

Optimasi Kinerja *Fuel Cell* pada Sistem Kereta Hibrida menggunakan Metode *External Energy Maximization Strategy*

AGUNG RAMADHAN¹, *ARIES SUBIANTORO¹, JUAN THOMAS WIJAYA¹,
SYAFIIE SYAMAUN²

¹Departemen Teknik Elektro, Universitas Indonesia, Indonesia

²Department of Chemical and Materials Engineering, King AbdulAziz University, Kingdom of Saudi Arabia

Email: agung.ramadhan@ui.ac.id, *aries.subiantoro@ui.ac.id

Received 13 Maret 2023 | *Revised* 4 April 2023 | *Accepted* 11 April 2023

ABSTRAK

Dalam sistem sumber daya hibrida, strategi manajemen energi (EMS) pada dasarnya hanya mengatur pembagian daya tanpa mempertimbangkan optimalisasi kinerja sistem. Oleh karena itu pada penelitian ini dirancang EMS berbasis optimasi pada kereta hibrida dengan sumber daya fuel cell (FC), baterai dan superkapasitor dengan metode External Energy Maximization Strategy (EEMS). Strategi ini dirancang untuk memaksimalkan energi yang disuplai oleh baterai dan superkapasitor melalui state of charge (SOC) baterai dan tegangan DC bus sehingga dapat meminimalisasi konsumsi hidrogen dan meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa strategi ini mampu memaksimalkan kinerja baterai dan superkapasitor. Efisiensi sistem berhasil ditingkatkan menjadi 86,37% dan konsumsi hidrogen berhasil dikurangi 10% dari strategi pembandingnya. State of charge (SOC) baterai juga mampu dipertahankan untuk tetap dalam rentang batas yang telah ditentukan.

Kata kunci: EMS, kereta hibrida, fuel cell, baterai, superkapasitor, optimasi

ABSTRACT

The energy management strategy (EMS) in a hybrid system essentially only regulates power sharing without considering system performance optimization. This study developed an EMS based on the optimization of hybrid train with fuel cell (FC), battery, and supercapacitor power sources using the External Energy Maximization Strategy (EEMS). This strategy is intended to maximize the energy supplied by battery and supercapacitor through the SOC of the battery and DC bus voltage, thereby reducing hydrogen consumption and increasing overall system efficiency. The simulation results show that this strategy can maximize battery and supercapacitor. The system efficiency was successfully increased to 86.37%, and the hydrogen consumption was reduced by 10% when compared to the comparison strategy. The SOC of the battery can also be kept within a certain range.

Keywords: EMS, hybrid train, fuel cell, battery, supercapacitor, optimization

1. PENDAHULUAN

Pengembangan tentang kendaraan hibrida terus dilakukan seiring dengan isu perubahan iklim dan kebutuhan akan sistem transportasi yang rendah emisi. Pada sektor transportasi umum, kereta memiliki beberapa kelebihan dibandingkan kendaraan umum lainnya dalam hal peningkatan kenyamanan, ramah lingkungan dan masa pakai yang lebih lama (**Zhang, dkk, 2020**). Salah satu teknologi sumber daya tanpa pembakaran dan menghasilkan *zero harmful emission* yang menjanjikan yaitu menggunakan *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)* karena terbukti lebih efisien dan ramah lingkungan dibandingkan dengan *Internal Combustion Engine (ICE)* pada aplikasi transportasi (**Lü, dkk, 2018**). Kereta menjadi pilihan terbaik untuk implementasi *Fuel Cell (FC)* karena: (1) Ruang yang luas untuk tanki *fuel cell* serta komponen *powertrain*, dan (2) jumlah stasiun pengisian hydrogen dapat dibatasi hanya disepanjang jalur kereta api (**Fragiacomo, dkk, 2020**)(**Fragiacomo & Genovese, 2019**).

FC seringkali digunakan sebagai sistem propulsi hibrida bersamaan dengan baterai dan/ atau superkapasitor sebagai sumber energi pendampingnya karena FC memiliki respon waktu-tunda terhadap fluktuasi *power demand* dan biaya operasional yang mahal (**Fernandez, dkk, 2010**). Permasalahan yang terjadi dalam sistem propulsi hibrida tersebut yaitu pengaturan kordinasi sumber daya harus dirancang sedemikian optimal agar dapat memenuhi kebutuhan daya beban dan juga menjaga penggunaan FC maupun keseluruhan sistem agar tetap efisien. Maka dari itu diperlukan *Energy Management System (EMS)* untuk mengatur kordinasi sumber daya tersebut (**Zhang, dkk, 2020**). EMS dirancang untuk mencapai konsumsi hydrogen yang optimal dan memastikan setiap sumber daya beroperasi pada rentang batasnya. Selain itu, EMS juga diharapkan dapat membuat siklus hidup dari *hybrid power system* menjadi lebih maksimal (**Motapon, dkk, 2014**).

Beberapa penelitian tentang EMS pada kereta dengan sistem sumber daya hibrida telah dilakukan dalam beberapa tahun terakhir. Terdapat dua dasar strategi dalam penerapan EMS untuk sistem FC hibrida, yaitu metode berbasis aturan dan metode berbasis optimasi (**Kang, dkk, 2020**). Metode berbasis aturan merupakan strategi yang paling umum digunakan untuk EMS pada kendaraan hibrida karena mudah diimplementasikan berdasarkan inteligensi manusia, *heuristic* atau model matematis tanpa harus mengetahui siklus kemudi terlebih dahulu. Strategi diterapkan berdasarkan tabel kebenaran atau aturan untuk pengambilan keputusan terhadap input yang diberikan (**Ramadan, dkk, 2017**). Smith, dkk, (**Smith, dkk, 2019**) mendesain strategi berbasis aturan *fuzzy* untuk manajemen energi pada *parallel Mild-Hybrid Electric Bus*. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode tersebut mampu mereduksi konsumsi bahan bakar diesel. Strategi berbasis aturan lainnya yaitu *state machine control* diterapkan oleh Garcia, dkk, (**Garcia, dkk, 2010**) dan Han, dkk, (**Han, dkk, 2016**) sebagai EMS untuk kereta hibrida. Strategi tersebut dirancang untuk meminimalisir perubahan yang kontinyu pada daya referensi FC dengan cara menentukan *state-state* operasi pada FC, baterai dan beban. Namun metode berbasis aturan tidak menjamin performa yang optimal. Maka dari itu Penelitian metode berbasis optimasi juga telah banyak dilakukan untuk menentukan distribusi daya berdasarkan *predefined transient cost function* (**Peng, dkk, 2019**). *Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS)* merupakan strategi optimisasi yang sering digunakan, yang bertujuan untuk merepresentasikan energi Baterai/ Superkapasitor setara dengan konsumsi hydrogen pada FC menggunakan *equivalent factor* (**Zhang dkk, 2017**).

