MPC yang didesain untuk melakukan pembagian daya atau menentukan *Power Split Ratio* (PSR) yang diimplementasikan sebagai *upper level controller* pada *Energy Management System* (EMS) dari kendaraan listrik hibrida *fuel cell* – baterai berhasil menghasilkan PSR berdasarkan *power demand* yang telah diberikan dengan rata-rata RMSE 0.05 atau 5 watt oleh tiga profil kecepatan yaitu UDDS, NEDC, dan MANHATTAN dengan SOC dari kendaraan listrik hibrida *fuel cell* – baterai tidak menyentuh batas maksimal dan minimal yang telah ditentukan, Selain itu, daya keluaran dari *fuel cell* dan baterai tidak melebihi batas maksimal dan minimal yang telah ditentukan sehingga *power control* pada kendaraan listrik baterai *fuel cell* – baterai dapat memenuhi kebutuhan daya yang telah disediakan oleh PSR dari EMS.

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 variabel kontrol akan semakin agresif untuk mendekati SOC optimal.
2. Agresifitas variabel kontrol berakibat keluaran daya *fuel cell* berada pada jangkauan kerja yang semakin rendah, semakin tinggi nilai *horizon* yang digunakan, semakin rendah konsumsi hidrogen yang digunakan.
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* minimasi hidrogen menghasilkan karakteristik respon sistem yang meminimalkan daya keluaran *fuel cell* dimana terlihat pada respon pembagian daya dan SOC bahwa daya *fuel cell* lebih banyak bekerja pada jangkauan efisiensi 44%-53% yaitu pada 88.9% penggunaan daya, pada respon SOC terlihat bahwa SOC terdapat pada jangkauan kerja 20%-30% dan tidak pernah mencapai SOC optimal yang ditentukan.
2. *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% yaitu 7.31% atau 1.7% lebih tinggi bila dibandingkan *objective function* minimasi hidrogen, pada respon SOC terlihat bahwa SOC terdapat pada jangkauan 50%-70% selama siklus mengemudi.

Terakhir pada pengujian variasi pembobotan yang dilakukan pada *objective function* efisiensi kerja *fuel cell* 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. Terlihat bila pembobotan pada ekspresi SOC dinaikan, maka jangkauan kerja SOC akan berada pada 40%-50% dan bila pembobotan pada ekspresi peningkatan efisiensi *fuel cell* dinaikan maka jangkauan kerja efisiensi *fuel cell* juga akan semakin tinggi bila dibandingkan dengan variasi peningkatan pembobotan ekspresi SOC.

5.2 Saran

Untuk mengembangkan penelitian yang sudah dilakukan agar menjadi semakin baik, Maka beberapa pengembangan dapat dikerjakan pada kemudian hari antara lain:

1. Penggunaan model nonlinier dari sistem kendaraan listrik hibrida *fuel cell* – baterai, khususnya pada permodelan *powertrain* dimana SOC dari baterai dipengaruhi dari beberapa *state* yang bersifat nonlinier dengan tujuan menjadikan simulasi lebih mirip dengan dunia nyata.
2. Implementasi *observer* EKF dalam melakukan estimasi SOC baterai karena metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu *coulomb counting* merupakan metode lama yang dapat dikembangkan lagi dalam implementasi EMS dengan tujuan meningkatkan keakuratan simulasi dalam hal estimasi SOC
3. Penerapan algoritma kontrol nonlinier seperti *Nonlinear Model Predictive Control* (NMPC) atau algoritma kontrol *Linear Time-Varying* seperti LTV-MPC untuk mengatasi kelemahan algoritma MPC linier.
4. Pemilihan pembobotan yang pada penelitian ini masih statis atau *time invariant* kedepannya dapat divariasikan terhadap waktu.
5. Pengimplementasian hasil desain kontroler MPC pada sistem manajemen energi atau *Energy Management System* (EMS) yang direplika dalam simulasi *Hardware-in-Loop* atau HiL.
6. Skenario pengujian yang lebih lama dengan menggabungkan beberapa *driving cycle* menjadi satu *driving cycle*.
7. Penambahan model prediksi kecepatan sehingga kontroler dapat digunakan secara *real time*, dimana dalam penelitian ini tidak digunakan prediktor kecepatan karena diasumsikan *driving cycle* diketahui sepenuhnya sehingga penelitian dianggap dalam *offline optimization strategy* yang lebih sering digunakan pada kendaraan yang sudah diketahui *driving cycle*-nya seperti bus, kereta, dan MRT.

