

## BAB IV

### ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada Bagian ini peneliti menjelaskan bagaimana memperoleh besar gaya dan porsi rem pada sistem *regenerative brake*, menentukan besar energi bangkitan yang bisa diserap dan disimpan oleh baterai, serta menentukan efisiensi dari sistem *regenerative brake* pada Mobil listrik 4 penumpang ini.

#### 4.1. Perhitungan Gaya dan Porsi Pengereman pada Kendaraan

Menentukan porsi pengereman yang cocok untuk kendaraan yaitu dengan menggunakan distribusi kurva pengereman. Bagian pengereman yang dianggap aman adalah yang berada di antara kurva pengereman ideal dan kurva pengereman minimal sesuai dengan standar *ECE*. Selain itu, porsi pengereman yang diterapkan oleh kendaraan juga harus memenuhi batasan yang ditetapkan oleh kurva koefisien gesek jalan.

Kurva pengereman ideal didapatkan dengan menggunakan persamaan 3.1 dimana nilai  $\frac{a}{g}$  dan  $\frac{Fb_f}{W}$  diubah-ubah dalam rentang dari 0,1 hingga 0,8. Berikut adalah contoh perhitungannya:

$$\frac{Fb_r}{W} = \frac{(L_f - \frac{a}{g} \cdot h)}{(L_r + \frac{a}{g} \cdot h)} \cdot \frac{Fb_f}{W}$$
$$\frac{Fb_r}{W} = \frac{(1,31 - 0,1 \cdot 0,66)}{(1,06 + 0,1 \cdot 0,66)} \cdot 0,1$$
$$\frac{Fb_r}{W} = 0,11048$$

Didapatkan porsi pengereman ideal pada setiap nilai  $\frac{a}{g}$  dan  $\frac{Fb_f}{W}$  seperti yang tercantum di bawah ini.

**Tabel 4.1** Porsi Pengereman Ideal

$\frac{a}{g}$	$\frac{Fb_f}{W}$	$\frac{Fb_r}{W}$
0	0	0
0,1	0,1	0,11048
0,2	0,2	0,197651
0,3	0,3	0,265183
0,4	0,4	0,316012
0,5	0,5	0,352518
0,6	0,6	0,376648
0,7	0,7	0,390013
0,8	0,8	0,393955

Selanjutnya, dilakukan pencarian kurva batas pengereman sesuai dengan standar ECE menggunakan persamaan 3.3 untuk menghitung nilai  $\frac{Fb_f}{W}$ . Berikut ini contoh perhitungannya :

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

$$\frac{Fb_f}{W} = \frac{0,3}{2,387} (1,06 + (0.1 + 0.85(0,3 - 0.2)0,66)$$

$$\frac{Fb_f}{W} = 0,1490$$

Selanjutnya, dicari nilai  $\frac{Fb_r}{W}$  menggunakan persamaan 3.4, seperti yang ditunjukkan dalam contoh perhitungan berikut:

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

$$\frac{Fb_r}{W} = (0.1 + 0.85(0,3 - 0.2)) - 0,1490$$

$$\frac{Fb_r}{W} = 0,0360$$

Nilai  $\mu$  yang digunakan divariasikan antara 0,1 sampai 0,8. Nilai porsi pengereman minimal sesuai standar *ECE* dapat dilihat pada tabel 4.2.

**Tabel 4.2** Porsi Pengereman Standar Minimal *ECE*

$\frac{a}{g}$	$\frac{Fb_f}{W}$	$\frac{Fb_r}{W}$
0	0	0
0,1	0,0450	-0,0300
0,2	0,0946	0,0054
0,3	0,1490	0,0360
0,4	0,2081	0,0619
0,5	0,2719	0,0831
0,6	0,3404	0,0996
0,7	0,4137	0,1113
0,8	0,4916	0,1184

Untuk mencari pengereman aktual diawali dengan menentukan nilai  $\frac{a}{g}$  aktual dengan memvariasikan nilai  $\mu$  antara 0,1 sampai 0,8 menggunakan persamaan 2.11 dengan contoh perhitungan :