Permasalahan yang terjadi adalah metode-metode EMS tersebut diatas masih dianggap belum mampu menghasilkan solusi *near-optimal* pada masing-masing sumber daya untuk menekan konsumsi bahan bakar dan meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan, bahkan pada

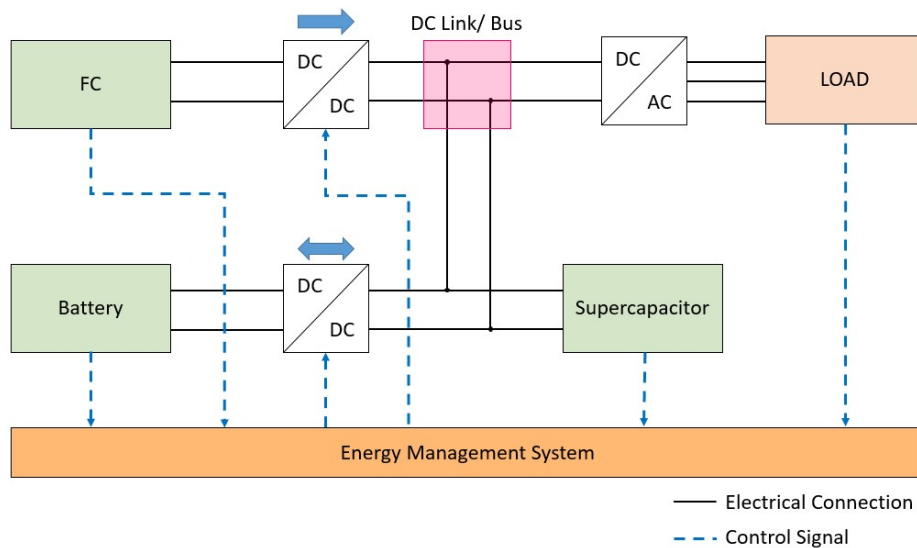
metode optimasi seperti *Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS)* (Ali, dkk, 2018).

Maka dari itu, kontribusi utama dari artikel ini adalah mengajukan optimasi EMS untuk mengurangi konsumsi hidrogen dengan cara memaksimalkan performa baterai dan superkapasitor serta meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem. Pada bidang manajemen energi, menurut *No Free Lunch Theorem* (Wolpert, dkk, 1997) dan Fathy, dkk, (Fathy, dkk, 2019), tidak ada *optimizer* yang dapat menyelesaikan semua permasalahan optimasi. Maka dari itu selalu ada peluang untuk mengembangkan *optimizer* baru sesuai permasalahan optimasinya. Metodologi penelitian pada artikel ini terdiri dari (1) Perancangan sistem dinamik kereta hibrida, (2) Estimasi Siklus kemudi dan Kebutuhan Daya Kereta, (3) Perancangan strategi manajemen energi (EMS), dan (4) pengujian konsumsi hidrogen dan efisiensi keseluruhan sistem.

Motapon, dkk, (Motapon, dkk, 2014) pada artikelnya memperkenalkan strategi optimasi yang disebut *External Energy Maximization Strategy (EEMS)* untuk *Fuel Cell Hybrid Emergency Power System* pada *More Electric Aircraft*. Tidak seperti ECMS yang membutuhkan evaluasi dari *equivalent fuel consumption*, EEMS meminimalisasi konsumsi hidrogen dengan cara memaksimalkan energi yang dihasilkan oleh baterai dan superkapasitor pada rentang batas operasinya. Hal tersebut membuat penulis mengadaptasi strategi tersebut untuk diaplikasikan pada sistem kereta hibrida ini. Strategi EEMS akan dibandingkan dengan strategi ECMS melalui simulasi dan eksperimen model kereta hibrida yang dirancang menggunakan perangkat lunak *MATLAB* dan *SIMULINK*.

2. METODE PENELITIAN

Kendaraan elektrik hibrida terdiri dari konfigurasi beberapa sumber daya dan komponen yang di kombinasikan untuk menyediakan daya yang dibutuhkan oleh beban. Konfigurasi sumber daya dan komponen yang dirancang pada penelitian ini terdiri dari FC, baterai, superkapasitor, *DC/DC converter*, *DC/AC converter*, beban dan EMS, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Konfigurasi kereta hibrida

FC merupakan sumber daya utama kereta yang dirancang untuk menghasilkan daya sebesar 71,4 kW. Baterai dirancang untuk menghasilkan daya sebesar 33,2 kW untuk memenuhi

kebutuhan daya kereta pada saat *peak demand* secara terus-menerus. Sedangkan superkapasitor digunakan untuk memenuhi kebutuhan daya pada saat *peak demand transient* yang membutuhkan respon cepat. FC terhubung dengan *DC/DC converter* satu arah tipe *boost* untuk melakukan *discharge*. Baterai dan superkapasitor terhubung dengan *DC/DC converter* dua arah yaitu tipe *buck* dan *boost* untuk melakukan *charge* dan *discharge*. Semua *DC/DC converter* terhubung ke beban melalui *DC/AC converter*. Tegangan *DC bus* pada sistem ini dijaga untuk tetap sebesar 600 V, dengan batas bawah 500 V dan batas atas 645 V.

