TUGAS AKHIR – TM184835

STUDI ANALISIS KINERJA SISTEM REM REGENERATIF PADA SEPEDA MOTOR HYBRID DENGAN KONFIGURASI SERI

ALEX WILLIAM PANGESTU
NRP 02111640000080

Dosen Pembimbing:
Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., PhD

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

TUGAS AKHIR – TM184835

STUDI ANALISIS KINERJA SISTEM REM REGENERATIF PADA SEPEDA MOTOR HYBRID DENGAN KONFIGURASI SERI

ALEX WILLIAM PANGESTU
NRP 02111640000080

Dosen Pembimbing:
Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., PhD

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

FINAL PROJECT – TM184835

PERFORMANCE ANALYSIS OF REGENERATIVE BRAKE SYSTEMS ON SERIES HYBRID ELECTRIC MOTORCYCLES

ALEX WILLIAM PANGESTU
NRP 02111640000080

Advising Lecturer:
Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., PhD

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2020

STUDI ANALISIS KINERJA SISTEM REM REGENERATIF PADA SEPEDA MOTOR HYBRID DENGAN KONFIGURASI SERI

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
Alex William Pangestu
NRP. 02111640000080

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. **Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D** ..... (Pembimbing)
   NIP. 195106051978031002
2. **Achmad Syaifuddin, ST., M.Eng., PhD** ..... (Penguji I)
   NIP. 197909262005011001
3. **Aida Annisa Amin Daman, ST, MT** ..... (Penguji II)
   NIP. 198907052015042005
4. **Dr. Unggul Wasiwitono, ST, M.Eng.Sc.** ..... (Penguji III)
   NIP. 197805102001121001

SURABAYA
AGUSTUS 2020

STUDI ANALISIS KEANDALAN SISTEM REM REGENERATIF PADA SEPEDA MOTOR HYBRID DENGAN KONFIGURASI SERI

Nama Mahasiswa : Alex William Pangestu
NRP : 02111640000080
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D

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. Penelitian mengenai sistem rem regeneratif pada sepeda motor masih sangat jarang dilakukan, oleh sebab itu pada tugas akhir ini akan dilakukan penelitian tentang analisis keandalan sistem rem regeneratif pada sepeda motor hybrid.

Pada penelitian terdapat dua tahapan utama, yang pertama adalah tahap perhitungan dan yang kedua adalah tahap analisis terhadap besar gaya dan porsi, kontribusi dan efisisensi 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

PERFORMANCE ANALYSIS OF REGENERATIVE BRAKE SYSTEMS ON SERIES HYBRID ELECTRIC MOTORCYCLES

Student Name : Alex William Pangestu
NRP : 02111640000080
Department : Mechanical Engineering
Advisor : Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D

ABSTRACK

Hybrid electric vehicles (HEV) are vehicles that use two or more different power sources to move. Hybrid technology has now been applied to four-wheeled motorized vehicles. Meanwhile, for two-wheeled motorized vehicles such as motorbikes, hybrid technology is still rarely applied. In a hybrid vehicle, the dissipated kinetic energy can be stored by using a regenerative brake system, where the electric motor is turned into a generator and then stored in the battery. Research on regenerative brake systems on motorbikes is still very rarely done, therefore this final project will research the performance analysis of regenerative brakimg systems on hybrid motorbikes.

In this research, there are two main steps, the first is the calculation step and the second is the analysis step of the force and portion size, contribution, and efficiency of the regenerative brake system. For the calculation step, the drag forces acting on the vehicle, the power and energy of the braking that can be stored based on the driving cycle WMTC class 1 and WMTC class 2 are calculated. Furthermore, for the analysis phase, the results obtained in the previous calculation step will be analyzed.

From this research, it was found that the magnitude of the mechanical brake system and the regenerative brake system on a hybrid motorcycle with a j/g value of 0.3 were 139,09 N and 266,31 N. The portions of mechanical and regenerative braking obtained with a j/g value of 0.3 were 0.060 and 0.114. The

contribution of the regenerative brake system to the power requirements of the vehicle is 33.194% in the WMTC class 1 driving cycle and 29.504% in the WMTC class 2 driving cycle, respectively. The efficiency of the regenerative brake system with WMTC class 1 driving cycle is 23.535% and with WMTC class 2 driving cycle is 31.98%

Keywords: regenerative brake, hybrid motorcycle, energy braking

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan karunia-Nya sehingga di tengah kondisi pandemi virus Covid-19, tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tidak dapat lepas dari dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dan mendukung penulis dalam proses penyusunan tugas akhir ini, antara lain:

1. Mama dan Papa, My brother and Sister (Bob, Marten dan Jasmine) yang selalu memberikan dukungan dan doa sehingga penulis bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D, selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberikan masukan, mengarahkan, memberikan ilmu yang bermanfaat, memotivasi dan menyempatkan waktunya untuk mendampingi penulis selama mengerjakan Tugas Akhir.
3. Bapak Achmad Syaifuddin ST, M.Eng, Ph.D, Ibu Aida Annisa Amin Daman, ST, MT, Bapak Dr. Unggul Wasiwitono, ST, M.Eng.Sc. selaku dosen penguji tugas akhir penulis karena telah meluangkan waktu dan memberikan saran-saran kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik.
4. Bapak Bambang Arip Dwiyantoro ST., M.Sc.Eng selaku dosen wali selama menempuh perkuliahan di Departemen Teknik Mesin ITS.
5. Angkatan M59 yang telah memberikan dukungan sekaligus menjadi keluarga penulis selama menempuh perkuliahan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember mulai dari awal perkuliahan hingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Teman-teman TPKB ITS khususnya angkatan 2016 yang menjadi keluarga pertama selama menempuh perkuliahan di ITS.
7. Teman-teman grup “NS”

8. Warga Laboratorium Otomotif terutama Marcel, Valen, Ariesto, Ayub, Vano, Sita dan Bella yang sudah menemani membantu menyelesaikan Tugas Akhir ini.
9. Seluruh civitas akademika Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember
10. Steven Chandra selaku teman sewaktu SMP yang menjadi orang pertama yang mengenalkan Kota Surabaya kepada penulis.
11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan penulis satu per satu.

Penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu penulis sangat mengharapkan masukan dan saran dari semua pihak. Penulis berharap bisa memberikan manfaat untuk siapapun yang membaca Tugas Akhir ini di kemudian hari.

Surabaya, Agustus 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN

ABSTRAK i

ABSTRACK..... iii

KATA PENGANTAR.....v

DAFTAR ISI vii

DAFTAR GAMBAR..... xii

DAFTAR TABEL xiiii

BAB 1 PENDAHULUAN.....1

1.1 LATAR BELAKANG..... 1
1.2 RUMUSAN MASALAH 3
1.3 TUJUAN TUGAS AKHIR..... 4
1.4 BATASAN MASALAH 4
1.5 MANFAAT PENELITIAN 4
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN 5

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....7

2.1 PENELITIAN TERDAHULU 7
2.2 KENDARAAN HYBRID 9
2.2.1 Hybrid Seri 9
2.2.2 Hybrid Paralel.....10
2.2.3 Hybrid Seri-Paralel 12
2.3 REGENERATIVE BRAKE.....13
2.4 CENTER OF GRAVITY (COG) 15
2.5 DISTRIBUSI GAYA PENGEREMAN 17
2.6 REGULASI PENGEREMAN 20
2.7 PRINSIP DASAR PENGEREMAN 22
2.7.1 Hukum Gerak Newton.....22
2.7.2 Hukum Konservasi Energi 23
2.8 GAYA DAN ENERGI PADA KENDARAAN BERGERAK.....23
2.9 KOMPONEN REGENERATIVE BRAKE.....27

2.9.1 Hybrid Motor Generator.....*27*
2.9.2 Engine Control Unit (ECU) *28*
2.9.3 Inverter.....*29*
2.9.4 Baterai *30*
2.10 *DRIVING CYCLE*.....30
2.10.1 WMTC Kelas 1 .....*31*
2.10.2 WMTC Kelas 2 .....*31*
2.10.3 WMTC Kelas 3 .....*32*
2.11 KONTRIBUSI DAN EFISIENSI REGENERATIVE BRAKE.....33

BAB 3 METODE PENELITIAN.....35

3.1 FLOWCHART PENELITIAN.....35
3.1.1 Data Kendaraan *38*
3.1.2 Data Driving cycle.....*39*
3.2 FLOWCHART PERHITUNGAN.....40
3.2.1 Perhitungan Gaya dan Porsi Rem Regeneratif *40*
3.2.2 Analisis Kontribusi Sistem Rem Regeneratif.....*45*
3.2.3 Analisis Efisiensi Sistem Rem Regeneratif *47*
3.3 DATA DAN CONTOH PERHITUNGAN.....49
3.3.1 Perhitungan Center of Gravity (CoG) *49*
3.3.2 Perhitungan Porsi Pengereman Ideal.....*49*
3.3.3 Perhitungan Porsi Pengereman Minimal *50*
3.3.4 Perhitungan Porsi Pengereman Aktual *51*
3.3.5 Perhitungan Porsi Maksimal Sistem Rem Regeneratif *52*
3.3.6 Perhitungan Gaya Maksimal Sistem Rem Regeneratif *53*
3.3.7 Perhitungan Gaya Hambat Angin *54*
3.3.8 Perhitungan Gaya Hambat Rolling *54*
3.3.9 Perhitungan Gaya Hambat Inersia.....*55*
3.3.10 Perhitungan Rhp Kendaraan *55*
3.3.11 Perhitungan Energi Bangkitan.....*56*
3.3.12 Perhitungan Energi Kinetik Perlambatan.....*56*
3.3.13 Perhitungan Kontribusi Sistem Rem Regeneratif *56*
3.3.14 Perhitungan Efisiensi Sistem Rem Regeneratif *56*

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN 57

4.1 PORSI DAN GAYA REM MEKANIS DAN REM REGENERATIF PADA KENDARAAN.....57
4.2 KONTRIBUSI SISTEM REGENERATIF TERHADAP KEBUTUHAN DAYA KENDARAAN.....59
4.3 EFISISENSI SISTEM REM REGENERATIF 62
4.3.1 Total Energi Bangkitan.....62
4.3.2 Energi Kinetik Perlambatan.....63
4.3.3 Efisiensi Sistem Rem Regeneratif pada Kendaraan....65

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN 67

5.1 KESIMPULAN 67
5.2 SARAN 69

DAFTAR PUSTAKA.....71

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR 2.1 ENERGI BANGKITAN PADA PORSI REGENERATIVE BRAKE 0,03G 7
GAMBAR 2.2 *DRIVING CYCLE* PENELITIAN SEBELUMNYA 8
GAMBAR 2.3 SKEMA POWER DAN DRIVETRAIN KENDARAAN HYBRID SERI 10
GAMBAR 2.4 SKEMA POWER DAN DRIVETRAIN KENDARAAN HYBRID PARALEL 11
GAMBAR 2.5 SKEMA POWER DAN DRIVETRAIN KENDARAAN HYBRID SERI-PARALEL 13
GAMBAR 2.6 ALIRAN ENERGI KENDARAAN HYBRID SAAT MENGEREM 15
GAMBAR 2.7 DISTRIBUSI GAYA-GAYA PADA KENDARAAN.....15
GAMBAR 2.8 DISTRIBUSI GAYA-GAYA SAAT PENIMBAGAN MIRING 16
GAMBAR 2.9 KENDARAAN SAAT UNDERSTEER DAN OVERSTEER20
GAMBAR 2.10 KURVA DISTRIBUSI PENGEREMAN.....22
GAMBAR 2.11 FREE BODY DIAGRAM KENDARAAN 24
GAMBAR 2.12 GRAFIK PENGARUH TEKANAN BAN TERHDAP F_O DAN F_S 25
GAMBAR 2.13 HYBRID MOTOR GENERATOR 28
GAMBAR 2.14 ENGINE CONTROL UNIT.....29
GAMBAR 2.15 INVERTER.....29
GAMBAR 2.16 BATERAI 30
GAMBAR 2.17 GRAFIK SIKLUS WMTC KELAS 1 31
GAMBAR 2.18 GRAFIK SIKLUS WMTC KELAS 2 32
GAMBAR 2.19 GRAFIK SIKLUS WMTC KELAS 3 33
GAMBAR 3.1 FLOWCHART PENELITIAN TUGAS AKHIR.....36
GAMBAR 3.2 *DRIVING CYCLE* WMTC KELAS 1.....39
GAMBAR 3.3 *DRIVING CYCLE* WMTC KELAS 2.....39
GAMBAR 3.4 FLOWCHART PERHITUNGAN GAYA DAN PORSI REM REGENERATIF 42
GAMBAR 3.5 FLOWCHART PERHITUNGAN KONTRIBUSI SISTEM REM REGENERATIF 45

GAMBAR 3.6 FLOWCHART ANALISIS EFISIENSI SISTEM REM REGENERATIF 47
GAMBAR 4.1 KURVA DISTRIBUSI PENGEREMAN.....57
GAMBAR 4.2 GRAFIK R_{HP} VS WAKTU *DRIVING CYCLE* WMTC KELAS 1.....60
GAMBAR 4.3 GRAFIK R_{HP} VS WAKTU *DRIVING CYCLE* WMTC KELAS 2.....60
GAMBAR 4.4 GRAFIK ENERGI BANGKITAN VS WAKTU *DRIVING CYCLE* WMTC KELAS 1.....62
GAMBAR 4.5 GRAFIK ENERGI BANGKITAN VS WAKTU *DRIVING CYCLE* WMTC KELAS 2.....63
GAMBAR 4.6 GRAFIK ENERGI KINETIK PERLAMBATAN VS WAKTU *DRIVING CYCLE* WMTC KELAS 1 64
GAMBAR 4.7 GRAFIK ENERGI KINETIK PERLAMBATAN VS WAKTU *DRIVING CYCLE* WMTC KELAS 2 64
GAMBAR 5.1 DISTRIBUSI PENGEREMAN 68

DAFTAR TABEL

TABEL 2.1 TABEL KARAKTERISTIK SIKLUS *WMTC* KELAS 1 31
TABEL 2.2 TABEL KARAKTERISTIK SIKLUS *WMTC* KELAS 2 32
TABEL 2.3 TABEL KARAKTERISTIK SIKLUS *WMTC* KELAS 3 33
TABEL 3.1 SPESIFIKASI HONDA REVO X.....38
TABEL 3.2 DATA PERHITUNGAN COG.....49
TABEL 3.3 PORSI PENGEREMAN IDEAL.....50
TABEL 3.4 PORSI PENGEREMAN MINIMAL 51
TABEL 3.5 PORSI PENGEREMAN AKTUAL 52
TABEL 3.6 PORSI PENGEREMAN MEKANIS DAN REGENERATIF 53
TABEL 3.7 GAYA PENGEREMAN MEKANIS DAN REGENERATIF....54
TABEL 4.1 PORSI REM MEKANIS DAN REM REGENERATIF 58
TABEL 4.2 GAYA REM MEKANIS DAN REM REGENERATIF.....59
TABEL 5.1 PORSI PENGEREMAN 67
TABEL 5.2 GAYA PENGEREMAN 68

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1
PENDAHULUAN

Pada bab pendahuluan penulis menulis mengenai latar belakang dari penyusunan tugas akhir ini, selanjutnya adalah mengenai rumusan masalah yang akan dicari dalam penelitian ini. Sehingga nantinya akan didapat tujuan serta manfaat dari penelitian ini. Dan yang terakhir adalah mengenai batasan masalah dan sistematika penulisan laporan yang digunakan dalam tugas akhir penulis, sehingga diharapkan pembaca dapat dengan mudah memahami isi dari bab pendahuluan ini.

