

Analisa Energi Bangkitan dan Efisiensi dari Penggunaan *Regenerative Brake* pada *Multipurpose Electric Vehicle ITS (MEvITS)*

Ananda Ezra Yohanes dan Harus Laksana Guntur
Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
E-mail: haruslg@me.its.ac.id

Abstrak—Sebuah sistem pengereman merupakan salah satu sistem yang sangat penting pada kendaraan bermotor. Dikarenakan sistem pengereman berfungsi dalam proses perlambatan dalam kendaraan. Salah satu ide terbaru dalam sistem pengereman adalah regenerative brake. Sistem pengereman regenerative brake merupakan sistem pengereman yang memanfaatkan energi yang terbuang dari putaran roda saat proses pengereman, kemudian akan diubah menjadi energi yang dapat disimpan dalam baterai. Pada penelitian ini akan diteliti mengenai porsi pengereman antara sistem rem mekanis dan sistem pengereman regenerative brake, analisa potensi energi bangkitan regenerative brake pada MEvITS dalam satu siklus driving cycle WLTC Class 1, dan akan dicari efisiensi dari penggunaan sistem regenerative brake pada MEvITS. Penelitian akan dilakukan dengan metode simulasi menggunakan software Matlab-Simulink, dengan input Driving Cycle WLTC Class 1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa porsi regenerative brake bervariasi, dan paling besar pada gigi transmisi 1 yaitu sebesar 0,11g, dan akan semakin kecil pada transmisi di atasnya. Kemudian hasil simulasi potensi energi bangkitan terbesar terdapat pada gigi transmisi 3 kendaraan yaitu sebesar 0,16 kWh, dan akan semakin kecil pada gigi transmisi di atasnya. Dan efisiensi terbesar didapat juga pada gigi transmisi 3 yaitu sebesar 46,12% dibandingkan dengan energi pengereman total kendaraan.

Kata Kunci—Energi Bangkitan, Gaya Pengereman, Porsi Pengereman, *Regenerative Brake*, Simulasi *Matlab-Simulink*.

I. PENDAHULUAN

Jumlah populasi pada kota-kota besar di Indonesia semakin hari semakin meningkat. Jumlah penduduk disalah satu kota besar di Indonesia, yaitu Jakarta mencapai 10,61 juta jiwa pada 2021. Kemudian berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik Kota Surabaya, jumlah penduduk pada tahun 2020 mencapai 2,9 juta jiwa yang pada tahun sebelumnya adalah 2,8 juta jiwa. Dapat disimpulkan bahwa tiap tahunnya jumlah penduduk pada kota-kota besar di Indonesia akan semakin meningkat dan akan menimbulkan sebuah masalah yaitu meningkatnya polusi udara. Berdasarkan data dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), kualitas udara di wilayah Jakarta dan sekitarnya semakin turun [1]. Tercatat dari konsentrasi PM2.5 mencapai puncaknya pada level 148 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (mikrogram per meter kubik) yang termasuk dalam kategori sangat tidak sehat, dimana yang seharusnya level pada kategori baik adalah pada rentang nilai 0 - 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Mitigasi dalam pengurangan polusi udara ini juga termasuk ke dalam tujuan pembangunan berkelanjutan yang ke 13 mengenai penanganan perubahan iklim. Salah satu solusi yang sudah ada dalam menangani permasalahan polusi udara ini adalah perkembangan kendaraan listrik (electric vehicle) di Indonesia. Berdasarkan data dari Kementerian Perindustrian,

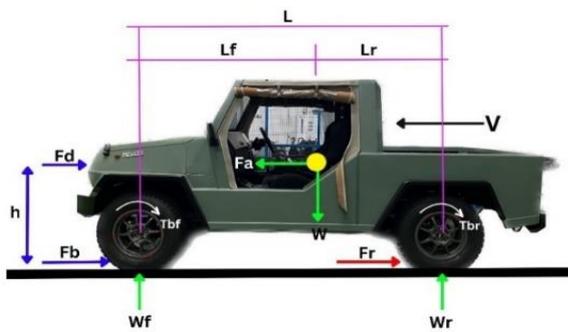
Tabel 1.
Spesifikasi MEvITS

Parameter	Besarnya Parameter
Wheelbase	2250 mm
Track	1413 mm
Ground Clearance	258 mm
Total Height	1601 mm
Massa Total	835 kg
Berat Total (W)	8191,35 N
Massa Dengan Muatan	1135 kg
Berat Total dengan Muatan (Wb)	11134,5 N
Jarak Sumbu Roda Depan ke CoG (L_f)	1,12 m
Jarak Sumbu Roda Belakang ke CoG (L_r)	1,13 m
Tinggi CoG ke Sumbu Roda (h)	0,39 m
Massa Jenis Udara	1,23 kg/m^3
Koefisien Drag Kendaraan	0,31
Luas Frontal Kendaraan	2,37 m^2
Koefisien Rolling	0,01
Koefisien Adhesi Jalan	0,9
Diameter Roda	627,38 mm