2.1 Dinamika Longitudinal Kereta

Karakteristik pergerakan kereta dimodelkan menggunakan sistem dinamika longitudinalnya. Berdasarkan hukum fundamental dinamika, penjumlahan dari aksi gaya pada kereta sama dengan perkalian dari massa kereta dan percepatannya (Arikan, dkk, 2019), seperti pada Persamaan (1).

$$F_T - (F_R + F_g + F_c + F_{brakedisk}) = m_v \cdot a \quad (1)$$

Dimana F_T merupakan gaya traksi, m_v merupakan total massa kereta, dan a merupakan percepatan kereta. Berdasarkan profil kecepatan dan geometri lintasan kereta. Sedangkan F_R , F_g , F_c dan $F_{brakedisk}$ secara berurutan merupakan *running resistance*, *grade resistance*, *curve resistance*, dan *brakedisk resistance*. Gaya resistif tersebut merupakan gaya hambat yang bekerja pada kereta yang masing-masing diformulasikan pada Persamaan berikut:

$$F_R = a + b \cdot v + c \cdot v^2 \quad (2)$$

$$F_g = m_v \cdot g \cdot \sin(\theta) = m_v \cdot g \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (3)$$

$$F_c = \begin{cases} m_v \cdot 0.03, & R_c < 272 \text{ m} \\ \frac{m_v \cdot 6.5}{R_c - 55}, & 272 \text{ m} \leq R_c < 2000 \text{ m} \\ 0 & R_c \geq 2000 \text{ m} \end{cases} \quad (4)$$

$$F_{brakedisk} = n_{bs} \left(4.33 \cdot \frac{v}{v_0} + 3.16 \cdot \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \right) \quad (5)$$

Tipe kereta yang digunakan untuk memodelkan dinamika longitudinal dan estimasi kebutuhan daya kereta yaitu GTW 2/6 DMU yang dioperasikan oleh RU Arriva seperti yang dibahas oleh Kapetanovic, dkk, (Kapetanović, dkk, 2021) dalam artikelnya. Kereta ini digunakan untuk melayani rute perjalanan Leeuwarden-Groningen. Parameter kereta ini ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter kereta Leeuwarden-Groningen

Parameter	Simbol	Nilai	Unit
Massa Bersih Kereta	m_{tare}	70.4	Ton
Massa Penumpang kereta	m_{pass}	3.08	Ton
Koefisien massa berputar	λ	0.05	-
Konstanta Davis	a	1001	N
Koefisien Davis (linear)	b	22.3	N.km/jam
Koefisien Davis (quadratic)	c	0.1	N.(km/jam) ²
Percepatan gravitasi	g	9.81	m/s ²
Jumlah brakepads pada kereta	n_{bs}	24	-
Konstanta kecepatan	v_0	100	Km/jam

2.2 Sistem Fuel Cell (FC)

Sistem FC yang paling banyak digunakan pada kendaraan hibrida adalah *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC). Karena tipe ini dapat beroperasi pada suhu yang rendah (berkisar antara -20 hingga 100°C) sehingga tidak diperlukan waktu yang lama untuk beroperasi dari posisi *idle*. Komponen FC sudah tersedia dalam bentuk blok pada *SimScape*. Model matematis FC yang digunakan dalam penelitian ini merupakan model yang diadaptasi dari Motapon, dkk, **(Motapon, dkk, 2014)**

Tegangan FC dihasilkan melalui Termodinamika reaktan elektro-kimia yang didapatkan dari Persamaan *Nernst* berikut:

$$E_n = 1.229 + (T - 298) \cdot \frac{-44.43}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left(P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}} \right) \quad (6)$$

Dimana P_{H_2} dan P_{O_2} merupakan tekanan parsial hidrogen dan oksigen (atm), T merupakan suhu operasi (K), F dan R merupakan konstanta *Faraday* (A s/mol) dan konstanta gas ideal (J/mol K).

Tekanan parsial ditentukan berdasarkan konversi reaktan sebagai berikut:

$$P_{H_2} = (1 - U_{f_{H_2}})x\%P_{fuel} \quad (7)$$

$$P_{O_2} = (1 - U_{f_{O_2}})y\%P_{air} \quad (8)$$

Dimana $U_{f_{H_2}}$ dan $U_{f_{O_2}}$ adalah reaktan hidrogen dan oksigen, P_{fuel} dan P_{air} merupakan tekanan suplai dari *fuel* dan udara (atm), x dan y adalah persentase hidrogen dan oksigen pada *fuel* dan udara (%). Parameter FC yang dipakai pada simulasi menggunakan modul FC *PowerCell S3 MS-100* dengan parameter pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Fuel Cell

Parameter	Nilai	Unit
Tegangan saat OA dan 1A	[500, 497]	V
Tegangan dan arus nominal [I_{nom} , V_{nom}]	[240, 350]	[A, V]
Tegangan dan arus nominal [I_{end} , V_{end}]	[300, 332]	[A, V]
Jumlah <i>cell</i>	500	-
Effisiensi <i>stack</i>	55	%
Suhu operasi	80	°C
Nominal <i>air flow rate</i>	4500	l/min
Tekanan suplai nominal [<i>Fuel</i> , <i>Air</i>]	[2.6, 1]	bar
Komposisi nominal [H_2 , O_2 , H_2O (<i>Air</i>)]	[99.95, 21, 1]	%

2.2 Baterai

Seperti Model FC, model baterai yang dipakai juga menggunakan blok yang telah tersedia pada *SimScape* dengan jenis baterai *Li-Ion*. Tegangan baterai diformulasikan pada Persamaan (9) berikut:

$$V_{batt} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it - R_b \cdot i_b + A_b \cdot e^{-B \cdot it} - K \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* \quad (9)$$

Dimana E_0 adalah tegangan konstan baterai (V), K adalah konstanta tegangan (V/Ah), Q adalah kapasitas baterai (Ah), i^* adalah arus baterai yang di filter, it adalah pengisian baterai sebenarnya (Ah), A_b adalah amplitudo zona eksponensial (V), B adalah *inverse* konstanta

waktu zona eksponensial $((Ah)-1)$, dan R_b adalah resistansi internal baterai (Ω). Persamaan (9) juga dinyatakan sebagai tegangan polarisasi, dengan $K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it$ disebut juga resistansi polarisasi (Pol_{res}). Ketika pengisian, tegangan baterai akan meningkat secara tiba-tiba setelah baterai telah diisi hingga penuh. Ketika pengisian baterai, resistansi polarisasi dirumuskan dengan Persamaan (10) berikut:

$$Pol_{res} = K \cdot \frac{Q}{it - 0.1 \cdot Q} \quad (10)$$

Jumlah *cell* baterai secara seri adalah 400 *cell*, sedangkan *stack* secara paralel adalah 20 modul. Parameter yang digunakan untuk model baterai dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter Baterai

