

# Studi Analisis Kinerja Sistem Rem Regeneratif pada Sepeda Motor Hybrid dengan Konfigurasi Seri

Alex William Pangestu dan I Nyoman Sutantra  
Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
*e-mail:* tantra@me.its.ac.id

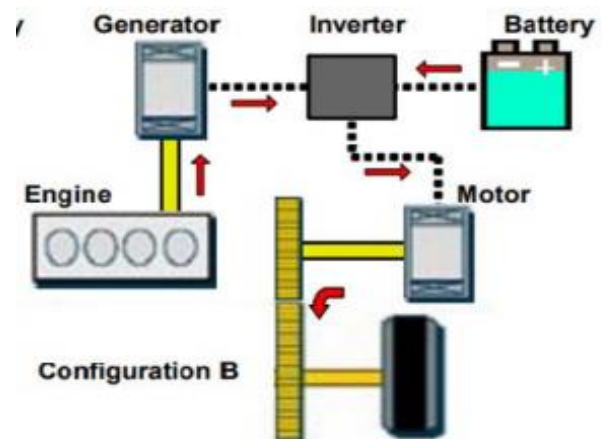
**Abstrak**—Hybrid electric vehicles (HEVs) atau kendaraan listrik hybrid adalah kendaraan yang menggunakan dua atau lebih sumber tenaga yang berbeda untuk bergerak. Teknologi sistem penggerak hybrid saat ini sudah diaplikasikan pada kendaraan bermotor roda empat. Sementara untuk aplikasi pada kendaraan bermotor roda dua seperti sepeda motor, teknologi hybrid ini belum banyak. Pada kendaraan hybrid, energi kinetik yang dikeluarkan dapat ditangkap dan disimpan dengan menggunakan sistem rem regeneratif, dimana motor listrik berubah menjadi generator kemudian energi tersebut disimpan ke dalam baterai. Pada penelitian terdapat dua tahapan utama, yang pertama adalah tahap perhitungan dan yang kedua adalah tahap analisis terhadap besar gaya dan porsi, kontribusi dan efisiensi sistem rem regeneratif. Untuk tahap perhitungan yang dilakukan adalah melakukan perhitungan gaya hambat yang bekerja pada kendaraan saat bergerak, perhitungan power dan besar energi pengereman yang bisa ditangkap berdasarkan driving cycle WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2. Selanjutnya untuk tahap analisis akan dilakukan analisis terhadap hasil yang didapatkan pada tahap perhitungan sebelumnya. Dari penelitian ini didapatkan besar gaya dari sistem rem mekanis dan sistem rem regeneratif pada roda depan dengan nilai  $j/g$  sebesar 0,3 adalah 139,09 N dan 266,31 N. Besar porsi pengereman mekanis dan regeneratif pada roda depan yang didapatkan dengan nilai  $j/g$  sebesar 0,3 adalah 0,060 dan 0,114. Besar kontribusi sistem rem regeneratif terhadap kebutuhan daya kendaraan pada driving cycle WMTC kelas 1 adalah 33,194% dan pada driving cycle WMTC kelas 2 adalah 29,504%. Besar efisiensi sistem rem regeneratif pada sepeda motor hybrid dengan driving cycle WMTC kelas 1 adalah 23,535% dan dengan driving cycle WMTC kelas 2 adalah 31,98%.

**Kata Kunci**—Regenerative Brake, Sepeda Motor Hybrid, Energi Pengereman.

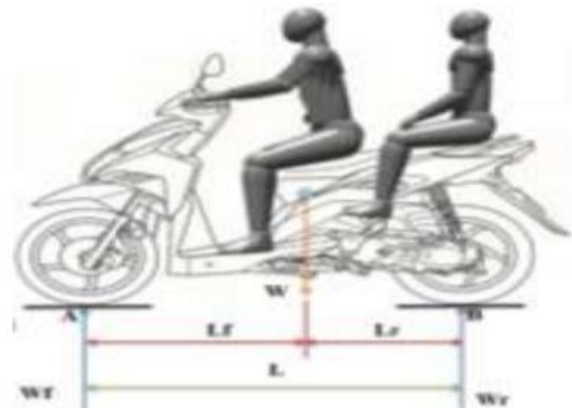
## I. PENDAHULUAN

SEPEDA motor merupakan alat transportasi yang paling banyak digunakan oleh masyarakat di Indonesia. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik (BPS) jumlah sepeda motor mencapai 120.101.047 unit dan jumlah ini akan terus meningkat setiap tahunnya. Dengan jumlah penggunaan sepeda motor yang semakin banyak menyebabkan konsumsi bahan bakar yang semakin tinggi pula.