1.1 Latar Belakang

Sepeda motor merupakan alat transportasi yang paling 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. Berdasarkan data dari Asosiasi Industri Sepeda Motor Indonesia (AISI) menunjukkan data penjualan sepeda motor 3 tahun terakhir mencapai 8 juta unit/tahun. Dengan jumlah penggunaan sepeda motor yang semakin banyak menyebabkan konsumsi bahan bakar yang semakin tinggi pula. Berdasarkan data yang dirilis oleh *British Petroleum* pada tahun 2013 menunjukkan bahwa produksi minyak di Indonesia semakin menurun sementara konsumsi minyak selalu meningkat dari tahun ke tahun. Menyikapi kondisi tersebut, di beberapa negara kendaraan listrik telah dikembangkan sebagai solusi untuk mengganti kendaraan berbahan bakar minyak bumi. Kendaraan listik dianggap teknologi yang menjanjikan dimasa depan, karena standard *CAFE (Coorporate Avarage Fuel Economy)* yang semakin ketat dan kesadaran masyarakat tentang lingkungan juga semakin meningkat (Zhuang, Zhang, Yang, Wang, & Hu, 2016). Kendaraan listrik juga sangat efisien dalam penggunaan bahan bakar, tidak menghasilkan gas buang hasil pembakaran dan dapat memberikan akselerasi yang cepat. Namun kendaraan listrik

dinilai masih memiliki berbagai kendala seperti waktu pengisian baterai yang lama, harga baterai yang cukup mahal dan daya jelajah yang tidak sebesar kendaraan berbahan bakar minyak dikarenakan dibatasi oleh kapasitas baterai. 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. Teknologi sistem penggerak *hybrid* saat ini sudah diaplikasikan pada kendaraan bermotor roda empat. Sementara untuk aplikasi pada kendaraan bermotor roda dua atau 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. Energi yang tersimpan dapat digunakan untuk mengurangi kebutuhan energi kendaraan untuk bergerak dan meningkatkan efisiensi. Energi tersebut dapat mengganti kerugian energi yang diakibatkan oleh gaya-gaya yang bekerja saat kendaraan bergerak. Penggunaan sistem rem regeneratif pertama kali diaplikasikan oleh Louis Antoine Krieger pada kereta api listrik di Inggris.

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.

Penelitian mengenai sistem rem regeneratif pada sepeda motor masih sangat jarang dilakukan. Penelitian tentang sistem rem regeneratif pada sepeda motor hanya mencakup tentang desain dan sistem kontrol rem regeneratif pada sepeda motor.

Penelitian ini hanya berfokus pada skema sistem kontrol sistem rem regeneratif dengan menggunakan motor DC. (Cui, Zhang, Ma, & Zhang, 2011).

Berdasarkan penelitian sebelumnya mengenai sistem rem regeneratif yang diaplikasikan pada bus transjakarta, didapatkan energi pengereman pada kendaraan yang dapat ditangkap dan disimpan dalam baterai. Pada penelitian ini juga didapatkan kapasitas baterai dan kapasitas generator berdasarkan *driving cycle* bus tranjakarta (Baradwadya, 2016).

Kemudian pada penelitian lainnya mengenai sistem rem regeneratif, didapatkan torsi, daya dan energi yang bisa dibangkitkan oleh desain sistem rem regeneratif dalam satu siklus *driving cycle NEDC* pada kendaraan GEA *Passenger Car* dengan menggunakan *software Matlab-Simulink*.

Dalam tugas akhir 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*.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam tugas akhir ini, dirumuskan beberapa permasalahan yaitu sebagai berikut:

1. Berapa besar porsi dan gaya rem mekanis serta rem regeneratif pada sepeda motor *hybrid*?
2. Berapa besar kontribusi sistem rem regeneratif terhadap kebutuhan daya kendaraan pada suatu *driving cycle*?
3. Berapa efisiensi sistem rem regeneratif yang dipasang pada sepeda motor *hybrid*?

1.3 Tujuan Tugas Akhir

Dengan mengacu pada perumusan masalah, maka tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan besar porsi dan gaya rem mekanis serta rem regeneratif pada sepeda motor *hybrid*.
2. Mendapatkan besar kontribusi sistem rem regeneratif terhadap kebutuhan daya kendaraan pada suatu *driving cycle*.
3. Mendapatkan efisiensi sistem rem regeneratif pada sepeda motor *hybrid*.

1.4 Batasan Masalah

Batasan yang digunakan pada penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Parameter kendaraan menggunakan spesifikasi kendaraan sepeda motor yang sudah ada
2. Analisis dan perhitungan tidak mencakup sistem kontrol.
3. Sistem penyimpanan hanya menggunakan baterai.
4. Massa kendaraan yang digunakan adalah massa motor ditambah 2 penumpang, dengan massa 1 penumpang 70 kg.
5. *Driving cycle* yang digunakan adalah *driving cycle WMTC* kelas 1 dan *WMTC* kelas 2.

1.5 Manfaat Penelitian

Dalam Tugas Akhir ini memiliki manfaat antara lain sebagai berikut:

1. Sebagai referensi dan literatur untuk penelitian yang berkaitan ataupun penelitian lebih lanjut mengenai sistem rem regeneratif.

2. Membantu pengembangan desain sepeda motor *hybrid* dengan memanfaatkan sistem rem regeneratif melalui permodelan kendaraan sepeda motor.
3. Memberikan inovasi terhadap sepeda motor *hybrid* yang sudah ada.

1.6 Sistematika Penulisan

Berikut ini merupakan sistematika penulisan yang digunakan dalam penelitian ini:

1. BAB 1: Pendahuluan
   Pada bab 1 akan dijelaskan mengenai latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, serta ruang lingkup penelitian yang terdiri dari batasan masalah penelitian
2. BAB 2: Tinjauan Pustaka
   Pada bab 2 akan dijelaskan mengenai teori yang digunakan dan kajian pustaka sebagai penunjang penelitian. Teori yang dibahas akan menjadi gambaran konsep tentang penelitian yang dilakukan
3. BAB 3: Metodologi
   Pada bab 3 akan dijelaskan mengenai alur pengerjaan penelitian yang dilakukan sehingga pelaksanaan penelitiannya dapat sistematis, terstruktur dan terarah.
4. BAB 4: Hasil dan Pembahasan
   Bab ini berisi analisis serta interpretasi hasil pengolahan data yang akan digunakan dalam menarik kesimpulan serta memberikan rekomendasi
5. BAB 5: Penutup
   Bab ini menjelaskan kesimpulan dari penelitian tugas akhir yang telah dilakukan untuk menjawab tujuan penelitian serta saran atau rekomendasi yang diberikan untuk penelitian selanjutnya.

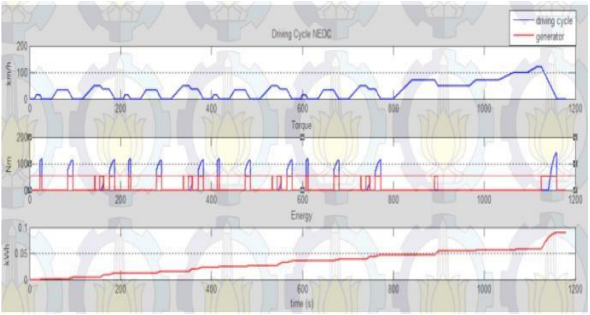
(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada bab 2 ini berisikan tentang tinjauan pustaka yang berisi tentang penelitian-penelitian *regenerative brake* terdahulu dan juga dasar teori yang berisi subbab tentang pengertian dari kendaraan hybrid, regenerative brake, distribusi gaya pengereman, regulasi pengereman, prinsip dasar pengereman, gaya dan energi pada kendaraan bergerak, komponen regenerative brake, *driving cycle* serta kontribusi dan efisiensi regenerative brake.

2.1 Penelitian Terdahulu

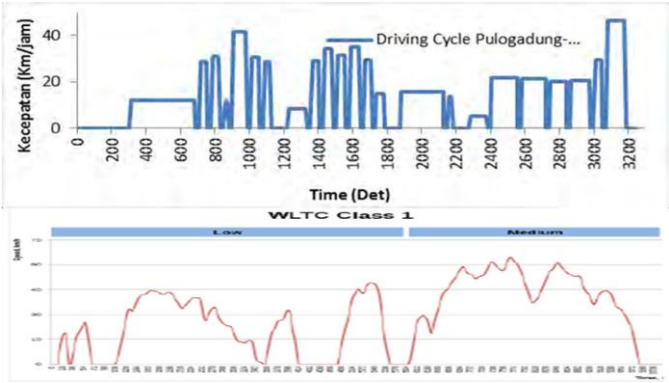
Penelitian-penelitian terdahulu tentang sistem rem regeneratif dapat dijadikan acuan untuk acuan dalam penelitian ini adalah oleh Gito Wijaya. Pada penelitian ini dicari nilai torsi, daya dan energi yang bisa dibangkitkan oleh desain *regenerative brake* dalam satu siklus *driving cycle NEDC* pada kendaraan GEA *Passenger Car* dengan menggunakan *software Matlab-Simulink*. Hasil simulasi dari *software* tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Energi bangkitan pada porsi regenerative brake 0,03g

Hasilnya, dalam satu siklus *driving cycle NEDC*, daya yang mampu dibangkitkan sebesar 2666 Watt dengan nilai energi bangkitan 0,08924kWh dengan porsi *regenerative brake* sebesar 0,03g yang didesain beroperasi pada awal proses pengereman dan terletak pada roda bagian depan. Namun, analisis porsi *regenerative brake* masih belum dilakukan. (Wijaya, 2014)

Penelitian kedua yang relevan untuk digunakan sebagai referensi dalam mengerjakan tugas akhir ini dilakukan oleh Christopher Resza Baradwadya. Penelitian ini bertujuan mencari energi pengereman pada kendaraan yang dapat ditangkap dan disimpan dalam baterai. Hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 2.2. Total energi pengereman yang dihasilkan selama *driving cycle* adalah sebesar 13471,49398 kJ. Selanjutnya untuk total energi pengereman yang bisa dimanfaatkan sebesar 10420,9305 kJ. Namun, *driving cycle* yang digunakan pada penelitian masih belum akurat karena masih banyak terjadi kecepatan konstan dan analisis kontribusi sistem rem regeneratif terhadap kebutuhan daya kendaraan belum dilakukan. (Baradwadya, 2016).



Gambar 2.2 *Driving cycle* penelitian sebelumnya

Penelitian ketiga yang relevan adalah yang dilakukan oleh Cui, Zhang, Ma, & Zhang. Penelitian ini bertujuan mencari skema kontrol pada sistem rem regeneratif yang optimal yang dipasang pada sepeda motor listrik. Skema kontrol ini bertujuan agar sistem rem regeneratif dapat menyimpan energi secara maksimum. Namun, analisis mengenai kontribusi dan efisiensi sistem rem regeneratif masih belum dilakukan. (Cui, Zhang, Ma, & Zhang, 2011).

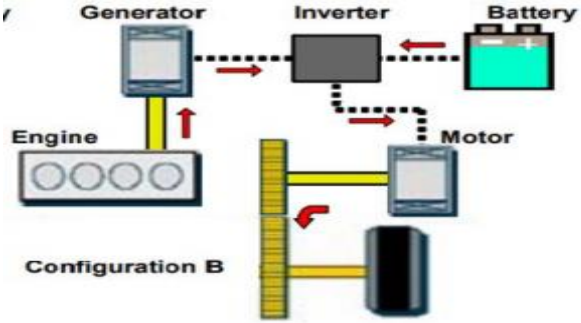
2.2 Kendaraan Hybrid

Kendaraan *hybrid* adalah kendaraan yang menggunakan dua atau lebih sumber energi. Pada umumnya energi yang digunakan untuk kendaraan *hybrid* adalah energi listrik yang disediakan oleh baterai dan energi yang berasal dari fosil. Berdasarkan aliran daya untuk menggerakkan kendaraan, sistem *hybrid* dibagi menjadi tiga, yaitu sistem *hybrid* paralel, seri dan seri-paralel. Ketiga macam sistem *hybrid* ini mempunyai kelebihan dan kekurangannya masing-masing. (Ehsani & Gao, 2010).

2.2.1 Hybrid Seri

Kendaraan *hybrid* dengan konfigurasi ini merupakan konfigurasi *hybrid* paling sederhana. Pada *hybrid* seri tenaga yang berasal dari mesin digunakan untuk menggerakkan generator yang menghasilkan tenaga listrik yang kemudian akan menggerakkan motor listrik yang mempunyai fungsi sebagai penggerak sebuah kendaraan. Ketika kendaraan membutuhkan tenaga yang kecil maka sebagian tenaga listrik yang dihasilkan dari mesin dan generator dapat digunakan untuk mengisi baterai/accu. Apabila tenaga listrik yang dihasilkan oleh baterai telah mencukupi kendaraan untuk bergerak maka mesin dapat mati secara otomatis oleh sistem pengendali. Namun ketika kendaraan membutuhkan tenaga yang besar melebihi tenaga yang dapat diberikan oleh mesin atau ketika kendaraan berjalan dengan kecepatan yang tinggi maka tenaga yang dihasilkan oleh mesin bisa mendapat tenaga dari baterai yang dapat membantu memasok

listrik pada motor listrik (Sutantra, 2015). Skema power dan drivetrain dari konfigurasi seri ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Skema power dan drivetrain kendaraan hybrid seri

Kendaraan *hybrid* dengan konfigurasi seri mempunyai beberapa kelebihan, yaitu:

1. Fleksibillitas penempatan mesin dan generator.
2. Kontrol sistem penggerak lebih ringkas.
3. Mesin dapat diatur untuk beroperasi pada putaran optimumnya.
4. Cocok untuk moda berkendara jarak dekat.

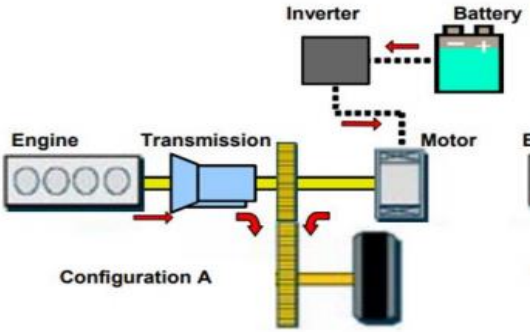
Namun konfigurasi seri pada kendaraan *hybrid* ini juga mempunyai beberapa kekurangan, yaitu:

1. Kendaraan membutuhkan tiga komponen penggerak, yaitu mesin pembakaran dalam, generator, dan motor listrik.
2. Efisiensi total rendah saat kendaraan melaju kencang dan ketika mengemudi jarak jauh.

