



**TUGAS AKHIR - TM 141585**

**ANALISA PENGAPLIKASIAN SISTEM 'KERS' PADA BUS  
TRANSJAKARTA DENGAN SISTEM PENYIMPANAN PADA  
BATERAI**

**CHRISTOPHER RESZA BARADWADYA  
NRP. 2110 100 083**

**Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D.**

**JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016**



**FINAL PROJECT - TM 141585**

**APPLICATION ANALYSIS OF 'KERS' ON BUS  
TRANSJAKARTA USING BATTERY STORAGE SYSTEMS**

**CHRISTOPHER RESZA BARADWADYA**  
NRP. 2110 100 083

Academic Supervisor  
Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D.

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2016

**ANALISA PENGAPLIKASIAN SISTEM 'KERS' PADA  
BUS TRANSJAKARTA DENGAN SISTEM  
PENYIMPANAN PADA BATERAI**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

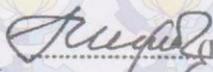
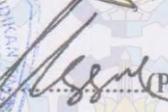
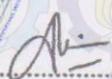
**pada**

**Bidang Studi Desain  
Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Noverber**

**Oleh:**

**Christopher Resza Baradwadya  
NRP. 2110 100 083**

**Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:**

1. Prof. Ir. I N Sutantra, M.S., Ph.D.  (Pembimbing)  
(NIP .195106051978031002)
2. Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E.  (Penguji I)  
(NIP .196511031990021001)
3. Dr. Eng. Unggul W, ST., MEng.Sc.  (Penguji II)  
(NIP .197805102001121001)
4. Aida Annisa Amin D., ST., MT.  (Penguji III)  
(NIP .198907052015042005)

**SURABAYA  
Januari, 2016**

# ANALISA PENGAPLIKASIAN SISTEM 'KERS' PADA BUS TRANSJAKARTA DENGAN SISTEM PENYIMPANAN PADA BATERAI

Nama mahasiswa : Christopher Resza Baradwadya  
NRP : 2110 100 083  
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS  
Dosen pembimbing : Prof. Ir. I. N. Sutantra, M.Sc., Ph.D.

## Abstrak

Kinetic Energy Recovery System (KERS) adalah suatu sistem otomotif yang bertujuan untuk memanfaatkan kembali energi kinetik kendaraan yang terbuang selama pengereman. Secara garis besar KERS adalah sebuah sistem pengereman dengan jalan mengkonversikan energi mekanis sistem menjadi bentuk energi lain yang dapat disimpan untuk digunakan kembali nanti pada saat dibutuhkan. Pada kendaraan komersil saat ini sebenarnya sudah terdapat pengaplikasian sistem charging baterai (*accumulator*) memanfaatkan energi dari *combustion engine*, yaitu menggunakan alternator. Alternator biasa digunakan di industri otomotif untuk mengisi baterai dan untuk memberi daya sistem listrik saat kendaraan beroperasi.

Pada penelitian ini akan dilakukan analisa pengaplikasian sistem *charging* baterai untuk skala kebutuhan yang lebih besar, yaitu selain untuk memenuhi kebutuhan daya *electrical system* pada kendaraan, juga untuk membantu proses akselerasi. Untuk itu akan dilakukan perhitungan untuk mengetahui kapasitas generator yang dibutuhkan agar mampu menyimpan dan menyalurkan putaran *combustion engine* menjadi energi listrik untuk disimpan pada baterai dan untuk menentukan kapasitas baterai yang dibutuhkan untuk menyimpan energi bangkitan hasil pengereman kendaraan berdasarkan *driving cycle* dari Bus Transjakarta. Metode yang digunakan adalah dengan menghitung gaya-gaya pengereman kendaraan berdasarkan peta distribusi pengeremannya ( $F_{braking}$ ), kemudian mencari nilai energi bangkitan yang dapat ditangkap

oleh *generator* dengan cara membandingkan besarnya energi kinetik kendaraan (translasi dan rotasi) ketika awal pengereman dengan energi kinetik kendaraan di akhir pengereman berdasarkan *driving cycle* dari Bus Transjakarta. Setelah kita mendapatkan nilai energi bangkitan berdasarkan fungsi waktu, kita dapat mengetahui spesifikasi generator yang dibutuhkan dan kapasitas baterai yang diperlukan untuk menyimpan energi bangkitan dari proses pengereman tersebut.

Pada penelitian ini didapatkan total energi pengereman yang tersedia selama perlambatan adalah 13471,49398 kJ, total energi pengereman yang dapat dimanfaatkan adalah 10420,9305 kJ, dan total nilai energi pengereman yang dapat ditangkap adalah 9378,837452 kJ. Efisiensi sistem adalah sebesar 69,62%. Generator yang akan digunakan adalah Dynastart SG-430. Sedangkan baterai yang akan digunakan adalah Lithium-Ion Rechargeable Cell 576V 60Ah Battery Pack. Kapasitas baterai yang dibutuhkan untuk menyimpan energi hasil pengereman adalah 17,0524 Ah.