Teknologi yang tepat untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah kendaraan dengan sistem penggerak hybrid. Hybrid electric vehicles (HEVs) atau kendaraan listrik hybrid adalah kendaraan yang menggunakan dua atau lebih sumber tenaga yang berbeda untuk bergerak. Kendaraan listrik hybrid menggabungkan mesin pembakaran internal dan motor listrik. Skema power dan drivetrain kendaraan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 1. Pada kendaraan hybrid, energi kinetik yang dikeluarkan dapat ditangkap dan



Gambar 1. Skema power dan drivetrain kendaraan hybrid seri.

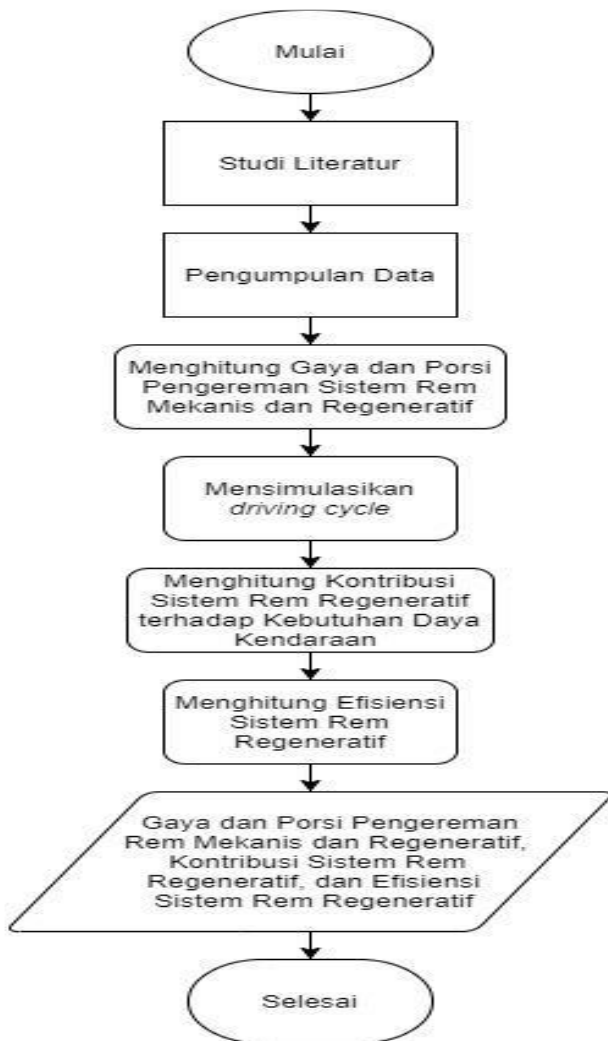


Gambar 3. Distribusi gaya-gaya pengereman.

disimpan dengan menggunakan sistem rem regeneratif, dimana motor listrik berubah menjadi generator kemudian energi tersebut disimpan ke dalam baterai.

Regenerative brake ini adalah suatu sistem pengereman yang mampu menyerap energi saat pengereman untuk dimanfaatkan untuk kebutuhan lain pada kendaraan. Sistem regenerative brake yang biasa digunakan adalah mekanik dan elektrik. Pada sistem regenerative brake mekanik, energi yang ditangkap disimpan dalam flywheel sedangkan pada regenerative brake elektrik menggunakan baterai.

Dalam penelitian ini akan dilakukan analisis pengereman regeneratif yang diterapkan pada sepeda motor hybrid. Penulis mengembangkan sistem rem regeneratif karena teknologi ini masih kurang diterapkan pada sepeda motor. Analisis ini akan berfokus pada distribusi pengereman antara roda depan dan roda belakang agar sistem rem dapat bekerja dengan baik serta menganalisis performa sistem rem regeneratif berdasarkan driving cycle WMTC.



Gambar 2. Diagram alir penelitian.

II. METODE PENELITIAN

Adapun metode penelitian yang dilakukan dapat diilustrasikan dalam sebuah diagram alir seperti Gambar 2.

III. URAIAN PENELITIAN

A. Center of Gravity

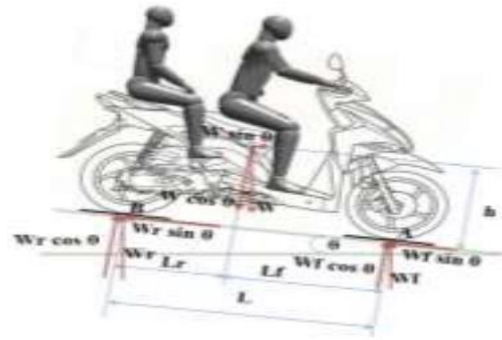
Posisi center of gravity kendaraan perlu dicari untuk memudahkan perhitungan distribusi pengereman. Distribusi gaya-gaya kendaraan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3 dan gambar 4 [1].