2.2.2 Hybrid Paralel

Tenaga penggerak kendaraan *hybrid* dengan konfigurasi paralel dapat dilakukan oleh mesin dan motor listrik yang dihubungkan secara parallel dimana keduanya tehubung langsung ke *drivetrain*. Karena menggunakan konfigurasi parallel, ukuran mesin dan motor listrik yang dibutuhkan lebih kecil dari

kendaraan *hybrid* konfigurasi seri, namun jumlah baterai yang dibutuhkan bisa meningkat. Pada kendaraan *hybrid* parallel tidak butuh generator, tetapi membutuhkan kopling mekanik untuk dapat menggabungkan energi mekanik dari mesin dan motor listrik (Sutantra, 2015). Skema power dan drivetrain dari konfigurasi paralel ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Skema power dan drivetrain kendaraan hybrid paralel

Kendaraan *hybrid* dengan konfigurasi paralel memiliki beberapa kelebihan, yaitu:

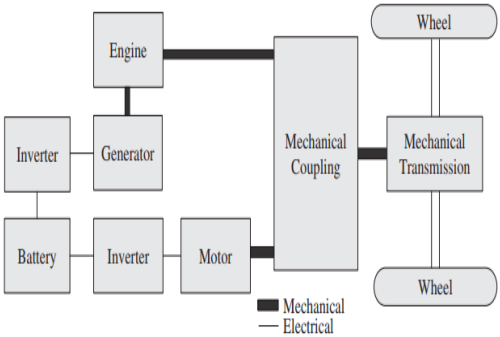
1. Kendaraan hanya membutuhkan dua komponen penggerak, yaitu motor listrik/generator dan mesin pembakaran dalam. Pada konfigurasi paralel motor listrik dapat digunakan sebagai generator.
2. Motor dan mesin bisa menggunakan kapasitas yang lebih kecil untuk mencapai performa yang sama dengan sistem *hybrid* seri.
3. Proses transmisi daya lebih ringkas disbanding konfigurasi seri, sehingga kerugian energi dapat dikurangi.

Namun konfigurasi paralel pada kendaraan *hybrid* ini juga mempunyai beberapa kekurangan, yaitu:

1. Membutuhkan sistem kontrol yang kompleks untuk dapat menyatukan dan mengatur daya yang dihasilkan oleh kedua sumber tenaga kendaraan, motor listrik dan motor pembakaran dalam.
2. Mesin pada konstruksi ini tidak dapat diatur untuk beroperasi pada putaran optimumnya. Sehingga tingkat efisiensi bahan bakar dari konstruksi paralel lebih kecil dibanding konstruksi seri. (Husain, 2005).

2.2.3 Hybrid Seri-Paralel

Kendaraan *hybrid* dengan konfigurasi seri-paralel merupakan gabungan dari kendaraan *hybrid* konfigurasi seri dan parallel. Pengembangan ini dimaksudkan bisa mengambil keunggulan dari masing-masing konfigurasi. Salah satu keuntungan dari konstruksi ini dapat dicapai dengan mengoptimasikan strategi operasi dari mesin. Pada umumnya, motor pembakaran dalam memiliki tingkat efisiensi yang buruk jika dioperasikan pada putaran dan daya rendah, terutama mesin yang menggunakan bahan bakar bensin. Dengan meningkatkan daya dan putaran mesin, kondisi operasi optimum dapat tercapai dan daya yang berlebih dapat digunakan mengisi baterai. Dengan penggunaan konstruksi seri/paralel, kondisi berkendara yang optimal dan efisien dapat dicapai, namun konstruksi ini membutuhkan sistem kontrol yang jauh lebih kompleks dari kontruksi seri maupun paralel (Sutantra, 2015). Skema power dan drivetrain dari konfigurasi seri-paralel ditunjukkan pada Gambar 2.5.

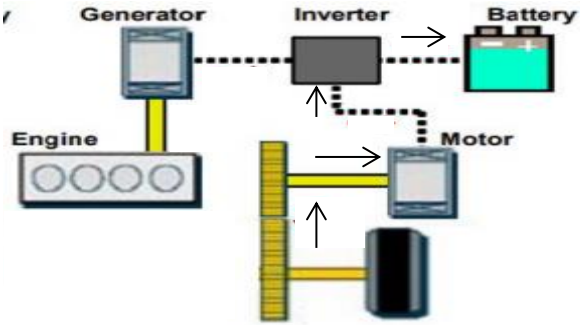


Gambar 2.5 Skema power dan drivetrain kendaraan hybrid seri-paralel

2.3 Regenerative Brake

Saat suatu kendaraan melakukan proses pengereman, maka akan selalu ada sejumlah energi yang hilang dari kendaraan tersebut. Ketika kendaraan berjalan dengan kondisi fluktuatif secara terus-menerus, maka akan lebih banyak lagi energi yang hilang akibat proses pengereman yang berulang-ulang. Desain pengereman yang harus dipenuhi pada kendaraan hybrid adalah untuk mendapatkan kembali sebanyak mungkin energi pengereman yang biasanya terbuang. Desain regenerative brake atau rem regeneratif akan mengacu kepada analisa kebiasaan pengereman dan karakteristik kendaraan seperti kecepatan kendaraan, energi pengereman, penurunan kecepatan dan juga *driving cycle*. Proses regenerative braking sendiri diawali dengan masuknya sejumlah energi kinetik yang berasal dari roda kendaraan saat melakukan perlambatan, energi kinetik tersebut yang akan dikonversikan menjadi suatu daya dan ditampung di dalam baterai. Sistem rem regeneratif pada kendaraan hybrid tipe parallel pada umumnya hampir sama dengan sistem pengereman pada kendaraan konvensional biasa, namun pada kendaraan

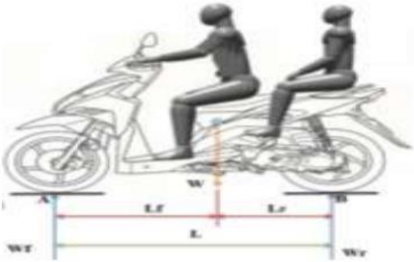
hybrid sistem pengeremannya terbagi menjadi sistem pengereman mekanik dan sistem pengereman elektrik, dimana sistem pengereman elektrik diletakkan langsung pada roda penggerak. Sama seperti pada kendaraan konvensional, sistem pengereman mekanik pada kendaraan hybrid juga menggunakan master cylinder dan booster, memiliki brake caliper dan brake disc, pada sebagian tipe kendaraan hybrid juga ada yang dilengkapi dengan ABS controller and actuator, dan besar gaya pengereman dihasilkan dan dikontrol oleh pengemudi kendaraan tersebut. Pada sistem pengereman elektrik, motor listrik langsung mendistribusikan torsi pengereman ke bagian roda penggerak yang dikontrol oleh suatu controller pada kendaraan yang besarnya tergantung dari kecepatan kendaraan dan posisi pedal pengereman, dimana kondisi tersebut telah didesain sebelumnya pada controller sistem pengereman elektrik. Untuk mendapatkan rasio pengereman yang optimal pada kendaraan hybrid, maka kita harus dapat menentukan porsi pengereman dari sistem regenerative braking, sistem pengereman mekanik dan juga sistem pengereman elektrik. Penentuan porsi pengereman ini juga dipengaruhi oleh kecepatan dan perlambatan kendaraan yang menjadi nilai acuan controller pada motor listrik dalam sistem pengereman elektrik. Aliran energi saat kendaraan mengerem dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Aliran energi kendaraan hybrid saat mengerem

2.4 Center of Gravity (CoG)

Sebelum melakukan perhitungan secara menyeluruh, perlu diketahui tentang posisi center of gravity kendaraan untuk lebih memudahkan dalam perhitungan. Free body diagram dari sepeda motor dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Distribusi gaya-gaya pada kendaraan

Rumus-rumus yang dipakai adalah sebagai berikut:

$$L_r = \frac{W_f.L}{W} \quad (2.1)$$

$$L_f = \frac{W_r.L}{W} \quad (2.2)$$

Keterangan:
L_f = Jarak dari CoG sampai roda depan
L_r = Jarak dari CoG sampai roda belakang
L = Jarak total antara roda depan dan belakang
W_f = Berat kendaraan bagian depan
W_r = Berat kendaraan bagian belakang
W = Berat total kendaraan

Gambar 2.8 menunjukkan distribusi gaya-gaya kendaraan saat dilakukan penimbangan miring. Mencari nilai h dalam penentuan CG diperlukan penimbangan kendaraan pada kondisi tanjakan. Proses penimbangan sama dengan sebelumnya, yaitu dengan timbangan diletakkan di bawah tumpuan ban depan dan belakang. Distribusi gaya-gaya pada saat penimbangan miring:

Gambar 2.8 Distribusi gaya-gaya saat penimbangan miring

Rumus yang dipakai untuk mecari nilai h adalah sebagai berikut:

$$h = \frac{W \cos\theta . L_f - W_r \cos\theta . L}{W \sin\theta} \quad (2.3)$$

Keterangan:
h = Jarak pusat CG dengan tanah
Θ = Sudut tanjakan
Lf = Jarak dari CG sampai tumpuan roda depan
Lr = Jarak dari CG sampai tumpuan roda belakang

L = Jarak total antara tumpuan depan dan belakang
Wf = Berat kendaraan bagian depan
Wr = Berat kendaraan bagian belakang
W = Berat total kendaraan

Selain itu, terdapat cara lain intuk menentukan titik berat yaitu dengan cara menggunakan rumus di bawah ini yaitu:

$$x = \frac{\sum x_i m_i}{\sum m_i} \quad (2.4)$$

$$y = \frac{\sum y_i m_i}{\sum y_i} \quad (2.5)$$

Keterangan:
x = Letak titik berat pada sumbu x
xi = Letak titik berat massa i pada sumbu x
mi = Massa
y = Letak titik berat pada sumbu y
yi = Letak titik berat massa i pada sumbu y

2.5 Distribusi Gaya Pengereman

Jumlah energi yang dapat dibangkitkan pada saat proses pengereman tergantung dari besarnya *regenerative brake* yang bekerja pada kendaraan. Untuk mendapatkan jumlah energi pengereman yang maksimum, maka harus dilakukan analisis dan perhitungan awal terhadap distribusi gaya pengereman yang terjadi pada roda bagian depan dan roda bagian belakang. Gaya pengereman di kedua roda pada kendaraan memiliki suatu rasio tetap yang dibatasi oleh koefisien gesek dari lintasan yang dilalui dan jumlahnya harus seimbang dengan beban normal pada roda kendaraan, sehingga roda kendaraan bagian depan dan bagian belakang pada kendaraan tersebut mendapatkan gaya pengereman maksimum secara bersamaan. Didapat penjumlahan gaya pengereman pada roda bagian depan dan roda bagian belakang harus sama dengan nilai koefisien gesek (μ) tersebut, yaitu:

$$F_b = F_{bf} + F_{br} \quad (2.6)$$

$$F_{b\,max} = F_{bf\,max} + F_{br\,max}$$
$$= \mu\,(W_f + W_r)$$
$$= \mu\,.W \quad (2.7)$$

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 Wf dan belakang Wr serta menganggap θ kecil, dapat dihitung sebagai berikut:

$$W_f = \frac{W}{L}\left(L_r - \frac{a}{g}h\right) \quad (2.8)$$

$$W_r = \frac{W}{L}\left(L_f - \frac{a}{g}h\right) \quad (2.9)$$

Distribusi sistem pengereman yang akan dirancang bertujuan agar terjadi keseimbangan gaya pengereman pada roda bagian depan (Fbf) dan roda bagian belakang (Fbr) dengan beban normal, sehingga kendaraan tetap berada dalam kondisi stabil saat berkendara, maka kita dapat menggunakan persamaan berikut:

$$\frac{F_{bf}}{F_{br}} = \frac{W_f}{W_r} = \frac{W/_L(L_r+\frac{a}{g}h)}{W/_L(L_f-\frac{a}{g}h)} \quad (2.10)$$

Keterangan:

W : Total beban normal pada suatu kendaraan (N)

Lf : Jarak titik pusat kendaraan ke roda bagian depan (m)

Lr : Jarak titik pusat kendaraan ke roda bagian belakang (m)

L : Jarak roda bagian depan dan roda belakang (m)

m : Massa kendaraan (kg)

a : Perlambatan kendaraan (m/s^2)

h : Jarak titik pusat kendaraan ke pusat roda kendaraan (m)

Saat kendaraan melakukan pengereman, maka akan terjadi perlambatan pada kendaraan tersebut:

$$a = \frac{F_{bf}+F_{br}}{m} \quad (2.11)$$

Nilai perlambatan pada suatu kendaraan dapat digunakan untuk mendapatkan bentuk distribusi besarnya masing-masing gaya pengereman pada roda bagian atas maksimum dari nilai koefisien gesek lintasan sebagai jumlah totalnya, yaitu:

$$\frac{F_{br}}{W} = \mu - \frac{F_{bf}}{W} \quad (2.12)$$

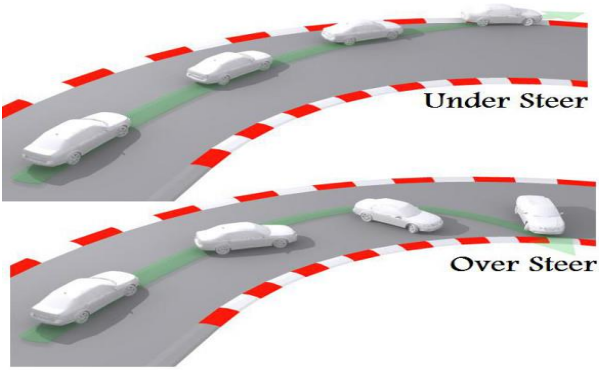
dengan menggabungkan kedua persamaan diatas, kita akan mendapatkan grafik distribusi gaya pengereman ideal pada roda bagian depan dan roda bagian belakang.

