

OPTIMASI EFISIENSI ENERGI PADA MOBIL LISTRIK EMPAT PENUMPANG MELALUI SISTEM *REGENERATIVE BRAKE*

Ashari Didik H., Dwi Iryaning Handayani, Yustina Suhandini T.J., Mustakim

Program Studi Teknik Industri Universitas Panca Marga

e-mail: Dwiiryaning@upm.ac.id

ABSTRAK

Penggunaan energi fosil yang terus-menerus dapat memberikan dampak krisis energi dan pencemaran lingkungan Gas Rumah Kaca (GRK) ini merupakan faktor penyebab dari perubahan iklim. Mobil listrik merupakan salah satu solusi permasalahan-permasalahan tersebut. Karena mobil listrik itu menggunakan sumber daya listrik yang bersih dan dapat diperbarui untuk menggerakkan kendaraannya, sehingga bisa mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang terbatas. Dalam penggunaan mobil listrik yang memanfaatkan teknologi pengereman regeneratif, tahap pertama adalah merancang porsi pengereman mekanik baik pada roda depan maupun belakang, beserta dengan pengereman regeneratif. Tujuannya untuk memperoleh porsi pengereman yang aman dengan mengikuti batasan atas pengereman ideal yang telah ditetapkan, sekaligus batas bawah yang ditetapkan oleh standar pengereman ECE. Setelah mendapatkan porsi pengereman yang aman dan sesuai dengan kondisi aktual, langkah selanjutnya adalah mencari energi yang dihasilkan oleh sistem pengereman regeneratif dengan melakukan simulasi menggunakan Matlab-simulink. Dalam simulasi ini, dapat diperoleh efisiensi regenerative brake, dengan membandingkan energi yang diserap dan energi pengereman yang tersedia. Sistem regenerative brake pada penelitian ini mampu menyerap energi 1,7623 kWh dengan efisiensi 67,31% pada porsi pengereman regeneratif 0,137 serta pengereman mekanis depan 0,6629 pada koefisien gesek jalan 0,8.

Kata kunci: *Regenerative Brake, porsi pengereman, simulasi Matlab-Simulink, Energi Bangkitan*

ABSTRACT

The continuous use of fossil energy can have an impact on the energy crisis and environmental pollution Greenhouse Gas (GHG) is a contributing factor to climate change. Electric cars are one of the solutions to these problems. Because electric cars use clean and renewable electrical resources to drive their vehicles, they can reduce dependence on limited fossil fuels. In the use of electric cars that utilize regenerative braking technology, the first stage is to design the portion of mechanical braking on both the front and rear wheels, along with regenerative braking. The goal is to obtain a safe braking portion by following the ideal braking upper limit that has been set, as well as the lower limit set by the ECE braking standard. After obtaining a safe braking portion that is in accordance with actual conditions, the next step is to find the energy generated by the regenerative braking system by simulating it using Matlab-simulink. In this simulation, the regenerative brake efficiency can be obtained by comparing the absorbed energy and the available braking energy. The regenerative brake system in this study is able to absorb 1.7623 kWh of energy with an efficiency of 67.31% at a regenerative braking portion of 0.137 and front mechanical braking of 0.6629 at a road friction coefficient of 0.8.

Keywords: *Regenerative Brake, braking portion, Matlab-Simulink simulation, Leakage Energy*

PENDAHULUAN

Perubahan iklim telah menjadi isu yang sangat serius dan mendapat perhatian serius dari berbagai negara di seluruh dunia. Dalam rangka mengatasi masalah ini, penerapan sumber energi alternatif telah menjadi semakin penting, dengan tujuan mengurangi emisi karbon dan mendukung keberlanjutan energi baik dalam konteks saat ini maupun masa depan, dengan fokus pada prinsip-prinsip lingkungan yang lebih baik. Pemanfaatan sumber energi fosil yang terus menerus saat ini dapat berdampak pada krisis energi dan peningkatan emisi Gas Rumah Kaca (GRK), yang merupakan faktor utama dari penyebabnya perubahan iklim yang sedang terjadi saat ini [1].

Demi mengurangi emisi gas Gas Rumah Kaca (GRK) kendaraan bermotor, Presiden mendukung adanya inovasi baru yaitu mobil listrik, sebagaimana tertuang dalam Peraturan

Presiden (PERPRES) No. 55 tahun 2019 tentang Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (Battery Electric Vehicle) untuk Transportasi Jalan. Mobil listrik menggunakan sumber daya listrik yang bersih dan dapat diperbarui untuk menggerakkan kendaraannya, serta mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang sangat terbatas. Melalui penghilangan emisi langsung dari knalpot dan mengurangi emisi dari sektor transportasi, mobil listrik dapat berperan penting dalam mengurangi emisi karbon secara signifikan [2]. Selain itu, penggunaan mobil listrik juga dapat memberikan keuntungan lain, seperti peningkatan efisiensi energi dan pengurangan biaya operasional jangka panjang. Hal ini dapat memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan yang positif, serta menciptakan industri baru yang berkelanjutan dan inovatif.

Kendaraan listrik dibagi menjadi 2 model yaitu kendaraan listrik menggunakan motor tak langsung yaitu hanya memakai satu motor dan yang kedua adalah kendaraan listrik dengan motor langsung yaitu menggunakan 2 atau 4 motor listrik yang langsung menempel pada roda penggerak. Kendaraan listrik dengan motor tak langsung konsepnya sama dengan kendaraan menggunakan mesin biasa. Transmisi yang digunakan sama dengan kendaraan biasa. Motor listrik pada kendaraan ini menggantikan fungsi dari mesin pada kendaraan biasa, jadi energi kinetik dari motor listrik ditransmisikan oleh sistem penyalur daya menjadi gaya dorong pada roda penggerak [3].