Penentuan jarak center of gravity ke roda depan ( $L_f$ ) dan jarak center of gravity ke roda belakang ( $L_r$ ) dipengaruhi oleh berat kendaraan pada bagian depan ( $W_f$ ) dan berat kendaraan bagian belakang ( $W_r$ ) dan jarak sumbu roda kendaraan ( $L$ ). Rumus yang dipakai untuk mencari nilai  $L_r$  dan  $L_f$  dapat dilihat pada persamaan 1 dan persamaan 2 [1]:

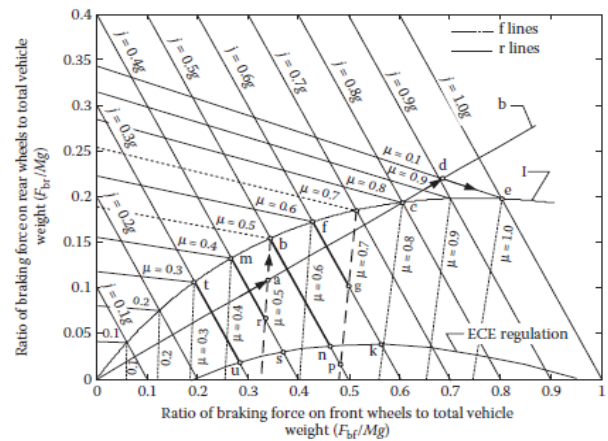
$$L_r = \frac{W_f \cdot L}{W} \tag{1}$$

$$L_f = \frac{W_r \cdot L}{W} \tag{2}$$

Untuk mencari nilai tinggi center of gravity ( $h$ ) diperlukan penimbangan kendaraan pada kondisi tanjakan seperti yang ditunjukkan pada gambar 4. Tinggi center of gravity



Gambar 4. Distribusi gaya-gaya saat penimbangan miring .



Gambar 5. Kurva distribusi pengereman.

kendaraan ( $h$ ) dipengaruhi oleh berat kendaraan, besar sudut tanjakan ( $\theta$ ), berat kendaraan bagian belakang ( $W_r$ ) dan jarak sumbu roda ( $L$ ). Rumus yang dipakai dapat dilihat pada persamaan 3 [1]:

$$h = \frac{W \cos \theta \cdot L_f - W_r \cos \theta \cdot L}{W \sin \theta} \tag{3}$$

B. Distribusi Gaya Pengereman

Selama pengereman terjadi perpindahan beban dari sumbu belakang (ban belakang) ke sumbu depan kendaraan. Dengan memperhatikan keseimbangan momen melalui titik tumpu depan dan belakang, gaya normal di depan ( $W_f$ ) dan belakang ( $W_r$ ) serta menganggap sudut ( $\theta$ ) kecil, dapat dihitung dengan persamaan 4[2]:

$$\frac{F_{bf}}{F_{br}} = \frac{W_f}{W_r} = \frac{W/L(L_r + \frac{a}{g}h)}{W/L(L_f - \frac{a}{g}h)} \tag{4}$$

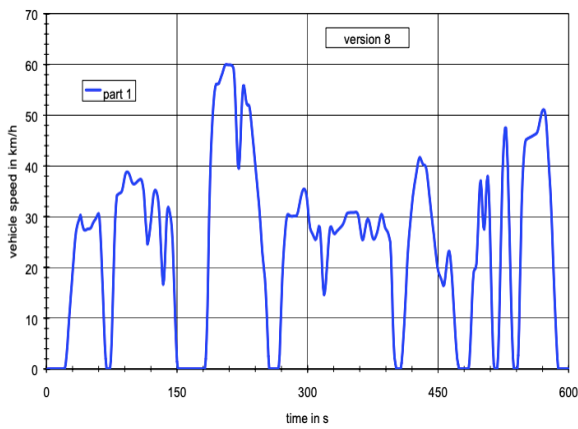
C. Regulasi Pengeraman

Menurut regulasi pengereman, saat roda bagian depan terkunci, gaya pengereman roda bagian belakang diharuskan dapat membuat kendaraan mengalami perlambatan yang lebih besar dengan menggunakan persamaan 5 [2]:

