

Analisa Gaya, Porsi, Kontribusi dan Efisiensi Sistem Rem Regeneratif pada Ezzy ITS II

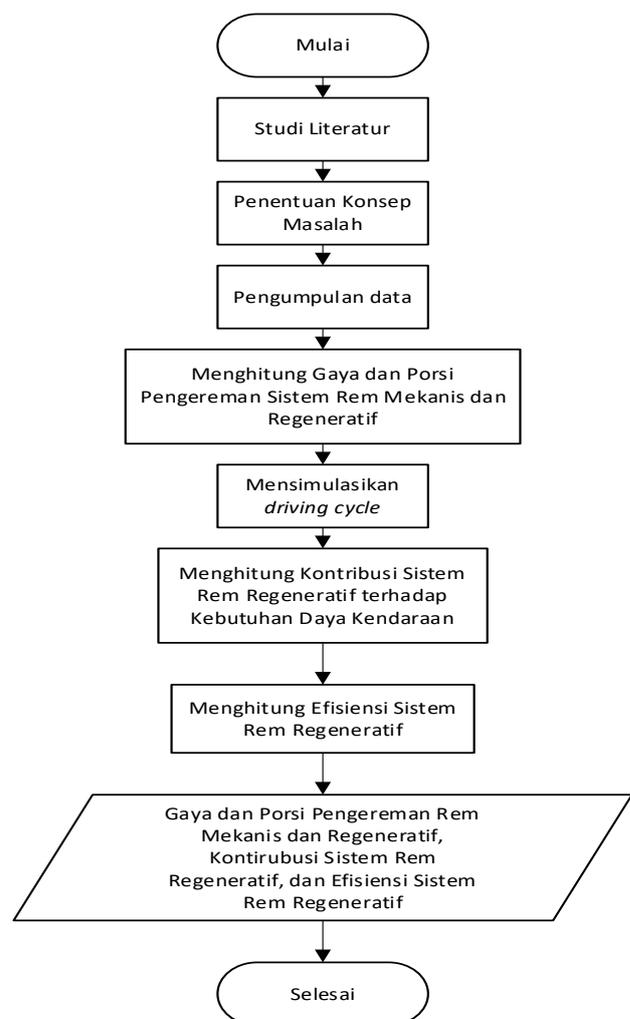
Ariesto Christopher Faradico Walla dan I Nyoman Sututra
Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: tantra@me.its.ac.id

Abstrak—*Driving cycle* merupakan serangkaian data yang mewakili kecepatan kendaraan versus waktu sebagai bentuk representasi dari keadaan jalan tertentu yang sebenarnya. Kepentingan dari penggunaan *Driving cycle* dalam menganalisa kendaraan adalah mengurangi biaya tes jalan, waktu tes dan kelelahan pengemudi. *Driving cycle* yang digunakan pada penelitian sebelumnya mengenai bus Transjakarta kurang mempresentasikan keadaan jalan dalam kota yang sebenarnya karena banyaknya kecepatan konstan yang terjadi. Sehingga hasil analisisnya kurang akurat apabila diaplikasikan secara langsung. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisa lebih dalam mengenai sistem rem regeneratif pada mobil listrik. Jenis kendaraan yang diteliti adalah city car EZZY ITS II sebagai objek penelitian dan menganalisa sistem rem regeneratifnya dengan *Driving cycle* Prius dan WLTP. Pemakaian city car adalah karena jenis kendaraan ini banyak digunakan oleh masyarakat. Penambahan *Driving cycle* Prius adalah untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat dengan kondisi jalan di Surabaya. Penelitian dimulai dengan analisa porsi dan gaya pengereman mekanis dan regeneratif kendaraan. Tujuannya adalah agar kendaraan tetap stabil saat pengereman. Penelitian dilanjutkan dengan analisa kontribusi dan efisiensi sistem rem regeneratif pada tiap *Driving cycle*. Analisa ini bertujuan untuk mengetahui besarnya pengaruh sistem rem regeneratif pada mobil listrik dan membandingkan hasil analisisnya berdasarkan *Driving cycle* yang digunakan. Hasil dari penelitian ini didapati sistem rem regeneratif pada kendaraan bekerja secara penuh pada rentang j/g 0-0,8 untuk *gear* pertama. Hasil penelitian ini cukup signifikan dikarenakan rem regeneratif dapat menggantikan peran rem mekanis roda depan kendaraan. Kontribusi sistem rem regeneratif yang didapatkan adalah 38,82% untuk *Driving cycle* Prius dan 30,36% untuk *Driving cycle* WLTP. Efisiensi sistem rem regeneratif yang didapatkan 67,94% untuk *Driving cycle* Prius dan 58,94% untuk *Driving cycle* WLTP. Kontribusi dan efisiensi yang didapatkan tersebut sudah lebih baik daripada penelitian sebelumnya.

Kata Kunci—Mobilitas, Krisis Bahan Bakar Minyak, Mobil Listrik, Sistem Rem Regeneratif

I. PENDAHULUAN

KEBUTUHAN akan mobilitas yang tinggi pada masyarakat tidak dapat terelakkan. Mobilitas dibutuhkan guna mengikuti alur perkembangan zaman yang semakin hari semakin menuntut masyarakat untuk cepat tanggap. Berdasarkan studi yang dilakukan oleh Frost & Sullivan yang diliput oleh Kompas, sebanyak 62% masyarakat Jakarta menggunakan mobil pribadi sebagai penunjang mobilitasnya. Mobil yang digunakan masyarakat pada umumnya berjenis *Internal Combustion Engine Vehicle* (ICEV). ICEV merupakan kendaraan yang memiliki sumber penggerak berupa motor pembakaran dalam. Salah satu kelemahan dari ICEV adalah bahan bakarnya yang berasal dari minyak bumi. Berdasarkan data yang dilansir dari SKK

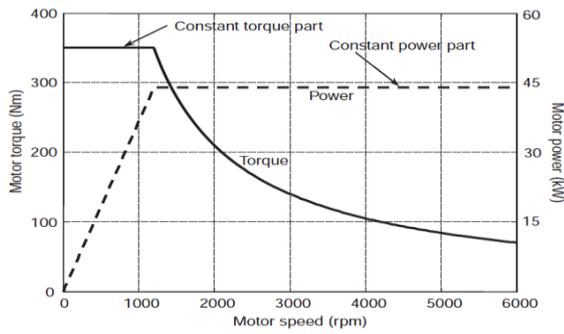


Gambar 1. Metode Penelitian.