Suatu kendaraan memiliki gaya pengereman aktual yang didesain oleh nilai yang tetap untuk mengatur gaya pengereman pada roda bagian depan dan belakang secara tetap. Nilai tetap tersebut dapat dihitung dengan persamaan berikut pada roda bagian depan dan belakang secara tetap. Nilai tetap tersebut dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\beta = \frac{F_{bf}}{F_b} \tag{2.13}$$

$$\frac{F_{bf}}{F_{br}} = \frac{\beta}{1-\beta} = \frac{L_b+\mu_0 h_g}{L_a-\mu_0 h_g} \tag{2.14}$$

Jika proses pengereman terjadi di daerah dimana distribusi gaya pengereman aktual berada di bawah distribusi pengereman ideal, maka roda bagian depan terkunci terlebih dahulu, sedangkan jika pengereman terjadi di daerah dimana distribusi gaya pengereman aktual berada di atas distribusi gaya pengereman ideal, maka roda bagian belakang akan terkunci terlebih dahulu, kendaraan tersebut akan kehilangan kestabilan karena kemampuan roda bagian belakang tersebut untuk melawan gaya dorong dari samping akan hilang. Untuk kendaraan tertentu dengan distribusi gaya rem tertentu, apabila roda depan akan terkunci terlebih dahulu kendaraan akan cenderung *understeer* dan apabila roda belakang akan terkunci terlebih dahulu kendaraan cenderung *oversteer* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Kendaraan saat understeer dan oversteer

2.6 Regulasi Pengereman

Saat roda depan mengunci, maka roda belakang menerima gaya pengereman minimum apabila distribusi gaya pengereman berada di bawah kurva. Regulasi pengereman dibentuk dengan alasan keamanan. Oleh karena hal itu, regulasi terus dikembangkan yang dibuat oleh Komisi Ekonomi Perserikatan Bangsa-Bangsa untuk Eropa (ECE). Berikut adalah syarat ketentuan yang dibuat:

$$\frac{F_{bf}}{W_f} \geq \frac{F_{br}}{W_r} \tag{2.15}$$

Keterangan:

F_{bf} = Gaya pengereman roda depan (N)

F_{br} = Gaya pengereman roda belakang (N)

W_f = Gaya normal bagian depan kendaraan (N)

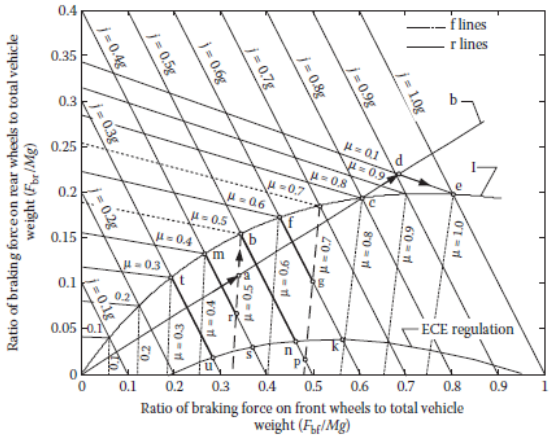
W_r = Gaya normal bagian belakang kendaraan (N)

Persamaan diatas menunjukkan bahwa roda belakang tidak pernah mengunci sebelum roda depan. Menurut regulasi pengereman ECE, saat roda bagian depan terkunci, gaya pengereman roda bagian belakang diharuskan dapat membuat kendaraan mengalami perlambatan yang lebih besar dengan persamaan berikut:

$$\frac{j}{g} \geq 0{,}1 + 0{,}85(\mu - 0{,}2) \qquad (2.16)$$

Keterangan:
j = Perlambatan kendaraan (m/s^2)
g = Percepatan gravitasi (m/s^2)
μ = Koefisien adhesi kontak ban-jalan.

Penentuan nilai minimal dari gaya pengereman kendaraan dan bentuk kurva pengereman ECE dihasilkan dari persamaan diatas. Pengereman yang direkomendasikan oleh regulasi ECE adalah pengereman diantara kurva pengereman ideal dan kurva pengereman ECE. Pada Gambar 2.10, pengereman aktual yang direkomendasikan diwakilkan pada garis linear 0-c, karena garis pengereman aktual tersebut berada dibawah kurva pengereman ideal dan diatas kurva pengereman ECE. 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.



Gambar 2.10 Kurva distribusi pengereman

2.7 Prinsip Dasar Pengereman

Berikut ini merupakan prinsip-prinisp dasar yang digunakan saat kondisi kendaraan mengerem.

2.7.1 Hukum Gerak Newton

Hukum gerak Newton yang pertama menyatakan bahwa setiap benda akan mempertahankan keadaan diam atau bergerak lurus beraturan, kecuali ada gaya yang bekerja untuk mengubahnya.

Pada kasus kendaraan yang bergerak dengan kecepatan konstan dalam garis lurus, gaya dari luar yang mempengaruhi kendaraan sehingga melambat adalah gaya pengereman. *Brake pads* akan mencengkeram *disc brake* melalui gesekan. Saat proses ini beberapa energi kinetik pada kendaraan diubah menjadi energi panas. Berkurangnya energi kinetik pada kendaraan menyebabkan kendaraan melambat. Pada kasus ini, hukum gerak Newton yang pertama bekerja. Hal ini dikarenakan kendaraan mengalami percepatan negatif akibat pengereman dan kendaraan tidak melanjutkan pergerakan dengan kecepatan konstan dalam garis lurus, namun mengalami perlambatan.

Hukum gerak Newton yang kedua menyatakan bahwa percepatan sebuah benda berbanding lurus dengan gaya total yang bekerja padanya dan berbanding terbalik dengan massanya. Arah percepatan sama dengan arah gaya total yang bekerja padanya.

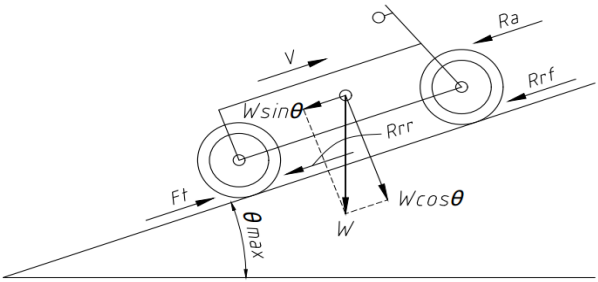
Contoh dari hukum gerak Newton yang kedua adalah kendaraan yang sedang melaju dengan kecepatan tertentu akan mengalami percepatan apabila diberikan gaya dorong yang lebih besar. Dalam hal ini, gaya dorong diberikan melalui pedal gas yang diinjak oleh pengemudi. Pada kasus kendaraan listrik dengan sistem rem regeneratif, kendaraan yang mengerem dengan perubahan kecepatan yang lebih besar akan memiliki gaya yang lebih besar untuk dijadikan sebagai energi regeneratif.

2.7.2 Hukum Konservasi Energi

Hukum konservasi energi menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dihancurkan. Energi hanya dapat diubah dari satu jenis energi ke yang lain. Pada kasus kendaraan yang bergerak dengan kecepatan konstan dalam garis lurus, gaya dari luar yang mempengaruhi kendaraan sehingga melambat adalah gaya pengereman. *Brake pads* akan mencengkeram *disc brake* melalui gesekan. Saat proses ini beberapa energi kinetik pada kendaraan diubah menjadi energi panas. Berkurangnya energi kinetik pada kendaraan menyebabkan kendaraan melambat. Pada kasus ini, hukum konservasi energi berlaku. Hal ini karena energi kinetik kendaraan diubah menjadi energi panas saat pengereman, yang menyebabkan kendaraan mengalami perlambatan.

2.8 Gaya dan Energi pada Kendaraan Bergerak

Gaya-gaya yang bekerja pada kendaraan meliputi gaya hambat berupa gaya hambat aerodinamis, gaya hambat rolling, serta gaya hambat gradien. Selain itu ada gaya inersia perlambatan sebagai hasil percepatan atau perlambatan kendaraan. Gaya-gaya tersebut yang nantinya akan berpengaruh pada gaya traksi kendaraan maupun gaya pengereman kendaraan. Gaya-gaya tersebut sesuai dengan Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Free Body Diagram Kendaraan

Gaya hambat angin (F_a) adalah gaya hambat yang disebabkan oleh aliran udara di sekitar bodi kendaraan. 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 hambat angin. Gaya hambat angin dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$F_a = \frac{1}{2} . \rho_u . C_D . A_f . V^2 \quad (2.17)$$

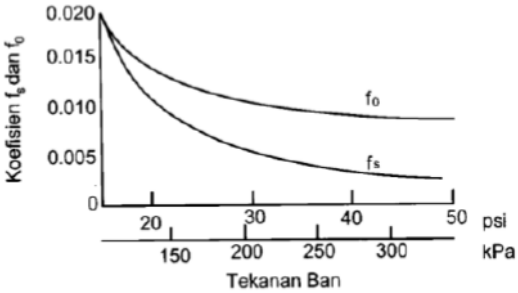
Keterangan:

Fa = Gaya hambat angin (N)
ρ_u = Densitas udara (kg/m^3)
C_D = Koefisien gaya hambar aerodinaika
A_f = Luas frontal kendaraan (m^2)
V = Kecepatan kendaraan (m/s)

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. Penjgaruh tekanan ban ditunjukkan pada Gambar 2.12. Arah gaya hambat rolling berlawanan dengan arah dari percepatan kendaraan. Gaya hambat rolling dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F_r = W . cos\alpha . C_r \quad (2.18)$$

$$C_r = C_k . C_a . C_f \left(f_o + f_s \left(\frac{V}{100}\right)\right) \quad (2.19)$$



Gambar 2.12 Grafik pengaruh tekanan ban terhdap f_o dan f_s

Keterangan:

Fr = Gaya hambar rolling (N)
W = Gaya hambat kendaraan (N)
Cr = Koefisien gaya hambat rolling
Ck = 1 Jika ban menggunakan kembangan
Ck = 0,6 Jika ban bias tanpa kembangan
Ck = 0,4 Jika ban radial tanpa kembangan
Ca = 2 Jika kendaraan berakselerasi
Ca = 1 Jika kecepatan kendaraan konstan
Cf = 1 Jika berjalan di aspal
Cf = 0,25 Jika berjalan di beton
f_o, f_s = Koefisien hambat rolling dari tekanan ban
α = Sudut tanjak (°)
V = Kecepatan kendaraan (km/jam)

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:

$$F_g = W.\sin\theta \qquad (2.20)$$

Keterangan:

Fg = Gaya hambat tanjak (N)
W = Gaya normal kendaraan (N)

α = Sudut tanjak (°)

Gaya inersia (Fi) 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:

$$F_i = m.a \quad (2.21)$$

Keterangan:

Fi = Gaya hambat inersia (N)

m = massa kendaraan (kg)

a = Percepatan kendaraan (m/s^2)

Gaya-gaya hambat tersebut dapat digunakan untuk mengetahui daya jalan kendaraan. Besar daya jalan atau yang biasa disebut *Road horsepower* (R_{hp}) 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 (Ft) yang dibutuhkan dan *Road Horse Power* (Rhp) yang diperlukan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F_t = F_a + F_r + F_i \quad (2.22)$$

$$Rhp = F_t \,.V.\eta \quad (2.23)$$

Keterangan:

Ft = Gaya traksi (N)

Fa = Gaya hambat angin (N)

Fr = Gaya hambat rolling (N)

Fi = Gaya hambat inersia (N)

Rhp = Daya jalan yang dibutuhkan (watt)

V = Kecepatan kendaraan (m/s)

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:

$$Ek = \frac{1}{2} \times m \times \left({V_2}^2 - {V_1}^2\right) \quad (2.24)$$

Keterangan:
Ek = Energi kinetik (J)
m = Massa kendaraan (kg)
V = Kecepatan kendaraan (m/s)

2.9 Komponen Regenerative Brake

Regenerative brake dalam menjalankan fungsinya harus memiliki beberapa komponen untuk menunjangnya yang terdiri dari *hybrid* motor generator, *ECU*, *inverter*, dan baterai. Berikut penjeleasan untuk komponen-komponen dari *regenerative brake*:

2.9.1 Hybrid Motor Generator

Hybrid Motor Generator berfungsi sebagai alat untuk mengkonversi energi kinetik dari roda menjadi energi listrik yang selanjutnya disimpan pada baterai ataupun sebaliknya. Ketika terjadi pengereman, *Hybrid Motor Generator* akan berbuah fungsi menjadi generator yang mengubah putaran pada roda menjadi energi listrik untuk selanjutnya disimpan pada baterai. Sedangkan ketika kendaraan melakukan akselerasi, *Hybrid Motor Generator* akan berfungsi sebagai motor yang mengubah energi listrik yang sebelumnya tersimpan pada baterai menjadi energi mekanik untuk membantu kerja engine. Perubahan fungsi dari generator menjadi motor maupun sebaliknya diatur oleh *Engine Control Unit (ECU)*. Contoh hybrid motor generator ditunjukkan pada Gambar 2.13.

Gambar 2.13 Hybrid Motor Generator

2.9.2 Engine Control Unit (ECU)

Tujuan utama dari *ECU* adalah mengelola mesin kendaraan melalui pengendalian, tidak terbatas pada : bahan bakar untuk campuran udara, kecepatan idle, waktu pengapian, *rev limiter*, suhu air pendingin, *Variable Valve Timing* (VVT) dan lain-lain. Pada kendaraan dengan sistem *regenerative brake*, *ECU* juga berfungsi untuk mengatur fungsi *hybrid* motor generator. Contoh ECU ditunjukkan pada Gambar 2.14.

Gambar 2.14 Engine Control Unit

2.9.3 Inverter

Inverter adalah komponen yang berfungsi sebagai penghubung antara baterai dan *Hybrid Motor Generator*. *Inverter* menkonversi arus DC dari baterai untuk memutar motor listrik dan sebaliknya *inverter* mengkoversi arus AC dari generator menjadi arus DC yang kemudian digunakan untuk mengisi baterai. Contoh inverter ditunjukkan pada Gambar 2.15.

Gambar 2.15 Inverter

2.9.4 Baterai

Baterai adalah sebuah alat yang dapat merubah energi kimia yang disimpannya menjadi energi listrik yang dapat digunakan oleh suati perangkat elektronik. Ada dua jenis *battery* yang biasa digunakan dalam kendaraan listrik yaitu baterai Nickel Metal Hydride (HiMH) dan Litium-Ion (Li-ion). Contoh baterai ditunjukkan pada Gambar 2.16.

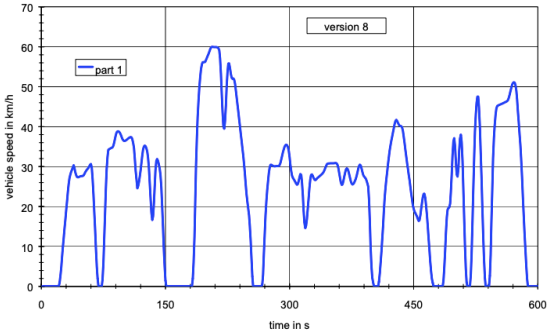
Gambar 2.16 Baterai

2.10 *Driving cycle*

Driving cycle adalah sekumpulan data yang menggambarkan hubngan antara kecepatan kendaraan terhadap waktu berkendara . Karena kondisi jalan, moda berkendara dan kondisi lingkungan di tiap belahan dunia berbeda-beda, diperlukan sebuah standar *driving cycle* tertentu pada tiap tempat. Salah satu *driving cycle* adalah *WMTC* (*World Motorcycle Test Cycle*). *WMTC* merupakan *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*). *WMTC* versi yang paling baru adalah versi ke-7 dengan prosedur pengujian *driving cycle* yang terbagi menjadi 3 kelas.