**Kata Kunci :** *KERS, Bus Transjakarta, Hybrid Electric Vehicle, Mass Rapid Transport, alternator, electric motor, driving cycle*

# APPLICATION ANALYSIS OF 'KERS' ON BUS TRANSJAKARTA USING BATTERY STORAGE SYSTEMS

**Name** : Christopher Resza Baradwadya  
**NRP** : 2110 100 083  
**Department** : Mechanical Engineering FTI-ITS  
**Academic Supervisor** : Prof. Ir. I. N. Sutantra, M.Sc., Ph.D.

## Abstract

Kinetic Energy Recovery System (KERS) is an automotive system that aims to recover the vehicle's kinetic energy which is wasted during braking. Briefly, KERS is a braking system which convert mechanical energy into other forms of energy that can be saved for reuse later on when needed. In the commercial vehicle there is already a battery charging system application (accumulator) utilizing the energy of the combustion engine, which uses the alternator. Alternator commonly used in the automotive industry to charge the battery and to power the electrical system when the vehicle is in operation.

This research will analyze the application of a battery charging system for a larger-scale needs, which in addition to meet the power needs of electrical system in the vehicle, as well as to assist vehicle acceleration. For that we have to determine the capacity of the generator to be able to store and distribute combustion engine's rotation into electrical energy and to determine the battery capacity required to store the vehicle's braking energy based on the driving cycle of Transjakarta. The method used to calculate the forces of braking the vehicle based on a map of the distribution of braking ( $F_{\text{braking}}$ ), then determine the value of the braking energy that can be captured by the generator by comparing the magnitude of the kinetic energy of the vehicle (translation and rotation) on the initial braking and the kinetic energy of the vehicle at the end braking based on the driving cycle of Transjakarta. Once we get the value of energy generated based

on a function of time, we can determine the generator and battery specification required to store the braking energy.

In this research, total braking energy available during deceleration is 13471,49398 kJ, total braking energy that can be utilized is 10420,9305 kJ, and the total value of the braking energy that can be captured is 9378,837452 kJ. The efficiency of the system is equal to 69,62%. Generator to be used is Dynastart SG-430. While the battery to be used is the Cell Lithium-Ion Rechargeable Battery Pack 576V 60Ah. The battery capacity is needed to store the results of the braking energy is 17,0524 Ah.

**Keyword:** *KERS, Bus Transjakarta, Hybrid Electric Vehicle, Mass Rapid Transport, alternator, electric motor, driving cycle*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan YME atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga Saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir berjudul “Analisa Pengaplikasian Sistem ‘KERS’ Pada Bus Transjakarta Dengan Sistem Penyimpanan Pada Baterai” dengan baik. Tugas Akhir ini disusun sebagai syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST).