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

$$\frac{a}{g} = 0,1 + 0,85 (0,5 - 0,2)$$

$$\frac{a}{g} = 0,355$$

Selanjutnya, pengereman aktual dihitung dengan menggunakan persamaan 3.2 untuk mendapatkan nilai  $\frac{Fb_f}{W}$ , seperti yang diperlihatkan dalam contoh perhitungan berikut :

$$\frac{Fb_f}{W} = \frac{(Lr + \frac{a}{g} h)}{L} \mu$$

$$\frac{Fb_f}{W} = \frac{(1,09 + 0,355 \cdot 0,66)}{2,38} \mu$$

$$\frac{Fb_f}{W} = 1,735$$

kemudian menentukan nilai  $\frac{Fb_r}{W}$  menggunakan persamaan 3.1 seperti yang diperlihatkan dalam contoh perhitungan berikut : :

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

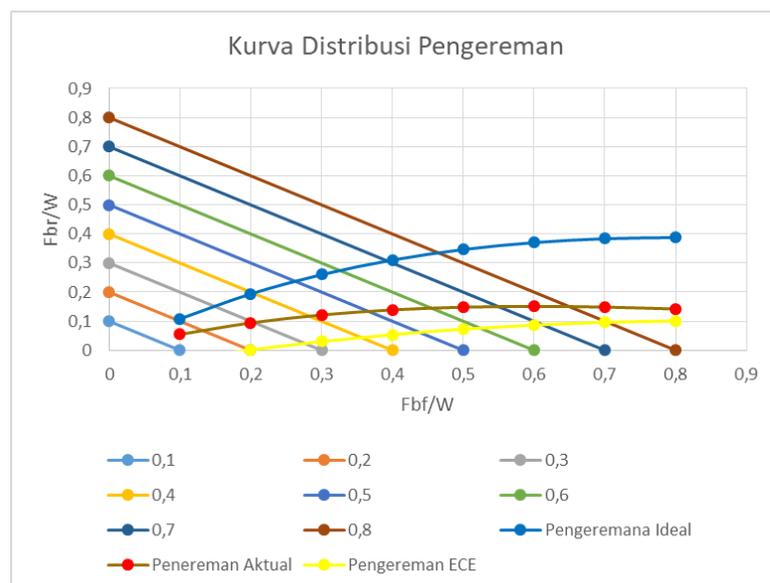
$$\frac{Fb_r}{W} = \frac{(1,31 - 0,355 \cdot 0,66)}{(1,09 + 0,355 \cdot 0,66)} \cdot 0,1734$$

$$\frac{Fb_r}{W} = 0,1442$$

**Tabel 4.3** Porsi Pengereman Aktual

$\mu$	$\frac{a}{g}$	$\frac{Fb_f}{W}$	$\frac{Fb_r}{W}$
0,1	0,015	0,044122	0,053615
0,2	0,1	0,083529	0,092283
0,3	0,185	0,118223	0,118803
0,4	0,27	0,148202	0,135467
0,5	0,355	0,173466	0,144169
0,6	0,44	0,194017	0,14649
0,7	0,525	0,209853	0,143756
0,8	0,61	0,220975	0,137093

Kurva pengereman pada mobil listrik 4 penumpang ini sesuai dengan gambar 4.1.



**Gambar 4.1** Kurva distribusi Pengereman Mobil Listrik 4 Penumpang

Berdasarkan grafik pada gambar 4.1 porsi pengereman dirancang berada dibawah kurva pengereman ideal dan diatas kurva pengereman *ECE*. Sistem pengereman *regenerative* diimplementasikan pada roda depan, dan proses ini dimulai sejak awal pengereman. Proporsi pengereman *regenerative* ditentukan berdasarkan kemampuan motor-generator yang digunakan, yang memiliki torsi sebesar 390 Nm.

$$F_b = \frac{I_t \times I_g \times T_m}{r} \eta$$

$$F_b = \frac{1,3 \times 3,9 \times 390}{0,203} \times 0,75$$

$$F_b = 7.305,296 \text{ N}$$

$$\frac{F_b}{W} = \frac{7.305,296 \text{ N}}{14.420,7 \text{ N}}$$

$$\frac{F_b}{W} = 0,5066$$

Namun, dalam situasi tertentu, porsi pengereman *regenerative* yang diterapkan tidak dapat mencapai angka 0,5065. Oleh karena itu berdsarkan Tabel 4.1 maka dipilihlah keofisien gesek antara 0,5 hingga 0,8. Namun untuk tetap menjaga keselamatan dalam proses pengereman kendaraan. maka saat kendaraan melakukan pengereman pada kondisi jalan dengan koefisien gesek antara 0,5 hingga 0,8, *regenerative brake* akan disesuaikan untuk tetap memastikan keamanan pengereman kendaraan.