2.10.1 WMTC Kelas 1

Siklus *WMTC* kelas 1 ini mewakili kecepatan rendah serta penggunaan pada zona perkotaan dengan siklus ditunjukkan pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Grafik siklus WMTC kelas 1

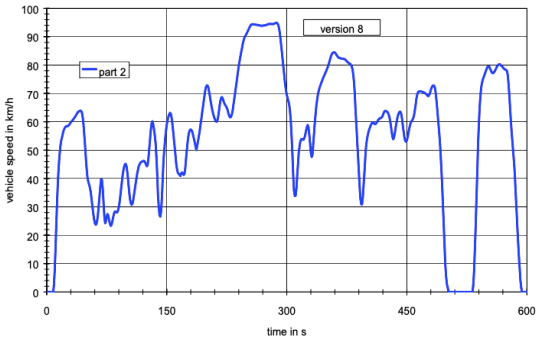
Tabel 2.1 dibawah menunjukkan karakteristik utama dari siklus WMTC kelas 1:

Tabel 2.1 Tabel Karakteristik Siklus *WMTC* Kelas 1

Distance	4,07 km
Duration	600 s
Average speed	24,4 km/jam
Maximum speed	60 km/jam

2.10.2 WMTC Kelas 2

Siklus *WMTC* kelas 2 ini mewakili kecepatan rendah serta penggunaan pada zona perkotaan dengan siklus ditunjukkan pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Grafik siklus WMTC kelas 2

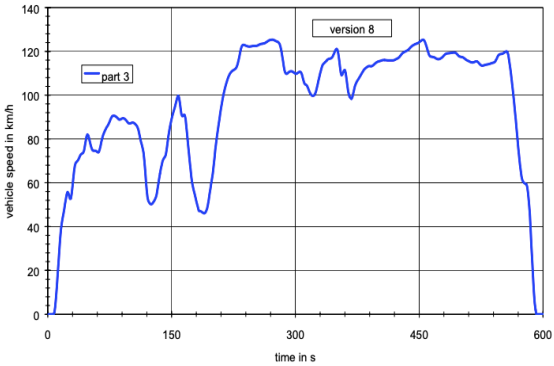
Tabel 2.2 dibawah menunjukkan karakteristik utama dari siklus WMTC kelas 2:

Tabel 2.2 Tabel Karakteristik Siklus *WMTC* Kelas 2

Distance	9,11 km
Duration	600 s
Average speed	54,7 km/jam
Maximum speed	95 km/jam

2.10.3 WMTC Kelas 3

Siklus *WMTC* kelas 3 mewakili kecepatan kendaraan relatif tinggi serta penggunaan pada zona pedesaan jalan utama ditunjukkan pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Grafik siklus WMTC kelas 3

dibawah menunjukkan karakteristik utama dari siklus WMTC kelas 3:

Tabel 2.3 Tabel Karakteristik Siklus *WMTC* Kelas 3

Distance	15,74 km
Duration	600 s
Average speed	94,4 km/jam
Maximum speed	125 km/jam

2.11 Kontribusi dan Efisiensi Regenerative 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.

$$Kontribusi\ Regenerative\ Brake = \frac{R_{hp}\ regeneratif\ (kw)}{R_{hp}\ total\ (kw)} \quad (2.20)$$

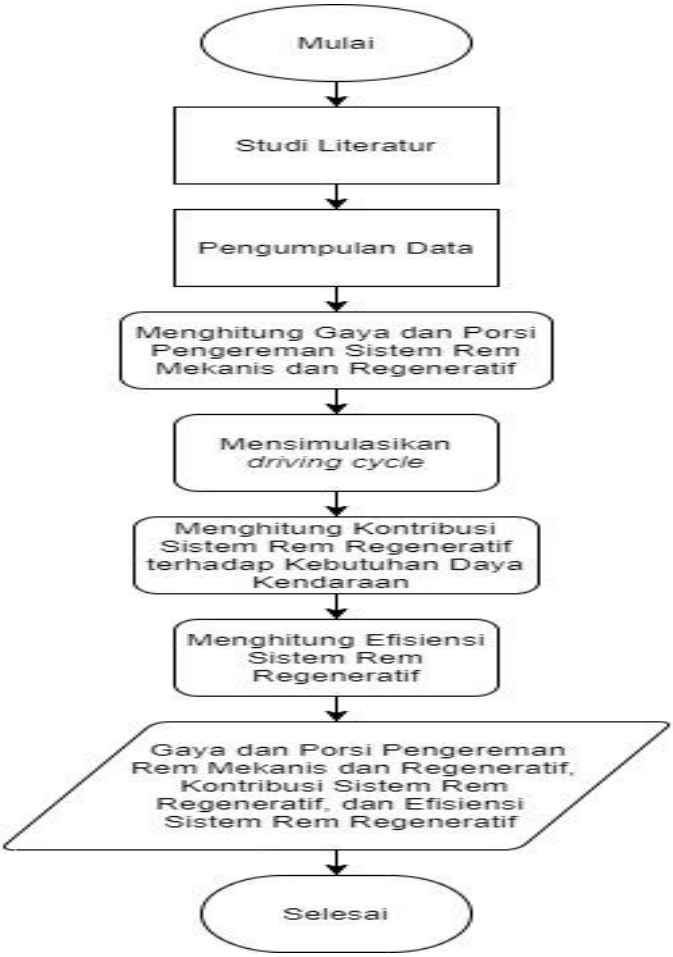
$$Efisiensi\ Regenerative\ Brake = \frac{Energi\ regeneratif\ total\ (kwh)}{Energi\ kinetik\ perlambatan\ (kwh)} \quad (2.21)$$

BAB 3
METODE PENELITIAN

Pada bab metodologi akan dijelaskan mengenai, *flowchart* dari penelitian yang dilakukan, dimulai dari studi literatur sampai dengan hasil yang diinginkan yaitu karakteristik traksi, karakteristik *power*, motor-generator yang digunakan, baterai yang digunakan, dan energi pengereman yang bisa dihasilkan dan disimpan dalam baterai oleh kendaraan sesuai dengan *driving cycle*. Selanjutnya akan dijelaskan tahapan dari perhitungan yang dilakukan dalam pengerjaan penelitian ini, dan yang terakhir adalah *flowchart* dari analisa perhitungan yang telah dilakukan.

3.1 Flowchart Penelitian

Berikut ini merupakan langkah-langkah penelitian yang dilakukan dan disajikan dalam bentuk *flowchart* pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Flowchart penelitian tugas akhir

Penelitian pada tugas akhir memiliki alir penelitian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.

Langkah pertama pada penelitian ini adalah studi literatur. Studi literatur bertujuan untuk mendalami landasan teori yang akan digunakan pada penelitian ini. Studi literatur dimulai dari

mencari jurnal-jurnal penelitian sebelumnya yang meneliti tentang topik yang sejenis, yaitu sistem rem regeneratif. Selain dari jurnal-jurnal penelitian, studi literatur dilakukan dengan sumber lainnya seperti tugas akhir dan *textbook* yang berkaitan dengan topik.

Langkah kedua pada penelitian ini adalah penentuan konsep masalah. Hasil dari studi literatur yang telah dilakukan dirumuskan menjadi poin-poin permasalahan. Poin-poin permasalahan tersebut adalah gaya dan porsi pengereman dari sistem rem mekanis dan sistem rem regeneratif, kontribusi sistem rem regeneratif terhadap kebutuhan daya kendaraan, dan efisiensi sistem rem regeneratif.

Langkah ketiga pada penelitian ini adalah pengumpulan data. Data-data yang diperlukan pada penelitian ini adalah data kendaraan dan *driving cycle*. Data kendaraan yang dipakai adalah sepeda motor Honda Revo X. *Driving cycle* yang dipakai adalah *driving cycle* WMTC.

Langkah keempat pada penelitian ini adalah menghitung gaya dan porsi pengereman sistem rem mekanis dan regeneratif yang merupakan poin permasalahan pertama. Perhitungan gaya dan porsi pengereman ini dilakukan dengan menggunakan *software Excel*. Penjelasan lebih detail mengenai langkah ini akan dibahas pada subbab diagram alir penelitian gaya dan porsi sistem rem regeneratif pada kendaraan.

Langkah kelima pada penelitian ini adalah memasukkan data *driving cycle* yang telah dipilih. Data *driving cycle* yang berisikan kecepatan kendaraan dan waktu tempuh. Perhitungan dilakukan dengan cara memasukan setiap data kecepatan kendaraan beserta waktunya pada dua kolom yang berbeda. Data-data tersebut akan digunakan untuk memudahkan setiap proses perhitungan selanjutnya dan mendapatkan hasil yang akurat pada setiap kecepatan dan waktu yang berbeda.

Langkah keenam pada penelitian ini adalah menghitung kontribusi sistem rem regeneratif terhadap kebutuhan daya kendaraan. Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan

software Excel. Penjelasan lebih detail mengenai langkah ini akan dibahas pada subbab diagram alir penelitian analisis kontribusi sistem rem regeneratif.

Langkah ketujuh pada penelitian ini adalah menghitung efisiensi sistem rem regeneratif. Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan *software Excel*. Penjelasan lebih detail mengenai langkah ini akan dibahas pada subbab diagram alir penelitian analisis efisiensi sistem rem regeneratif.

Setelah semua langkah-langkah sebelumnya telah dilakukan, hasil yang akan didapatkan adalah tabel dari gaya dan porsi sistem rem mekanis dan regeneratif beserta grafik dari distribusi pengeremannya, persentase kontribusi sistem rem regeneratif, dan persentase efisiensi sistem rem regeneratif.

3.1.1 Data Kendaraan

Data kendaraan yang dipakai pada penelitian ini ditunjukkan pada dibawah ini.

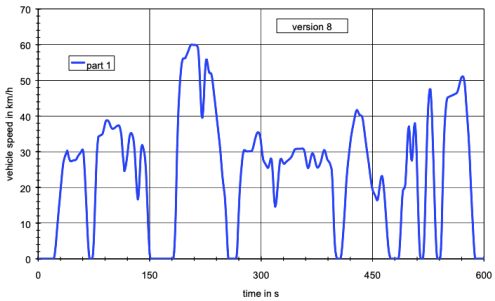
Tabel 3.1 Spesifikasi Honda Revo X

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

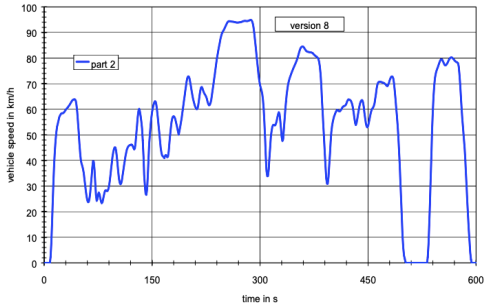
Jarak terendah ke tanah	135 mm
Luas frontal area	0,25 m^2
Berat kosong	97,5 kg

3.1.2 Data *Driving cycle*

Data *driving cycle* pertama yang dipakai adalah *driving cycle* standar WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2 dan Gambar 3.3 dibawah ini.



Gambar 3.2 *Driving cycle* WMTC kelas 1

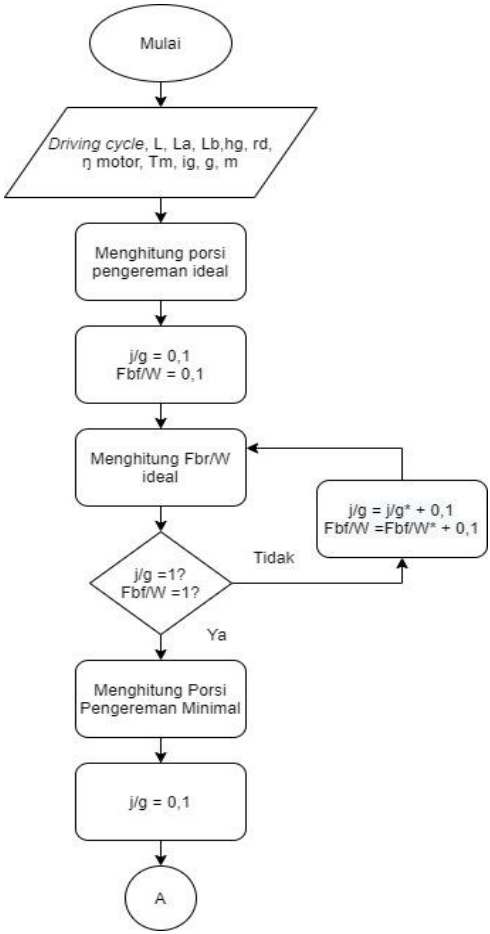


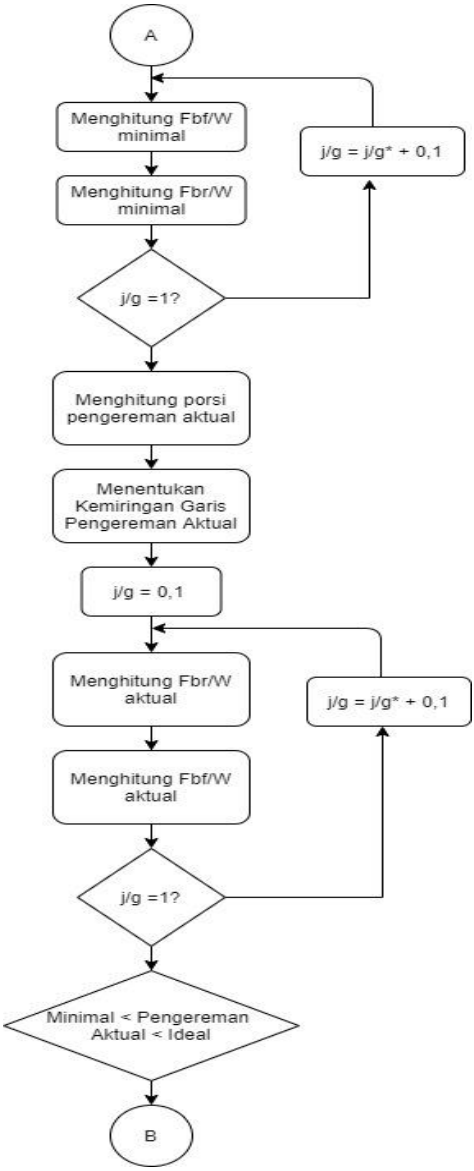
Gambar 3.3 *Driving cycle* WMTC kelas 2

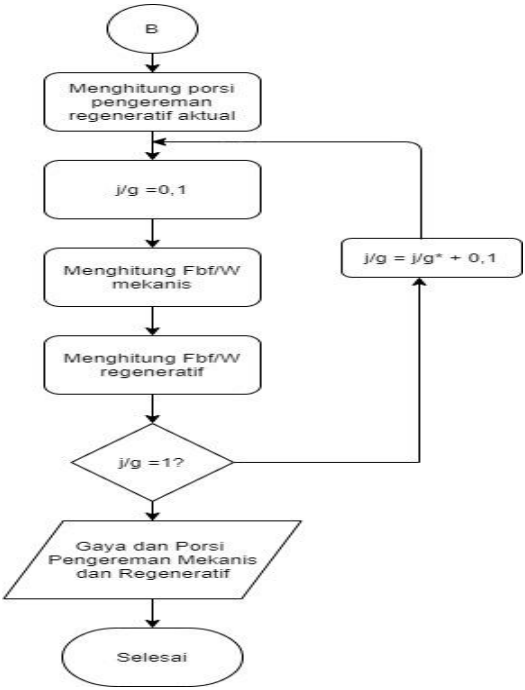
3.2 Flowchart Perhitungan

Pada subbab ini berisi tentang flowchart dari masing-masing perhitungan yang dibutuhkan.

3.2.1 Perhitungan Gaya dan Porsi Rem Regeneratif




A
Menghitung Fbf/W minimal
Menghitung Fbr/W minimal
j/g =1?
j/g = j/g* + 0,1
Menghitung porsi pengereman aktual
Menentukan Kemiringan Garis Pengereman Aktual
j/g = 0,1
Menghitung Fbr/W aktual
Menghitung Fbf/W aktual
j/g =1?
j/g = j/g* + 0,1
Minimal < Pengereman Aktual < Ideal
B



Gambar 3.4 Flowchart perhitungan gaya dan porsi rem regeneratif

Perhitungan gaya dan porsi dari sistem rem regeneratif memiliki alur perhitungan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4. Sebelum melakukan perhitungan porsi pengereman, nilai La dan Lb kendaraan sebelum dan sesudah ditambah penumpang harus dicari dengan menggunakan persamaan 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 dan 2.5. Penjelasan mengenai tiap langkahnya dijelaskan pada paragraf selanjutnya.