Parameter	Persamaan	Nilai	Unit
Tegangan nominal	$1.18 \cdot n_{bat_{ser}}$	472	V
<i>Rated capacity</i>	$6.5 \cdot n_{bat_{par}}$	130	Ah
<i>State of charge</i> (SOC) awal	-	65	%
Respon waktu baterai	-	20	S
Kapasitas maksimum	$7 \cdot n_{bat_{par}}$	140	Ah
Tegangan <i>cut-off</i>	-	320	V
Tegangan <i>full charge</i>	$1.39 \cdot n_{bat_{ser}}$	556	V
Arus <i>discharge</i> nominal	$1.3 \cdot n_{bat_{par}}$	26	A
Resistansi internal	$0.002 \cdot n_{bat_{ser}}/n_{bat_{par}}$	0.04	Ω
Kapasitas saat tegangan nominal	$6.25 \cdot n_{bat_{par}}$	125	Ah
Zona eksponensial [V, I]	$[1.28 \cdot n_{bat_{ser}}, 1.13 \cdot n_{bat_{par}}]$	[512, 22.6]	[V, A]

2.2 Superkapasitor

Model superkapasitor yang dipakai juga merupakan model superkapasitor yang tersedia pada *SimScape*. Tegangan keluaran superkapasitor diformulasikan dengan:

$$V_{sc} = \frac{Q_T}{C_T} - R_{SC} \cdot i_{sc} \quad (11)$$

$$Q_T = N_{SC_{par}} \cdot Q_c = \int i_{sc} dt \quad (12)$$

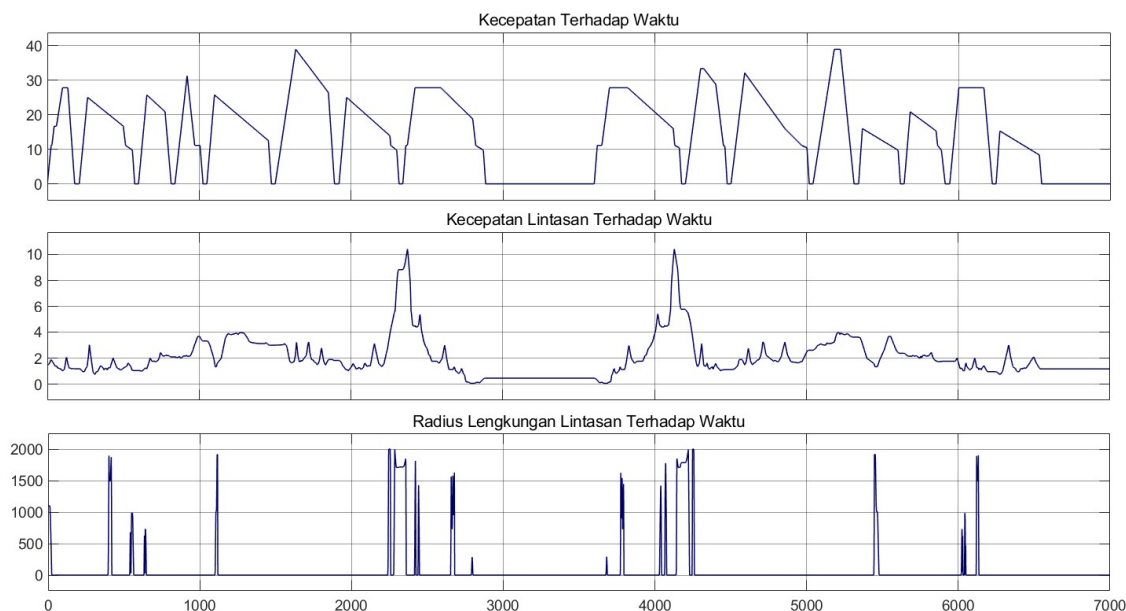
Dimana Q_T adalah muatan listrik total (C), R_{SC} adalah tahanan ekuivalen superkapasitor, dan I_{sc} adalah arus superkapasitor. Parameter yang digunakan untuk model superkapasitor diambil dari parameter modul superkapasitor NESSCAP 88 F dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Parameter Superkapasitor

Parameter	Nilai	Unit
<i>Rated capacitance</i>	15.6	F
Tahanan ekuivalen superkapasitor	0.3	Ω
Tegangan <i>rated</i>	660	V
Jumlah <i>cell</i> secara seri	350	-
Jumlah modul secara parallel	1	-
Tegangan awal	600	V
Suhu operasi	25	$^{\circ}\text{C}$
Jumlah lapisan elektroda	6	-
Jari-jari molekul	0.4×10^{-9}	m

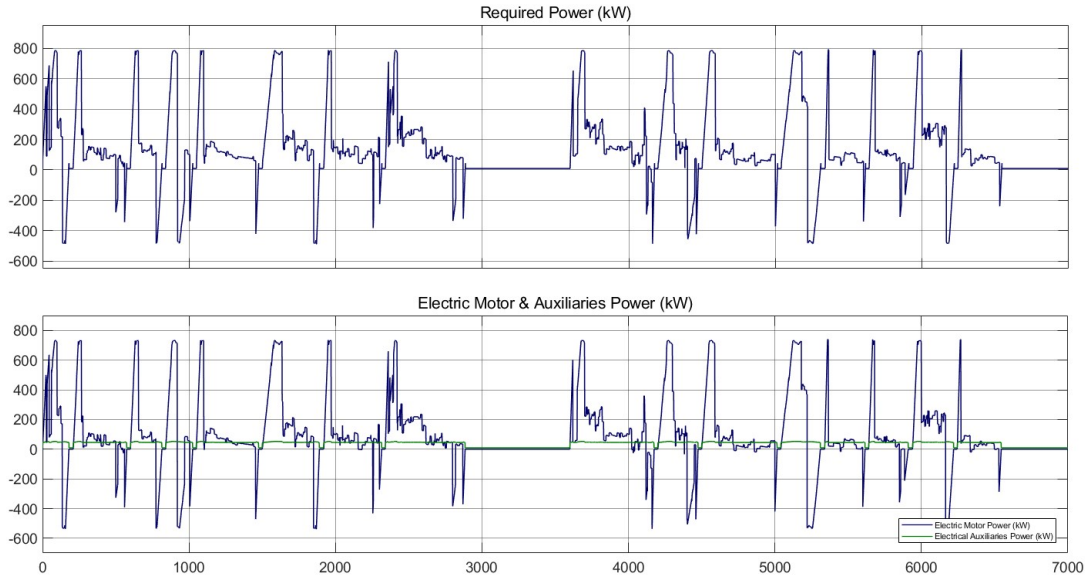
2.2 Siklus Kemudi dan Estimasi Kebutuhan Daya Kereta