**Tabel 4.4** Porsi Pengereman Kendaraan Regeneratif Roda Depan

$\mu$	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

Berdasarkan Tabel 4.4 dari porsi pengereman terlihat bahwa pada koefisien gesek jalan 0,5 dan 0,6, sehingga pengereman pada roda depan sepenuhnya dilakukan dengan menggunakan pengereman *regenerative*. Sementara itu, pada koefisien gesek jalan 0,7 dan 0,8, porsi pengereman *regenerative* sudah maksimum, sehingga perlu ditambahkan porsi pengereman mekanik. Sedangkan porsi pengereman pada roda belakang menggunakan porsi pengereman aktual yang telah ditentukan pada tabel 4.3.

Untuk menghitung nilai gaya pengereman yang dibutuhkan pada setiap roda depan dan roda belakang, yaitu dengan cara porsi pengereman ( $\frac{F_{bf}}{W}$ ) dikalikan dengan berat kendaraan mobil listrik ( $W$ ), yang akhirnya di peroleh gaya pengereman ( $F_{bf}$ ), berikut contoh perhitungannya:

$$\frac{F_{bf}}{W} = 0,5066$$

$$F_{bf} = 0,5066 \times 14,406 \text{ N}$$

$$F_{bf} = 7305,3 \text{ N}$$

Setelah gaya pengereman diperoleh, disesuaikan dengan Tabel 4.5.

**Tabel 4.5** Gaya Pengereman Kendaraan Regeneratif Roda Depan

$\mu$	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

Dalam mobil listrik berkapasitas empat penumpang ini, roda belakang digunakan sebagai penggerak utama, dan *motor-generator* hanya terhubung pada roda belakang. Oleh karena itu, penempatan *regenerative* brake harus disesuaikan dengan kondisi mobil listrik ini, dengan pengereman regeneratif yang sepenuhnya

diterapkan pada roda belakang. Porsi pengereman kendaraan menggunakan *regenerative brake* pada roda belakang akan ditentukan berdasarkan nilai yang ada dalam Tabel 4.6

**Tabel 4.6** Porsi Pengereman Kendaraan Regeneratif Roda Belakang

$\mu$	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

Berdasarkan Tabel 4.6 porsi pengereman *regenerative* pada roda belakang jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan porsi pengereman *regenerative* pada roda depan. karena desain kendaraan ini menetapkan porsi pengereman yang lebih besar untuk roda depan daripada roda belakang. Dengan demikian, pada porsi pengereman roda belakang, tidak perlu diterapkan pengereman mekanis tambahan karena porsi pengereman roda belakang sudah tercukupi oleh *regenerative brake*.

Kemudian menghitung nilai gaya pengereman yang dibutuhkan pada setiap roda depan dan roda belakang, yaitu dengan cara porsi pengereman ( $\frac{F_{bf}}{W}$ ) dikalikan dengan berat kendaraan mobil listrik (W), yang akhirnya di peroleh gaya pengereman ( $F_{bf}$ ), berikut contoh perhitungannya :

$$\frac{F_{bf}}{W} = 0,1371$$

$$F_{bf} = 0,1371 \times 14,406 \text{ N}$$

$$F_{bf} = 1976,98 \text{ N}$$

Setelah gaya pengereman diperoleh, disesuaikan dengan Tabel 4.7.