Perhitungan porsi pengereman ideal dimulai dengan menentukan persamaan Wf dan Wr yang sudah tercantum pada persamaan 2.8 dan 2.9. Persamaan ini memakai prinsip kesetimbangan momen yang terjadi pada kendaraan. Persamaan ini digunakan untuk mendapatkan distribusi pengereman yang

diperlukan kendaraan untuk menentukan rasio gaya pengeraman. Rasio gaya pengereman didapatkan dengan menggunakan persamaan 2.10 yang diubah mejadi persamaan dibawah. Nilai j/g dan Fbf/W divariasikan dengan nilai 0,1-0,9 guna memperoleh kurva pengereman ideal.

$$\frac{F_{br}}{W} = \frac{\left(L_f - \frac{j}{g}h\right)}{\left(L_r + \frac{j}{g}h\right)} \times \frac{F_{bf}}{W} \tag{3.1}$$

Kurva pengereman ideal diperlukan sebagai acuan dalam mendesain sistem pengereman. Apabila sistem pengereman yang dirancang berada diatas kurva pengereman ideal, maka roda belakang akan mengunci terlebih dahulu. Hal ini menyebabkan kendaraan kehilangan kestabilan karena kemampuan melawan gaya dorong dari samping pada roda belakang akan hilang.

Langkah selanjutnya adalah menghitung porsi pengereman minimum sesuai standar ECE. Regulasi ECE mengharuskan roda depan terkunci lebih dahulu dibandingkan roda belakang. Hal itu dapat dihitung dengan persamaan berikut yang merupakan hasil subtitusi persamaan 2.15 dan 2.16.

$$\frac{F_{bf}}{W} = \frac{\left(L_r + \frac{a}{g}h\right)}{L} \times \mu \tag{3.2}$$

Persamaan 3.2 disubtitusikan dengan persamaan 2.7 untuk mendapatkan persamaan rasio pengereman terhadap berat kendaraan sesuai regulasi ECE. Kurva distribusi pengereman minimum sesuai regulasi ECE didapatkan dengan memvariasikan nilai μ dengan rentang nilai 0,1-0,9 pada persamaan berikut:

$$\frac{F_{bf}}{W} = \frac{\mu}{L}\left(L_r + (0{,}1 + 0{,}85(\mu - 0{,}2)\ h\ \right) \tag{3.3}$$

$$\frac{F_{br}}{W} \geq (0{,}1 + 0{,}85(\mu - 0{,}2) - \frac{F_{bf}}{W} \tag{3.4}$$

Langkah selanjutnya yang dilakukan setelah mendapatkan porsi pengereman minimal adalah menghitung porsi pengereman aktual. Hal pertama yang perlu dilakukan pada langkah ketiga ini adalah 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. Garis β dikatakan baik apabila garis tersebut tidak melewati kurva garis pengereman aktual dan berada diatas kurva pengereman minimal. Hal yang perlu dilakukan setelah menentukan nilai tetap tersebut adalah menghitung porsi pengereman minimal pada roda depan dan belakang menggunakan persamaan (3.3) dan (3.4). Perhitungan dilakukan dengan iterasi sampai dengan nilai j/g sebesar 1 dan posisi dari garis distribusi pengereman aktual berada diatas garis distribusi pengereman minimal dan dibawah garis distribusi pengereman ideal.

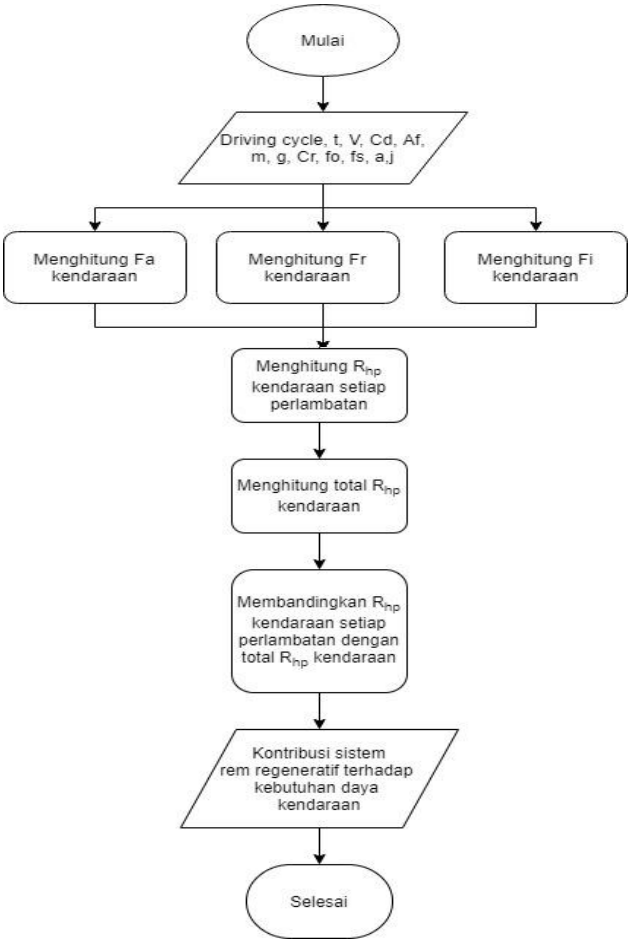
Langkah terakhir dari perhitungan ini adalah menghitung porsi pengereman regeneratif aktual. Perhitungan ini bertujuan mendapatkan porsi maksimal dari sistem rem regeneratif untuk membantu pengereman kendaraan. Porsi pengereman regeneratif aktual pada satu rasio j/g adalah sama dengan porsi pengereman mekanis aktual pada roda depan apabila nilai dari porsi pengereman mekanis aktual pada roda depan lebih kecil dari porsi maksimal sistem rem regeneratif. Perhitungan dari porsi pengereman regeneratif aktual dilakukan dengan iterasi sampai dengan nilai j/g sebesar 1. Perhitungan porsi maksimal sistem rem regeneratif dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{F_{reg}}{W} = \frac{\frac{i_t \times i_g \times T_m \times \eta_m}{r}}{W} \tag{3.5}$$

Keterangan:

F_{reg} = Gaya pengereman regeneratif (N)
W = Total gaya normal pada kendaraan (N)
i_t = Rasio gear transmisi
i_g = Rasio gardan
T_m = Torsi motor listrik (Nm)
η_m = Efisiensi motor listrik
r = Radius roda kendaraan

3.2.2 Analisis Kontribusi Sistem Rem Regeneratif



Gambar 3.5 Flowchart perhitungan kontribusi sistem rem regeneratif

Perhitungan kontribusi sistem rem regeneratif memiliki alir perhitungan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5.

Penjelasan mengenai tiap langkahnya dijelaskan pada paragraf selanjutnya.

Analisis kontribusi sistem rem regeneratif dimulai pengumpulan data yang diperlukan. Data-data tersebut adalah *driving cycle* yang berisikan kecepatan dan waktu, koefisien gaya hambat aerodinamika, densitas udara, luasan frontal kendaraan, massa kendaraan, percepatan gravitasi, koefisien gaya hambat *rolling*, koefisien hambat *rolling* dari tekanan ban, sudut tanjak, percepatan kendaraan, dan perlambatan kendaraan.

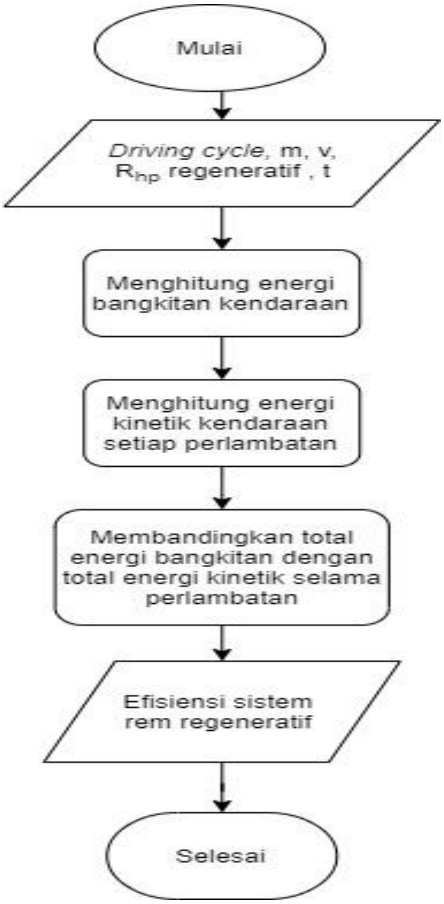
Langkah pertama yang dilakukan pada analisis ini adalah perhitungan gaya hambat angin, gaya hambat *rolling*, dan gaya hambat inersia dari kendaraan. Perhitungan tersebut dilakukan dengan menggunakan *software Excel*. Perhitungan yang dilakukan akan menyesuaikan dengan *driving cycle* yang dipilih dan persamaan yang dipakai pada perhitungan adalah persamaan gaya hambat angin, gaya hambat *rolling*, dan gaya hambat inersia.

Langkah kedua yang dilakukan pada analisis ini adalah menghitung Rhp kendaraan. 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.

Langkah ketiga yang dilakukan pada analisis ini adalah membandingkan Rhp kendaraan setiap perlambatan dengan total Rhp kendaraan. Perbandingan tersebut akan menghasilkan besaran persentase kontribusi sistem rem regeneratif terhadap kebutuhan daya kendaraan. Persamaan yang digunakan pada langkah ini adalah sebagai berikut:

$$Kontribusi = \frac{R_{hp}\ regeneratif\ (kw)}{R_{hp}\ total\ (kw)} \times 100 \qquad (3.6)$$

3.2.3 Analisis Efisiensi Sistem Rem Regeneratif



Gambar 3.6 Flowchart Analisis Efisiensi Sistem Rem Regeneratif

Perhitungan efisiensi sistem rem regeneratif memiliki alir perhitungan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6.

Penjelasan mengenai tiap langkahnya dijelaskan pada paragraf selanjutnya.

Analisis efisiensi sistem rem regeneratif dimulai dengan pengumpulan data yang diperlukan. Data-data yang diperlukan adalah *driving cycle* yang berisikan kecepatan dan waktu, massa kendaraan, dan Rhp regeneratif atau Rhp kendaraan selama perlambatan.

Langkah pertama dari analisa ini adalah menghitung energi bangkitan kendaraaan. Energi bangkitan adalah energi listrik yang dihasilkan dari sistem rem regeneratif. Energi bangkitan kendaraan didasari dari Rhp regeneratif. Rhp regeneratif yang dihasilkan pada suatu *driving cycle* yang terbagi setiap satu detik dikonversikan menjadi energi bangkitan. Energi bangkitan hasil konversi akan memiliki satuan kwh.

Langkah kedua dari analisa ini adalah menghitung energi kinetik kendaraan pada setiap perlambatan suatu *driving cycle*. Energi kinetik adalah energi yang terjadi karena adanya pergerakan dari kendaraan tersebut, baik itu percepatan maupun perlambatan.

Langkah ketiga dari analisa ini adalah membandingkan total energi bangkitan dengan total energi kinetik selama perlambatan. Perbandingan tersebut akan menghasilkan besar persentase efisiensi sistem rem regeneratif. Sebelum membandingkan nilai-nilai tersebut, dilakukan konversi satuan pada energi kinetik dari J menjadi kwh. Persamaan yang dipakai adalah sebagai berikut:

$$Efisiensi = \frac{Total\ energi\ regeneratif\ total\ (kwh)}{Total\ energi\ kinetik\ perlambatan\ (kwh)} \times 100\% \qquad (3.7)$$

3.3 Data dan Contoh Perhitungan

Pada subbab ini berisi contoh-contoh perhitungan data yang dibutuhkan untuk analisis perhitungan gaya dan porsi rem mekanis dan rem regeneratif, kontribusi dan efisiensi sistem rem regeneratif.

3.3.1 Perhitungan Center of Gravity (CoG)

Data yang dibutuhkan untuk perhitungan center of gravity ditunjukkan pada tabel Tabel 3.2 antara lain:

Tabel 3.2 Data perhitungan CoG

i	m_i (kg)	x_i (m)	y_i (m)
motor	97,5	0,74	0,19
penumpang 1	70	0,84	0,84
penumpang 2	70	1,17	1,02

Perhitungan untuk mencari CoG menggunakan rumus pada persamaan 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 dan 2.5 dengan data pada Tabel 3.2. Persamaan 2.1, 2.2 dan 2.3 digunakan untuk mencari CoG kendaraan kosong, dimana letak CoG kendaraan kosong yaitu L_f sebesar 0,74 dan h sebesar 0,19. Persamaan 2.4 dan 2.5 digunakan untuk mencari CoG dengan berat 2 penumpang. Setelah dilakukan perhitungan didapatkan L_f dan h berturut-turut adalah 0,896 m dan 0,623 m.