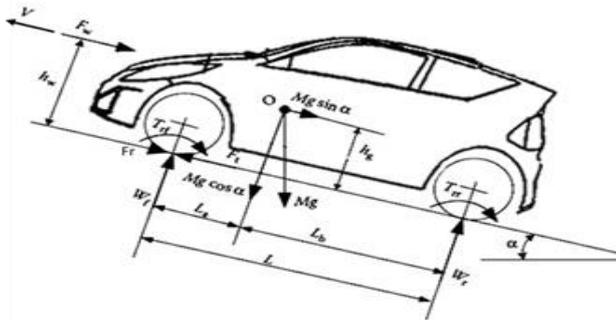
Migas 2015 dan BP *Statistical Review* 2016 tingkat konsumsi bahan bakar minyak di Indonesia pada tahun 2006-2015 selalu melebihi dari tingkat produksinya. Hal ini dapat mengakibatkan Indonesia mengalami krisis bahan bakar minyak apabila tidak segera diatasi.

Salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan mobilitas dan krisis bahan bakar ini adalah penggunaan Electric Vehicle (EV). Di negara maju, khususnya di eropa, pemerintah setempat mendukung penggunaan mobil listrik dalam bentuk subsidi dan bebas pajak. Keunggulan utama EV dibandingkan ICEV adalah efisiensi yang tinggi dalam pemakaian energi. Hal itu bisa didapatkan salah satunya adalah karena penggunaan sistem rem regenerative [1].

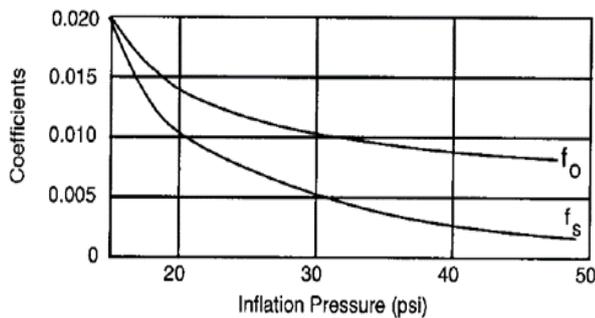
Penelitian terdahulu, mengenai penggunaan sistem rem regeneratif pada bus transjakarta, analisa dilakukan dengan



Gambar 2. Karakteristik Motor Listrik.



Gambar 3. FBD Kendaraan.



Gambar 4. Koefisien hambatan rolling akibat pengaruh tekanan ban.

Driving cycle yang kurang mendekati dengan kondisi kenyataan yang ditandai dengan banyaknya kecepatan konstan yang terjadi dan belum membahas mengenai kontribusi sistem rem regeneratif terhadap kebutuhan daya kendaraan dalam suatu *Driving cycle*. Selain pada bus transjakarta, penelitian lain juga membahas pengaplikasian pada sistem rem regeneratif pada mobil multiguna pedesaan. Pada penelitian tersebut, sistem rem regeneratif belum diaplikasikan pada roda depan yang dimana porsi pengeremannya yang lebih besar dibandingkan roda belakang [2] [3].

Dengan permasalahan dan hal-hal yang dapat diperbaiki dari penelitian sebelumnya, penulis memiliki ide untuk melakukan penelitian mengenai pengaplikasian sistem rem regeneratif pada mobil listrik berpengergerak roda depan dengan menggunakan *Driving cycle* yang lebih mendekati kenyataan. Mobil listrik yang digunakan sebagai objek penelitian adalah EZZY ITS II yang merupakan mobil listrik berpengergerak roda depan. Selain daripada itu, guna mendekati kondisi kenyataan, *Driving cycle* yang dipakai terbagi menjadi dua yaitu *Driving cycle* standar Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure (WLTP) dan *Driving cycle* yang didapatkan dari data logger pada

Tabel 1. Porsi Pengereman Ideal

j/g	F _{bf} /W	F _{br} /W
0	0	0,00
0,1	0,1	0,11
0,2	0,2	0,18
0,3	0,3	0,24
0,4	0,4	0,28
0,5	0,5	0,30
0,6	0,6	0,31
0,7	0,7	0,31
0,8	0,8	0,29

Tabel 2. Porsi Pengereman Minimal

j/g	μ	F _{bf} /W	F _{br} /W
0	0,08	0,04	-0,04
0,1	0,20	0,10	0,00
0,2	0,32	0,17	0,03
0,3	0,44	0,24	0,06
0,4	0,55	0,33	0,07
0,5	0,67	0,42	0,08
0,6	0,79	0,52	0,08
0,7	0,91	0,63	0,07
0,8	1,02	0,75	0,05

Tabel 3. Porsi Pengereman Aktual

j/g	F _{br} /W	F _{bf} /W
0	0	0
0,1	0,04	0,06
0,2	0,07	0,13
0,3	0,11	0,19
0,4	0,15	0,25
0,5	0,19	0,32
0,6	0,22	0,38
0,7	0,26	0,44
0,8	0,30	0,50

penelitian sebelumnya.

II. METODE PENELITIAN

Metode penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.