**Tabel 4.7** Gaya *Regenerative Brake* Roda Belakang

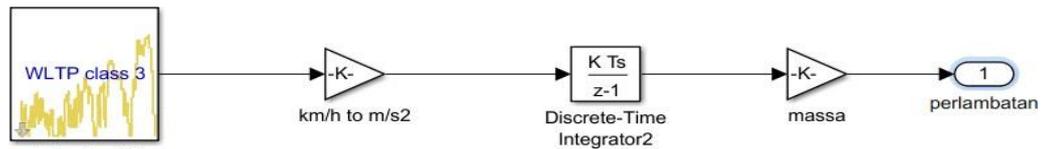
$\mu$	Fb reg	Fbf	Fbr
0,5	2079,016	5131,334	0
0,6	2112,482	6539,938	0
0,7	2073,067	8021,423	0
0,8	1976,98	9559,58	0

**4.2 Analisa Total Energi Bangkitan Yang Dapat Diserap**

Total Energi bangkitan yang dapat diserap oleh *regerenative brake* diperoleh dari Spesifikasi mobil listrik 4 penumpang dan simulasi pada software Matlab-Simulink yang sesuai dengan blok-blok Simulink yang ada dibawah ini :

**4.2.1 Blok Gaya Perlambatan ( $F_a$ )**

Adanya gaya perlambatan timbul karena massa kendaraan mengalami dampak kendaraan sesuai dengan persamaan dibawah ini.:



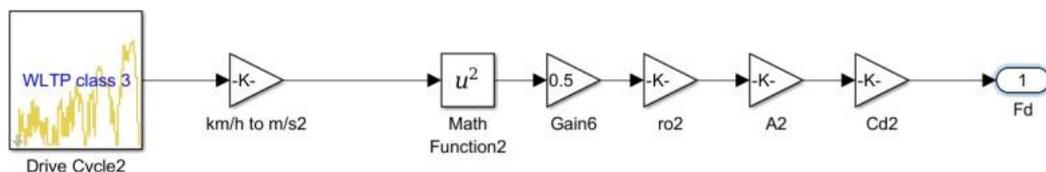
Gambar 4.2 Blok Simulink gaya perlambatan

$$F_a = m \cdot a \dots\dots\dots (3.7)$$

$$a = \frac{dv}{dt} \dots\dots\dots (3.8)$$

**4.2.2. Blok Gaya Hambat *Drag* ( $F_d$ )**

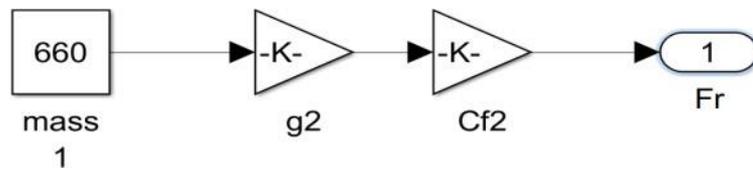
Gaya hambat *drag* dipengaruhi oleh kecepatan kendaraan seperti yang dinyatakan dalam persamaan 2.12..



Gambar 4.3 Blok simulink gaya hambat *drag*

### 4.2.3. Blok Gaya Hambat *Rolling*

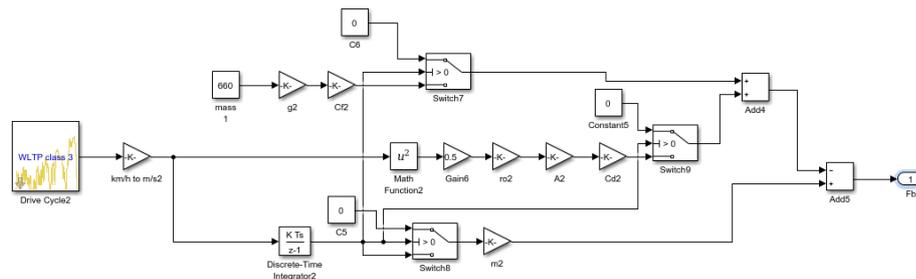
Gaya hambat *rolling* adalah hasil dari gaya gesekan antara roda dan permukaan jalan, sebagaimana dijelaskan dalam persamaan 2.13..