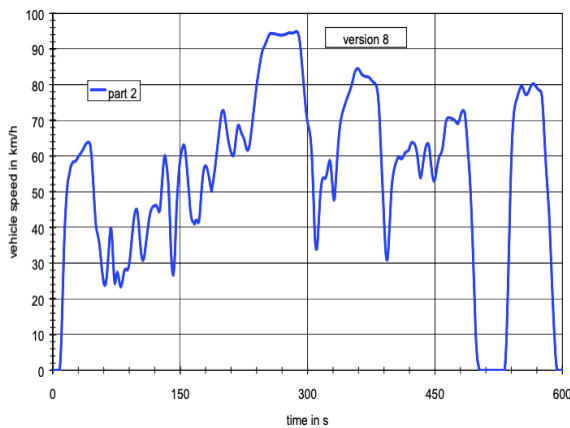
$$\frac{j}{g} \geq 0,1 + 0,85(\mu - 0,2) \tag{5}$$

$\mu$  adalah koefisien adhesi kontak ban-jalan,  $j$  adalah perlambatan kendaraan dan  $g$  adalah percepatan gravitasi.

Penentuan nilai minimal dari gaya pengereman kendaraan dan bentuk kurva pengereman dihasilkan dari persamaan diatas. Pengereman yang direkomendasikan oleh regulasi adalah pengereman diantara kurva pengereman ideal dan



Gambar 6. (a) Grafik driving cycle WMTC kelas 1.



Gambar 6. (b) Grafik driving cycle WMTC kelas 2.

kurva pengereman. Pada gambar 5, pengereman aktual yang direkomendasikan diwakilkan pada garis linear 0-c, karena garis pengereman aktual tersebut berada dibawah kurva pengereman ideal dan diatas kurva pengereman. Dengan mengaplikasikan pengereman aktual yang direkomendasikan, roda bagian depan terkunci terlebih dahulu sehingga kendaraan tidak kehilangan kestabilan saat pengereman. Garis pengereman aktual yang tidak direkomendasikan diwakilkan pada garis linear c-b, karena karena garis pengereman aktual tersebut berada diatas kurva pengereman ideal. Dengan mengaplikasikan pengereman aktual yang tidak direkomendasikan tersebut, Roda bagian belakang yang akan terkunci lebih dahulu dibandingkan roda bagian depan. Hal ini mengakibatkan kendaraan akan kehilangan kestabilan. Kestabilan hilang karena kemampuan roda bagian belakang untuk menahan gaya dorong dari samping akan hilang.

**D. Gaya Hambat Kendaraan**

Gaya hambat kendaraan yang mempengaruhi suatu kendaraan saat melaju yaitu gaya hambat angin, gaya hambat rolling, dan gaya hambat inersia [3].

**1) Gaya Hambat Angin**

Besarnya gaya hambat angin dipengaruhi oleh kecepatan relatif angin terhadap kendaraan ( $V$ ), massa jenis udara ( $\rho_u$ ), luas frontal kendaraan ( $A_f$ ) dan kofisien drag ( $C_D$ ) yang dituliskan pada persamaan 1 :

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho_u \cdot C_D \cdot A_f \cdot V^2 \tag{6}$$

Tabel 2.  
Porsi Pengereman Mekanis dan Regeneratif

j/g	Pengereman aktual		Pengereman roda depan	
	Fbr/W	Fbf/W	Fbf/W mek	Fbf/W reg
0	0	0	0	0
0,1	0,042	0,058	0,000	0,058
0,2	0,084	0,116	0,002	0,114
0,3	0,126	0,174	0,060	0,114
0,4	0,168	0,232	0,118	0,114
0,5	0,210	0,290	0,176	0,114
0,6	0,252	0,348	0,234	0,114
0,7	0,294	0,406	0,292	0,114
0,8	0,336	0,464	0,350	0,114
0,9	0,378	0,522	0,408	0,114
1,0	0,420	0,580	0,466	0,114

Tabel 3.  
Gaya Pengereman Mekanis dan Regeneratif

j/g	Pengereman aktual		Pengereman roda depan	
	Fbr	Fbf	Fbf mek	Fbf reg
0	0	0	0	0
0,1	97,85	135,13	0,00	135,13
0,2	195,71	270,27	3,96	266,31
0,3	293,56	405,40	139,09	266,31
0,4	391,42	540,53	274,23	266,31
0,5	489,27	675,66	409,36	266,31
0,6	587,13	810,80	544,49	266,31
0,7	684,98	945,93	679,62	266,31
0,8	782,84	1081,06	814,76	266,31
0,9	880,69	1216,19	949,89	266,31
1	978,55	1351,33	1085,02	266,31