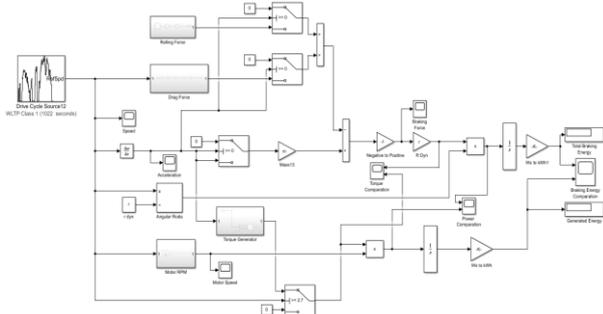
jumlah kendaraan listrik di Indonesia telah mengalami peningkatan yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Jumlah kendaraan ini akan terus ditingkatkan karena diperkuat melalui penerbitan Peraturan Presiden Nomor 55 Tahun 2019 tentang percepatan program kendaraan bermotor listrik berbasis baterai (Battery Electric Vehicle/BEV) untuk transportasi jalan [2]. Pemerintah Indonesia juga telah meningkatkan dukungan terhadap mobil listrik dengan mengeluarkan berbagai insentif dan regulasi yang bertujuan untuk meningkatkan akses masyarakat ke kendaraan listrik diantaranya adalah pengurangan pajak, subsidi pelanggan dan pengurangan biaya kendaraan. Selain itu kendaraan listrik juga dinilai lebih efisien dan lebih ramah lingkungan. Salah satu teknologi yang meningkatkan efisiensi dari sebuah kendaraan listrik adalah regenerative brake.

Sistem regenerative brake merupakan sebuah sistem pengereman yang telah digunakan hampir di seluruh mobil listrik yang sudah di produksi. Regenerative brake sendiri adalah sebuah sistem pengereman yang mengubah energi kinetik menjadi energi listrik yang tersimpan dalam baterai. Regenerative brake akan memanfaatkan energi saat pengereman yang terbuang lalu dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator. Untuk meningkatkan efisiensi dan dari regenerative brake, pada umumnya penggunaan sistem ini dikombinasikan dengan sistem pengereman mekanis, dan diperlukan juga porsi pengereman antara sistem pengereman regenerative brake dan sistem rem mekanis. Dapat disimpulkan bahwa proses dari sistem regenerative brake ini dapat memperpanjang jangka waktu pemakaian dan meningkatkan efisiensi dari bahan bakar kendaraan tersebut.

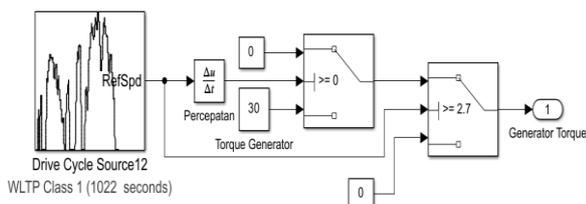
Sistem regenerative braking sangat cocok bila digunakan



Gambar 1. Free body diagram MEvITS.



Gambar 2. Blok simulink gabungan.



Gambar 3. Blok simulink torsi generator.

pada Multipurpose Electric Vehicle ITS (MEvITS). Mobil tersebut merupakan mobil listrik yang dirancang dan dikembangkan sepenuhnya oleh ITS, dan bekerja sama dengan beberapa start up ITS. Proyek pembuatan mobil listrik ini diketuai oleh Prof. Dr-Eng. Harus Laksana Guntur S.T., M.Eng. Beliau menjelaskan MEvITS difokuskan untuk kebutuhan operasional di perusahaan, bandara, pertanian, dan sebagainya. Dengan spesifikasi dan fungsi operasional dari MEvITS, tentunya sistem regenerative braking sangat cocok bila diterapkan pada mobil listrik tersebut, karena dari siklus berkendara yang akan banyak proses pengereman, membuat penerapan regenerative brake pada MEvITS akan semakin efisien. Maka dari itu diadakan penelitian ini untuk dapat menganalisa besar energi bangkitan dan efisiensi dari sistem regenerative brake pada Multipurpose Electric Vehicle ITS.

II. URAIAN PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan. Tahapan pertama adalah melakukan pembelajaran dan studi literatur mengenai sistem *regenerative brake* dan mengumpulkan data-data spesifikasi MEvITS. Proses studi literatur dilakukan dengan memanfaatkan berbagai sumber, diantaranya adalah penelitian terdahulu, *text book*, jurnal penelitian tugas akhir, dan beberapa jurnal internasional. Setelah itu dilakukan juga pengumpulan data mengenai *driving cycle* yang akan digunakan. Setelah itu penelitian ini

Tabel 2. Data Pengereman Aktual Kendaraan

a/g	Fbf/W	Fbr/W
0,00	0,00	0,00
0,10	0,06	0,04
0,20	0,12	0,08
0,30	0,17	0,13
0,40	0,23	0,17
0,50	0,29	0,21
0,60	0,35	0,25
0,70	0,41	0,29
0,80	0,46	0,34

Tabel 3.