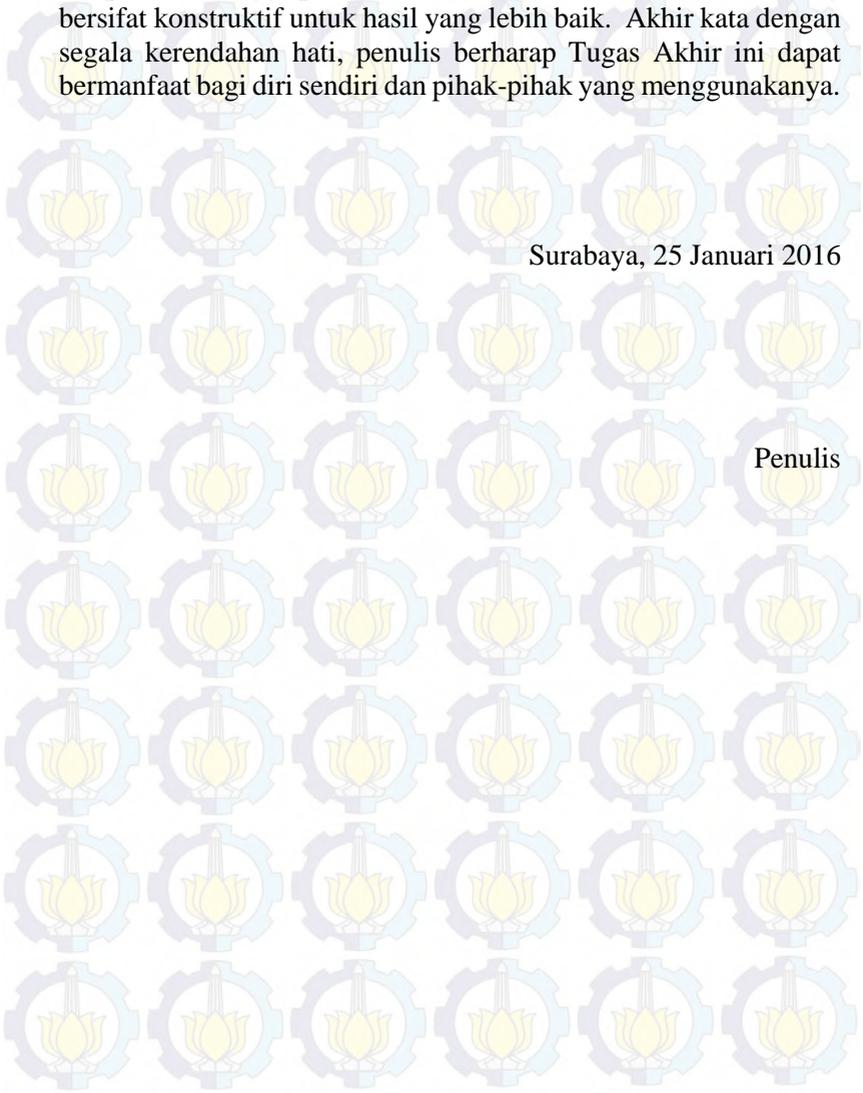
Selama penyusunan Tugas Akhir ini saya telah menerima banyak bantuan dari berbagai pihak. Oleh karenanya dalam kesempatan ini, saya ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua dan semua keluarga saya yang selalu memberi semangat dan doa dari jauh selama saya menjalani masa perkuliahan hingga saat ini.
2. Bapak Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D., selaku dosen pembimbing yang memberikan bimbingan, ilmu pengetahuan dan dukungan moral hingga Tugas Akhir ini selesai dengan baik.
3. Bapak Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E., selaku dosen penguji Tugas Akhir.
4. Bapak Dr. Eng. Unggul Wasiwitono ST., M. Eng. Sc. selaku dosen penguji Tugas Akhir.
5. Ibu Aida Annisa Amin D., ST., MT., selaku dosen penguji Tugas Akhir.
6. Bapak Ir. Bambang Pramujati, M.Sc., PhD selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin-ITS.
7. Segenap dosen dan staf Jurusan Teknik Mesin ITS.
8. Teman-teman Teknik Mesin ITS angkatan 2010 yang selalu memberikan dukungan dalam segala hal.
9. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna, sehingga penulis selalu membuka kritik dan saran yang bersifat konstruktif untuk hasil yang lebih baik. Akhir kata dengan segala kerendahan hati, penulis berharap Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi diri sendiri dan pihak-pihak yang menggunakannya.

Surabaya, 25 Januari 2016

Penulis



## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	v
<b>DAFTAR ISI</b> .....	vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiii

### **BAB I PENDAHULUAN**

1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Tugas Akhir.....	3
1.6 Sistematika Penulisan Laporan.....	3

### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

2.1 Tinjauan Pustaka.....	5
2.1.1 Pengertian <i>KERS</i> .....	5
2.1.2 Kendaraan <i>Hybrid</i> .....	6
2.1.3 Sistem <i>KERS</i> dengan <i>Electric Motor</i> .....	7
2.1.3.1 Mode <i>Charging</i> dan <i>Mechanical Braking</i> .....	8
2.1.3.2 Mode <i>Discharging</i> .....	9
2.1.4 Operasional Pengereman dengan <i>KERS</i> .....	9
2.1.4.1 <i>Braking</i> .....	9
2.1.4.2 <i>Acceleration Boost</i> .....	10
2.1.4.3 Netral.....	10
2.1.5 Komponen utama pada <i>KERS</i> .....	10
2.1.5.1 <i>Hybrid Motor-Generator</i> .....	10
2.1.5.2 <i>Engine Control Unit (ECU)</i> .....	11
2.1.5.3 <i>Battery</i> .....	12
2.1.5.3.1 Kapasitas Baterai.....	14
2.1.5.3.2 Rangkaian Baterai.....	14
2.1.6 Alternator.....	15

2.2. Dinamika Kendaraan.....	16
2.2.1 Gaya Hambat Kendaraan.....	16
2.2.1.1 Gaya Hambat <i>Drag</i> ( $F_D$ ).....	17
2.2.1.2 Gaya Hambat <i>Rolling</i> ( $F_R$ ).....	17
2.2.1.3 Gaya Hambat <i>Gradien</i> ( $F_G$ ).....	17
2.2.1.4 Gaya Hambat Inersia Kendaraan ( $F_a$ ).....	18
2.2.1.5 Gaya Pengereman Bus Transjakarta.....	18
2.2.2 Torsi Pengereman Bus Transjakarta.....	18
2.2.3 Daya Pengereman Bus Transjakarta.....	18
2.2.4 Torsi <i>Engine</i> Bus Transjakarta.....	18
2.2.5 Putaran <i>Engine</i> Bus Transjakarta.....	19
2.2.6 Energi Pengereman Bus Transjakarta.....	19
2.2.6.1 Energi Kinetik Rotasi <i>Combustion Engine</i> ...	19
2.2.6.2 Energi Kinetik Translasi Kendaraan.....	19