**Gambar 4.4** Blok Simulink Gaya Hambat *Rolling*

### 4.2.4. Blok Gaya pengereman kendaraan

Berdasarkan persamaan 3.6 gaya pengereman kendaraan dapat dimodelkan sebagai berikut:

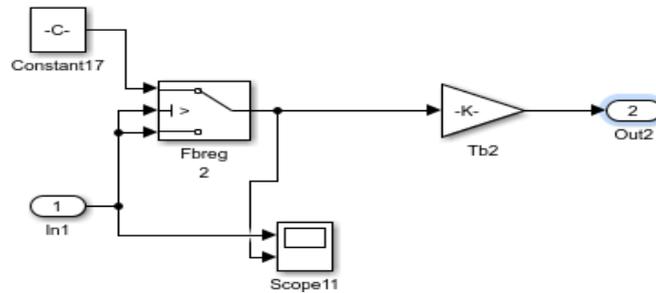


**Gambar 4.5** Blok Simulink Gaya pengereman

Dalam simulasi tersebut, blok gaya pengereman diperluas dengan menambahkan sebuah blok *switch* yang mengikuti aturan berikut: jika nilai percepatan ( $a$ ) lebih besar dari 0, maka nilai  $F_b$  (gaya pengereman) akan diatur sama dengan 0; namun, jika nilai  $a$  kurang dari 0, maka nilai  $F_b$  akan dihitung berdasarkan blok gaya pengereman yang telah dijelaskan sebelumnya. Tujuannya adalah agar simulasi hanya mempertimbangkan gaya pengereman tanpa memasukkan gaya traksi kendaraan.

#### 4.2.5. Blok Torsi Pengereman

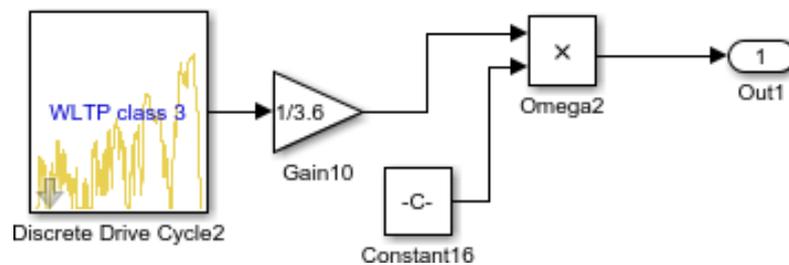
Torsi pengereman dihitung dengan mengalikan nilai  $F_b$  (gaya pengereman) dengan jari-jari dinamis roda, sesuai dengan persamaan 2.19..



**Gambar 4.6** Blok Simulink Torsi Pengereman

#### 4.2.6. Blok Putaran Motor

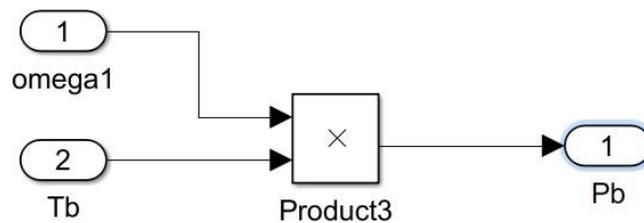
Putaran motor ( $\omega$ ) diperoleh dari persamaan 2.21.



**Gambar 4.7** Blok Simulink Putaran Motor

#### 4.2.7. Blok Daya Pengereman

Nilai daya pengereman dihasilkan dengan mengalikan torsi pengereman dengan kecepatan sudut ( $\omega$ ), sesuai dengan persamaan 2.18.

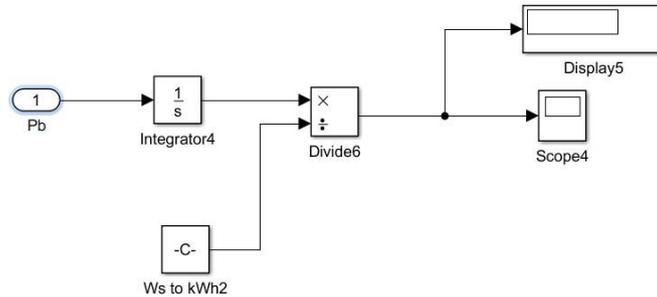


**Gambar 4.8** Blok Simulink Daya Pengereman

**4.2.8. Blok Energi yang Tersedia**

Energi yang tersedia dapat ditemukan dengan melakukan *integrasi* terhadap daya pengereman, sesuai dengan persamaan:

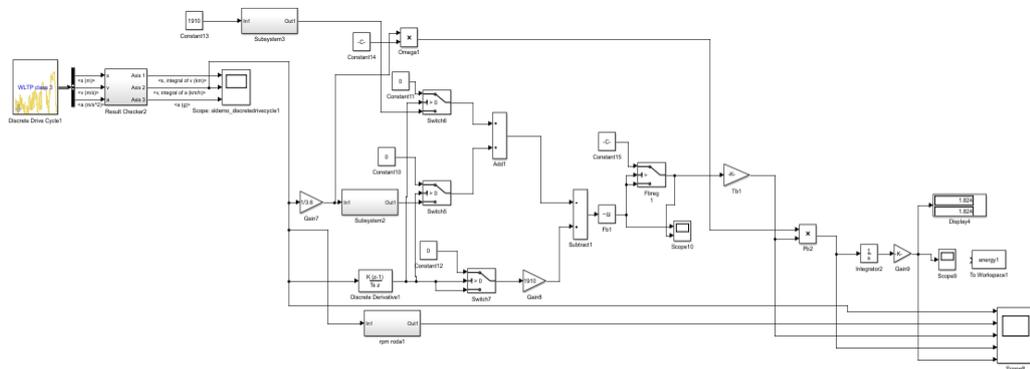
$$E = \int P_b dt' \dots\dots\dots (3.9)$$



**Gambar 4.9** Blok Simulink Energi Bangkitan

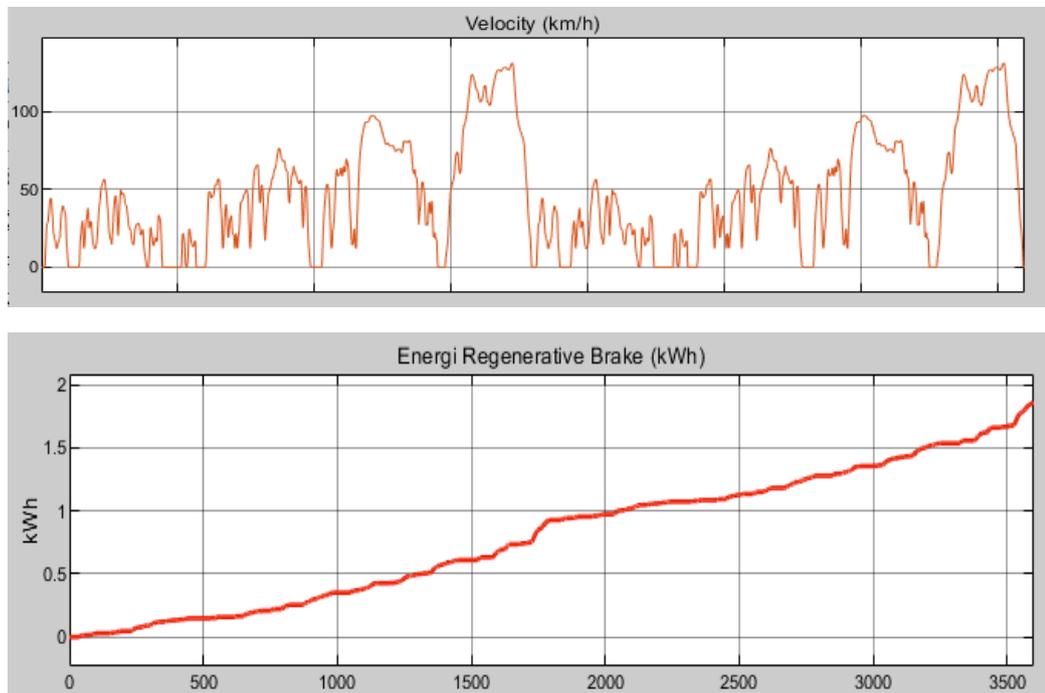
**4.2.9. Blok Gabungan Matlab Simulink**

Untuk memperoleh Total Energi bangkitan yang dapat diserap oleh *regerenative brake* maka blok-blok *software Matlab-Simulink* yang ada digabungkan menjadi blok gabungan *Matlab-Simulink* seperti gambar 4.10 yang ada dibawah ini :



**Gambar 4.10** Blok Gabungan Matlab Simulink

Dari hasil simulasi *software Matlab-Simulink* Blok Gabungan dengan porsi yang digunakan sesuai dengan porsi *regerenative brake* pada roda belakang ,dengan koefisien gesek jalan 0,8 sebesar 0,1371, maka di peroleh total Total Energi bangkitan yang dapt diserap oleh *regerenative brake*.