Porsi Pengereman Mekanis dan Regenerative Brake

a/g	Porsi Pengereman Aktual		Porsi Regenerative	
	Fbr/W	Fbf/W	Fbf/W(Mek)	Fbf/W(Reg)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,10	0,04	0,06	0,01	0,04
0,20	0,08	0,12	0,07	0,04
0,30	0,13	0,17	0,13	0,04
0,40	0,17	0,23	0,19	0,04
0,50	0,21	0,29	0,25	0,04
0,60	0,25	0,35	0,30	0,04
0,70	0,29	0,41	0,36	0,04
0,80	0,34	0,46	0,42	0,04

Tabel 4.

Perbandingan Gaya Pengereman Mekanis dan Regenerative

Gaya Pengereman Mekanik vs Regenerative (3rd Gear)				
a/g	Gaya Pengereman Mekanik		Gaya Regenerative	
	Fbr	Fbf	Fbf (Mek)	Fbf (Reg)
0	0	0	0	0
0,1	467,649	645,801	163,0358243	482,7651757
0,2	935,298	1291,602	808,8368243	482,7651757
0,3	1402,947	1937,403	1454,637824	482,7651757
0,4	1870,596	2583,204	2100,438824	482,7651757
0,5	2338,245	3229,005	2746,239824	482,7651757
0,6	2805,894	3874,806	3392,040824	482,7651757
0,7	3273,543	4520,607	4037,841824	482,7651757
0,8	3741,192	5166,408	4683,642824	482,7651757

Tabel 5.

Efisiensi Sistem Regenerative Brake

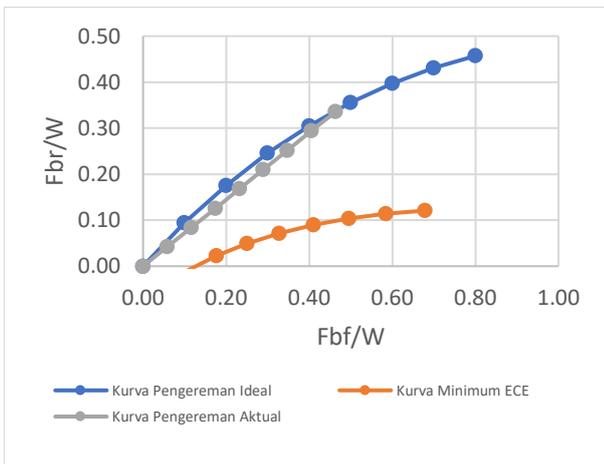
Gigi	Energi bangkitan	Energi Bangkitan Efektif	Energi Pengereman Kendaraan	Efisiensi Regenerative Brake
3	0,18	0,16		46,12%
4	0,13	0,12	0,35	34,13%
5	0,11	0,10		28,88%

akan dilakukan dengan beberapa tahapan untuk dapat mencapai rumusan masalah yang ada (Tabel 1).

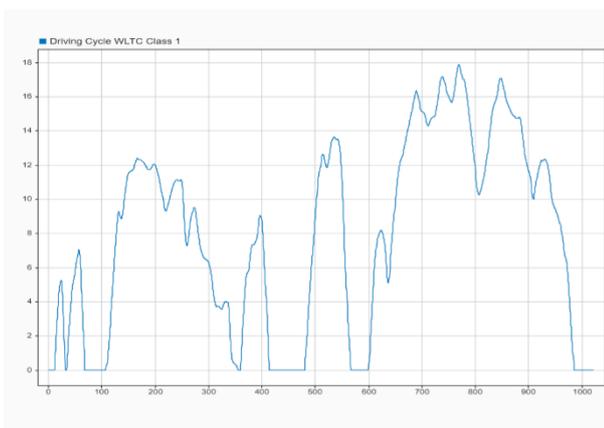
A. Porsi Pengereman

Porsi pengereman bertujuan untuk mengetahui pembagian porsi pengereman dari sistem pengereman mekanis dan sistem pengereman *regenerative* pada saat MEvITS melakukan proses pengereman. Pertama-tama akan dilakukan perhitungan untuk mencari kurva pengereman kendaraan. Kurva pengereman kendaraan bertujuan agar kendaraan dapat dikatakan aman dan stabil saat mengalami proses pengereman.