Saat ini mobil listrik yang beredar dipasaran hampir secara keseluruhan menggunakan sistem *regenerative brake*. Sistem *regenerative brake* digunakan bertujuan mengurangi energi kinetik yang terbuang begitu saja menjadi energi panas, energi kinetik yang terbuang ini dimanfaatkan kembali untuk menghasilkan energi listrik dengan mengubah fungsi motor listrik menjadi generator [4]. Selain itu sistem *regenerative brake* ini dapat memperpanjang jarak tempuh serta mengoptimasi efisiensi energi pada mobil listrik tersebut [5]. Zhang [6] mengungkapkan bahwa sistem *regenerative brake* dapat mencapai penggunaan energi yang efisien dan memperluas jarak tempuh yang bisa dicapai oleh kendaraan listrik sepenuhnya.

Sistem Pengereman Regeneratif telah menjadi fokus beberapa penelitian yang melibatkan berbagai jenis kendaraan. Pada tahun 2014, Wijaya [7] mengadopsi pendekatan ini pada mobil Nasional Gea Passenger yang beroperasi dengan teknologi Electronic Fuel Injection (EFI) dan menggunakan bensin sebagai bahan bakar. Penelitian tersebut difokuskan pada analisis porsi pengereman dan energi yang dihasilkan dari sistem pengereman regeneratif yang telah dirancang. Penelitian selanjutnya, dilakukan oleh Baradwadya [8] memilih kendaraan umum yaitu bus Transjakarta yang menggunakan bahan bakar solar. Pada penelitian ini, fokus utama adalah menganalisis energi yang dihasilkan dari sistem Pengereman Regeneratif. Pada tahun 2018, pendekatan yang berbeda dilakukan oleh Perdana [9] dengan memodifikasi mobil multiguna pedesaan berbasis Gea Passenger, sebuah mobil nasional, menggunakan teknologi energi listrik. Penelitian ini mencakup analisis porsi pengereman, energi yang dihasilkan, dan efisiensi dari implementasi sistem pengereman regeneratif.

Melalui serangkaian penelitian ini, dapat dikenali bahwa sistem pengereman regeneratif telah menjadi isu yang semakin relevan. Hal ini disebabkan kesesuaian yang sangat kuat antara sistem pengereman regeneratif dan mobil listrik model city car berkapasitas 4 penumpang. Kendaraan tersebut memiliki berat yang signifikan, tentunya diperlukan sejumlah energi cukup besar saat mengoperasikan mobil tersebut. Sistem Pengereman *regenerative* ini mampu menyerap kembali energi yang tidak dimanfaatkan selama proses pengereman dan menggunakannya untuk mengoptimasi efisiensi energi dan jarak tempuh pada mobil listrik 4 penumpang. Perdana [9] melakukan analisa pada porsi pengereman seberapa besar energi yang dapat dibangkitkan dan berapa besar efisiensinya yang diperoleh dengan menggunakan *driving cycle* yang mendekati situasi aktual.

Namun demikian, penelitian yang mengeksplorasi terhadap penggunaan sistem *regenerative brake* pada jenis kendaraan spesifik, seperti Mobil 4 Penumpang *City Car* (Mobil Listrik) masih terbatas. Hal ini tercermin dalam penelitian sebelumnya yang disajikan pada Tabel 1, menunjukkan penggunaan Sistem *Regenerative Brake* pada Mobil 4 Penumpang *City Car* (Mobil Listrik) berpeluang untuk dilakukan penelitian.

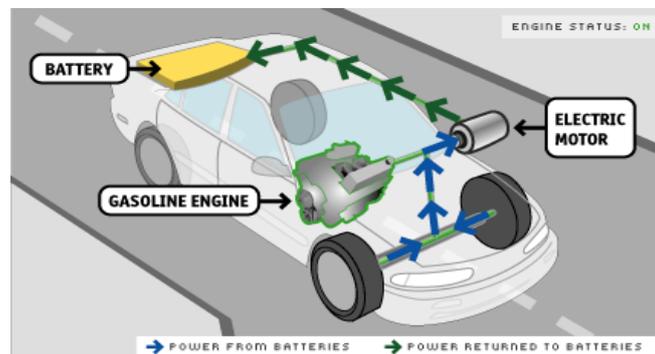
Tabel 1. Posisi penelitian

Peneliti	Type Kendaraan	Jumlah penumpang	Bahan Bakar	Porsi Pengereman	Energi yang dibangkitkan	Efisiensi Sistem <i>Regenerative Brake</i>
Wijaya [7]	Mobil Nasional <i>Gea Passenger</i>	NA	Bensin	Ya	Ya	Tidak
Baradwadya [8]	<i>Bus Transjakarta</i>	NA	Solar	Ya	Tidak	Tidak
Perdana [9]	Mobil Multiguna Pedesaan	2 penumpang	Mobil listrik	Ya	Ya	Ya
Usulan	Mobil 4 Penumpang <i>City Car</i>	4 penumpang	Mobil listrik	Ya	Ya	Ya

Dengan demikian, penelitian ini memiliki potensi untuk memberikan kontribusi yang berharga dalam mengembangkan mobilitas berkelanjutan dan teknologi kendaraan listrik. Oleh karena itu penelitian ini akan melakukan optimasi efisiensi energi pada mobil listrik empat penumpang melalui sistem *regenerative brake* dengan pendekatan bagaimana menentukan seberapa besar energi yang dapat dibangkitkan oleh sistem regenerative braking yang bekerja pada mobil listrik 4 penumpang. Untuk mendapatkan jumlah energi pengereman yang maksimum, maka harus dilakukan analisa dan perhitungan awal terhadap distribusi gaya pengereman yang terjadi pada roda bagian depan dan roda bagian belakang. Gaya pengereman di kedua roda pada kendaraan memiliki suatu rasio tetap yang dibatasi oleh nilai koefisien gesek dari lintasan yang dilalui dan jumlahnya harus seimbang dengan beban normal pada roda kendaraan, sehingga roda kendaraan bagian depan dan bagian belakang pada kendaraan tersebut mendapatkan gaya pengereman maksimum secara bersamaan [10].