3.3.2 Perhitungan Porsi Pengereman Ideal

Contoh perhitungan dari porsi pengereman ideal dengan nilai j/g sebesar 0,1 dan nilai Fbf/W sebesar 0,1 adalah sebagai berikut:

$$\frac{F_{br}}{W} = \frac{\left(L_f - \frac{j}{g}h\right)}{\left(L_r + \frac{j}{g}h\right)} \times \frac{F_{bf}}{W}$$

$$\frac{F_{br}}{W} = \frac{(0{,}89m - 0{,}1\ .0{,}638m)}{(0{,}337m + 0{,}1\ .0{,}638m)} \times 0{,}1$$

$$\frac{F_{br}}{W} = 0{,}206$$

Perhitungan porsi pengereman ideal dengan variasi j/g dan Fbf/W selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 3.3

Tabel 3.3 Porsi pengereman ideal

j/g	Fbf/W	Fbr/W
0	0	0
0,1	0,1	0,206
0,2	0,2	0,328
0,3	0,3	0,397
0,4	0,4	0,429
0,5	0,5	0,435
0,6	0,6	0,423
0,7	0,7	0,396
0,8	0,8	0,358
0,9	0,9	0,312
1	1	0,258

3.3.3 Perhitungan Porsi Pengereman Minimal

Contoh perhitungan dari porsi pengereman minimal kendaraan pada roda bagian depan dengan nilai μ sebesar 0,2 adalah sebagai berikut:

$$\frac{F_{bf}}{W} = \frac{\mu}{L}(L_r + (0{,}2 + 0{,}85(\mu - 0{,}2)\ h\ )$$

$$\frac{F_{bf}}{W} = \frac{0{,}2}{1{,}227\text{m}}(0{,}89 + (0{,}1 + 0{,}85(0{,}2 - 0{,}2)\ 0{,}638\text{m})$$

$$\frac{F_{bf}}{W} = 0{,}065$$

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

$$\frac{F_{br}}{W} = (0{,}1 + 0{,}85(0{,}2 - 0{,}2) - 0{,}065$$

$$\frac{F_{br}}{W} = 0{,}035$$

Perhitungan porsi pengereman minimal dengan seluruh nilai variasi μ dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Porsi pengereman minimal

μ	Fbf/W	Fbr/W
0	0	-0,070
0,1	0,028	-0,013
0,2	0,065	0,035
0,3	0,111	0,074
0,4	0,166	0,104
0,5	0,230	0,125
0,6	0,302	0,138
0,7	0,383	0,142
0,8	0,473	0,137
0,9	0,572	0,123
1	0,680	0,100

3.3.4 Perhitungan Porsi Pengereman Aktual

Contoh perhitungan dari porsi pengereman aktual kendaraan pada roda bagian belakang dengan penentuan nilai kemiringan garis β sebesar 0,42 dan nilai j/g sebesar 0,2 dapat dicontohkan sebagai berikut:

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

$$\frac{F_{br}}{W} = 0{,}42 \,.\, 0{,}2$$

$$\frac{F_{br}}{W} = 0{,}084$$

Contoh perhitungan dari porsi pengereman aktual kendaraan pada roda bagian depan dengan penentuan nilai

kemiringan garis β sebesar 0,42 dan nilai j/g sebesar 0,2 dapat dicontohkan sebagai berikut:

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

$$\frac{F_{bf}}{W} = 0{,}2 - 0{,}084$$

$$\frac{F_{bf}}{W} = 0{,}116$$

Perhitungan porsi pengereman aktual dengan seluruh nilai variasi j/g dapat dilihat pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Porsi pengereman aktual

j/g	Fbr/W	Fbf/W
0,1	0,042	0,058
0,2	0,084	0,116
0,3	0,0126	0,174
0,4	0,168	0,232
0,5	0,21	0,29
0,6	0,252	0,348
0,7	0,294	0,406
0,8	0,336	0,464
0,9	0,378	0,522
1	0,42	0,58

3.3.5 Perhitungan Porsi Maksimal Sistem Rem Regeneratif

Perhitungan porsi maksimal sistem rem regeneratif untuk *gear* pertama pada roda depan dapat dicontohkan sebagai berikut:

$$\frac{Fb_{reg}}{W} = \frac{\frac{i_t \times i_g \times T_m \times \eta_m}{r}}{W}$$

$$\frac{Fb_{reg}}{W} = \frac{\frac{2{,}615 \times 2{,}642 \times 8{,}76\ \text{Nm} \times 0{,}95}{0{,}2159\text{m}}}{2329{,}875\text{N}}$$

$$\frac{Fb_{reg}}{W} = 0{,}114$$

Setelah mendapatkan porsi maksimal sistem rem regeneratif, kita perlu mencari porsi rem mekanis apabila porsi

pengereman aktual lebih besar dibandingkan porsi rem regeneratif. Contoh perhitungan porsi rem mekanis pada roda depan adalah sebagai berikut:

$$\frac{F_{mek}}{W} = \frac{F_{aktual}}{W} - \frac{F_{reg}}{W}$$

$$\frac{F_{mek}}{W} = 0{,}116 - 0{,}114$$

$$\frac{F_{mek}}{W} = 0{,}002$$

Perhitungan porsi pengereman mekanis dan porsi regeneratif aktual secara keseluruhan pada roda depan dapat dilihat pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Porsi pengereman mekanis dan regeneratif

Fbf/W mek 1	Fbf/W reg 1
0	0
0,000	0,058
0,002	0,114
0,060	0,114
0,118	0,114
0,176	0,114
0,234	0,114
0,292	0,114
0,350	0,114
0,408	0,114
0,466	0,114

3.3.6 Perhitungan Gaya Maksimal Sistem Rem Regeneratif

Contoh perhitungan dari gaya pengereman regeneratif adalah sebagai berikut:

$$Fbf_{reg} = \frac{F_{bf}}{W}_{reg} \times W$$

$$Fbf_{reg} = 0{,}058 \times 2329{,}875N$$

$Fbf_{reg} = 135{,}13\ N$

Perhitungan gaya pengereman mekanis dan regeneratif dengan seluruh nilai porsi pengereman dapat dilihat pada Tabel 3.7.

Tabel 3.7 Gaya pengereman mekanis dan regeneratif

Fbf mek 1	Fbf reg 1
0	0
0,00	135,13
3,96	266,31
139,09	266,31
274,23	266,31
409,36	266,31
544,49	266,31
679,62	266,31
814,76	266,31
949,89	266,31
1085,02	266,31

3.3.7 Perhitungan Gaya Hambat Angin

Contoh perhitungan dari gaya hambat angin (F_a) pada kendaraan dengan menggunakan *driving cycle* WMTC kelas 2 pada detik ke-20 adalah sebagai berikut:

$$F_a = \frac{1}{2} . \rho_u . C_D . A_f . V^2$$

$$F_a = \frac{1}{2} . 1{,}2\ kg/m^3 . 1{,}8 . 0{,}25\ m^2 . (15{,}47\ m/s)^2$$

$$F_a = 64{,}65\ N$$

3.3.8 Perhitungan Gaya Hambat Rolling

Contoh perhitungan gaya hambat *rolling* (Fr) pada kendaraan dengan menggunakan *driving cycle* WMTC kelas 2

pada detik ke-20, kondisi lintasan aspal yang datar adalah sebagai berikut:

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

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

$$F_r = 2329{,}875\text{N}.\cos 0\ .\ 0{,}4\ .\ 2\ .\ 1(0{,}01 + 0{,}005\left(\frac{55{,}7}{100}\right))$$

$$\text{F}_\text{r} = 29{,}79\ \text{N}$$

3.3.9 Perhitungan Gaya Hambat Inersia

Contoh perhitungan gaya inersia (Fi) pada kendaraan dengan menggunakan *driving cycle* WMTC kelas 2 pada detik ke-20 adalah sebagai berikut:

$$F_i = m\ .a$$

$$F_i = m\ .\left(\frac{V_{21}-V_{20}}{t_{21}-t_{20}}\right)$$

$$F_i = 237{,}5\ \text{kg}\ .\left(\frac{15{,}78-15{,}47}{21-20}\right)\frac{m/s}{s}$$

$$F_i = 72{,}575\ \text{N}$$

3.3.10 Perhitungan R_{hp} Kendaraan

Setelah mendapatkan nilai gaya-gaya hambat yang bekerja pada kendaraan pada subbab 3.3.7 sampai dengan 3.3.9, langkah selanjutnya adalah perhitungan R_{hp} 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 R_{hp} kendaraan pada *driving cycle* WMTC kelas 2 pada detik ke-20 adalah sebagai berikut:

$$R_{hp} = F_t\ .V.\eta$$

$$R_{hp} = (\text{F}_\text{a} + \text{F}_\text{r} + \text{F}_\text{i})\ .V.\eta$$

$$R_{hp} = (64{,}65 + 29{,}79 + 72{,}575)N.\ 15{,}47\frac{m}{s}\ .(0{,}95.\ 0{,}4.\ 0{,}9)$$

$$R_{hp} = 0{,}77\ \text{kw}$$

3.3.11 Perhitungan Energi Bangkitan

Energi bangkitan adalah energi listrik yang dihasilkan dari sistem rem regeneratif. Energi bangkitan kendaraan didasari dari R_{hp} regeneratif. R_{hp} regeneratif yang memiliki satuan kw akan dikonversikan menjadi satuan kwh. Contoh perhitungan energi bangkitan pada *driving cycle* WMTC kelas 1 adalah:

$$Energi\ bangkitan = \frac{R_{hp}\ regeneratif\ (kw)}{3600\ s}$$

$$Energi\ bangkitan_{WMTC\ kelas\ 1} = \frac{0{,}39\text{kw}}{3600\text{s}}$$

$$Energi\ bangkitan_{WMTC\ kelas\ 1} = 0{,}0001\ \text{kwh}$$

3.3.12 Perhitungan Energi Kinetik Perlambatan

Contoh perhitungan energi kinetik perlambatan dengan *driving cycle* WMTC kelas 2 detik ke-48 adalah sebagai berikut:

$$Ek\ perlambatan_{WMTC\ kelas\ 2} = \frac{1}{2} \times m \times \left({V_{49}}^2 - {V_{48}}^2\right)$$

$$Ek\ perlambatan_{WMTC\ kelas\ 2} = \frac{1}{2} \times 237{,}5\text{kg} \times (12{,}97^2 - 14{,}17^2)\frac{m^2}{s^2}$$

$$Ek = -3850\ \text{J (mengalami perlambatan)}$$

$$Ek = 3850\ \text{J}$$

3.3.13 Perhitungan Kontribusi Sistem Rem Regeneratif

Contoh perhitungan kontribusi sistem rem regeneratif terhadap kebuthan daya kendaraan adalah sebagai berikut:

$$Kontribusi = \frac{R_{hp}\ regeneratif\ (kw)}{R_{hp}\ total\ (kw)} \times 100\%$$

$$Kontribusi_{WMTC\ kelas\ 1} = \frac{52{,}81}{159.09} \times 100\%$$

$$Kontribusi_{WMTC\ kelas\ 1} = 33{,}194\%$$

3.3.14 Perhitungan Efisiensi Sistem Rem Regeneratif

Contoh perhitungan efisiensi sistem rem regeneratif adalah sebagai berikut:

$$Efisiensi = \frac{Total\ energi\ bangkitan\ (kwh)}{Total\ energi\ kinetik\ perlambatan\ (kwh)} \times 100\%$$

$$Efisiensi_{WMTC\ kelas\ 1} = \frac{0{,}0125\text{kwh}}{0{,}0532\text{kwh}} \times 100\%$$

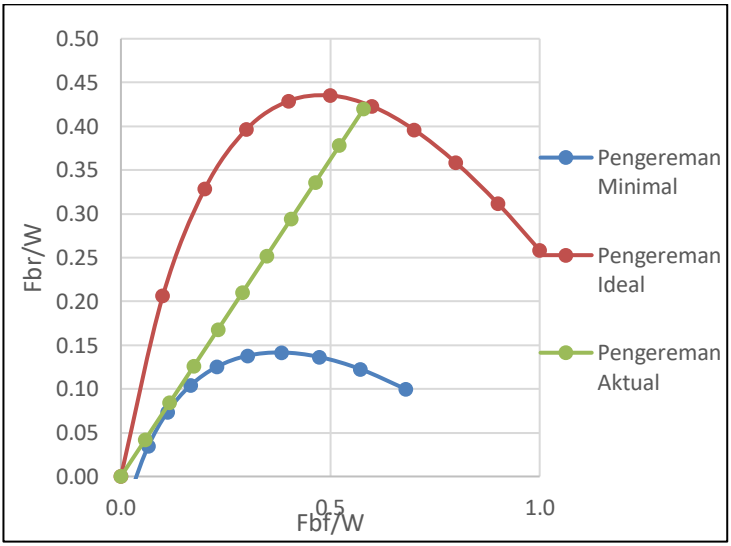
$$Efisiensi_{WMTC\ kelas\ 1} = 23{,}535\%$$

BAB 4
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab 4 ini berisikan tentang hasil dan pembahasan analisis porsi dan gaya pengereman rem mekanis dan rem regeneratif pada kendaraan, kontribusi sistem rem regeneratif, dan efisiensi sistem rem regeneratif.

4.1 Porsi dan Gaya Rem Mekanis dan Rem Regeneratif pada Kendaraan

Berdasarkan perhitungan yang dilakukan pada subbab 3.3.1 sampai dengan subbab 3.3.6, grafik distribusi pengereman dapat digambarkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Kurva Distribusi Pengereman

Pada Gambar 4.1 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 dilihat pada Tabel 4.1 dan dapat digunakan untuk menentukan besar gaya pengereman mekanis dan regeneratif yang diperlukan. Besar gaya pengereman mekanis dan regeneratif dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.1 Porsi rem mekanis dan rem regeneratif

Pengereman aktual			Pengereman roda depan	
j/g	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 4.2 Gaya rem mekanis dan rem regeneratif

Pengereman aktual			Pengereman roda depan	
j/g	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

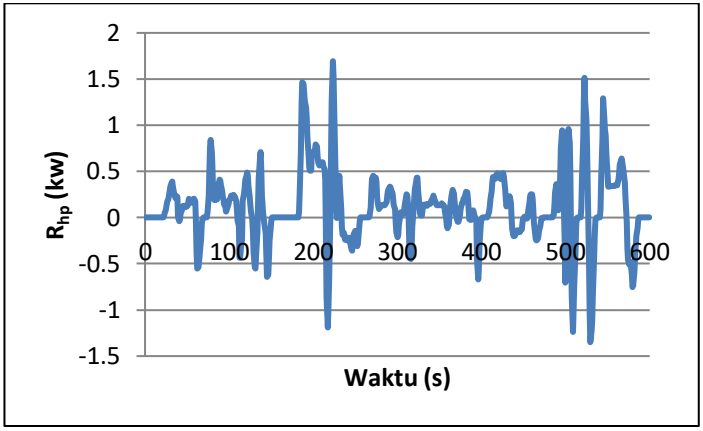
Berdasarkan hasil yang didapatkan pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2, porsi dan gaya pengereman regeneratif maksimal adalah sebesar 0,114 dan 266,31 N. Pada variasi j/g 0,1 pengereman aktual pada roda depan dapat sepenuhnya menggunakan pengereman regeneratif. Sedangkan pada variasi j/g 0,2 sampai 1, pengereman 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.

4.2 Kontribusi Sistem Regeneratif terhadap Kebutuhan Daya Kendaraan

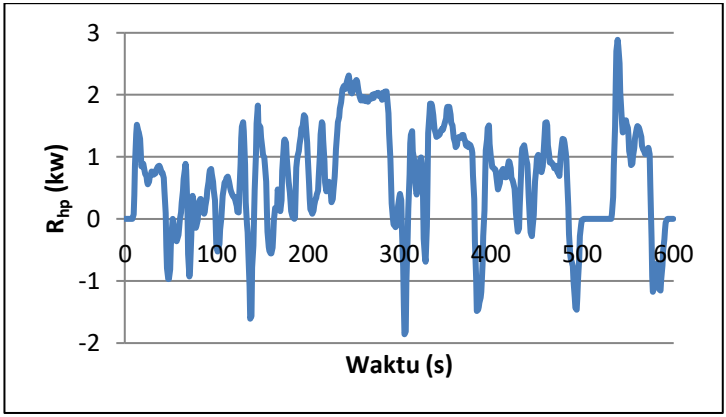
Pada subbab ini berisikan tentang hasil grafik Rhp regeneratif dan total Rhp yang didapatkan berdasarkan perhitungan pada subbab 3.3.7 sampai dengan subbab 3.3.10.

Berdasarkan perhitungan R_{hp} kendaraan pada subbab 3.3.10 maka bisa dilakukan plotting R_{hp} terhadap waktu selama *driving*

cycle WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2. Hasil plotting dapat dilihat pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3.