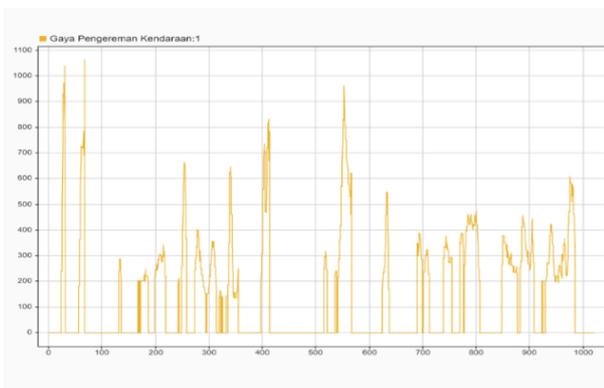
Tahap pertama untuk mencari proses pengereman adalah melakukan perhitungan kurva ideal [2-3]. Kurva ideal bertujuan untuk membatasi agar roda bagian belakang kendaraan tidak mengalami *lock* terlebih dahulu pada saat proses pengereman, agar kendaraan tidak mengalami *oversteer*. Kurva pengereman ideal dapat dihitung menggunakan Persamaan 1 dengan variasi nilai a/g dan Fbf/W dari 0 hingga 0,8



Gambar 4. Kurva pengereman MEvITS.



Gambar 5. Permodelan driving cycle.



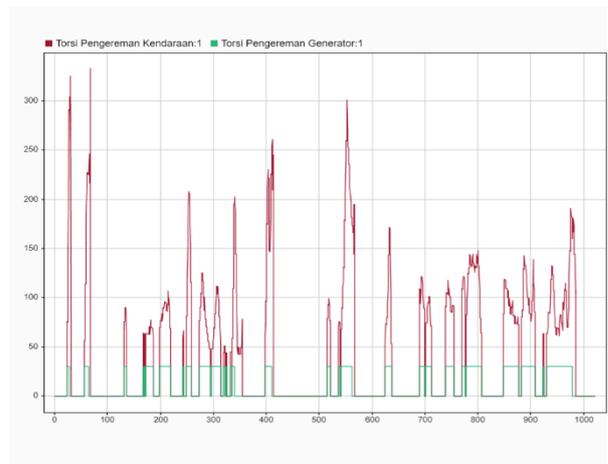
Gambar 6. Grafik gaya pengereman kendaraan.

$$\frac{Fbr}{W} = \frac{\left(\frac{Lf - \frac{a}{g}h}{Lr + \frac{a}{g}h}\right) \cdot \frac{Fbf}{W}}{\left(\frac{Lf - \frac{a}{g}h}{Lr + \frac{a}{g}h}\right) \cdot \frac{Fbf}{W}} \quad (1)$$

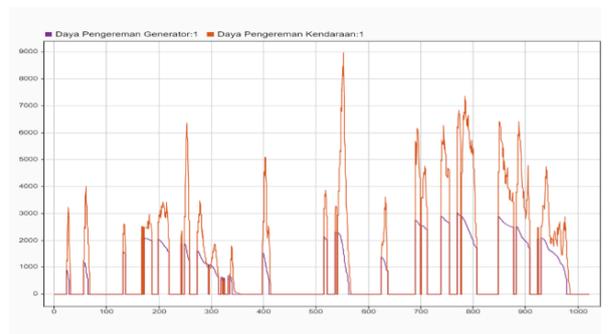
Tahap kedua adalah mencari kurva pengereman minimum menurut regulasi ECE. Kurva minimum bertujuan untuk membatasi agar roda bagian depan kendaraan tidak mengalami lock terlebih dahulu disaat proses pengereman. Untuk mencari kurva minimum, diawali dengan mencari nilai μ melalui persamaan 2 dengan variasi a/g dari 0 hingga 0,8.

$$\mu = \frac{\left(\frac{a}{g} - 0,1\right)}{0,85} + 0,2 \quad (2)$$

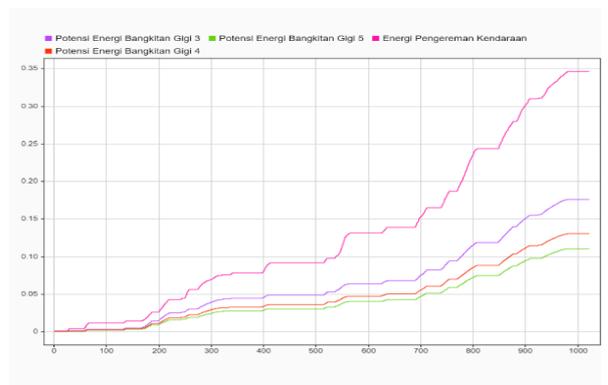
Kemudian nilai μ tersebut akan dimasukkan kedalam persamaan 3 dan 4 untuk mencari kurva pengereman minimum dengan variasi a/g dari 0 hingga 0,8.



Gambar 7. Grafik perbandingan torsi pengereman generator dan kendaraan.



Gambar 8. Grafik perbandingan daya pengereman generator dan kendaraan.