DAFTAR PUSTAKA

- Chan, C. C. (2007). The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 704–718. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2007.892489>
- Das, H. S., Tan, C. W., & Yatim, A. H. M. (2017). Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 268–291. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.03.056>
- Ferrara, A., Okoli, M., Jakubek, S., & Hametner, C. (2020). Energy management of heavy-duty fuel cell electric vehicles: Model predictive control for fuel consumption and lifetime optimization. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 14205–14210. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1053>
- Han, J., Hu, Y., & Dian, S. (2018). The State-of-the-art of Model Predictive Control in Recent Years. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 428(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/428/1/012035>
- Hannan, M. A., Lipu, M. S. H., Hussain, A., & Mohamed, A. (2017). A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 78, pp. 834–854). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.001>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers, & IEEE Control Systems Society. (n.d.). *2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA) : 21-24 August 2018*.
- Levine, W. S., Advisory Board Richard Braatz, E., Goodwin, G., Davor Hrovat, A., Lin, Z., Spong, M., Steinbuch, M., Vidyasagar, M., & Yamamoto, Y. (n.d.). *Control Engineering Series Editor*. <http://www.springer.com/series/4988>
- Liu, S., Bin, Y., Li, Y., & Scheppat, B. (2018). Hierarchical MPC Control Scheme for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles. *IFAC-PapersOnLine*, 51(31), 646–652. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.10.151>
- M. Sabri, M. F., Danapalasingam, K. A., & Rahmat, M. F. (2016). A review on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1433–1442. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.09.036>
- Nur Malasari, N., Onggo, H., Rokhmat, M., Teknik Elektro Universitas Telkom, F., & Penelitian Fisika LIPI, P. (n.d.). *INTEGRASI POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE (PEM) FUEL CELL DAN ANALISIS PENGARUH JUMLAH SEL TERHADAP PERFORMANSI BERDASARKAN DATA KURVA KARAKTERISTIK*.
- Pereira, D. F., Lopes, F. D. C., & Watanabe, E. H. (2021). Nonlinear Model Predictive Control for the Energy Management of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles in Real Time. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(4), 3213–3223. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2979528>
- Putra Amiruddin, B., Pembimbing Ir Rusdhianto Effendi, D. A., DrIr Ari Santoso, M., & Departemen Teknik Elektro, D. (n.d.). *PENGATURAN KEMUDI KENDARAAN OTONOM FOUR WHEEL STEER DAN FOUR WHEEL DRIVE (4WS4WD) MENGGUNAKAN MODEL PREDICTIVE CONTROL*.
- Ravey, A., Blunier, B., & Miraoui, A. (2012). Control strategies for fuel-cell-based hybrid electric vehicles: From offline to online and experimental results. In *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (Vol. 61, Issue 6, pp. 2452–2457). <https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2198680>

- Rivera-Barrera, J. P., Muñoz-Galeano, N., & Sarmiento-Maldonado, H. O. (2017). Soc estimation for lithium-ion batteries: Review and future challenges. In *Electronics (Switzerland)* (Vol. 6, Issue 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/electronics6040102>
- Rudolf, T., Schurmann, T., Schwab, S., & Hohmann, S. (2021). Toward Holistic Energy Management Strategies for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles in Heavy-Duty Applications. *Proceedings of the IEEE*, 109(6), 1094–1114. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2021.3055136>
- Soumeur, M. A., Gasbaoui, B., Abdelkhalek, O., Ghouili, J., Toumi, T., & Chakar, A. (2020). Comparative study of energy management strategies for hybrid proton exchange membrane fuel cell four wheel drive electric vehicle. *Journal of Power Sources*, 462. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228167>
- Tazelaar, E., Veenhuizen, B., van den Bosch, P., & Grimminck, M. (2012a). Analytical solution of the energy management for fuel cell hybrid propulsion systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(5), 1986–1998. <https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2190630>
- Tazelaar, E., Veenhuizen, B., van den Bosch, P., & Grimminck, M. (2012b). Analytical solution of the energy management for fuel cell hybrid propulsion systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(5), 1986–1998. <https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2190630>
- Wang, Z., Feng, G., Zhen, D., Gu, F., & Ball, A. (2021). A review on online state of charge and state of health estimation for lithium-ion batteries in electric vehicles. In *Energy Reports* (Vol. 7, pp. 5141–5161). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.113>
- Wu, J., Zhang, N., Tan, D., Chang, J., & Shi, W. (2020). A robust online energy management strategy for fuel cell/battery hybrid electric vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(27), 14093–14107. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2020.03.091>
- Zhou, Y., Ravey, A., & Péra, M. C. (2021). Real-time cost-minimization power-allocating strategy via model predictive control for fuel cell hybrid electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113721>