METODE PENELITIAN

Kendaraan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Mobil Listrik 4 Penumpang merupakan mobil listrik yang didesign mirip *City Car*, yang diadopsi dan dimodifikasi dari spesifikasi mobil listrik Brajawahana [8] ITS. Harapannya mobil ini bisa di gunakan di jalan raya kota-kota besar. Hal ini dikarenakan bodynya yang cukup kecil dan mobil ini bisa bermanuver dengan lincah, gesit, dan energi yang dibutuhkan akan lebih hemat dalam mengoperasikannya. Selengkapny konsep produk mobil Listrik 4 penumpang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Mobil Listrik 4 penumpang

Mobil listrik 4 penumpang ini didesain dengan diameter ban berukuran 16 inci dengan panjang mobil 2,8 m dan lebar 1,6 m. Untuk berat mobil itu sendiri mencapai 1 ton dalam kondisi kosong dan jika kondisi terisi bisa mencapai 1,5 ton. Mobil ini di gerakkan dengan motor penggerak 25 kw hasil rancangan mahasiswa ITS sendiri. Sedangkan tenaga yang

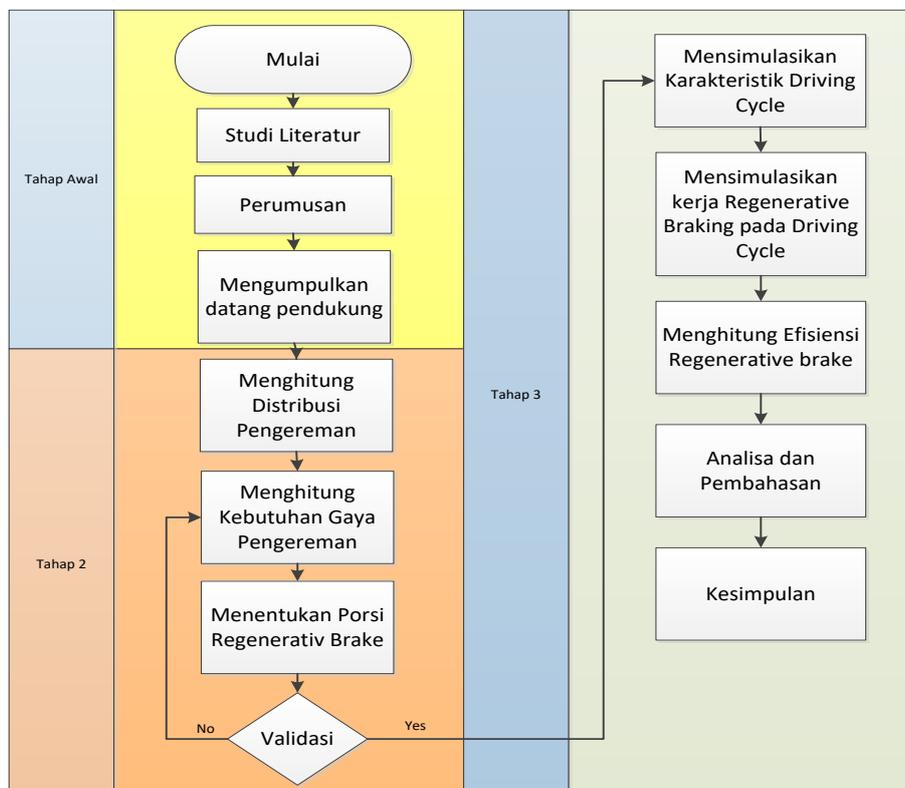
dihasilkan mencapai 50 Hp dan bisa mencapai kecepatan 200 km/jam. Tabel 2 menunjukkan data spesifikasi Mobil Listrik 4 penumpang.