**2) Gaya Hambat Rolling**

Gaya hambat *rolling* merupakan gaya hambat yang terjadi karena adanya gesekan antara ban dengan jalan. Gaya hambat ini dipengaruhi oleh koefisien gesek jalan ( $f_r$ ), dan berat kendaraan ( $W$ ) sehingga dapat dituliskan pada persamaan 7 :

$$F_r = W \cdot \cos\alpha \cdot C_r \tag{7}$$

Dengan nilai  $C_r$  bisa dicari menggunakan persamaan 7 :

$$C_r = C_k \cdot C_a \cdot C_f (f_o + f_s \left(\frac{V}{100}\right)) \tag{8}$$

**3) Gaya Hambat Inersia**

Gaya hambat inersia dipengaruhi oleh massa kendaraan ( $m$ ) dan percepatan kendaraan ( $a$ ) yang dituliskan pada persamaan 9:

$$F_i = m \cdot a \tag{9}$$

**E. Daya**

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 pada persamaan (10) dan (11):

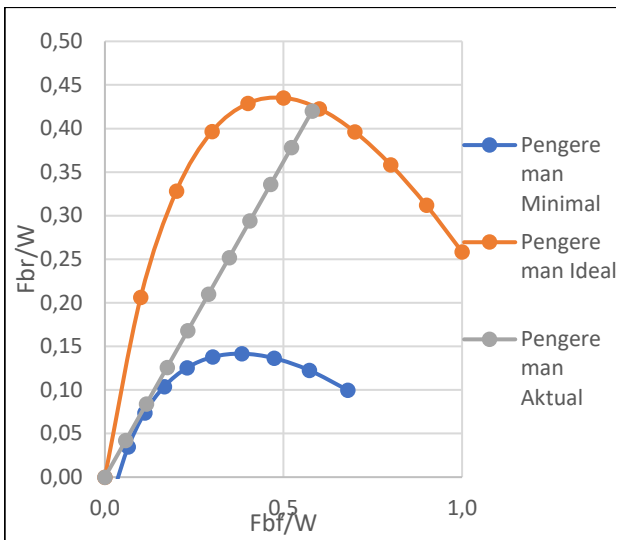
$$F_t = F_a + F_r + F_i \tag{10}$$

$$Rhp = F_t \cdot V \cdot \eta \tag{11}$$

dengan  $F_a$  adalah gaya hambat angin,  $F_r$  adalah gaya hambat rolling,  $F_i$  adalah gaya hambat inersia,  $V$  adalah kecepatan kendaraan,  $\eta$  adalah efisiensi sistem rem regeneratif.

**F. Energi Kinetik**

Pada kendaraan yang bergerak, selain adanya gaya hambat, terdapat pula energi kinetik yang terjadi. Energi kinetik terjadi karena adanya pergerakan dari kendaraan tersebut,



Gambar 7. Kurva distribusi pengereman.

Tabel 1. Spesifikasi Honda Revo X

Spesifikasi	Keterangan
Tipe mesin	4 langkah, SOHC
Volume langkah	109m17 cc
Daya maksimum	6,56 kW / 7500 rpm
Torsi maksimum	8,76 N.m / 6000 rpm
Kopling	Multiplate wet clutch with diaphragm spring
Sistem bahan bakar	Injeksi (PGM-FI)
Dimensi	1.919 x 709 x 1.080 mm
Rasio transmisi ke-1	2,615
Rasio transmisi ke-2	1,555
Rasio transmisi ke-3	1,136
Rasio transmisi ke-4	0,916
Rasio final drive	2,642
Jarak sumbu roda	1.227 mm
Jarak terendah ke tanah	135 mm
Luas frontal area	0,25 m <sup>2</sup>
Berat kosong	97,5 kg

baik itu percepatan maupun perlambatan. Energi kinetik pada kendaraan dapat dirumuskan pada persamaan 12 :

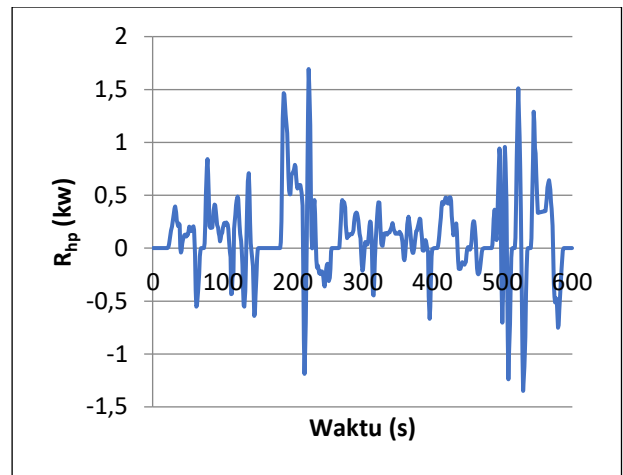
$$Ek = \frac{1}{2} \times m \times (V_2^2 - V_1^2) \tag{12}$$