LAMPIRAN

Kode MATLAB

```
addpath(genpath('D:\matlab\tbxmanager\toolboxes\yalmip'))
addpath(genpath('D:\matlab\SDPT3-4.0'))
addpath(genpath('D:\win64\matlab'))
yalmip('clear')
load('fc_eff_polyfit.mat')
load('Pdemand_DCvfinal.mat')
%P_d_org = out.Pd(1:end-1,1);
%% Set Power Demand dan Sampling
dt = 1;
dt_new = 1;
n = dt_new/dt;
%Pd = mean(reshape(P_d_org,n,[]))';
Pd = P_d_org;
P_max = ceil(max(Pd)); % max power demand
T = size(Pd,1);
%% Spesifikasi Baterai
V_oc = 286;
R_b = 0.378;
Vdc_mean = 284.5040;
Q_b = 7;
SOC_min = 0.2;
SOC_max = 0.8;
SOC_opt = 0.5;
SOC_in = 0.80;
SOC_fin = 0.5;
P_bmin = -Q_b*1.0;
P_bmax = Q_b*2.5;
batt_eff = 0.90; % Efisiensi Baterai
boost_eff = 0.90;
Em_eff = 0.95;
%% Spesifikasi Fuel Cell
P_fcmin = 1;
P_fcmax = 30;
P_fc_max_eff = 13;
a0 = 0.000778922161230731;
```

```

a1 = 0.0319457033533490;
a2 = 0.0914004505418717;
A = 0.0238;
B = 1.2605;
C = 2.39312;
D = (R_b/(V_oc^2));
E = 1;
Amod = [1 (batt_eff*1)/Vdc_mean;0 1];
Bumod = [(batt_eff*1)/Vdc_mean 1]';
Bwmod = [(batt_eff*1)/Vdc_mean 0]';
Cmod = [1 0;0 1];
Dmod = [0 1]';
%Q = sdpvar(repmat(1,1,H),repmat(1,1,H));
%R = sdpvar(repmat(1,1,H),repmat(1,1,H));
%% Formulasi MPC
warning('off','YALMIP:strict')
H = 50; % Horizon
P_fc = sdpvar(repmat(1,1,H),repmat(1,1,H));
P_batt = sdpvar(repmat(1,1,H),repmat(1,1,H));
SOC = sdpvar(repmat(1,1,H),repmat(1,1,H));
P_d = sdpvar(repmat(1,1,H),repmat(1,1,H));
pastpfc = sdpvar(1);
constraints = [-2 <= diff([pastpfc P_fc{:}]) <= 1.5];
objective = 0;
for i = 1:H
objective = objective + 0.05*(P_fc{i}-P_fc_max_eff)^2 + 10*((P_d{i}/Em_eff) -
(P_fc{i}*boost_eff + P_batt{i}*batt_eff))^2;
constraints = [constraints,P_fcmin <= P_fc{i} <= P_fcmax,...
P_bmin <= P_batt{i} <= P_bmax,...
SOC_min <= SOC{i} <= SOC_max];
end
for k = 1:H-1
objective = objective + 500*(SOC{k}-SOC_opt)^2;
constraints = [constraints, SOC{k+1} == SOC{k} -...
(P_batt{k}*batt_eff)/(V_oc*Q_b)];
end
options = sdpsettings('verbose',1,'solver','gurobi');
% options for different solver and display settings.