Siklus kemudi digunakan untuk menilai performa kereta dan mengidentifikasi kebutuhan bahan bakar. Untuk mengestimasi faktor-faktor yang mempengaruhi dinamika longitudinal kereta dan mendapatkan estimasi kebutuhan daya kereta, diperlukan model geometri lintasan seperti ketinggian, radius lengkungan lintasan dan juga siklus kemudi kereta yang berupa profil kecepatan kereta terhadap waktu. Siklus kemudi kereta dan geometri lintasan yang diadaptasi dari artikel Kapetanovic, dkk, **(Kapetanović, dkk, 2021)** dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Siklus kemudi dan geometri lintasan kereta

Selanjutnya kebutuhan daya kereta dapat diestimasi berdasarkan siklus kemudi dan parameter geometri tersebut. Daya beban kereta terdiri dari beban elektrik motor dan beban tambahan dari penggunaan alat elektronik seperti lampu, *Air Conditioner*, dan perangkat elektronik lainnya. Estimasi kebutuhan daya kereta pada jalur lintasan Groningen-Leeuwarden dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Estimasi kebutuhan daya kereta

Dapat dilihat pada grafik estimasi kebutuhan daya kereta tersebut bahwa daya maksimum yang dibutuhkan kereta adalah sebesar 800 kW. Namun karena sumber daya yang digunakan hanya mampu menghasilkan daya maksimum sebesar 100 kW, maka nilai estimasi kebutuhan daya yang dipakai merupakan 1/10 dari nilai estimasi kebutuhan daya yang sebenarnya, sehingga daya maksimum kebutuhan daya kereta pada simulasi ini adalah sebesar 80 kW.

2.3 Equivalent Consumption Management Strategy (ECMS)

Tujuan dari ECMS adalah mencapai konsumsi hidrogen minimum dengan cara meminimalisasi hidrogen yang dikonsumsi oleh FC dan meminimalisasi persamaan *fuel* untuk menjaga SOC baterai. ECMS diformulasikan untuk menentukan solusi optimal dari:

$$x = [P_{fc}, \alpha_p, P_{batt}]$$

Untuk meminimalisasi fungsi biaya berikut:

$$F = [P_{fc} + \alpha_p \cdot P_{batt}] \cdot \Delta T \quad (23)$$

Pada pertidaksamaan:

$$P_{load} = P_{fc} + P_{batt} \quad (34)$$

$$\alpha_p = 1 - 2\mu \frac{(SOC - 0.5(SOC_{max} + SOC_{min}))}{SOC_{max} + SOC_{min}} \quad (45)$$

Dengan batasan kondisi:

$$P_{fc_min} \leq P_{fc} \leq P_{fc_max}$$

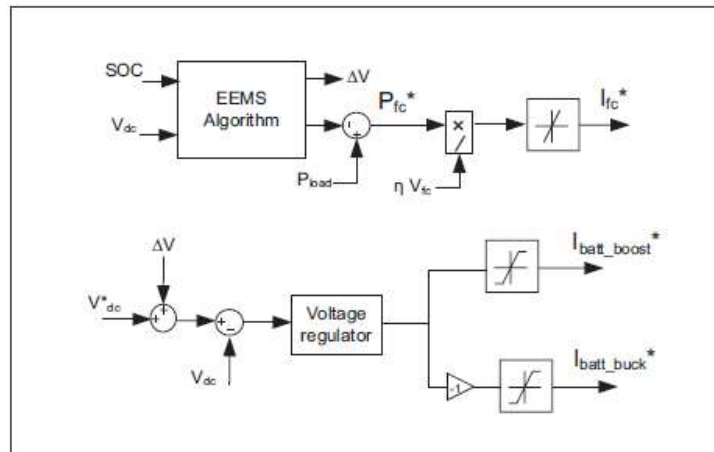
$$P_{batt_min} \leq P_{batt} \leq P_{batt_max}$$

$$0 \leq \alpha_p \leq 100$$

Dimana P_{fc} , P_{batt} , dan P_{load} merupakan FC, baterai dan kebutuhan daya beban, α_p adalah koefisien penalti, T adalah waktu cuplik. Kemudian P_{fc_min} dan P_{fc_max} , P_{batt_min} dan P_{batt_max} , SOC_{min} dan SOC_{max} merupakan batasan daya FC, daya Baterai, dan SOC baterai. Sedangkan μ adalah *balance coefficient* dari SOC.

2.4 Usulan Strategi Manajemen Energi

Strategi EMS yang diusulkan pada penelitian ini adalah *External Energy Management Strategy (EEMS)* yang diperkenalkan oleh Motapon, dkk, dalam artikelnya **(Motapon, dkk, 2014)** tentang manajemen energi pada *Aircraft system*. Konsep dasar dari EEMS adalah mereduksi konsumsi hidrogen dengan cara memaksimalkan suplai kebutuhan oleh baterai dan superkapasitor dengan memenuhi batasan yang telah ditentukan. Kelebihan EEMS dibandingkan metode optimasi lainnya yaitu formulasi yang relatif sederhana, karena EEMS hanya membutuhkan fungsi biaya dari baterai dan superkapasitor dan tidak membutuhkan perhitungan energi baterai secara empiris. Seperti yang terlihat pada Gambar 4, input EEMS yaitu *state of charge* (SOC) baterai dan tegangan *DC bus*. Output dari EEMS yaitu referensi daya baterai dan tegangan *charge/ discharge* superkapasitor (ΔV). Daya dari baterai dibandingkan dengan kebutuhan daya beban untuk mengestimasi referensi daya FC melalui arusnya (I_{FC}^*). Kemudian jumlah tegangan superkapasitor dan referensi tegangan pada *DC bus* (V_{dc_ref}) akan dibandingkan dengan tegangan aktual pada *DC bus* untuk menentukan *state* superkapasitor (*charge/ discharge*).