Tabel 2. Data Spesifikasi Mobil Listrik 4 Penumpang

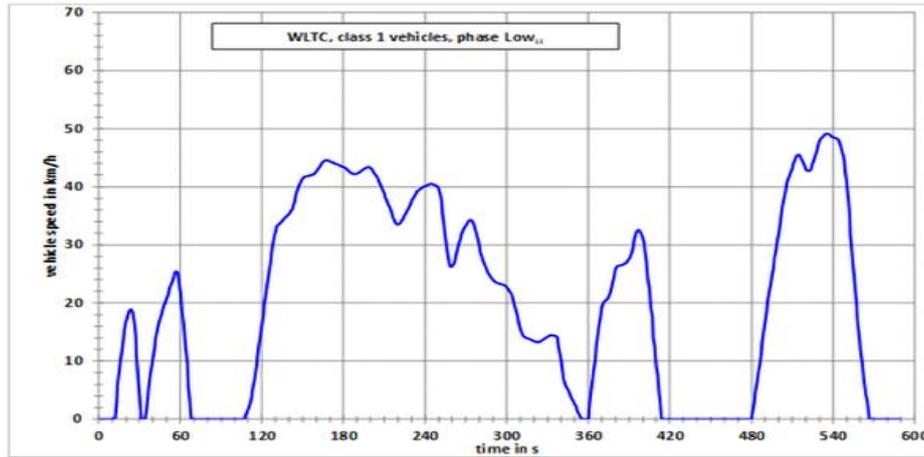
Dimensi	
Wheelbase	2380mm
Track Width	1520mm
Ground Clearance	200 mm
Massa	
Berat Kosong Kendaraan	770 kg
Berat Terisi	1470 kg
Jarak CG ke sumbu roda depan (Lf)	1,31 m
Jarak CG ke sumbu roda belakang (Lr)	1,06 m
Tinggi CG ke permukaan tanah (h)	0,66
Ban	
Jenis	Radial
Diameter	406 mm
Lebar	205 mm
Koefisien Adhesi Aspal (η)	0,75
Koefisien Drag Kendaraan (μ)	0,4
Kinerja	
Motor	25 kw
Torsi Motor	390 Nm
Tenaga yang dihasilkan	50 Hp
Rasio Transmisi (It)	1,3
Rasio Gardan (Ig)	3,9

Selanjutnya pada metode penelitian ini merujuk pada penelitian Perdana [9].

Tahap awal akan melibatkan analisis mendalam terkait teknologi Sistem *regenerative brake*. Langkah berikutnya akan berfokus pada pengumpulan data yang relevan guna mendukung pelaksanaan penelitian ini. kemudian, data yang terkumpul akan dianalisis untuk menghasilkan temuan yang dapat memberikan jawaban terhadap permasalahan yang telah dirumuskan sebelumnya. Semua langkah dalam prosedur penelitian ini akan dijelaskan secara runtut melalui diagram alir pada Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. Grafik *Driving Cycle* WLTP Class 1

Berdasarkan diagram alir pada Gambar 2, metodologi penelitian ini dilakukan dalam beberapa langkah:

1. Langkah awal adalah melakukan tinjauan literatur mengenai teknologi pengereman regeneratif pada kendaraan. Pengumpulan informasi dapat dilakukan melalui berbagai sumber, seperti penelitian sebelumnya, text book, jurnal penelitian, hand book, dan penelusuran di internet.
2. Langkah kedua adalah merumuskan permasalahan. Informasi yang diperoleh dari studi literatur akan diubah menjadi poin-poin permasalahan yang relevan dan akan menjadi dasar untuk perumusan masalah yang tercantum dalam bab pendahuluan
3. Langkah ketiga adalah mengumpulkan data yang relevan untuk mendukung penelitian ini. Data yang diperlukan adalah data yang meliputi informasi mengenai mobil listrik 4 penumpang, termasuk dimensinya, serta data yang memengaruhi gaya yang bekerja pada kendaraan tersebut. Selain itu, data *drive cycle* juga diperlukan untuk mengetahui perilaku kendaraan selama beroperasi.

Langkah keempat adalah mencari model pengereman kendaraan yang sesuai. Pada langkah ini, dilakukan proses pemodelan pengereman kendaraan yang akan menghasilkan kurva distribusi pengereman

$$\frac{Fb_r}{W} = \frac{(L_f - \frac{a}{g} \cdot h)}{(L_r + \frac{a}{g} \cdot h)} \cdot \frac{Fb_f}{W} \quad (1)$$

Dimana Fb_r/w adalah rasio pengereman pada roda sisi depan, L_f adalah Jarak titik pusat kendaraan ke roda bagian depan (m), L_r adalah Jarak titik pusat kendaraan ke roda bagian belakang (m), a adalah Perlambatan kendaraan (m/s^2), g adalah Gravitasi (m/s^2), h adalah Jarak titik pusat kendaraan ke pusat roda kendaraan (m) Fb_f/w adalah rasio pengereman pada roda sisi belakang.

Kurva pengereman juga tidak boleh kurang dari standar minimal pengereman ECE dengan variasi nilai a/g dari 0,1 hingga 0,8 pada persamaan

$$\frac{Fb_f}{W} = \frac{\mu}{L} (L_r + (0.1 + 0.85(\mu - 0.2) h)) \quad (2)$$

$$\frac{Fb_r}{W} \geq (0.1 + 0.85(\mu - 0.2)) - \frac{Fb_f}{W} \quad (3)$$

Dimana Fb_r/w adalah rasio pengereman pada roda sisi depan, L adalah Jarak roda depan dan roda belakang (m), L_r adalah Jarak titik pusat kendaraan ke roda bagian belakang (m), μ adalah koefisien gesek, h adalah Jarak titik pusat kendaraan ke pusat roda kendaraan (m) Fb_f/w adalah rasio pengereman pada roda sisi belakang.