G. Driving Cycle WMTC

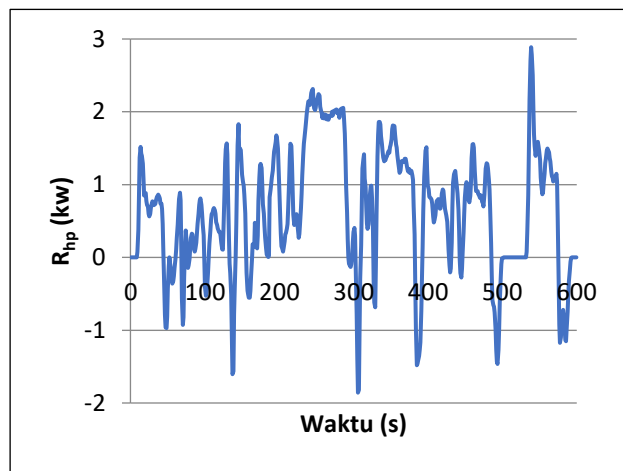
World Motorcycle Test Cycle (WMTC) adalah driving cycle yang digunakan untuk sepeda motor dan berasal dari proyek antara VROM (Netherlands Ministry of the Environment), TNO Automotive, dan IMMA (International Motorcycle Manufacturer Association). Berikut driving cycle WMTC yang dipakai pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 6 [4].

H. Kontribusi dan Efisiensi Regenerate Brake

Untuk mengetahui berapa besar kontribusi dan efisiensi sistem rem regeneratif perlu dibandingkan energi pengereman yang tersedia dengan energi yang diterima generator. Energi pengereman yang tersedia adalah energi yang dibutuhkan sistem pengereman untuk melakukan perlambatan pada kendaraan. Energi pengereman yang tersedia didapat dari perhitungan sistem pengereman total. Selanjutnya energi yang didapat dari perhitungan pengereman total dibandingkan dengan energi generator yang didapat. Nantinya didapatkan persentase berapa energi yang masuk generator dan dapat dimanfaatkan kembali. Kontribusi



Gambar 8(a). Grafik Rhp vs waktu driving cycle WMTC kelas 1.



Gambar 8(b). Grafik Rhp vs waktu driving cycle WMTC kelas 2.

dan efisiensi sistem rem regeneratif dapat dihitung dengan persamaan 13 dan persamaan 14 :

$$Kontribusi = \frac{R_{hp\ regenerative} (kw)}{R_{hp\ total} (kw)} \tag{13}$$

$$Efisiensi = \frac{Energi\ regeneratif\ total (kwh)}{Energi\ kinetik\ perlambatan (kwh)} \tag{14}$$

IV. HASIL DAN ANALISIS

A. Data dan Spesifikasi Kendaraan

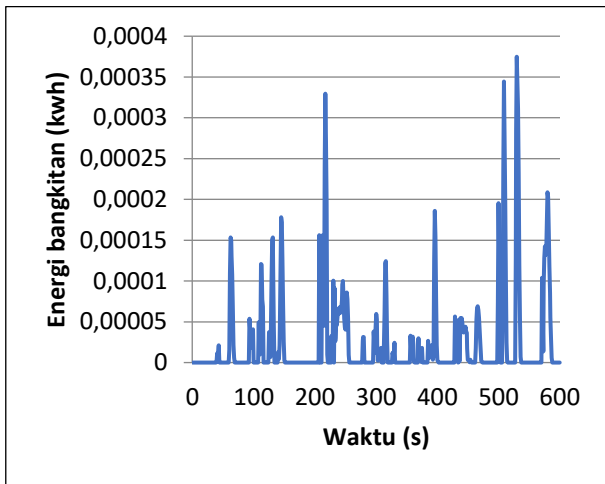
Data dan spesifikasi sepeda motor Honda Revo X yang dijadikan acuan pada penelitian ini bisa dilihat di tabel 1 pada lampiran.