Gambar 4. Konfigurasi EEMS (Motapon, dkk, 2014)

Permasalahan optimasi EEMS diformulasikan untuk menemukan solusi optimal dari:

$$x = [P_{batt}, \Delta V]$$

Fungsi objektif yang akan dimaksimalisasi adalah energi yang disuplai oleh baterai dan superkapasitor selama interval waktu yang ditentukan, seperti pada Persamaan (16).

$$F = -\left(P_{batt} \cdot \Delta T + \frac{1}{2} C_r \cdot \Delta V^2\right) \quad (16)$$

Terhadap Pertidaksamaan (17) berikut:

$$P_{batt} \Delta T \leq (SOC - SOC^{min}) V_{batt} Q \quad (17)$$

Dengan batasan kondisi:

$$P_{batt_min} \leq P_{batt} \leq P_{batt_max}$$

$$V_{dc_min} - V_{dc} \leq \Delta V \leq V_{dc_max} - V_{dc}$$

Dimana P_{batt} merupakan daya yang dihasilkan baterai selama waktu cuplik ΔT , C_r merupakan kapasitansi superkapasitor, V_{dc_min} dan V_{dc_max} merupakan batasan dari tegangan *DC bus*, V_{batt} merupakan tegangan baterai dan Q merupakan kapasitas baterai.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi dan pengujian dilakukan untuk melihat performa distribusi daya pada strategi EEMS dibandingkan dengan ECMS untuk melihat sejauh mana EEMS dapat mengoptimalkan sistem. Semua pengujian dilakukan dengan menggunakan lingkungan simulasi *MATLAB* dan *SIMULINK*, dengan modul *SimScape* untuk masing-masing komponen sumber daya yang digunakan.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah merancang strategi manajemen energi untuk mengurangi konsumsi hidrogen dan meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem terhadap *DC/DC converter* pada setiap sumber daya. Terdapat faktor yang membuat daya yang dihasilkan oleh sumber daya tidak maksimal, seperti kehilangan energi pada saat proses konversi, saat *charge* dan *discharge* baterai, dan atau kehilangan energi karena resistansi maupun akibat panas yang dihasilkan. Konsumsi hidrogen dan efisiensi keseluruhan sistem dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$ConsH2 = \frac{N}{F} \int_0^{7000} i_{fc} dt \quad (58)$$

$$efficiency = \frac{P_{load}}{P_{fc}^{in} + P_{batt}^{in} + P_{cap}^{in}} \quad (69)$$

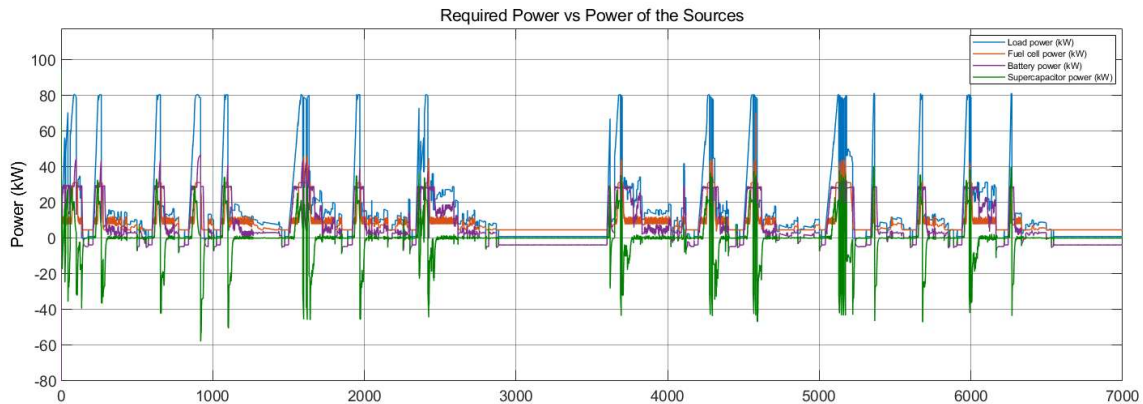
Dimana F merupakan konstanta Faraday (A s/mol), P_{fc}^{in} , P_{batt}^{in} dan P_{cap}^{in} merupakan daya input FC, Baterai, dan superkapasitor ke *DC/DC converter*.

Simulasi dilakukan dengan inialisasi SOC sebesar 95%, SOC minimum sebesar 60%, suhu baterai sebesar 30 °C dan tegangan *DC bus* sebesar 600 V. Distribusi daya pada strategi ECMS dan EEMS ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5. Distribusi daya strategi ECMS

Optimasi Kinerja Fuel Cell pada Sistem Kereta Fuel Cell/ Baterai/ Superkapasitor Menggunakan Strategi Maksimalisasi Energi Eksternal



Gambar 6. Distribusi daya strategi EEMS

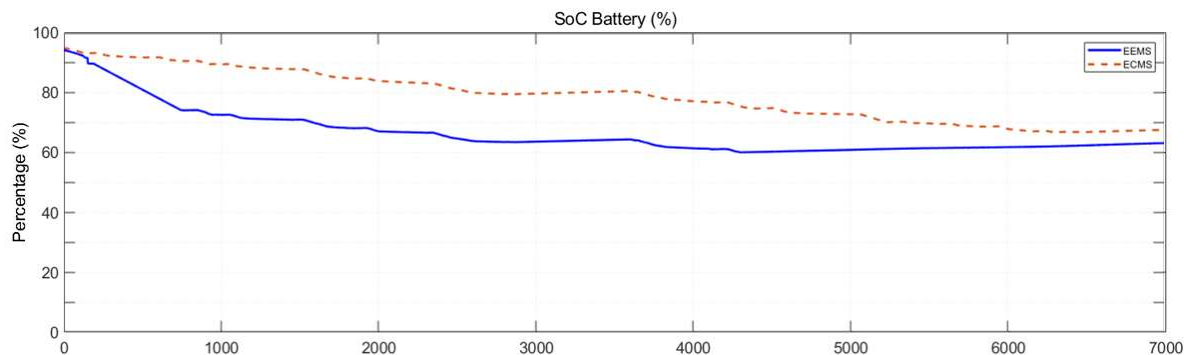
Pada strategi ECMS dan EEMS, referensi daya FC diatur berdasarkan profil daya beban dan SOC baterai. Pada Gambar 5 dan 6 dapat disimpulkan bahwa kedua strategi mampu mengatur distribusi daya sesuai dengan kebutuhan beban. Pada saat beban tidak membutuhkan daya, maka FC akan menghasilkan daya minimum sebesar 5 kW, daya ini digunakan untuk mengisi baterai dan superkapasitor. Daya negatif pada baterai dan superkapasitor mengindikasikan kedua sumber daya tersebut dalam kondisi *charging*.