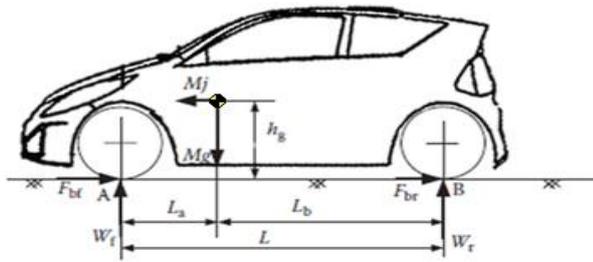
III. URAIAN PENELITIAN

A. Motor Generator Unit

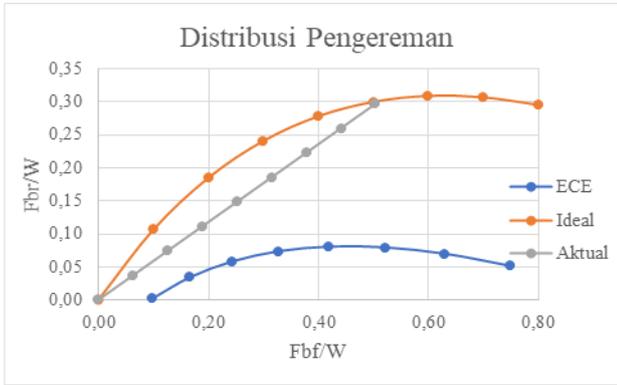
Motor listrik memiliki karakteristik yang seperti ditunjukkan pada gambar 2. Karakteristiknya yaitu menghasilkan torsi yang besar dan konstan dari putaran nol sampai putaran dasar (base speed). Putaran dasar adalah kecepatan putaran motor yang menjadi awal dari menurunnya torsi yang dihasilkan motor listrik seiring pertambahan kecepatan putaran motor. Berbeda dengan torsi, saat motor listrik mencapai putaran dasarnya, tenaga yang dihasilkan akan menjadi konstan hingga kecepatan maksimumnya. Dengan karakteristik tersebut, maka ada tiga faktor yang dijadikan pertimbangan dalam pemilihan motor listrik yaitu kecepatan dasar motor, kecepatan maksimum, dan torsi maksimum [3].

B. Gaya dan Energi pada Kendaraan Bergerak

Gaya hambatan angin (F_w) adalah gaya hambatan yang disebabkan oleh aliran udara di sekitar bodi kendaraan seperti yang ditunjukkan pada gambar 3. Efek dari aliran udara tersebut adalah terjadinya perbedaan tekanan antara bagian depan dan bagian belakang kendaraan. Tekanan udara yang lebih besar di bagian depan dibanding bagian belakang kendaraan menyebabkan terjadinya gaya hambatan angin. Gaya hambatan



Gambar 5. FBD Kendaraan saat pengereman.



Gambar 6. Kurva distribusi pengereman.

Tabel 4. Porsi Pengereman Aktual dan Regeneratif Aktual

j/g	Pengereman aktual		Pengereman regeneratif aktual			
	F _{br} /W	F _{bf} /W	F _{br} /W	F _{bf} /W	F _{br} /W	F _{bf} /W reg
			mek 1	reg 1	mek 2	2
0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,04	0,06	0	0,06	0	0,04
0,2	0,07	0,13	0	0,13	0	0,07
0,3	0,11	0,19	0	0,19	0,02	0,09
0,4	0,15	0,25	0	0,25	0,05	0,09
0,5	0,19	0,32	0	0,32	0,09	0,09
0,6	0,22	0,38	0	0,38	0,13	0,09
0,7	0,26	0,44	0	0,44	0,17	0,09
0,8	0,30	0,50	0	0,50	0,20	0,09

angin dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$F_w = 0,5 \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot V^2 \tag{1}$$

Gaya hambat *rolling* (F_r) adalah gaya hambat yang terjadi pada antara ban dan jalan. Gaya hambat ini terjadi akibat adanya defleksi pada roda yang berputar. Arah gaya hambat *rolling* berlawanan dengan arah dari percepatan kendaraan. Gambar 4 menunjukkan koefisien hambat *rolling* akibat pengaruh tekanan ban. Gaya hambat *rolling* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F_r = W \cdot \cos\alpha \cdot C_r \tag{1}$$

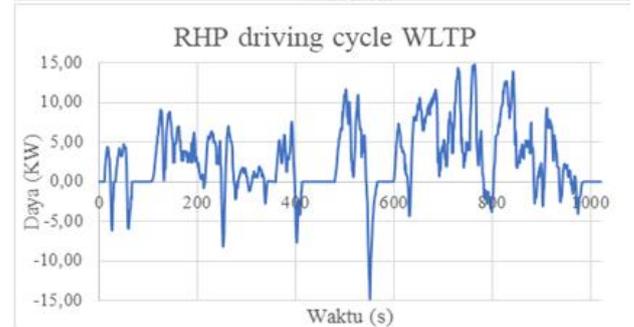
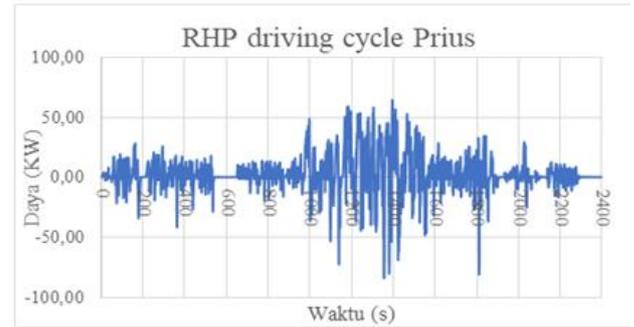
$$C_r = C_K \cdot C_A \cdot C_j \left(f_0 + f_s \left(\frac{V}{100} \right) \right) \tag{2}$$

Gaya hambat tanjak (F_g) adalah gaya hambat yang disebabkan oleh dua faktor yaitu berat kendaraan dan sudut tanjakan jalan. Gaya hambat tanjak dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F_g = W \cdot \sin\alpha \tag{3}$$

Tabel 5. Gaya Pengereman Aktual dan Regeneratif Aktual

j/g	Pengereman aktual		Pengereman regeneratif aktual			
	F _{bf} (N)	F _{br} (N)	F _{bf} mek 1 (N)	F _{bf} reg 1 (N)	F _{bf} mek 2 (N)	F _{bf} reg 2 (N)
0	0	0	0	0	0	0
0,1	689,64	1174,26	0	1174,26	0	689,64
0,2	1379,29	2348,51	0	2348,51	0	1379,29
0,3	2068,93	3522,77	0	3522,77	325,67	1743,26
0,4	2758,57	4697,03	0	4697,03	1015,31	1743,26
0,5	3448,22	5871,29	0	5871,29	1704,96	1743,26
0,6	4137,86	7045,54	0	7045,54	2394,60	1743,26
0,7	4827,50	8219,80	0	8219,80	3084,24	1743,26
0,8	5517,14	9394,06	0	9394,06	3773,89	1743,26



Gambar 7. RHP Driving cycle Prius dan Driving cycle WLTP.