```

```

parameters_in = {SOC{1},[P_d{:}],pastpfc}; % Input parameters
solutions_out = {[P_fc{:}], [P_batt{:}],[SOC{:}]}];

controller
optimizer(constraints,objective,options,parameters_in,solutions_out);

%% Simulasi
%q_pem = ones(1,5)*(1/(P_fc_max_eff)^2);
%r_pem = ones(5,1)*10;
oldPfc = 0;
for j = 1:T-(H-1)
P_ref = Pd(j:j+(H-1)); % Defining the reference for each horizon
inputs = {SOC_in,P_ref',oldPfc};
Sol = controller{inputs};
SOC_in = Sol{1, 3}(2);
P_fc_pred(j:j+(H-1),1) = Sol{1,1};
oldPfc = Sol{1,1}(1);
P_batt_pred(j:j+(H-1),1) = Sol{1,2};
SOC_pred(j:j+(H-1),1) = Sol{1,3}
%SOC_ambil = SOC_pred(j:j+(H-1),1);
%r_pem = (10*(SOC_ambil-SOC_opt).^2);
end
%%
figure
plot(Pd./Em_eff, 'LineWidth',1.0)
hold on
plot(P_batt_pred.*batt_eff, 'LineWidth',1.0)
hold on
stairs(P_fc_pred.*boost_eff, 'LineWidth',1.0)
xlim([0 T])
ylabel('Daya (kW)')
legend('Daya Traksi', 'Daya Baterai', 'Daya Fuel Cell')
xlabel('Waktu (Second)')
grid on
figure
plot(SOC_pred*100, 'LineWidth',1.0)
ylim([1 100])
xlim([0 T])
ylabel('State Of Charge(%)')
xlabel('Waktu (s)')

```

```

grid on
yline(20,LineWidth=1.5,LineStyle='-',Color='r')
yline(80,LineWidth=1.5,LineStyle='--',Color='r')
legend('State of Charge(SOC)', 'Batas Bawah SOC', 'Batas Atas SOC')
hold off
figure
plot(P_fc_pred)
xlim([0 T])
ylim([0 33])
title('Keluaran Daya Fuel Cell')
xlabel('Waktu (Second)')
ylabel('Daya (kW)')
yline(1,LineWidth=1.5,LineStyle='-',Color='r')
yline(30,LineWidth=1.5,LineStyle='--',Color='r')
legend('Daya Fuel Cell', 'Batas Bawah Daya Keluaran Fuel Cell', 'Batas Atas Daya
Keluaran Fuel Cell')
%figure
%plot(P_fc_pred)
%figure
%plot(P_batt_pred)
%%
M_H2 = cumtrapz(1/3600,P_fc_pred./(polyval(p,P_fc_pred).*33.3));
M_H2_fin = M_H2(end)
H_Pow = A.*P_fc_pred.*P_fc_pred + B.*P_fc_pred + C.*ones(T,1);
Energy_h = cumtrapz(1/3600,H_Pow);
%M_h2 = Energy_h/33.3;
%M_h2_fin = M_h2(end)
P_supply = P_batt_pred*batt_eff + P_fc_pred*boost_eff;
P_demand = P_d_org/Em_eff;
err_demand = P_demand - P_supply;
rmse = sqrt(mean(err_demand.^2))
%%
figure
title('Galat Daya Supply & Demand')
plot(err_demand)
xlabel('Time (s)')
ylabel('Error (kW)')
xlim([0 T])