Untuk melihat sejauh mana penggunaan baterai dimaksimalkan, maka dilakukan pengamatan pada suplai daya yang dihasilkan oleh baterai dan juga rentang kerja SOC pada satu siklus perjalanan. Perbandingan besaran suplai daya baterai antara kedua strategi ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Perbandingan daya yang dihasilkan oleh baterai

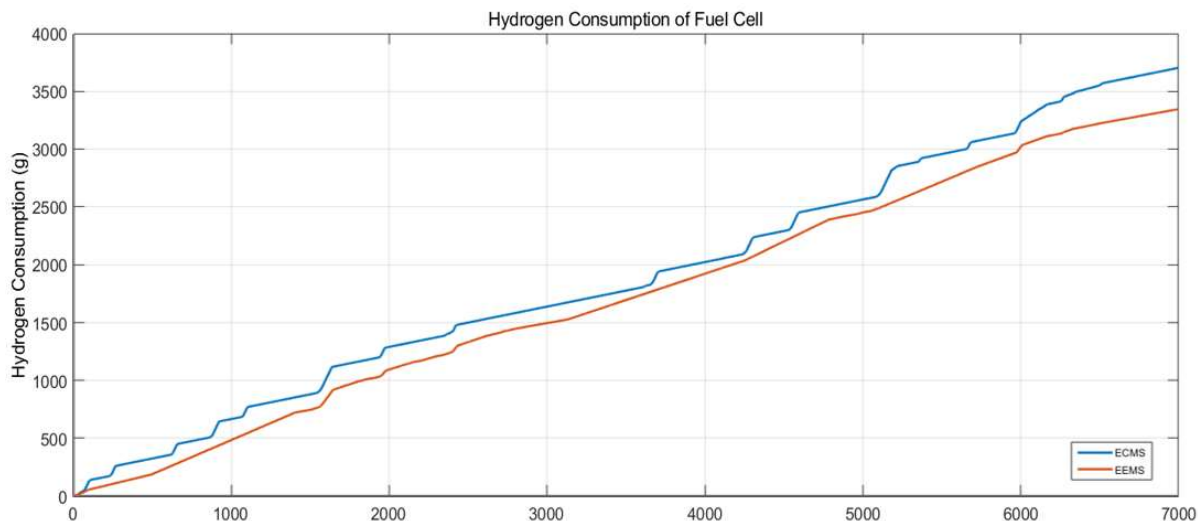
Dapat dilihat pada Gambar 7, pada saat siklus awal kereta berjalan hingga detik ke 1000, EEMS memaksimalkan penggunaan baterai untuk suplai daya ke beban. Kondisi ini terjadi karena SOC baterai dalam kondisi maksimalnya, oleh karena itu baterai akan mengambil alih sebagian besar suplai daya ke beban hingga mencapai batas minimum SOC nya. Kemudian perbandingan SOC baterai pada satu siklus perjalanan kereta dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 8. Perbandingan *State of the Charge* (SOC) Baterai

Pada strategi ECMS, jika daya beban kurang dari daya maksimum FC, maka selisih daya FC dengan daya beban akan dipakai untuk melakukan pengisian baterai. Pengisian baterai ini akan dilakukan meskipun SOC baterai masih diatas nilai minimumnya. Superkapasitor juga akan sering dalam kondisi *charge* untuk membuat *DC bus* menghasilkan arus negatif untuk mengisi baterai. Terlihat pada Gambar 8, SOC baterai masih berada pada batas kerja yang ditentukan, dengan SOC awal 95%, SOC baterai pada akhir siklus perjalanan kereta adalah sebesar 67,62%.

Sedangkan pada strategi EEMS, dengan SOC baterai pada awal siklus sama dengan ECMS, baterai berada pada kondisi *discharge* dan mengambil alih sebagian besar suplai daya ke beban hingga SOC mencapai batas minimumnya, yaitu 60%. Superkapasitor juga dalam kondisi *discharge* untuk membantu baterai mensuplai daya. Kemudian setelah baterai mencapai SOC minimumnya, FC mengambil alih suplai daya ke beban sekaligus melakukan pengisian baterai sehingga baterai kembali dalam kondisi *charge*. Sama seperti strategi ECMS, SOC baterai juga masih pada batas kerja yang ditentukan. Namun pada strategi EEMS, energi baterai yang terpakai lebih banyak, dengan SOC baterai pada akhir siklus perjalanan kereta adalah sebesar 63,22%. Dengan begitu, penggunaan FC secara otomatis berkurang, begitu pula dengan konsumsi hidrogennya. Perbandingan konsumsi hidrogen antar kedua strategi dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Perbandingan Konsumsi Hidrogen

Dapat dilihat pada Gambar 9, strategi EEMS terbukti mampu membuat konsumsi hidrogen FC berkurang dibandingkan dengan strategi ECMS. Hal ini disebabkan oleh penggunaan FC yang lebih sedikit karena dilakukan maksimalisasi penggunaan energi baterai pada EEMS. Perbandingan performa secara keseluruhan antara ECMS dan EEMS dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan Performa ECMS dan EEMS

Parameter	ECMS	EEMS	Unit
Konsumsi hidrogen	3703	3346	g
Rentang SOC baterai	95 – 67,62	95 – 63,22	%
Efisiensi sistem	84,86	86,37	%

Dapat dilihat pada Tabel 5 bahwa strategi EEMS mampu mengurangi 10% dari konsumsi hidrogen pada strategi ECMS menjadi sebesar 3346 g. Selain itu, rentang SOC baterai pada strategi EEMS juga terbukti masih mampu dipertahankan agar tetap dalam batas SOC yang telah ditentukan. Setelah dilakukan perhitungan efisiensi keseluruhan sistem, EEMS terbukti berhasil membuat sistem menjadi lebih efisien, yaitu sebesar 86,37% jika dibandingkan dengan ECMS sebesar 84,86%.