Gaya inersia (F_i) adalah gaya hambat yang terjadi ketika kendaraan mengalami percepatan maupun perlambatan dan arah dari gaya hambat ini adalah kebalikan dari gaya arah kendaraan. Gaya inersia dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F_i = M \cdot a \tag{4}$$

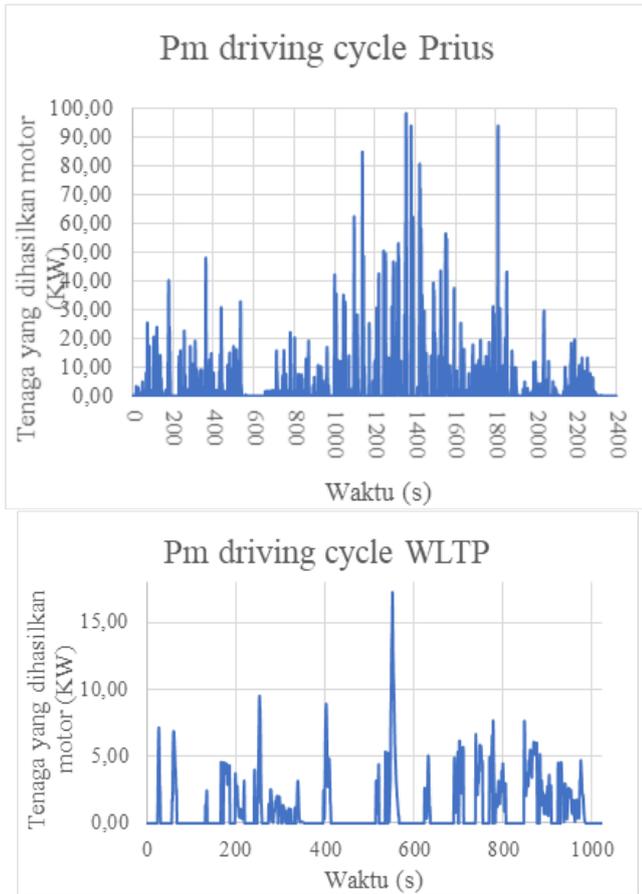
Gaya-gaya hambat tersebut dapat digunakan untuk mengetahui daya jalan kendaraan. RHP adalah tenaga yang digunakan kendaraan untuk melawan gaya hambat. Besar daya jalan atau yang biasa disebut *Road horse power* (RHP) yang diperlukan tersebut tergantung pada besaran gaya dorong yang diperlukan di tiap tingkat kecepatan, moda operasi kendaraan, dan besaran gaya traksi kendaraan dipengaruhi oleh gaya hambat yang terjadi di tiap moda operasi.

Pada kendaraan beroperasi pada jalan yang rata dengan kecepatan berubah, gaya traksi (F_t) yang dibutuhkan dan *Road horse power* (RHP) yang diperlukan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F_t = F_w + F_r + F_i \tag{6}$$

$$F_t = (0,5 \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot V^2 + W \cdot \cos\alpha \cdot C_r + M \cdot a)$$

$$RHP = F_t \cdot V \tag{7}$$



Gambar 8. Tenaga yang dihasilkan motor dengan *Driving cycle* Prius dan *Driving cycle* WLTP selama perlambatan.

$$RHP = (0,5 \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot V^2 + W \cdot \cos\alpha \cdot C_r + M \cdot a) \cdot V$$

Pada mobil listrik, mesin yang dipakai untuk menggerakkan kendaraan adalah motor listrik. Dengan diketahuinya nilai RHP kendaraan pada suatu moda operasi, tenaga motor listrik yang dihasilkan akan mengikuti persamaan sebagai berikut:

$$P_m = \frac{RHP}{\eta} \tag{8}$$

Pada kendaraan yang bergerak, selain adanya gaya hambat, terdapat pula energi kinetik yang terjadi. Energi kinetik terjadi karena adanya pergerakan dari kendaraan tersebut, baik itu percepatan maupun perlambatan. Energi kinetik pada kendaraan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$E_k = 0,5 \times k_m \times M \times (V_1^2 - V_2^2) \tag{9}$$

$$k_m = 1,04 + 0,0025 (I_t \times I_g)^2 \tag{10}$$

C. Distribusi Pengereman

Perhitungan distribusi pengereman terbagi menjadi pengereman ideal, minimal, dan aktual. Dalam perhitungan porsi pengereman ideal ini, digunakan prinsip kesetimbangan momen yang terjadi pada kendaraan. FBD kendaraan dapat dilihat pada gambar 5. Pengereman mengakibatkan perpindahan beban dari sumbu belakang (roda belakang) menuju sumbu depan (roda depan) kendaraan. Porsi pengereman ideal didapatkan dengan persamaan berikut:

$$\frac{F_{br}}{W} = \frac{\left(L_a - \frac{j}{g} h_g\right)}{\left(L_b + \frac{j}{g} h_g\right)} \times \frac{F_{bf}}{W} \tag{11}$$

Dalam menghitung porsi pengereman minimal, perlu diperhatikan aturan dari ECE yang mengharuskan roda depan terkunci lebih dahulu dibandingkan roda belakang. Dengan demikian, gaya pengereman dan porsi pengereman minimal di roda depan dengan koefisien adhesi kontak ban-jalan (μ) menjadi:

$$F_{bf} = W_f \times \mu \tag{12}$$

$$\frac{F_{bf}}{W} = \frac{\mu}{L} (L_b + (0,1 + 0,85(\mu - 0,2)h_g)) \tag{13}$$

Dalam menentukan porsi pengereman minimal pada roda belakang, dengan mengikuti peraturan ECE, yang menyatakan roda depan harus terkunci lebih dahulu daripada roda belakang, persamaan yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1

$$\frac{F_{br}}{W} \geq 0,1 + 0,85(\mu - 0,2) - \frac{F_{bf}}{W} \tag{14}$$

Perhitungan porsi pengereman regeneratif aktual bertujuan mendapatkan porsi maksimal dari sistem rem regeneratif untuk membantu pengereman kendaraan. Porsi pengereman regeneratif aktual pada satu rasio j/g adalah sama dengan porsi pengereman mekanis aktual pada roda depan apabila nilai dari porsi pengereman mekanis aktual pada roda depan lebih kecil dari porsi maksimal sistem rem regeneratif. Perhitungan porsi maksimal sistem rem regeneratif dapat menggunakan persamaan sebagai berikut yang merupakan fungsi dari torsi motor listrik:

$$\frac{F_{reg}}{W} = \frac{I_t \times I_g \times T_m \times \eta_m}{r \cdot W} \tag{15}$$