Gambar 9. Grafik perbandingan energi pengereman total dan energi bangkitan generator pada gigi 3, 4, dan 5.

$$\frac{Fbf}{W} = \frac{\mu}{L} \cdot (Lr + (0,1 + 0,85(\mu - 0,2))h) \quad (3)$$

$$\frac{Fbr}{W} = (0,1 + 0,85(\mu - 0,2)) - \frac{Fbf}{W} \quad (4)$$

Tahap ketiga adalah mencari kurva pengereman aktual mekanis pada kendaraan dengan diawali melakukan *try and error* pada β dengan memasukkan nilai β kedalam persamaan 5 dan 6. [2]. Perlu diperhatikan bahwa penentuan nilai β harus memperhatikan posisi dari kurva pengereman aktual. Nilai β yang baik harus membuat garis pengereman aktual berada dibawah kurva pengereman ideal, dan diatas kurva pengereman minimum, dan mendekati kurva pengereman ideal agar proses pengereman dapat dikatakan stabil dan aman.

$$\frac{Fbr}{W} = \beta \cdot \frac{a}{g} \quad (5)$$

$$\frac{Fbf}{W} = \frac{a}{g} - \frac{Fbr}{W} \quad (6)$$

Tahap keempat adalah menentukan porsi maksimum dari *regenerative brake*. Penentuan porsi ini dengan memasukan data dari spesifikasi *motor/generator* yang digunakan kedalam persamaan 7.

$$\frac{Fbreg}{W} = \frac{It.Ig.Tm.\eta m}{r} \quad (8)$$

Tahap terakhir adalah membandingkan antara porsi dan gaya pengereman maksimum *regenerative brake* dan mekanis dengan ketentuan sebagai berikut:

Jika $\frac{Fbf}{w}reg \geq \frac{Fbf}{w}mek$, maka pengereman sepenuhnya dikerjakan oleh *regenerative brake*. Jika $\frac{Fbf}{w}reg < \frac{Fbf}{w}mek$, maka proses pengereman akan dilanjutkan oleh sistem rem mekanis.

Untuk pembagian gaya pengereman antara kedua sistem juga akan menggunakan ketentuan yang sama, dan akan dibandingkan dari nilai a/g 0 hingga 0,8.

B. Analisa Potensi Energi Bangkitan

Untuk menganalisa potensi energi bangkitan, pertama-tama akan dianalisa gaya-gaya yang bekerja pada kendaraan disaat kendaraan mengalami proses pengereman sesuai dengan gambar *free body* diagram pada Gambar 1 [4].

Dimana gaya-gaya yang bekerja pada kendaraan tersebut akan dimodelkan kedalam *software matlab simulink*. Susudan blok gaya mengikuti persamaan:

Gaya inersia merupakan gaya hambat yang terjadi karena adanya proses perlambatan dan arahnya berlawanan dengan arah pengereman kendaraan [5].

$$Fa = m.a \quad (9)$$

Gaya hambat *drag* merupakan gaya hambat yang terjadi akibat perbedaan tekanan udara antara bagian depan dan belakang kendaraan dan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$FD = \frac{1}{2} . Cd . \rho u . v_u^2 . A \quad (10)$$

Gaya hambat *rolling* merupakan gaya hambat yang terjadi akibat adanya defleksi antara roda dengan permukaan jalan, dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Fr = m.g.Cf \quad (11)$$

Gaya hambat pengereman merupakan penjumlahan dari gaya hambat yang terjadi pada kendaraan mengikuti rumus sebagai berikut:

$$Fb = Fa - Fd - Fr \quad (12)$$

Putatan roda dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\omega_{roda} = \frac{v}{r_{dyn}} \quad (13)$$

Kemudian kecepatan putar motor dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\omega_{motor} = \frac{V.It.Ig}{\pi.r} \quad (14)$$

Torsi pengereman kendaraan merupakan hasil kali antara gaya pengereman dengan jari-jari roda kendaraan, dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Tb = Fb.r \text{ dyn} \quad (15)$$

Daya pengereman generator merupakan hasil kali antara torsi pengereman generator dan kecepatan putar motor:

$$Pb_{generator} = Tb_{generator} . \omega_{motor} \quad (16)$$

Energi pengereman dan potensi energi bangkitan merupakan hasil integrasi dari daya. Energi pengereman dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$E = \int Pb dt \quad (17)$$

Permodelan blok *Simulink* berdasarkan Persamaan 17 berdasarkan *input* dari *driving cycle WLTP Class 1*. Kemudian akan didapatkan *output* berupa energi pengereman total dan energi yang dapat dibangkitkan oleh generator

Blok *Simulink* gabungan pada Gambar 2 akan digunakan pada gigi 3, 4, dan 4 [6]. Sementara pada gigi 1 dan 2 akan ada penambahan blok *switch* sebagai pemabatas kecepatan. Sementara untuk blok *Simulink* dari torsi generator dapat mengikuti persamaan pada Gambar 3.