```

```

grid on
hold on
yline(0,LineWidth=1.5,LineStyle='--',Color='r')
%%
%%
figure
plot(SOCVAR1*100)
ylim([0 100])
xlim([0 5473])
ylabel('State Of Charge(%)')
xlabel('Waktu (s)')
grid on
hold on
plot(SOCVAR2*100)
yline(20,LineWidth=1.5,LineStyle='-',Color='r')
yline(80,LineWidth=1.5,LineStyle='--',Color='r')
legend('SOC Var ObjFun 1','SOC ObjFun 2','Batas Bawah SOC','Batas Atas SOC')
hold off
%%
figure
stairs(PfcVAR1,LineWidth=1.0)
ylim([0 35])
xlim([0 5473])
ylabel('Daya Keluaran Pfc (kW)')
xlabel('Waktu (s)')
grid on
hold on
stairs(PfcVAR2,LineWidth=1.0)
yline(1,LineWidth=1.5,LineStyle='--',Color='r')
yline(30,LineWidth=1.5,LineStyle='--',Color='r')
legend('Pfc Var 1','Pfc Var 2','Batas Bawah Pfc','Batas Atas Pfc')
hold off
%%
plot(ErrVAR1*100)
ylim([0 100])
xlim([0 5473])
ylabel('State Of Charge(%)')
xlabel('Waktu (s)')

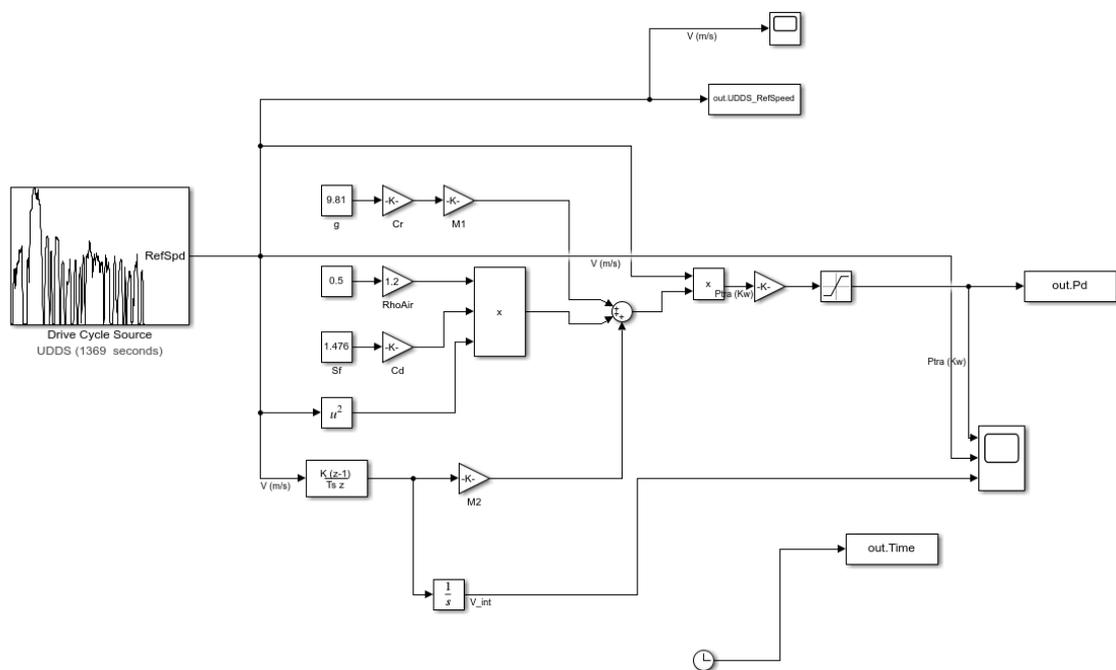
```

```

grid on
hold on
plot(ErrVAR2*100)
yline(0,LineWidth=1.5,LineStyle='--',Color='r')
legend('SOC Var 1','SOC Var 2','Batas Charging/Discharging')
hold off
%%

```

Diagram Blok Simulink – Perhitungan Daya Traksi



BIODATA PENULIS



Muhammad Rasyendria Rangga Bijana, Lahir dan besar di Gresik pada tanggal 11 Maret 2000. Penulis merupakan putra tunggal. Penulis menempuh pendidikan di SDN Tlogopatut 2 Gresik 2008, Kemudian dilanjutkan studi ke SMPN 1 Gresik pada 2013, Kemudian dilanjutkan ke SMAN 1 Gresik pada tahun 2015. Pada tahun 2018 penulis melanjutkan pendidikan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya dengan jurusan Teknik Elektro. Kosentrasi yang diambil penulis merupakan Teknik Sistem Pengaturan, dimana penulis merasakan ketertarikan dengan Teknik Sistem Pengaturan dalam menyelesaikan permasalahan sehari-hari serta pada karakteristik dari sistem dinamik. Semasa perkuliahan, Penulis mengembangkan diri pada Tim riset Chem-E Car ITS, Spektronics, Selama tiga tahun. Di Tim Spektronics, Penulis bersama dengan tim mengikuti dan menjuarai beberapa kompetisi baik nasional maupun internasional. Selain itu, Penulis juga berkontribusi pada beberapa acara yang diselenggarakan oleh Himpunan Mahasiswa Elektro ITS (HIMATEKTRO) dan Badan Eksekutif Mahasiswa ITS (BEM-ITS) seperti Lomba Robot Nasional (BARONAS) dan INI LHO ITS. Penulis memiliki minat dan ketertarikan yang tinggi terhadap riset dan perkembangan keilmuan yang berkaitan dengan Teknik Elektro, Khususnya pada kosentrasi Teknik Sistem Pengaturan. Bila terdapat saran, masukan, maupun hal lain yang ingin dikomunikasikan terhadap penulis, Penulis dapat dihubungi melalui *e-mail* rasyendriarb@gmail.com.