IV. HASIL DAN ANALISIS

A. Perhitungan Gaya dan Porsi Rem Mekanis dan Rem Regeneratif pada Kendaraan

Perhitungan gaya dan porsi rem mekanis dan rem regeneratif dimulai dengan perhitungan porsi pengereman ideal. Tujuan perhitungan porsi pengereman ideal adalah membentuk kurva distribusi pengereman ideal yang diperlukan untuk penentuan pengereman aktual. Kurva pengereman ideal diperlukan sebagai acuan dalam mendesain sistem pengereman. Nilai j/g pada persamaan divariasikan pada nilai 0 sampai 0,8 dan nilai F_{bf}/W divariasikan pada nilai 0 sampai 0,8. Berikut adalah contoh perhitungan dari porsi pengereman ideal dengan nilai j/g sebesar 0,2 dan nilai F_{bf}/W sebesar 0,2 dan hasil lengkapnya:

$$\frac{F_{br}}{W} = \frac{\left(L_a - \frac{j}{g} h_g\right)}{\left(L_b + \frac{j}{g} h_g\right)} \times \frac{F_{bf}}{W}$$

$$\frac{F_{br}}{W} = \frac{(1,2837 - 0,2,0,82)}{(1,0503 + 0,2,0,82)} \times 0,2$$

$$\frac{F_{br}}{W} = 0,18$$

Nilai dari j/g dan F_{bf}/W pada tabel 1 yaitu 0 sampai 0,8. Penentuan nilai F_{bf}/W yang sama dengan nilai j/g adalah untuk mendapatkan distribusi pengereman yang ideal pada roda depan maupun roda belakang kendaraan. Nilai F_{br}/W yang dihasilkan sesuai dengan nilai F_{bf}/W -nya akan dijadikan acuan dalam membuat kurva distribusi pengereman ideal.

Langkah selanjutnya yang dilakukan adalah menghitung porsi pengereman minimal. Dalam menghitung porsi pengereman minimal, perlu diperhatikan aturan dari ECE yang mengharuskan roda depan terkunci lebih dahulu dibandingkan roda belakang. Nilai j/g divariasikan dengan nilai 0 sampai 0,8. Berikut adalah contoh perhitungan dari porsi pengereman minimal kendaraan pada roda bagian depan dengan nilai j/g sebesar 0,2 dan contoh perhitungan dari porsi pengereman minimal kendaraan pada roda bagian belakang dengan nilai μ sebesar 0,32 dan hasil lengkapnya:

$$\mu = \frac{\frac{j}{g} - 0,1}{0,85} + 0,2$$

$$\mu = \frac{0,2 - 0,1}{0,85} + 0,2$$

$$\mu = 0,32$$

$$\frac{F_{bf}}{W} = \frac{\mu}{L} (L_b + (0,1 + 0,85(\mu - 0,2) h_g))$$

$$\frac{F_{bf}}{W} = \frac{0,32}{2,334} (1,0503 + (0,1 + 0,85(0,32 - 0,2) 0,82))$$

$$\frac{F_{bf}}{W} = 0,17$$

$$\frac{F_{br}}{W} = (0,1 + 0,85(0,32 - 0,2)) - \frac{F_{bf}}{W}$$

$$\frac{F_{br}}{W} = (0,1 + 0,85(0,32 - 0,2)) - 0,17$$

$$\frac{F_{br}}{W} = 0,03$$

Pada tabel 2, terdapat nilai F_{br}/W yang bernilai negatif yaitu pada nilai j/g sebesar 0. Hal ini menandakan bahwa nilai F_{br}/W pada rentang nilai j/g tersebut tidak berlaku dan tidak mempengaruhi terhadap pengereman minimum. Hal ini juga membuktikan bahwa persyaratan dari regulasi ECE yang menetapkan nilai j/g yang berlaku yaitu 0,2-0,8 berhasil dipenuhi. Hal ini karena pada rentang nilai tersebut, nilai dari perhitungan F_{br}/W yang dilakukan tidak ada yang bernilai negatif.

Langkah menghitung porsi pengereman aktual dimulai dengan menentukan kemiringan dari garis pengereman aktual (β) yang berfungsi sebagai nilai yang tetap untuk mengatur gaya pengereman pada roda depan dan belakang. Penentuan nilai tersebut harus memperhatikan garis distribusi pengereman ideal dan minimal. Penentuan nilai β adalah hasil try and error yang dimana mengharuskan garis distribusi pengereman berada dibawah kurva pengereman ideal dan diatas kurva pengereman minimal. Perhitungan dari porsi pengereman aktual kendaraan pada roda bagian belakang dan depan dengan penentuan nilai kemiringan garis β sebesar 0,37

dan nilai j/g sebesar 0,2 dapat dicontohkan sebagai berikut beserta hasil lengkapnya pada tabel 3:

$$\frac{F_{br}}{W} = \beta \cdot \frac{j}{g}$$

$$\frac{F_{br}}{W} = 0,37,0,2$$

$$\frac{F_{br}}{W} = 0,07$$

$$\frac{F_{bf}}{W} = \frac{j}{g} - \frac{F_{br}}{W}$$

$$\frac{F_{bf}}{W} = 0,2 - 0,07 \quad \frac{F_{bf}}{W} = 0,13$$

Berdasarkan gambar 6, dapat dilihat garis pengereman aktual pada kendaraan berada dibawah kurva garis pengereman ideal dan diatas kurva garis pengereman ideal. Hal ini menandakan bahwa penentuan β sudah baik dan sesuai dengan regulasi pengereman yang dibuat oleh ECE. Dengan terpenuhinya regulasi tersebut, maka pengereman dari kendaraan adalah stabil dan aman, karena oversteer pada kendaraan saat pengereman dapat dihindari.