C. Efisiensi Regenerative Brake

Efisiensi yang akan dicari adalah perbandingan antara energi yang dikeluarkan oleh kendaraan pada saat pengereman dan energi yang dapat diserap oleh generator dari total energi pengereman yang ada. Setelah didapat hasil simulasi berupa energi pengereman total dan potensi energi bangkitan, pertama-tama akan dicari terlebih dahulu potensi energi bangkitan efektif. Potensi energi bangkitan efektif adalah energi yang telah melalui generator yang nantinya akan disimpan dalam baterai. Untuk mencari potensi energi bangkitan efektif dapat menggunakan rumus berikut:

$$Eb_{efektif} = Eb . \eta \quad (18)$$

Setelah itu hasilnya akan dibandingkan dengan energi pengereman total melalui persamaan berikut:

$$\eta_{reg} = \frac{E_{Bangkitan}}{E_{pengereman\ total}} . 100\% \quad (19)$$

III. HASIL DAN ANALISA

A. Analisa Porsi Pengereman

Untuk menghitung porsi pengereman kendaraan, pertama-tama harus didapatkan kurva pengereman kendaraan MEvITS. Mencari kurva pengereman diawali dengan perhitungan kurva ideal dengan contoh sebagai berikut pada variasi nilai a/g 0,8.

$$\frac{Fbr}{W} = \frac{\left(Lf - \frac{a}{g} . h\right)}{\left(Lr + \frac{a}{g} . h\right)} . \frac{Fbf}{W}$$

$$\frac{Fbr}{W} = \frac{(1,12 - 0,8 . 0,39)}{(1,13 + 0,8 . 0,39)} . 0,8$$

$$\frac{Fbr}{W} = 0,46$$

Setelah itu akan dihitung kurva pengereman minimum dengan contoh sebagai berikut menggunakan variasi nilai a/g 0,8.

$$\mu = \frac{\left(\frac{a}{g} - 0,1\right)}{0,85} + 0,2$$

$$\mu = \frac{(0,8 - 0,1)}{0,85} + 0,2$$

$$\mu = 1,02$$

Nilai μ yang didapat akan dimasukan kedalam perhitungan untuk mencari kurva pengereman minimum sebagai berikut

$$\frac{Fbf}{W} = \frac{\mu}{L} \cdot (Lr + (0,1 + 0,85(\mu - 0,2))h)$$

$$\frac{Fbf}{W} = \frac{1,02}{2,25} \cdot (1,13 + (0,1 + 0,85(1,02 - 0,2))0,39)$$

$$\frac{Fbf}{W} = 0,68$$

Untuk mencari porsi minimum roda belakang dapat menggunakan rumus berikut

$$\frac{Fbr}{W} = (0,1 + 0,85(\mu - 0,2)) - \frac{Fbf}{w}$$

$$\frac{Fbr}{W} = (0,1 + 0,85(1,02 - 0,2)) - 0,68$$

$$\frac{Fbr}{W} = 0,12$$

Kemudian selanjutnya akan dilakukan perhitungan pengereman aktual dengan menentukan nilai β terlebih dahulu. Berikut adalah contoh perhitungan kurva pengereman aktual dengan nilai β 0,42 dan dengan variasi a/g sebesar 0,8.

$$\frac{Fbr}{W} = \beta \cdot \frac{a}{g}$$

$$\frac{Fbr}{W} = 0,42 \cdot 0,8$$

$$\frac{Fbr}{W} = 0,34$$

$$\frac{Fbf}{W} = \frac{a}{g} - \frac{Fbr}{W}$$

$$\frac{Fbf}{W} = 0,8 - 0,34$$

$$\frac{Fbf}{W} = 0,46$$

Data pengereman aktual kendaraan pada rentang a/g 0 hingga 0,8 dapat dilihat melalui Tabel 2.

Kemudian didapatkan kurva pengereman kendaraan MEvITS sesuai dengan Gambar 4. Dari Gambar 4, dapat dilihat bahwa pemilihan nilai β sebesar 0,42 sudah ideal dikarenakan posisi kurva pengereman berada diantara kurva pengereman ideal dan kurva pengereman minimum. Nilai β juga sudah ideal dikarenakan posisi kurva pengereman aktual sudah mendekati kurva pengereman ideal, sehingga proses pengereman dapat dikatakan maksimal, stabil, dan aman.