**Gambar 4.11** Energi bangkitan *regenerative brake*

Berdasarkan Gambar 4.2 hasil simulasi menunjukkan bahwa total energi yang dapat diserap dari satu siklus *driving cycle WLTP class 1* adalah sekitar 1,855 kWh. Selanjutnya, agar energi ini dapat disimpan dalam baterai, perlu melalui *generator* untuk mengubahnya menjadi energi listrik, Efisiensi *generator* yang digunakan dalam siklus ini sebesar 95%, sehingga energi yang benar-benar dapat disimpan dalam baterai adalah :

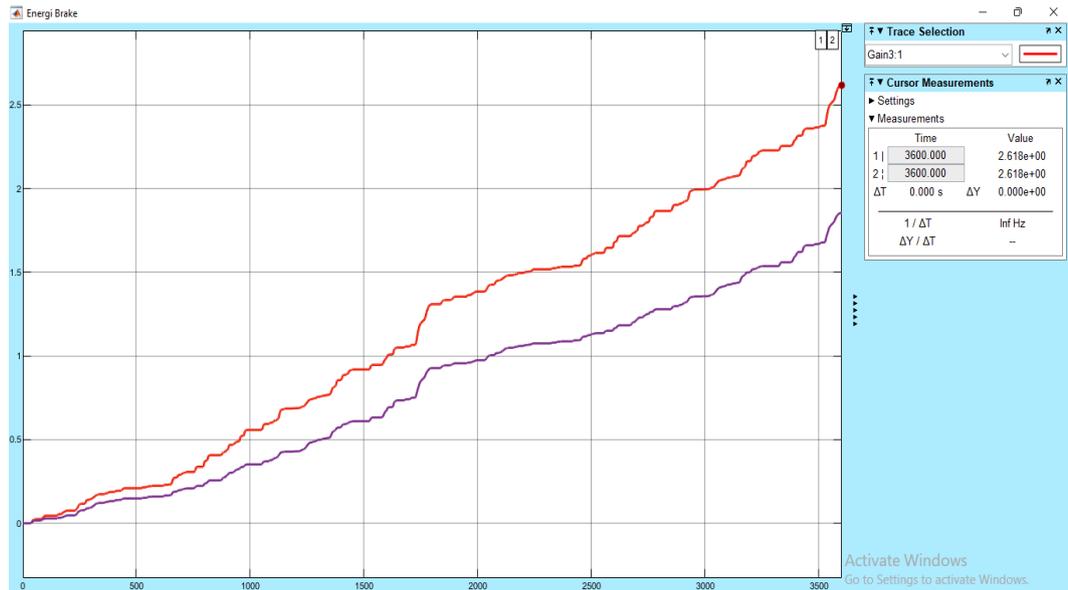
$$E = 1,855 \text{ kWh} \times 0,95$$

$$E = 1,7623 \text{ kWh}$$

### 4.3 Mencari Efisiensi Sistem *Regenerative Brake*

Untuk menentukan efisiensi sistem *regenerative brake*, langkah pertama adalah menentukan energi total yang digunakan dalam proses pengereman kendaraan. Energi pengereman total dapat diperoleh melalui hasil simulasi menggunakan blok *Matlab regenerative brake*, dengan memperhitungkan seluruh

porsi pengereman. Grafik hasil simulasi ini terdapat dalam Gambar 4.3 di bawah ini :



**Gambar 4.12** Grafik total Energi pengereman dan Energi bangkitan *regenerative brake*

Dalam gambar di atas, grafik berwarna merah memperlihatkan jumlah energi yang digunakan untuk melakukan perlambatan kendaraan secara keseluruhan, sementara grafik berwarna biru menunjukkan jumlah energi yang berhasil diserap oleh sistem *regenerative brake* sesuai dengan porsi yang telah dirancang. Total energi yang tersedia dari proses pengereman adalah sekitar 2,618 kWh, sementara energi yang berhasil diserap oleh sistem, sebagaimana dihitung sebelumnya, adalah sekitar 1,7623 kWh.

$$Efisiensi = \frac{1,7623}{2,618}$$

$$Efisiensi = 0,6731$$

Dari perhitungan tersebut diperoleh efisiensi sistem *regenerative brake* sebesar 67,31 %.