Langkah akhir dari perhitungan ini adalah menghitung porsi pengereman regeneratif aktual. Porsi pengereman regeneratif aktual pada satu rasio j/g adalah sama dengan porsi pengereman mekanis aktual pada roda depan apabila nilai dari porsi pengereman mekanis aktual pada roda depan lebih kecil dari porsi maksimal sistem rem regeneratif. Apabila porsi pengereman aktual roda bagian depan melebihi porsi maksimal rem regeneratif, sisa pengereman dilanjutkan dengan pengereman mekanis

Perhitungan dari porsi pengereman regeneratif aktual dilakukan dengan memvariasikan nilai j/g sebesar 0 sampai 0,8 dan rasio *gear* transmisinya. Perhitungan porsi maksimal sistem rem regeneratif untuk *gear* pertama dan kedua dapat dicontohkan sebagai berikut:

$$\frac{F_{reg}}{W} = \frac{I_t \times I_g \times T_m \times \eta_m}{r}$$

$$\frac{F_{reg}}{W} 1 = \frac{2,362 \times 4,5 \times 370 \times 0,95}{0,3085}$$

$$\frac{F_{reg}}{W} 1 = 0,61$$

$$\frac{F_{reg}}{W} 2 = \frac{0,36 \times 4,5 \times 370 \times 0,95}{0,3085}$$

$$\frac{F_{reg}}{W} 2 = 0,09$$

Perhitungan porsi pengereman aktual dan porsi regeneratif aktual dengan seluruh nilai variasi j/g dan rasio *gear* transmisi dapat dilihat pada tabel 4.

Dengan melihat hasil tabel 4, pada *gear* pertama, sistem rem roda depan kendaraan pada nilai j/g sebesar 0 sampai 0,8

adalah penuh mengandalkan sistem rem regeneratif saja. Hal ini dilihat dengan nilai F_{bf}/W mek 1 memiliki nilai sama dengan nol pada rentang nilai j/g tersebut. Pada *gear* kedua, sistem rem roda depan kendaraan pada nilai j/g sebesar 0 sampai 0,2 adalah penuh mengandalkan sistem rem regeneratif saja. Hal ini dilihat dengan nilai F_{bf}/W mek 2 memiliki nilai sama dengan nol pada rentang nilai j/g tersebut. Hal yang dimaksud kendaraan mengandalkan sistem rem regeneratif saja untuk pengereman roda depan adalah rem mekanis tidak bekerja sama sekali dalam membantu pengereman kendaraan dan hanya mengandalkan rem regeneratif saja. Hal ini bisa terjadi dikarenakan porsi pengereman pada roda depan kendaraan lebih kecil sama dengan porsi pengereman maksimal rem regeneratif, sehingga porsi pengereman roda depan yang dibutuhkan dapat dipenuhi pengereman regeneratif saja.

Gaya pengereman mekanis dan pengereman regeneratif pada kendaraan didapatkan dengan mengalikan porsi pengereman dengan nilai gaya normal kendaraan. Contoh perhitungan dari gaya pengereman adalah sebagai berikut:

$$F_{bf} = \frac{F_{bf}}{W} \cdot W$$

$$F_{bf} = 0,07 \cdot 18639$$

$$F_{bf} = 1379,29$$

Perhitungan gaya pengereman aktual dan porsi regeneratif aktual dengan seluruh nilai variasi j/g dan rasio *gear* transmisi dapat dilihat pada tabel 5.

Dengan melihat hasil tabel 5 diatas, pada *gear* pertama, sistem rem roda depan kendaraan pada nilai j/g sebesar 0 sampai 0,8 adalah penuh mengandalkan sistem rem regeneratif saja. Hal ini dilihat dengan nilai F_{bf} mek 1 memiliki nilai sama dengan nol pada rentang nilai j/g tersebut. Pada *gear* kedua, sistem rem roda depan kendaraan pada nilai j/g sebesar 0 sampai 0,2 adalah penuh mengandalkan sistem rem regeneratif saja. Hal ini dilihat dengan nilai F_{bf} mek 2 memiliki nilai sama dengan nol pada rentang nilai j/g tersebut. Hal yang dimaksud kendaraan mengandalkan sistem rem regeneratif saja untuk pengereman roda depan adalah rem mekanis tidak bekerja sama sekali dalam membantu pengereman kendaraan dan hanya mengandalkan rem regeneratif saja. Hal ini bisa terjadi dikarenakan gaya pengereman pada roda depan kendaraan lebih kecil sama dengan gaya pengereman maksimal rem regeneratif, sehingga gaya pengereman roda depan yang dibutuhkan dapat dipenuhi pengereman regeneratif saja.

B. Perhitungan Kontribusi Sistem Rem Regeneratif

Perhitungan kontribusi sistem rem regeneratif diawali dengan menghitung gaya hambat angin (F_w), gaya hambat *rolling* (F_r), dan gaya inersia (F_i) pada kendaraan. Contoh perhitungan dari gaya hambat angin (F_w) pada kendaraan dengan *Driving cycle* Prius pada detik ke-2 adalah sebagai berikut:

$$F_w = 0,5 \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot V^2$$

$$F_w = (0,5) \cdot (1,2) \cdot (1,79) \cdot (0,4) \cdot (0,28)^2$$

$$F_w = 0,03 \text{ N}$$

Contoh perhitungan gaya hambat *rolling* (F_r) pada kendaraan dengan *Driving cycle* Prius pada detik ke-2,

kondisi lintasan adalah aspal yang datar, dan tekanan ban radial dengan kembangan sebesar 40 Psi adalah sebagai berikut:

$$F_r = W \cdot \cos \alpha \cdot C_r$$

$$C_r = C_K \cdot C_A \cdot C_j (f_o + f_s \left(\frac{V}{100} \right))$$

$$F_r = 18639 \cdot \cos (0) \cdot (1) \cdot (2) \cdot (1) (0,008 + 0,00025 \left(\frac{1}{100} \right))$$

$$F_r = 298,32 \text{ N}$$

Contoh perhitungan gaya inersia (F_i) pada kendaraan dengan *Driving cycle* Prius pada detik ke-2 adalah sebagai berikut:

$$F_i = M \cdot a$$

$$F_i = M \cdot \left(\frac{V_3 - V_2}{t_3 - t_2} \right)$$

$$F_i = 1900 \cdot \left(\frac{0 - 0,28}{3 - 2} \right)$$

$$F_i = -527,82 \text{ N}$$

Langkah selanjutnya dari perhitungan kontribusi sistem rem regeneratif setelah mengetahui besarnya gaya hambat yang terjadi pada kendaraan adalah menghitung RHP kendaraan. RHP kendaraan adalah tenaga yang digunakan kendaraan untuk melawan gaya hambat baik itu saat kendaraan mengalami percepatan maupun perlambatan. Setiap gaya hambat yang dihasilkan oleh kendaraan pada suatu *Driving cycle* akan mempengaruhi RHP kendaraan yang dihasilkan. RHP kendaraan dihitung pada setiap kondisi *Driving cycle*, baik kendaraan itu mengalami percepatan, perlambatan, dan kecepatan konstan. Dari setiap kondisi tersebut, RHP yang dihasilkan dijumlahkan secara keseluruhan untuk mendapatkan total RHP kendaraan. Perhitungan persamaan tersebut memiliki dua kemungkinan hasil, yaitu bernilai positif atau negatif. Angka bernilai positif menandakan bahwa kendaraan mengalami percepatan. Angka bernilai negatif menandakan kendaraan mengalami perlambatan. Contoh perhitungan RHP kendaraan pada *Driving cycle* Prius detik ke-2 adalah sebagai berikut:

$$RHP = (F_w + F_r + F_i) V$$

$$RHP = (0,03 + 298,32 + (-527,82)) \cdot 0,28$$

$$RHP = -0,06 \text{ KW}$$

$$RHP_{\text{Perlambatan}} = 0,06 \text{ KW}$$

RHP perlambatan adalah RHP yang dihasilkan kendaraan saat mengalami perlambatan saja. Hasil perhitungan lengkap mengenai RHP pada setiap detik pada tiap *Driving cycle* dapat dilihat pada lampiran. Berikut adalah grafik yang menunjukkan RHP kendaraan pada tiap *Driving cycle*:

Gambar 7 diatas menunjukkan RHP kendaraan pada tiap detik untuk setiap *Driving cycle*. RHP yang bernilai negatif menandakan kendaraan mengalami perlambatan dan menandakan sistem rem regeneratif bekerja. Apabila dibandingkan, *Driving cycle* Prius memiliki jumlah perlambatan yang lebih banyak yaitu sebanyak 962 detik perlambatan dari total 2400 detik yang tersedia daripada

Driving cycle WLTP dengan 388 detik perlambatan dari total 1022 detik yang tersedia. Total RHP pada *Driving cycle* Prius adalah 22435,49 KW dan pada *Driving cycle* WLTP adalah 3684,56 KW. Dengan perbedaan jumlah perlambatan yang terjadi, kontribusi sistem regeneratif pada *Driving cycle* Prius seharusnya lebih besar dibandingkan *Driving cycle* WLTP. Hal ini dikarenakan dengan semakin banyak perlambatan yang terjadi, maka sistem rem regeneratif semakin sering bekerja.

Langkah akhir yang dilakukan adalah membandingkan total tenaga yang dihasilkan motor (P_m) setiap perlambatan dengan total RHP kendaraan. Berikut adalah contoh perhitungan tenaga yang dihasilkan motor beserta grafik tenaga yang dihasilkan motor:

$$P_m = \frac{RHP}{\eta}$$

$$P_m = \frac{0,06}{(0,95 \times 0,95 \times 0,95)}$$

$$P_m = 0,07 \text{ KW}$$

Gambar 8 diatas adalah grafik yang menunjukkan tenaga yang dihasilkan oleh motor pada tiap detiknya untuk setiap *Driving cycle*. Perhitungan untuk total nilai tenaga yang dihasilkan motor melibatkan total RHP perlambatan dibandingkan dengan efisiensi dari drivetrain. Grafik P_m bernilai nol menunjukkan bahwa kendaraan sedang tidak mengalami perlambatan sehingga sistem rem regeneratif tidak bekerja. Dilihat dari grafik-grafik diatas, *Driving cycle* Prius memiliki total nilai tenaga yang dihasilkan motor lebih besar yaitu sebesar 8709,53 KW dibandingkan dengan *Driving cycle* WLTP sebesar 1118,55 KW. Hal ini dikarenakan jumlah perlambatan yang terjadi pada *Driving cycle* Prius lebih banyak dibandingkan *Driving cycle* WLTP yang menandakan pada *Driving cycle* Prius, sistem rem regeneratif lebih banyak bekerja dan motor menghasilkan tenaga yang lebih banyak pula.

Perbandingan tersebut akan menghasilkan besaran persentase kontribusi sistem rem regeneratif terhadap kebutuhan daya kendaraan. Persamaan yang dipakai guna mendapatkan persentase kontribusi sistem rem regeneratif terhadap kebutuhan daya kendaraan adalah persamaan (34). Perhitungan kontribusi sistem rem regeneratif terhadap kebutuhan daya kendaraan pada setiap *Driving cycle* yang dipilih adalah sebagai berikut:

$$\%K_{reg} = \frac{\text{Total } P_m \text{ perlambatan}}{\text{Total RHP kendaraan}} \times 100\%$$

$$\%K_{reg \text{ Prius}} = \frac{8709,53}{22435,49} \times 100\%$$

$$\%K_{reg \text{ Prius}} = 38,82\%$$

$$\%K_{reg \text{ WLTP}} = \frac{1118,55}{3684,56} \times 100\%$$

$$\%K_{reg \text{ WLTP}} = 30,36\%$$

Dapat dilihat pada perhitungan diatas, kontribusi sistem rem regeneratif terhadap kebutuhan daya kendaraan pada *Driving cycle* Prius lebih besar dengan nilai 38,82% dibandingkan *Driving cycle* WLTP yang menghasilkan nilai 30,36%. Perbedaan ini dipengaruhi dengan total perlambatan

pada *Driving cycle* Prius yang lebih banyak dibanding *Driving cycle* WLTP. Arti dari persentase yang dihasilkan adalah sebanyak 38,82% daya yang dibutuhkan kendaraan pada *Driving cycle* Prius dapat dipenuhi oleh sistem rem regeneratif. Sedangkan untuk *Driving cycle* WLTP, sebanyak 30,36% daya yang dibutuhkan kendaraan dapat dipenuhi oleh sistem rem regeneratif.