Kemudian porsi pengereman aktual mekanis tersebut akan dibandingkan dengan. Porsi pengereman dari sistem *regenerative brake*. Untuk dapat membandingkan porsi dari kedua sistem pengereman tersebut, pertama tama akan dicari porsi pengereman maksimum dari *regenerative brake*. Berikut contoh perhitungan porsi maksimum *regenerative brake*. Pada gear 3 kendaraan:

$$\frac{Fb_{reg}}{W} = \frac{It \cdot Ig \cdot Tm \cdot \eta m}{r \cdot W}$$

$$\frac{Fb_{reg}}{W} = \frac{1,23 \cdot 4,5 \cdot 30 \cdot 0,91}{0,31 \cdot 11134,5}$$

$$\frac{Fb_{reg}}{W} = 0,04$$

Dikarenakan sistem pengereman *regenerative* memiliki porsi yang terbatas, maka tidak mungkin di segala kondisi rentang nilai a/g proses pengereman seluruhnya dikerjakan oleh sistem *regenerative brake*. Porsi pengereman yang terbatas dari sistem rem *regenerative* mengharuskan proses pengereman dilanjutkan oleh sistem pengereman mekanis. Maka dari itu perlu pembagian porsi yang tepat antara kedua sistem pengereman. Berikut adalah porsi pengereman antara sistem rem mekanis dengan sistem rem *regenerative* dengan menggunakan ketentuan sesuai pada bab 2 (Tabel 3).

Setelah didapatkan perbandingan porsi pengereman antara kedua sistem, selanjutnya akan dibandingkan gaya pengereman antara kedua sistem dengan diawali mencari gaya pengereman maksimum *regenerative brake*. Berikut adalah contoh mencari gaya pengereman maksimum *regenerative brake* pada gigi 3

$$Fb_{reg} = \frac{Fb_{reg}}{W} \cdot W$$

$$Fb_{reg} = 0,04 \cdot 11134,5$$

$$Fb_{reg} = 482,76 \text{ N}$$

Hasil perbandingan gaya pengereman dari kedua sistem pengereman pada gigi 3 kendaraan pada rentang a/g 0 hingga 0,8 dapat dilihat melalui Tabel 4. Melalui hasil perhitungan Tabel 4, dapat dilihat bahwa porsi pengereman *regenerative* hanya terbatas hingga 0,04 pada gigi 4 kendaraan sehingga gaya pengereman maksimum yang dapat diberikan terbatas hingga 482,76 N. Sehingga pada rentang a/g 0,2 hingga 0,8, sistem pengereman sebagian besar akan dikerjakan oleh rem mekanis.

B. Analisa Potensi Energi Bangkitan

Untuk mendapatkan nilai potensi energi bangkitan dari *regenerative brake*, akan dimulai dengan melakukan permodelan *driving cycle WLTP Class 1* pada *Simulink*. Gambar 5 adalah hasil permodelan *driving cycle* pada *Simulink*. Setelah itu dengan menggunakan *block Simulink* pada bab sebelumnya, didapatkan hasil berupa energi pengereman total kendaraan dan potensi energi bangkitan *regenerative brake* (Gambar 5). Gambar 6 adalah hasil simulasi dari gaya pengereman kendaraan

Grafik Gambar 6 menjelaskan mengenai gaya pengereman yang didapat dari penjumlahan gaya hambat yang terjadi pada kendaraan. Gaya pengereman tersebut akan diolah untuk dapat mencari torsi pengereman. Grafik perbandingan antara torsi pengereman kendaraan dengan torsi pengereman generator pada gigi 3 dapat dilihat pada Gambar 7. Dapat dilihat bahwa torsi generator dibatasi hanya sampai 30 Nm saja mengikuti karakteristik dari spesifikasinya. Dan kemudian pada grafik perbandingan daya pengereman

kendaraan dan generator gigi 3 pada Gambar 8, tren grafik dari daya pengereman generator akan mengalami penurunan terlebih dahulu dikarenakan pembatasan kerja dari sistem *regenerative brake*, sehingga jika kendaraan berada dibawah kecepatan 10 km/jam, maka sistem *regenerative brake* tidak dapat bekerja. Setelah itu dengan mengintegrasikan hasil daya dari kedua sistem pengereman, Gambar 9 adalah perbandingan energi pengereman kendaraan dengan potensi energi yang dapat diserap dan dibangkitkan oleh generator pada gigi 3, 4 dan 5 kendaraan.

Pada grafik pada Gambar 9, dilihat bahwa didapatkan energi pengereman total sebesar 0,35 kWh, dan potensi energi bangkitan pada gigi 3, 4 dan 5 secara berurutan adalah 0,18; 0,13; dan 0,11. Potensi energi bangkitan yang lebih kecil disebabkan oleh pembatasan kerja dari generator baik dalam segi torsi maupun dalam segi pembatasan kerja yang diakibatkan oleh kecepatan rendah. Semakin tinggi gigi percepatan maka potensi energi bangkitannya juga akan semakin kecil, dikarenakan semakin tinggi *gear* yang digunakan, maka rasio transmisi juga akan semakin kecil menyebabkan daya dan energi yang dihasilkan juga akan semakin kecil