B. Porsi dan Gaya Pengereman Mekanis dan Regeneratif

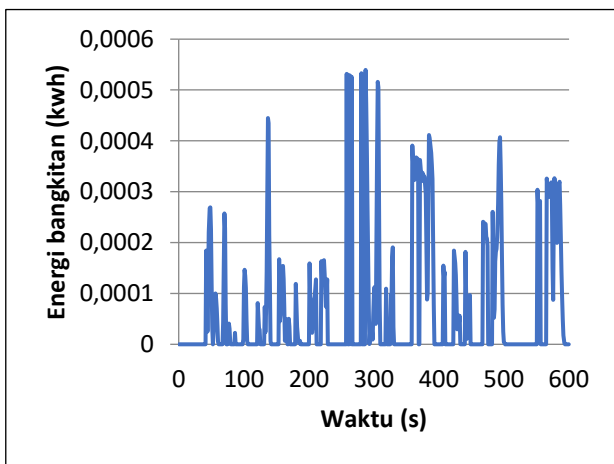
Berikut ini hasil perhitungan untuk mendapatkan porsi dan gaya pengereman mekanis dan regeneratif. Grafik distribusi pengereman hasil perhitungan ditunjukkan pada gambar 7.

Pada gambar 7 sumbu x mewakili porsi pengereman roda depan dan sumbu y mewakili porsi pengereman pada roda belakang. Berdasarkan kurva distribusi pengereman diatas dapat dilihat bahwa nilai porsi pengereman aktual yang dirancang baik karena garis pengereman aktual berada di atas kurva pengereman minimal dan tidak melewati kurva pengereman ideal dan syarat porsi pengereman pada roda depan harus lebih besar dibanding roda belakang juga terpenuhi. Selanjutnya nilai porsi pengereman aktual dapat





Gambar 9(a). Grafik energi bangkitan vs waktu *driving cycle* WMTC kelas 1.



Gambar 9(b). Grafik energi bangkitan vs waktu *driving cycle* WMTC kelas 2.

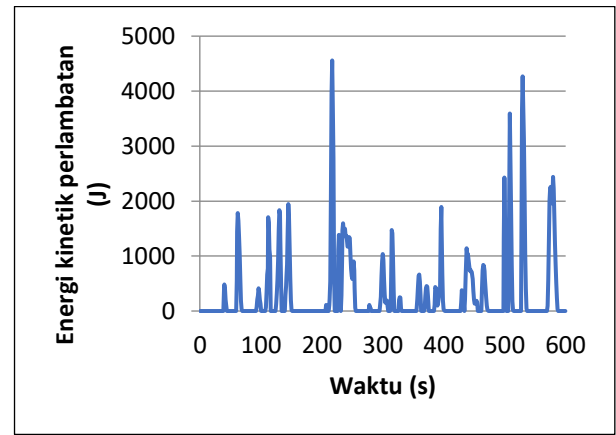
dilihat pada tabel 2 dan dapat digunakan untuk menentukan besar gaya pengereman mekanis dan regeneratif yang diperlukan. Besar gaya pengereman mekanis dan regeneratif dapat dilihat pada tabel 3

Berdasarkan hasil yang didapatkan pada tabel 2 dan tabel 3, porsi dan gaya pengereman regeneratif maksimal adalah sebesar 0,114 dan 266,31 N. Pada variasi  $j/g$  0,1 pengereman aktual pada roda depan dapat sepenuhnya menggunakan pengereman regeneratif. Sedangkan pada variasi  $j/g$  0,2 sampai 1, pengereman aktual pada roda depan tidak dapat sepenuhnya menggunakan pengereman regeneratif. Sisa porsi dan gaya pengereman aktual harus dibantu dengan porsi dan gaya pengereman mekanis untuk menjaga kendaraan tetap stabil.

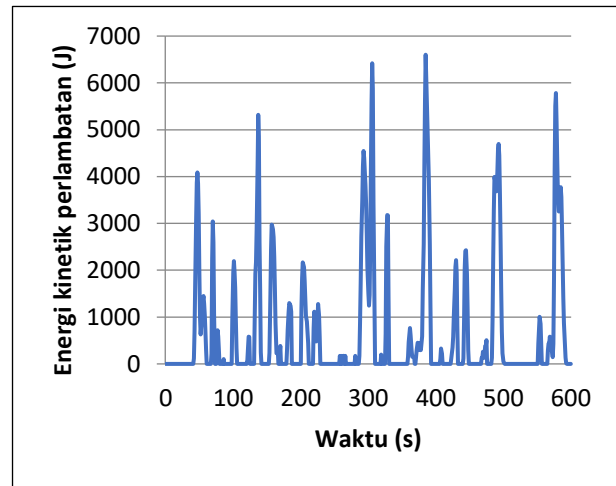
### C. Kontribusi Sistem Regeneratif terhadap Kebutuhan Daya Kendaraan

Berdasarkan perhitungan  $R_{hp}$  kendaraan maka bisa dilakukan plotting  $R_{hp}$  terhadap waktu selama *driving cycle* WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2. Hasil plotting dapat dilihat pada gambar 8.