4. Langkah kelima melibatkan analisis pembagian porsi pengereman antara rem mekanik dan rem elektrik berdasarkan kurva distribusi pengereman dari tahap sebelumnya. Pembagian pengereman ini akan disesuaikan dengan koefisien gesek jalan yang umumnya terjadi di lingkungan perkotaan. Selain itu, posisi *regenerative brake* juga akan ditentukan. Setelah pembagian porsi pengereman yang optimal ditemukan, langkah selanjutnya adalah mencari gaya yang diperlukan selama proses pengereman kendaraan.
 5. Langkah berikutnya melibatkan analisis terhadap potensi daya yang bisa dihasilkan oleh sistem pengereman regenerative dan kemudian disimpan dalam baterai
- Susunan blok gaya mengikuti persamaan:

$$F_b = F_a - F_d - F_r - F_g \tag{4}$$

Dimana F_d adalah gaya hambat drag (N), F_a adalah gaya perlambatan, F_r adalah Gaya Hambat Rolling (N), F_g adalah Gaya Hambat Gradien (N)

$$F_a = m \cdot a \tag{5}$$

Dimana a adalah Gaya Hambat Inersia Kendaraan (N), m adalah Massa kendaraan (kg), a adalah Perlambatan kendaraan (m/s^2)

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho v^2 A \tag{6}$$

Dimana F_d adalah Drag Force (N), C_d adalah Koefisien drag, ρ adalah Massa jenis udara (kg/m^3), v adalah Kecepatan relative kendaraan (m/s), A adalah Luas frontal kendaraan (m^2)

$$F_r = m g C_f \tag{7}$$

Dimana F_r adalah Gaya Hambat Rolling (N), C_f adalah Rolling Coeficient, m adalah Massa kendaraan (kg), g adalah Gravitasi (m/s)

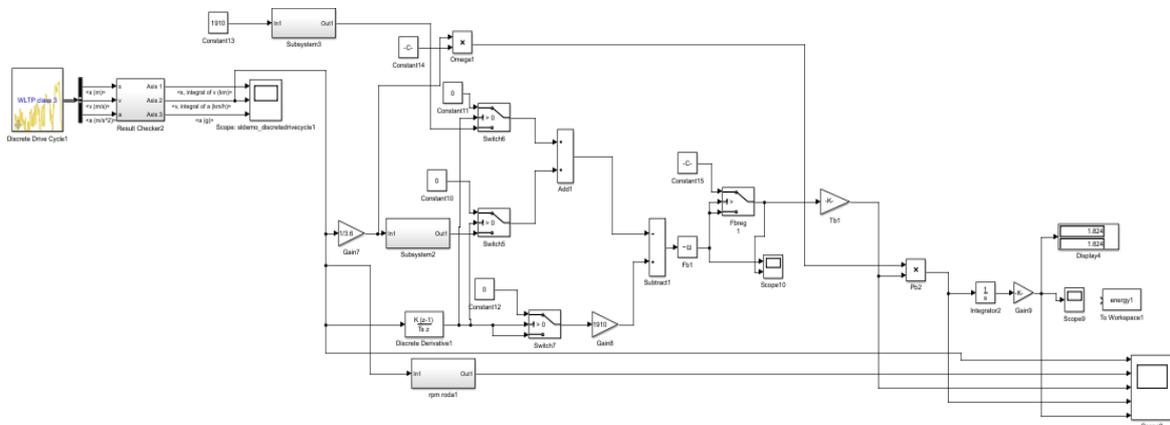
Selain gaya pengereman terdapat blok model untuk mengkonversi gaya pengereman menjadi energi pengereman mengikuti persamaan:

$$T_b = \frac{F_b \times r}{I_t \times I_g \times \eta} \tag{8}$$

$$\omega_{motor} = \frac{V \times I_t \times I_g}{\pi \times r} \tag{9}$$

$$P_b = T_b \cdot \omega_{roda} \tag{10}$$

Dimana T_b adalah Torsi Pengereman (Nm), F_b adalah Gaya Rem Total (N), P_b adalah Daya Pengereman (Kw), ω_{roda} adalah Kecepatan putaran Roda (Rpm), ω_{motor} adalah Kecepatan putaran motor (Rpm), v adalah kecepatan linier (m/s), I_t adalah Rasio Transmisi, I_g adalah Rasio Gardan.



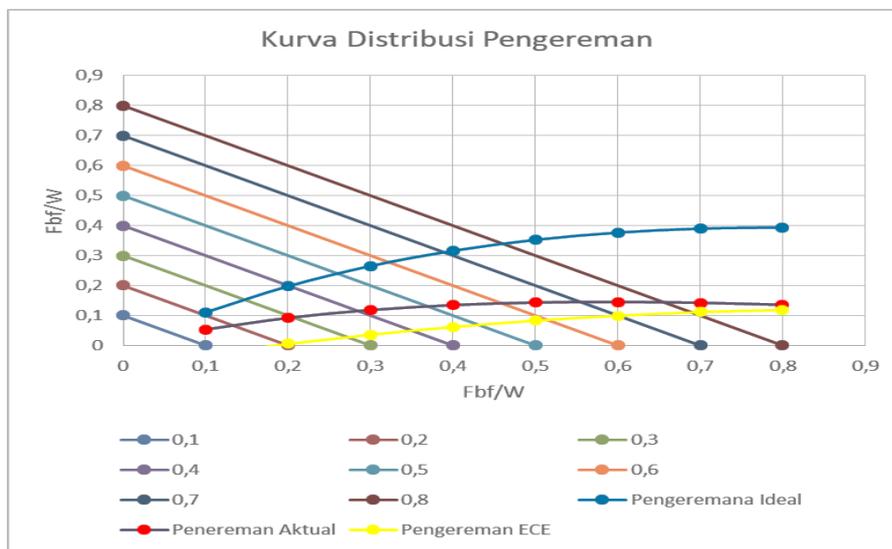
Gambar 4. Blok Gabungan Matlab Simulink

- Langkah terakhir bagaimana menentukan efisiensi sistem *regenerative brake* dalam membangkitkan energi kinetik yang terbangun pada saat pengereman, dengan membandingkan daya yang dihasilkan terhadap energi kinetik yang terbangun.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Porsi Pengereman Kendaraan