C. Perhitungan Efisiensi Sistem Rem Regeneratif

Perhitungan efisiensi sistem rem regeneratif diawali dengan menghitung energi bangkitan kendaraan. Energi bangkitan adalah energi listrik yang dihasilkan dari sistem rem regeneratif. Energi bangkitan kendaraan didasari dari tenaga yang dihasilkan motor selama perlambatan. Tenaga motor yang dihasilkan motor pada suatu *Driving cycle* yang terbagi setiap satu detik dikonversikan menjadi energi bangkitan dengan satuan J. Total waktu yang tersedia pada *Driving cycle* Prius adalah 2400 detik dan *Driving cycle* WLTP sebanyak 1022 detik. Berikut contoh perhitungan energi bangkitan *Driving cycle* Prius pada detik ke-2:

$$E_b = P_m \text{ Perlambatan} \left(\frac{KJ}{s} \right) \times 1(s) \times \frac{1000}{1} \left(\frac{J}{KJ} \right)$$

$$E_{b2 \text{ Prius}} = 0,07 \left(\frac{KJ}{s} \right) \times 1(s) \times \frac{1000}{1} \left(\frac{J}{KJ} \right)$$

$$E_{b2 \text{ Prius}} = 70 \text{ J}$$

$$\text{Total } E_b \text{ Prius} = \Delta E_b = E_{b1} + E_{b2} + \dots + E_{b2400}$$

$$\text{Total } E_b \text{ Prius} = 8709534,29 \text{ J} = 8,71 \text{ MJ}$$

$$\text{Total } E_b \text{ WLTP} = \Delta E_b = E_{b1} + E_{b2} + \dots + E_{b1022}$$

$$\text{Total } E_b \text{ WLTP} = 1118550,91 \text{ J} = 1,12 \text{ MJ}$$

Langkah selanjutnya adalah menghitung energi kinetik kendaraan pada setiap detik perlambatan suatu *Driving cycle*. Energi kinetik adalah energi yang terjadi karena adanya pergerakan dari kendaraan tersebut, baik itu percepatan maupun perlambatan. Pada perhitungan nilai total energi kinetik perlambatan, apabila terdapat energi kinetik yang bernilai negatif pada suatu detik, maka energi kinetik tersebut dijadikan sama dengan nol. Hal ini dikarenakan pada detik tersebut, kendaraan tidak mengalami perlambatan. Contoh perhitungan energi kinetik dengan *Driving cycle* Prius detik ke-2 dan nilai total energi kinetik pada tiap *Driving cycle* adalah sebagai berikut:

$$E_{k2 \text{ Prius}} = 0,5 \times km \times M \times (V_2^2 - V_3^2)$$

$$km = 1,04 + 0,0025 (I_t \times I_g)^2$$

$$km = 1,04 + 0,0025 (2,362 \times 4,25)^2 = 1,29$$

$$E_{k2 \text{ Prius}} = 0,5 \times 1,29 \times 1900 \times (0,28^2 - 0^2)$$

$$E_{k2 \text{ Prius}} = 94,72 \text{ J}$$

$$\text{Total } E_k \text{ perlambatan Prius} = \Delta E_k$$

$$= E_{k1} + E_{k2} + \dots + E_{k2400}$$

$$\text{Total } E_k \text{ perlambatan Prius} = 12816628,46 \text{ J} = 12,82 \text{ MJ}$$

$$\text{Total } E_k \text{ perlambatan WLTP} = \Delta E_k = E_{k1} + E_{k2} + \dots + E_{k1022}$$

$$\text{Total } E_k \text{ perlambatan WLTP} = 1895837,46 \text{ J} = 1,90 \text{ MJ}$$

Hasil perhitungan lengkap mengenai energi bangkitan (E_b) dan energi kinetik (E_k) kendaraan pada setiap detik pada tiap *Driving cycle* dapat dilihat pada lampiran. Langkah terakhir yang dilakukan adalah membandingkan total energi bangkitan dengan total energi kinetik selama perlambatan. Perbandingan tersebut akan menghasilkan besar persentase efisiensi sistem rem regeneratif. Perhitungan efisiensi sistem regeneratif untuk tiap *Driving cycle* yang dipilih adalah sebagai berikut:

$$\eta_{\text{reg}} = \frac{\text{Total } E_b}{\text{Total } E_k \text{ perlambatan}} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{reg Prius}} = \frac{8,71}{12,82} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{reg Prius}} = 67,94\%$$

$$\eta_{\text{reg WLTP}} = \frac{1,12}{1,90} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{reg WLTP}} = 58,94\%$$

Arti dari persentase yang dihasilkan adalah sistem rem regeneratif dapat mengkonversikan sebanyak 67,94% dari total energi kinetik yang dihasilkan selama perlambatan pada *Driving cycle* Prius untuk dijadikan energi listrik. Sedangkan untuk *Driving cycle* WLTP, sistem rem regeneratif dapat mengkonversikan sebanyak 58,94% dari total energi kinetik yang dihasilkan selama perlambatan. Perbedaan nilai efisiensi ini terjadi dikarenakan total perlambatan yang terjadi pada *Driving cycle* Prius lebih banyak dari *Driving cycle* WLTP. Nilai efisiensi pada kedua *Driving cycle* ini sudah cukup baik, karena lebih dari 50% dari energi kinetik yang

selama perlambatan yang berpotensi diubah menjadi energi listrik mampu diubah oleh sistem rem regeneratif baik untuk *Driving cycle* Prius maupun *Driving cycle* WLTP.

V. KESIMPULAN/RINGKASAN

Berdasarkan analisa pengaplikasian sistem rem regeneratif pada EZZY ITS II yang telah dilakukan, beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut: (1)Porsi dan gaya pengereman regeneratif pada *gear* pertama bekerja secara penuh tanpa adanya bantuan dari rem mekanis pada rentang j/g 0 sampai 0,8. Sedangkan pada *gear* kedua, porsi dan gaya pengereman regeneratif bekerja secara penuh pada rentang j/g 0 sampai 0,2; (2)Besarnya kontribusi sistem rem regeneratif terhadap kebutuhan daya kendaraan pada *Driving cycle* Prius adalah 38,82% dan pada *Driving cycle* WLTP adalah 30,36%; (3)Besarnya efisiensi sistem rem regeneratif pada mobil EZZY ITS II dengan *Driving cycle* Prius adalah 67,94% dan dengan *Driving cycle* WLTP adalah 58,94%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Auto, "Support of electric-car sales in individual european countries and numbers of newly registered electric vehicles in 2018," Mladá Boleslav, Czech Republic, 2019.
- [2] C. R. Baradwadya, "Analisa pengaplikasian sistem 'kers' pada bus transjakarta dengan sistem penyimpanan pada baterai," Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2016.
- [3] P. B. Perdana and I. N. Sutantra, "Analisa penggunaan regenerative brake pada mobil multiguna pedesaan bertenaga listrik," Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2018.