Berdasarkan gambar 8(a) dan gambar 8(b), didapatkan jumlah total  $R_{hp}$  pada *driving cycle* WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 adalah 159,09 kw dan 521,77 kw. Selanjutnya adalah membandingkan  $R_{hp}$  regeneratif dengan total  $R_{hp}$  kendaraan. Berdasarkan hasil perhitungan dengan



Gambar 10(a). Grafik energi kinetik perlambatan vs waktu *driving cycle* WMTC kelas 1.



Gambar 10(b). Grafik energi kinetik perlambatan vs waktu *driving cycle* WMTC kelas 2.

menggunakan persamaan 13 didapatkan nilai kontribusi sistem rem regeneratif adalah sebesar 33,194% pada *driving cycle* WMTC kelas 1 dan 29,504% pada *driving cycle* WMTC kelas 2. Nilai kontribusi sistem rem regeneratif ini dapat digunakan untuk menambah daya jelajah kendaraan akan tetapi nilai diatas bukan sesuatu yang pasti dan dapat berubah sesuai dengan pemilihan *driving cycle* dan kondisi berkendara sesungguhnya.

### D. Efisiensi Sistem Rem Regeneratif

Sebelum menghitung efisiensi sistem rem regeneratif perlu dihitung total energi yang bisa dibangkitkan berdasarkan *driving cycle* yang dipilih. Hasil tersebut dapat dilihat pada gambar 9.

Berdasarkan kedua grafik diatas dapat dilihat nilai maksimum dari energi bangkitan pada *driving cycle* WMTC kelas 1 dan kelas 2 adalah 0,0004 kwh dan 0,0005 kwh. Setelah dilakukan penjumlahan dari semua energi bangkitan dari detik 0 sampai 600 didapatkan total energi bangkitan pada *driving cycle* WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 adalah 0,0125 kwh dan 0,0366 kwh. Selanjutnya perlu dilakukan perhitungan energi kinetik perlambatan selama *driving cycle*. Hasil perhitungan dapat dilihat pada gambar 10.

Setelah dilakukan penjumlahan dari semua energi kinetik perlambatan dari detik 0 sampai 600 didapatkan total energi kinetik perlambatan pada *driving cycle* WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 adalah 191.842,545 J dan 411.623,756 J.

Nilai tersebut kemudian dikonversi menjadi satuan kwh sehingga menjadi 0,0533 kwh dan 0,1143 kwh. Nilai efisiensi sistem rem regeneratif berdasarkan driving cycle WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 didapatkan dengan menggunakan persamaan 14 adalah sebesar 23,535% dan 31,98%. Nilai efisiensi diatas bukan sesuatu yang pasti dan dapat berubah sesuai dengan pemilihan *driving cycle* dan kondisi pengereman sesungguhnya.

## V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan analisis maka bisa didapatkan beberapa kesimpulan antara lain adalah yang pertama porsi dan gaya rem regeneratif maksimal sebesar 0,114 dan 266,31 N, yang kedua kontribusi sistem rem regeneratif sebesar 33,194% dan 29,504% dengan driving cycle WMTC kelas 1 dan kelas 2, yang ketiga efisiensi sistem rem regeneratif sebesar 23,535% dan 31,98% dengan driving cycle WMTC

kelas 1 dan WMTC kelas 2.

## LAMPIRAN

Spesifikasi Honda Revo dapat kita lihat pada Tabel 1.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Cui, H. Zhang, Y. L. Ma, and Y. J. Zhang, "Regenerative braking control method and optimal scheme for electric motorcycle," *Int. Conf. Power Eng. Energy Electr. Drives*, no. May, pp. 1–6, 2011, doi: 10.1109/PowerEng.2011.6036557.
- [2] T. C. International Regulations, "International: light-duty: worldwide harmonized light vehicles test procedure (wltp)." international council on clean transportation, USA, 2018, [Online]. Available: <https://www.transportpolicy.net/standard/international-light-duty-worldwide-harmonized-light-vehicles-test-procedure-wltp/>.
- [3] I. N. Sutantra, *Teknologi Otomotif Hybrid*, 1st ed. Surabaya: Guna Widya, 2010.
- [4] I. N. Sutantra, *Teknologi Otomotif Hybrid*, 1st ed. Surabaya: Guna Widya, 2015.