Kurva porsi pengereman menunjukkan kurva pengereman ideal dan kurva standar pengereman ECE sebagai batas maksimal dan minimal untuk porsi pengereman yang akan digunakan pada kendaraan sesuai dengan Gambar 5. Kurva pengereman ideal didapat dari persamaan 1 dengan porsi F_{br}/W 0,1105 pada saat nilai a/g 0,1 dan F_{bf}/W 0,1 hingga porsi paling besar 0,3525 pada nilai a/g dan F_{bf}/W 0,5 dan 0,3939 pada nilai a/g 0,8 dan F_{bf}/W 0,8. Porsi pengereman standar ECE dari kendaraan didapat sebesar 0,2081 pada a/g 0,4, sebesar 0,2719 pada a/g 0,5 dan 0,3404 pada a/g 0,6. Selain itu nilai F_{bf}/W pada variasi nilai a/g lain di bawah 0 sehingga dalam proses mencari porsi pengereman kendaraan bisa diabaikan. Kurva yang didapat pada grafik dengan warna merah antara kurva pengereman ideal dan kurva pengereman standar ECE.



Gambar 5. Kurva distribusi Pengereman Mobil Listrik 4 Penumpang

Sistem *regenerative brake* dirancang pada roda bagian depan dan dilakukan pada awal pengereman. Porsi pengereman *regenerative brake* didapat dari kemampuan motor-generator yang digunakan dengan spesifikasi torsi motor-generator 390 Nm. Sehingga kemampuan maksimal pengereman oleh motor dapat diketahui dengan persamaan 8 sebesar 7.305,296 N. Gaya itu dapat mencapai porsi pengereman maksimal 0,5066. Akan tetapi porsi pengereman *regenerative brake* yang digunakan pada kondisi tertentu tidak bisa mencapai nilai 0,5066 agar menjaga proses pengereman kendaraan tetap aman.

Menurut sistem *regenerative brake* memungkinkan penghematan energi selama pengereman dan penyimpanannya dalam akumulator atau mengembalikannya ke sistem catu daya [11]. Disamping itu sistem *regenerative brake* bisa diaplikasikan baik pada roda depan maupun roda belakang. Adanya sistem *regenerative brake* ini tentunya mempengaruhi porsi pengereman mekanis yang digunakan dapat lebih kecil bahkan ditiadakan tergantung besar porsinya. Porsi pengereman kendaraan saat sistem *regenerative brake* terhubung dengan roda depan pada kondisi koefisien gesek jalan 0,5-0,8 tersaji pada Tabel 3. Sistem pengereman intensitas sedang akan mengurangi frekuensi penggunaan pengereman utama sistem, yang akan meningkatkan keandalan dan keamanan kendaraan [12].

Berdasarkan Tabel 3 dapat diketahui porsi rem mekanis pada koefisien gesek jalan 0,5 dan 0,6 tidak ada, pengereman pada roda depan sepenuhnya dengan pengereman regeneratif. Sementara pada koefisien gesek jalan 0,7 dan 0,8 porsi pengereman regeneratif maksimal ditambah porsi pengereman mekanis. Untuk porsi pengereman roda belakang sesuai dengan porsi yang telah ditentukan sebelumnya. Nilai gaya pengereman yang dibutuhkan pada masing-masing roda depan dan roda belakang serta *regenerative brake* dengan mengalikan porsi pengereman dengan berat mobil sehingga didapat nilai gaya pengereman.

Tabel 3. Porsi Pengereman Kendaraan Regeneratif Roda Depan

μ	Fb reg/W	Fbf/W	Fbr/W
0,5	0,3558	0	0,1442
0,6	0,4535	0	0,1465
0,7	0,5066	0,0497	0,1438
0,8	0,5066	0,1563	0,1371

Tabel 4. Gaya Pengereman Kendaraan Regeneratif Roda Depan

μ	Fb reg	Fbf	Fbr
0,5	5131,334	0	2079,016
0,6	6539,938	0	2112,482
0,7	7305,296	716,1272	2073,067
0,8	7305,296	2254,284	1976,98

Diketahui mobil listrik 4 penumpang yang digunakan merupakan mobil dengan penggerak roda belakang sehingga meskipun potensi energi pengereman yang dapat dibangkitkan besar, akan tetapi perlu beberapa modifikasi untuk menggunakan *regenerative brake* pada roda depan. Porsi pengereman pada saat sistem *regenerative brake* terdapat pada roda belakang tersaji pada Tabel 5 dan Nilai gaya pengeremannya tersaji pada Tabel 6.

Tabel 5. Porsi Pengereman Kendaraan Regeneratif Roda Belakang

μ	Fb reg/W	Fbf/W	Fbr/W
0,5	0,1442	0,3558	0
0,6	0,1465	0,4535	0
0,7	0,1438	0,5562	0
0,8	0,1371	0,6629	0

Tabel 6. Gaya Pengereman Mobil Listrik Regeneratif Roda Belakang

μ	Fb reg	Fbf	Fbr
0,5	2079,016	5131,334	0
0,6	2112,482	6539,938	0
0,7	2073,067	8021,423	0
0,8	1976,98	9559,58	0