C. Analisa Efisiensi Regenerative Brake

Hasil simulasi dari energi pengereman kendaraan secara keseluruhan dan potensi energi bangkitan akan dibandingkan untuk mendapatkan efisiensi dari penggunaan *regenerative brake*. Efisiensi yang dihitung adalah besarnya energi yang dapat diserap dari keseluruhan total energi yang terbuang pada saat proses pengereman. Potensi energi yang didapat dari hasil simulasi akan melewati generator sebelum nantinya akan disimpan pada baterai. Maka dari itu untuk mencari potensi energi bangkitan yang efektif, hasil potensi energi dari simulasi akan dikalikan dengan efisiensi generator. Berikut adalah contoh perhitungan potensi energi bangkitan efektif pada gigi 3 kendaraan.

$$Eb_{efektif} = Eb \cdot \eta$$

$$Eb_{efektif} = 0,1758 \cdot 0,91$$

$$Eb_{efektif} = 0,16 \text{ kWh}$$

Kemudian potensi energi bangkitan efektif tersebut akan dibandingkan dengan energi pengereman total untuk mendapatkan efisiensi sistem. Berikut adalah contoh perhitungan efisiensi pada gigi 3 kendaraan

$$\eta_{reg} = \frac{E_{Bangkitan}}{E_{pengereman\ total}} \cdot 100\%$$

$$\eta_{reg} = \frac{0,16 \text{ kWh}}{0,35} \cdot 100\%$$

$$\eta_{reg} = 46,12\%$$

Didapatkan efisiensi sistem *regenerative brake* sebesar 46,12% pada gigi 3 kendaraan. Tabel 5 adalah hasil perhitungan efisiensi pada gigi 3,4, dan 5. Dapat dilihat pada Tabel 5, bahwa semakin tinggi gigi yang digunakan pada saat proses pengereman, maka efisiensi sistem juga akan semakin kecil. Hal ini disebabkan oleh besarnya energi yang juga semakin kecil jika menggunakan gigi percepatan yang tinggi. Namun perlu diperhatikan juga harus memperhatikan rasio perbandingan kecepatan dan transmisi pada saat pengereman agar proses pengereman dapat terbilang aman dan stabil.

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Pada penelitian ini dapat ditarik beberapa kesimpulan, diantaranya adalah: (1) Porsi sistem pengereman *regenerative* bervariasi berdasarkan koefisien gesek lintasan yang dilalui, dan gigi percepatan kendaraan yang digunakan. Pada gigi percepatan 1 didapatkan porsi maksimal sebesar 0,11, kemudian pada gigi percepatan 2 sebesar 0,06, kemudian pada gigi percepatan 3 sebesar 0,04, pada gigi percepatan 4 sebesar 0,03 dan pada gigi percepatan 5 sebesar 0,03. Porsi dan gaya pengereman mekanis juga bervariasi mengikuti koefisien gesek lintasan yang dilalui oleh kendaraan. (2) Potensi energi yang dapat dibangkitkan oleh sistem *regenerative brake* dalam satu siklus driving cycle WLTP Class 1 pada gigi percepatan 3 adalah sebesar 0,16 kWh, pada gigi percepatan 4 sebesar 0,118 kWh, dan pada gigi percepatan 5 sebesar 0,10 kWh. (3) Efisiensi dari penggunaan sistem *regenerative brake* pada MEvITS pada gigi percepatan 3 adalah sebesar 46,12%, pada gigi percepatan 4 adalah sebesar 34,13% dan pada gigi percepatan 5 sebesar 28,88% dalam satu siklus driving cycle WLTP Class 1.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ibrahim, "Perkembangan Terakhir Kondisi Kualitas Udara di Wilayah Jakarta dan Sekitarnya," vol. 2022, no. Jakarta. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), Jakarta, 2022.
- [2] A. C. F. Walla and I. N. Sutantra, "Analisa gaya, porsi, kontribusi dan efisiensi sistem rem regeneratif pada EZZY ITS II," *J. Tek. ITS*, vol. 9, no. 2, 2021, doi: 10.12962/j23373539.v9i2.52345.
- [3] I. N. Sutantra and B. Sampurno, *Teknologi Otomotif*, 2nd ed. Surabaya: Guna Widya, 2015, ISSN: 9795450522.
- [4] H. Naunheimer, B. Bertsche, J. Ryborz, and W. Novak, *Automotive Transmissions Fundamental, Selection, Design and Application*, 2nd ed. Stuttgart: Springer, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-16214-5, ISSN: 9781425803780.
- [5] Perdana, P. Bintang, and I. N. Sutantra, "Analisa penggunaan *regenerative brake* pada mobil multiguna pedesaan bertenaga listrik," *J. Tek. ITS*, vol. 7, no. 1, pp. E17–E20, 2018, doi: 10.12962/j23373539.v7i1.29591.
- [6] G. Wijaya, "Analisa Gaya Pengereman dan Energi yang Dibangkitkan dengan Porsi *Regenerative Braking*," Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2014.