Gambar 4.2 Grafik R_{hp} vs waktu *driving cycle* WMTC kelas 1



Gambar 4.3 Grafik R_{hp} vs waktu *driving cycle* WMTC kelas 2

Berdasarkan kedua grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai R_{hp} mengalami naik dan turun di setiap detiknya. Hal ini dipengaruhi dari nilai kecepatan dan gaya inersia setiap detiknya apabila nilai gaya hambat inersia kendaraan bernilai negatif besar R_{hp} kendaraan yang dihasilkan nantinya dapat dimanfaatkan kembali menjadi R_{hp} regeneratif. Nilai R_{hp} terbesar pada *driving cycle* WMTC kelas 1 didapatkan pada detik 223 sebesar 1,69 kw dan nilai terendah didapatkan pada detik 530 sebesar -1,35 kw. Selanjutnya nilai R_{hp} terbesar pada *driving cycle* WMTC kelas 2 didapatkan pada detik 539 sebesar 2,89 kw dan nilai terendah didapatkan pada detik 306 sebesar -1,86 kw. Setelah dilakukan penjumlahan dari semua R_{hp} dari detik 0 sampai 600 didapatkan jumlah total R_{hp} pada *driving cycle* WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 adalah 159,09 kw dan 521,77 kw.Berdasarkan analisis R_{hp} terhadap waktu masing-masing driving cyle pada subbab 3.2.2 didapatkan besar R_{hp} regeneratif pada driving cyle WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 adalah sebesar 52,81 kw dan 153,95 kw. Total R_{hp} yang dibutuhkan kendaraan selama driving cycle WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 adalah 159,09 kw dan 521,77 kw. Perbandingan antara R_{hp} regeneratif dan R_{hp} total akan menghasilkan besaran persentase kontribusi sistem rem regeneratif terhadap kebutuhan daya kendaraan.

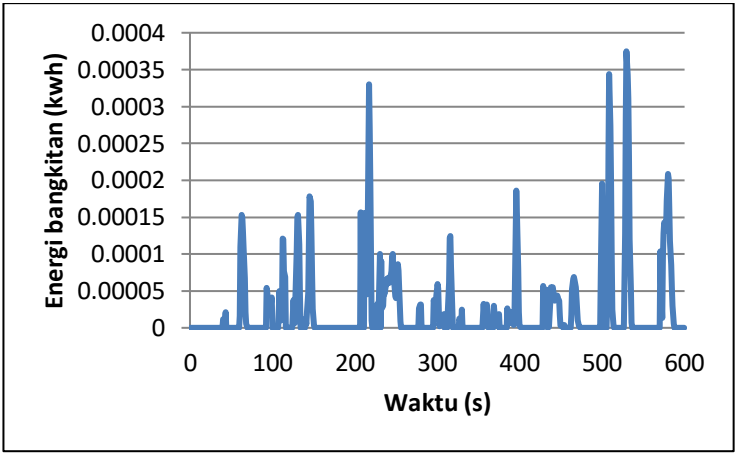
Berdasarkan perhitungan kontribusi sistem rem regeneratif terhadap kebutuhan daya kendaraan pada subbab 3.3.13 didapatkan kontribusi sistem rem regeneratif terhadap kebutuhan daya kendaraan pada driving cycle WMTC kelas 1 dan kelas 2 adalah sebesar 33,194% dan 29,504%. Nilai kontribusi sistem rem regeneratif 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.

4.3 Efisisensi Sistem Rem Regeneratif

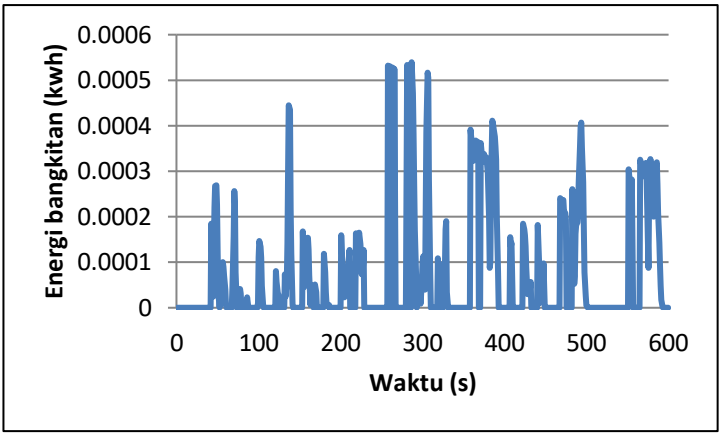
Pada subbab ini berisikan tentang hasil grafik total energi bangkitan dan total energi kinetik perlambatan yang dihasilkan kendaraan selama driving cycle WMTC.

4.3.1 Total Energi Bangkitan

Berdasarkan perhitungan energi bangkitan pada subbab 3.3.11 maka bisa dilakukan plotting energi bangkitan terhadap waktu selama *driving cycle* WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2. Hasil plotting dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5.



Gambar 4.4 Grafik energi bangkitan vs waktu *driving cycle* WMTC kelas 1

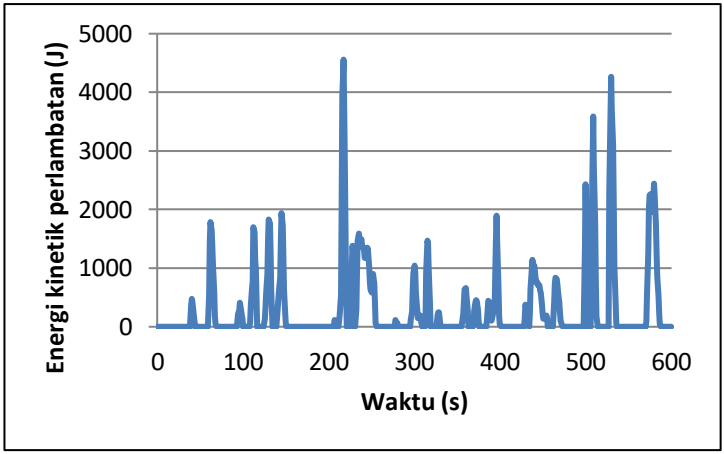


Gambar 4.5 Grafik energi bangkitan vs waktu *driving cycle* WMTC kelas 2

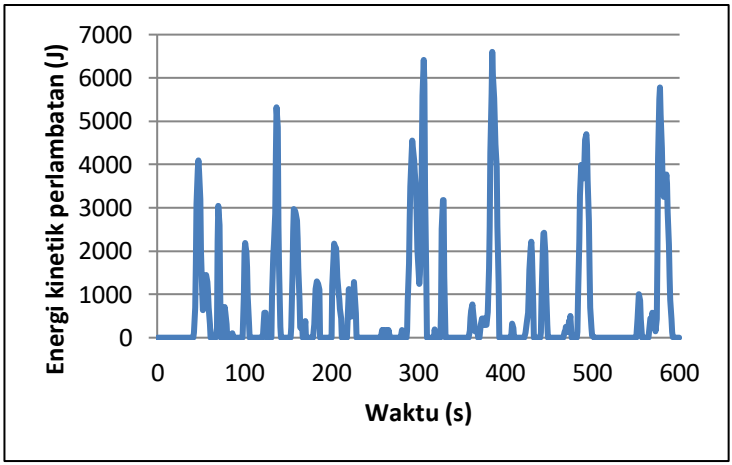
Berdasarkan kedua grafik diatas dapat dilihat nilai maksimum dari energi bangkitan pada *driving cycle* WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 adalah 0,0004 kwh dan 0,0005 kwh. Setelah dilakukan penjumlahan dari semua energi bangkitan dari detik 0 sampai 600 didapatkan total energi bangkitan pada *driving cycle*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

4.3.2 Energi Kinetik Perlambatan

Berdasarkan perhitungan energi kinetik perlambatan pada subbab 3.3.12 maka bisa dilakukan plotting energi kinetik perlambatan terhadap waktu selama *driving cycle* WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2. Hasil plotting dapat dilihat pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.7.



Gambar 4.6 Grafik energi kinetik perlambatan vs waktu *driving cycle* WMTC kelas 1



Gambar 4.7 Grafik energi kinetik perlambatan vs waktu *driving cycle* WMTC kelas 2

Berdasarkan kedua grafik diatas dapat dilihat nilai maksimum dari energi kinetik perlambatan pada *driving cycle*

WMTC kelas 1 dan kelas 2 adalah 4552, 852 J dan 6601,577 J. 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 yang didapatkan dalam satuan joule akan dikonversi menjadi satuan kwh untuk memudahkan perhitungan. Setelah dilakukan pengkonversian satuan didapatkan nilai energi kinetik perlambatan pada *driving cycle* WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 sebesar 0,0533 kwh dan 0,1143 kwh.Berdasarkan analisis yang dilakukan pada subbab 3.2.3 didapatkan total energi bangkitan perlambatan driving cycle WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 sebesar 0,0125 kwh dan 0,0366 kwh dan total energi kinetik perlambatan driving cycle WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 sebesar 0,0533 kwh dan 0,1143 kwh. Perbandingan antara total energi bangkitan dan total energi kinetik perlambatan akan menghasilkan besaran persentase efisiensi sistem rem regeneratif.

4.3.3 Efisiensi Sistem Rem Regeneratif pada Kendaraan

Efisiensi sistem rem regeneratif pada kendaraan didapatkan dengan membandingkan total energi bangkitan dengan total energi kinetik perlambatan kendaraan selama satu driving cycle. Berdasarkan perhitungan efisiensi sistem rem regeneratif pada subbab 3.3.14 didapatkan efisiensi sistem rem regeneratif pada WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 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.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis pengaplikasian sistem rem regeneratif pada sepeda motor hybrid yang telah dilakukan, beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

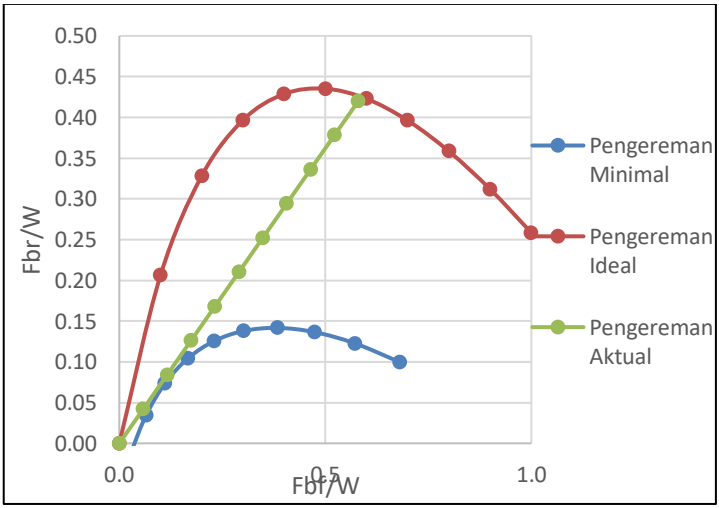
1. Besar porsi dan gaya pengereman dari sistem rem mekanis dan sistem rem regeneratif pada sepeda motor hybrid tercantum pada Tabel 5.1 dan Tabel 5.2. Grafik dari distribusi pengereman ditunjukkan pada Gambar 5.1.
2. Besar kontribusi sistem rem regeneratif terhadap kebutuhan daya kendaraan pada *driving cycle* WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 berturut-turut adalah 33,194% dan 29,504%.
3. Besar efisiensi sistem rem regeneratif *driving cycle* WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 berturut-turut adalah 23,535% dan 31,98%.

Tabel 5.1 Porsi Pengereman

Pengereman aktual			Pengereman roda depan	
j/g	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 5.2 Gaya Pengereman

Pengereman aktual			Pengereman roda depan	
j/g	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



Gambar 5.1 Distribusi Pengereman

5.2 Saran

Berdasarkan analisis pengaplikasian sistem rem regeneratif pada sepeda motor hybrid yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat dipertimbangkan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Pada penelitian selanjutnya, diharapkan dapat melibatkan analisis sistem kontrol untuk memperoleh hasil yang lebih baik.
2. Pada penelitian selanjutnya, diharapkan objek penelitian yang dipakai adalah sepeda motor listrik, agar dapat dibandingkan hasil yang diperoleh dengan hasil yang didapatkan dengan penelitian ini.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

https://www.astra-honda.com/product/revo-x. (2016). Dipetik Maret 20, 2020, dari https://www.astra-honda.com/.

Baradwadya, C. R. (2016). Analisa Pengaplikasian Sistem ‘KERS’ pada Bus Transjakarta dengan Sistem Penyimpanan pada Baterai. *Tugas Akhir*.

Baradwadya, C. R. (2016). *Analisa Pengaplikasian Sistem 'KERS' pada Bus Transjakarta dengan Sistem Penyimpanan pada Baterai.* Surabaya: Teknik Mesin ITS.

Cui, W., Zhang, H., Ma, Y., & Zhang, Y. (2011). *Regenerative Braking Control Method and Optimal Scheme for Electric Motorcycle.* Shanghai: Shanghai University.

Ehsani, M., & Gao, Y. (2010). *Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicle Fundamentals, Theory, and Design.* New York: CRC Press.

https://www.transportpolicy.net/standard/international-light-duty-worldwide-harmonized-light-vehicles-test-procedure-WMTC/. (t.thn.). Dipetik November 13, 2019, dari https://www.transportpolicy.net/.

Husain, I. (2005). *Electric and Hybrid Vehicles : Design Fundamentals.* Ohio: Taylor and Franci e-Library.

Patil, S. (2012). *Regenerative Braking System in Automobiles.* India: Vishwakarma Institure of Information Technology.

Perdana, P. (2018). *Analisa Penggunaan Regenerative Brake pada Mobil Multiguna Pedesaan Bertenaga Listrik.* Surabaya: Teknik Mesin ITS.

Sheikh, A. Z. (2019). *Comparative Analysis of Parallel vs Series Hybrid Powertrains*. New York: Rochester Institute of Technology.

Sutantra. (2015). *Teknologi Otomotif Hybrid (1 ed)*. Surabaya: Guna Widya.

Sutantra, I., & Sampurno, B. (2010). *Teknologi Otomotif Edisi Kedua.* Surabaya : Widya Guna.

Wijaya, G. (2014). *Analisa Gaya Pengereman dan Energi yang Dibangkitkan dengan Porsi Regenerative Braking.* Surabaya: Teknik Mesin ITS.

Yunus, M. (2017). *Rancang Bangun Purwarupa Drivetrain Sepeda Motor Multi-Mode Hybrid yang Efisien.* Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Zhuang, W., Zhang, X., Yang, D., Wang, L., & Hu, X. (2016). Comparison of Multi-Mode Hybrid with Multiple Planetary Gears. *Applied Energy*, 642-632.

BIODATA PENULIS

Penulis dilahirkan di Rantauprapat pada tanggal 18 Oktober 1998 dan merupakan anak ketiga dari 4 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Perguruan Buddhis Jayanti (2004-2010), SMP Perguruan Buddhis Jayanti (2010-2013), SMA Sutomo 1 (2013-2016), dan menempuh perkuliahan di Departemen Teknik Mesin FTIRS ITS.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi selama perkuliahan. Tercatat dalam berorganisasi, penulis mengikuti organisasi Tim Pembina Kerohanian Buddha (TPKB) tahun 2017 sebagai Staff PSDM dan tahun 2018 sebagai Staff Hubungan Luar. Penulis juga pernah mengikuti beberapa pelatihan pengembangan kerpribadian baik dari departemen, fakultas serta tingkat institut yang diadakan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis mempunyai motto hidup yaitu selalu bersyukur. Motto tersebut menjadi pedoman dalam melakukan setiap kegiatan dan pengingat agar selalu mensyukuri apapun yang diberikan dalam keadaan senang maupun susah. Apabila ada saran dan kritik mengenai Tugas Akhir ini bisa menghubungi penulis melalui email: alexpangestu18@gmail.com.