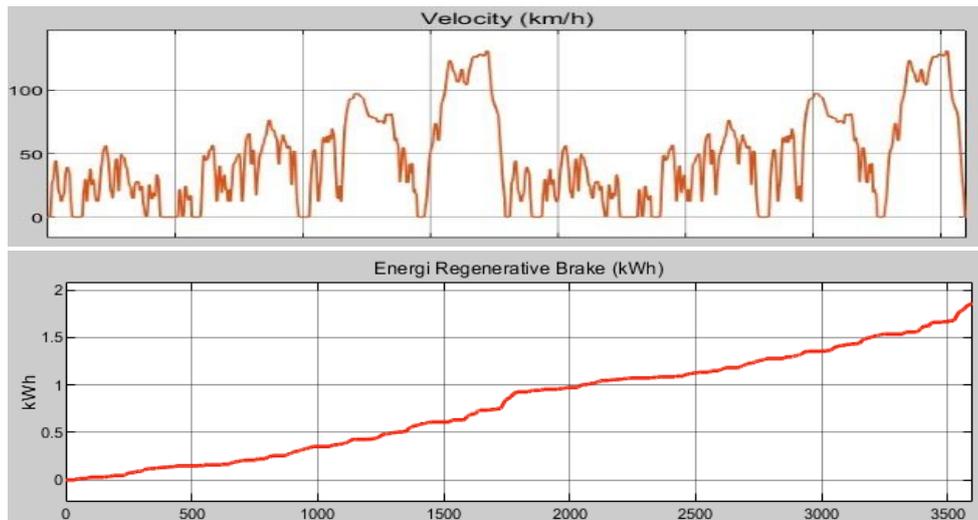
Porsi *regenerative brake* pada roda belakang lebih kecil daripada porsi *regenerative brake* pada roda depan dikarenakan porsi pengereman yang didesain lebih besar pada roda depan dibandingkan pada roda belakang. Akibatnya pada porsi pengereman roda belakang tidak diperlukan pengereman mekanis karena porsi pengereman roda belakang sudah dicukupi oleh *regenerative brake*.

Analisa Energi Bangkitan Maksimal Kendaraan

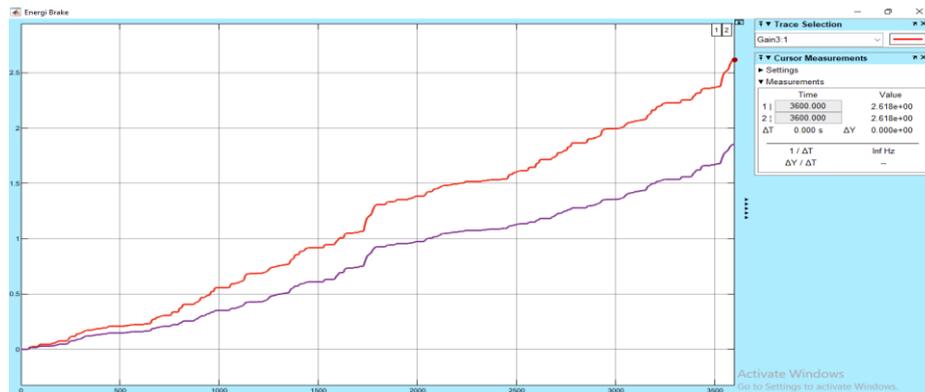
Energi bangkitan maksimal yang mampu diserap kendaraan didapat dari simulasi pada *software* sesuai blok-blok model yang telah didesain. Energi bangkitan yang dapat diserap sistem *regenerative brake* dapat dilihat pada Gambar 6. Porsi yang digunakan sesuai dengan porsi *regenerative brake* pada roda belakang dengan koefisien gesek jalan 0,8 sebesar 0,1372

Sesuai grafik di atas, energi bangkitan total yang mampu diserap dari hasil simulasi sebesar 1,855 kWh pada satu siklus *driving cycle* WLTP kelas 1. Selanjutnya energi yang dapat disimpan pada baterai harus melewati generator untuk diubah menjadi energi listrik.

Generator yang digunakan memiliki efisiensi sebesar 95% sehingga energi yang mampu diserap dan disimpan pada baterai sebesar 1,7623 kWh.



Gambar 6. Energi Bangkitan *Regenerative brake*



Gambar 7. Energi Pengereman dan Energi Bangkitan *Regenerative brake*

Mencari Efisiensi Sistem *Regenerative Brake*

Mencari nilai efisiensi sistem *regenerative brake* terlebih dulu mencari energi pengereman total yang digunakan dalam proses pengereman kendaraan. Energi pengereman total dapat diketahui dari hasil simulasi dengan blok model *regenerative brake* dengan porsi keseluruhan pengereman. Hasil simulasi didapat grafik pada Gambar 6 dan 7. Pada gambar di atas, grafik merah menunjukkan energi pengereman keseluruhan yang digunakan untuk perlambatan kendaraan sementara grafik biru merupakan energi *regenerative brake* yang mampu diserap sistem sesuai porsi *regenerative brake* yang telah didesain. Total energi pengereman yang tersedia sebesar 2,618 kWh sementara energi yang diserap dari perhitungan sebelumnya sebesar 1,7328 kWh. Didapat efisiensi sistem *regenerative brake* sebesar 67,31%

Dari hasil penelitian jika dibandingkan dengan penelitian Wijaya [13] yang mampu membangkitkan energi bangkitan sebesar 0,08924 kWh yang menggunakan *driving cycle* NEDC, sedangkan penelitian pada mobil listrik 4 penumpang mampu membangkitkan energi bangkitan lebih besar yaitu 1,7328 kWh menggunakan *Driving Cycle Class 1*. Jika mengacu pada penelitian Perdana [9] energi yang dibangkitkan pada sistem *regenerative brake* yaitu 1,738 kWh pada koefisien gesek 0,8 dan efisiensi sistem *regenerative brake* nya sebesar 51,74% sedangkan pada penelitian mobil listrik 4 penumpang energi bangkitannya hamper sama sebesar 1,7328 kWh dan efisiensi sistem *regenerative brake* sebesar 67,31%.