4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah dilakukan perancangan strategi optimalisasi dengan metode maksimalisasi energi eksternal (EEMS). Pada saat pengujian, EEMS dibandingkan dengan strategi optimalisasi lainnya yaitu *Equivalent Consumption Management Strategy* (ECMS) untuk melihat peningkatan performa sistem. Performa yang dibandingkan pada penelitian ini yaitu konsumsi hidrogen pada FC dan efisiensi keseluruhan sistem. Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa strategi manajemen energi yang diusulkan yaitu EEMS berhasil mendapatkan solusi optimal untuk konsumsi hidrogen, yaitu sebesar 3346 g dan meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem menjadi sebesar 86,37 %. Hasil tersebut lebih baik jika dibandingkan dengan strategi ECMS yang menghasilkan konsumsi hidrogen sebesar 3703 g dan efisiensi keseluruhan sistem sebesar 84,86%. Selain itu, formulasi EEMS lebih sederhana dan lebih tahan terhadap perubahan beban yang fluktuatif. EEMS juga tetap berhasil menjaga SOC baterai dan tegangan *DC bus* tetap bekerja dalam rentang batas yang telah ditentukan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim Riset Inovatif Produktif (RISPRO) Invitasi yang telah memberikan dukungan secara penuh pada penelitian ini. Pelaksanaan riset ini dilakukan melalui pendanaan Riset Inovatif Produktif (RISPRO) Invitasi, dengan nomor kontrak PRJ-2/LPDP/LPDP.4/2022.

DAFTAR RUJUKAN

Ali, A. M., & Söffker, D. (2018). Towards optimal power management of hybrid electric vehicles in real-time: A review on methods, challenges, and state-of-the-art solutions. *Energies*, *11*(3), 1–24. <https://doi.org/10.3390/en11030476>

- Arikan, Y., & Cam, E. (2019). Optimizing of Speed Profile in Electrical Trains for Energy Saving with Dynamic Programming. *3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, ISMSIT 2019 - Proceedings*.
<https://doi.org/10.1109/ISMSIT.2019.8932874>
- Fathy, A., Al-Dhaifallah, M., & Rezk, H. (2019). Recent Coyote Algorithm-Based Energy Management Strategy for Enhancing Fuel Economy of Hybrid FC/Battery/SC System. *IEEE Access*, *7*, 179409–179419. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2959547>
- Fernandez, L. M., Garcia, P., Garcia, C. A., Torreglosa, J. P., & Jurado, F. (2010). Comparison of control schemes for a fuel cell hybrid tramway integrating two dc/dc converters. *International Journal of Hydrogen Energy*, *35*(11), 5731–5744.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.132>
- Fragiacomo, P., & Genovese, M. (2019). Modeling and energy demand analysis of a scalable green hydrogen production system. *International Journal of Hydrogen Energy*, *44*(57), 30237–30255. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.186>
- Fragiacomo, P., Piraino, F., & Genovese, M. (2020). Insights for industry 4.0 applications into a hydrogen advanced mobility. *Procedia Manufacturing*, *42*(2019), 239–245.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.077>
- Garcia, P., Fernandez, L. M., Garcia, C. A., & Jurado, F. (2010). Energy management system of fuel-cell-battery hybrid tramway. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *57*(12), 4013–4023. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2034173>
- Han, Y., Cao, N., Hong, Z., Li, Q., & Chen, W. (2016). Experimental Study on Energy Management Strategy for Fuel Cell Hybrid Tramway. *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2016 - Proceedings*.
<https://doi.org/10.1109/VPPC.2016.7791686>
- Kang, J., Guo, Y., & Liu, J. (2020). Rule-based energy management strategies for a fuel cell-battery hybrid locomotive. *2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration: Connecting the Grids Towards a Low-Carbon High-Efficiency Energy System, EI2 2020*, 45–50. <https://doi.org/10.1109/EI250167.2020.9346652>
- Kapetanović, M., Núñez, A., van Oort, N., & Goverde, R. M. P. (2021). Reducing fuel consumption and related emissions through optimal sizing of energy storage systems for diesel-electric trains. *Applied Energy*, *294*.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117018>
- Lü, X., Qu, Y., Wang, Y., Qin, C., & Liu, G. (2018). A comprehensive review on hybrid power system for PEMFC-HEV: Issues and strategies. *Energy Conversion and Management*, *171*,

- 1273–1291. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.065>
- Motapon, S. N., Dessaint, L. A., & Al-Haddad, K. (2014). A robust H₂-consumption-minimization-based energy management strategy for a fuel cell hybrid emergency power system of more electric aircraft. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *61*(11), 6148–6156. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2308148>
- Njoya Motapon, S., Dessaint, L. A., & Al-Haddad, K. (2014). A comparative study of energy management schemes for a fuel-cell hybrid emergency power system of more-electric aircraft. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *61*(3), 1320–1334. <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2257152>
- Peng, H., Li, J., Deng, K., Thul, A., Li, W., Lowenstein, L., Sauer, Di. U., & Hameyer, K. (2019). An efficient optimum energy management strategy using parallel dynamic programming for a hybrid train powered by fuel-cells and batteries. *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2019 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/VPPC46532.2019.8952323>
- Ramadan, H. S., Becherif, M., & Claude, F. (2017). Energy Management Improvement of Hybrid Electric Vehicles via Combined GPS/Rule-Based Methodology. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, *14*(2), 586–597. <https://doi.org/10.1109/TASE.2017.2650146>
- Smith, D., Douglas, R., & Naeem, W. (2019). Fuzzy Rule-Based Energy Management Strategy for a Parallel Mild-Hybrid Electric Bus. *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference, ESARS-ITEC 2018*, 4–8. <https://doi.org/10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607670>
- Wolpert, D. H., & Macready, W. G. (1997). No free lunch theorems for optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, *1*(1), 67–82. <https://doi.org/10.1109/4235.585893>
- Zhang, H., Yang, J., Zhang, J., Song, P., & Li, M. (2020). Optimal energy management of a fuel cell-battery-supercapacitor-powered hybrid tramway using a multi-objective approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, *234*(5), 511–523. <https://doi.org/10.1177/0954409719849804>
- Zhang, W., Li, J., Xu, L., & Ouyang, M. (2017). Optimization for a fuel cell/battery/capacity tram with equivalent consumption minimization strategy. *Energy Conversion and Management*, *134*, 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.007>