Perbedaan-perbedaan hasil dari penelitian tersebut kemungkinan terjadi didasari dari spesifikasi kendaraan dan type kendaraan yang diujikan serta *driving cycle* yang digunakan.

KESIMPULAN

Pada tugas akhir ini, kesimpulan dari analisa sistem *regenerative brake* pada mobil multiguna pedesaan bertenaga listrik adalah: 1) Penggunaan porsi *regenerative braking* pada roda belakang mobil listrik 4 penumpang berfluktuasi sesuai dengan tingkat koefisien gesek jalan. Rentangnya mulai dari 0,1446 saat koefisien gesek jalan sebesar 0,5 hingga 0,1375 saat koefisien gesek jalan mencapai 0,8. Porsi pengereman mekanis pada roda depan juga berubah-ubah, bergantung pada koefisien gesek jalan serta porsi *regenerative braking* pada roda belakang. Sementara itu, porsi pengereman mekanis pada roda belakang tidak dibutuhkan; 2) Dalam satu siklus *driving cycle* WLTP kelas 1, sistem *regenerative brake* mampu menyerap energi bangkitan sebesar 1,7623 kWh saat koefisien gesek jalan sebesar 0,8; 3) Efisiensi dari sistem *regenerative brake* yang telah diimplementasikan pada mobil listrik 4 penumpang ini mencapai angka sekitar 67,31%; 4) Keterbatasan ini pada penelitian ini fokus pada kendaraan listrik 4 penumpang yang membatasi hasil pada berbagai tipe dan ukuran kendaraan. Selain itu penelitian ini menggunakan satu siklus *driving cycle* WLTP kelas 1 mungkin tidak mencakup variasi berkendara sehari-hari. Penelitian tidak sepenuhnya memperhitungkan faktor-faktor lain yang mempengaruhi efisiensi sistem *regenerative brake*, seperti kondisi baterai atau usia kendaraan. Keterbatasan lainnya penelitian tidak menjelaskan implikasi tidak adanya pengereman mekanis pada roda belakang dalam kondisi tertentu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Addinsyah and W. Herumurti, “Studi Timbulan dan Reduksi Sampah Rumah Kompos serta Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca di Surabaya Timur,” *JTITS*, vol. 6, no. 1, pp. 62–67, 2017. doi: 10.12962/j23373539.v6i1.22973.
- [2] A. Fayad, H. Ibrahim, A. Ilinca, S.S. Karganroudi, and M. Issa, “Energy Recovering Using Regenerative Braking in Diesel–Electric Passenger Trains: Economical and Technical Analysis of Fuel Savings and GHG Emission Reductions,” *Energies*, vol. 15, no. 1, p. 1-16, 2022. doi: 10.3390/en15010037.
- [3] D.B. Prasetyo, U. Wasiwitono, and I.N. Sutantra, “Desain dan Analisa Sistem Tenaga dan Transmsi pada Mobil Angkutan Multiguna Pedesaan Bertenaga Listrik,” vol. 6, no. 2, 2017.
- [4] N. Kusumaningrum, S. Riyadi, L.H. Pratomo, and F.B. Setyawan, “Optimalisasi Pengereman Regeneratif dengan Perubahan Sudut Eksitasi pada Pulsa Tunggal,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 13, no. 1, pp. 1–9, 2021. doi: 10.15294/jte.v13i1.28600.
- [5] A.H. Salari, H. Mirzaeinejad, and M.F. Mahani, “A new control algorithm of regenerative braking management for energy efficiency and safety enhancement of electric vehicles,” *Energy Conversion and Management*, vol. 276, p. 116564, 2023. doi: 10.1016/j.enconman.2022.116564.
- [6] J. Zhang, Y. Yang, D. Qin, C. Fu, and Z. Cong, “Regenerative Braking Control Method Based on Predictive Optimization for Four-Wheel Drive Pure Electric Vehicle,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 1394–1406, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3046853.
- [7] I.N. Sutantra, *Teknologi Otomotif Hybrid*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Guna Widya, 2015.
- [8] C.R. Baradwadya, “Analisa Pengaplikasian Sistem ‘KERS’ pada Bus Transjakarta dengan Sistem Penyimpanan pada Baterai,” Laporan Tugas Akhir, Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2016.

- [9] P.B. Perdana and I.N. Sutantra, “Analisa Penggunaan Regenerative Brake pada Mobil Multiguna Pedesaan Bertenaga Listrik,” *JTITS*, vol. 7, no. 1, pp. 17–20, 2018, doi: 10.12962/j23373539.v7i1.29591.
- [10] A.P. Budijono, I.N. Sutantra, and A.S. Pramono, “Optimizing regenerative braking on electric vehicles using a model-based algorithm in the antilock braking system,” *IJPEDS*, vol. 14, no. 1, pp. 131-139, 2023. doi: 10.11591/ijped.v14.i1.pp131-139.
- [11] X. Wu, “Research and Implementation of Electric Vehicle Braking Energy Recovery System Based on Computer,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1744, no. 2, p. 022080, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1744/2/022080.
- [12] N.V. Martyushev *et al.*, “Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground Transport by Optimizing Battery Consumption,” *Energies*, vol. 16, no. 2, p. 729, 2023. doi: 10.3390/en16020729.
- [13] G. Wijaya, “Analisa Gaya Pengereman dan Energi yang Dibangkitkan dengan Porsi Regenerative Braking,” Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2014.