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

3.1. Prosedur Penelitian.....	21
3.2. Diagram Alir Pemodelan.....	21
3.3. Analisa Pengereman.....	24
3.4. Data Kendaraan.....	25
3.5. Metode Perhitungan.....	26
3.5.1 Metode Perhitungan Gaya-Gaya Pengereman Kendaraan.....	26
3.5.2 Metode Perhitungan Energi Pengereman Kendaraan.....	27
3.5.3 Metode Perhitungan Kapasitas Baterai dan Instalasi Baterai.....	27
3.6. Prinsip Kerja <i>KERS-Mechanical Braking</i> .....	28
3.6.1 Mode <i>Charging</i> .....	29
3.6.2 Mode <i>Discharging</i> .....	31
3.6.3 Mode <i>Engine</i> .....	32

### **BAB IV ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1. <i>Driving Cycle</i> Bus Transjakarta.....	33
4.2. Perhitungan Nilai Putaran <i>Combustion Engine</i> Pada Setiap Perlambatan.....	35
4.3. Perhitungan Nilai Energi Kinetik Rotasi <i>Combustion Engine</i> Pada Setiap Perlambatan.....	40
4.4. Perhitungan Nilai Energi Kinetik Translasi Kendaraan Pada Setiap Perlambatan.....	45
4.5. Perhitungan Nilai Energi Pengereman Bus Transjakarta Pada Setiap Perlambatan.....	48
4.6. Spesifikasi <i>Hybrid Motor-Generator</i> yang Akan Digunakan.....	51
4.7. Nilai Energi Pengereman yang Dapat Ditangkap Oleh Generator dan Dikonversi Menjadi Energi Listrik.....	52
4.8. Nilai Kapasitas Baterai yang Diperlukan Untuk Menyimpan Energi Pengereman Bus Transjakarta.....	55
4.9. Spesifikasi Baterai yang Akan Digunakan Untuk Menyimpan Energi Hasil Pengereman Bus Transjakarta	56
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1 Kesimpulan.....	59
5.2 Saran.....	60
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	61

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Klasifikasi Hybrid Electric Vehicle.....	6
Gambar 2. 2	Mode Charging pada KERS.....	8
Gambar 2. 3	Mode Discharging pada KERS.....	9
Gambar 2. 4	Contoh Hybrid Motor-Generator.....	11
Gambar 2. 5	Toyota's Power Control Unit.....	12
Gambar 2. 6	Grafik Power Density dan Energy Density Berbagai Jenis Material.....	13
Gambar 2. 7	Komponen pada Alternator.....	15
Gambar 2. 8	Sistem Pengisian Baterai Pada Baterai.....	16
Gambar 2. 9	Gaya Hambat Pada Kendaraan.....	17
Gambar 3. 1	Flowchart Penelitian.....	20
Gambar 3. 2	Flowchart Penelitian Lanjutan 1.....	21
Gambar 3. 3	Flowchart Penelitian Lanjutan 2.....	22
Gambar 3. 4	Flowchart Penelitian Lanjutan 3.....	23
Gambar 3. 5	Dimensi Bus Transjakarta.....	24
Gambar 3. 6	Operasi Pengereman Pada Berbagai Posisi Pedal Gas.....	27
Gambar 3. 7	Mode Charging dengan Sambungan Clutch Terhubung.....	28
Gambar 3. 8	Mode Charging dengan Sambungan Clutch Terputus.....	29
Gambar 3. 9	Aliran Energi Pada Mode Discharging.....	30
Gambar 3. 10	Aliran Energi Pada Mode Engine.....	31
Gambar 4. 1	Pemodelan <i>Crankshaft Combustion Engine</i> Pada <i>Solidwork</i> .....	41
Gambar 4. 2	DynaStart SG-430.....	51
Gambar 4. 3	576V 60Ah Battery Pack.....	55

## DAFTAR GRAFIK

Grafik 4.1	<i>Driving Cycle</i> Bus Transjakarta.....	34
Grafik 4.2	Putaran <i>Combustion Engine</i> Pada Setiap Perlambatan.....	39
Grafik 4.3	Perbandingan Total Energi Pengereman yang Tersedia dan Energi Pengereman yang Dapat Dimanfaatkan.....	50
Grafik 4.4	Energi Pengereman yang Dapat Ditangkap oleh Generator.....	53
Grafik 4.5	Perbandingan Energi Pengereman yang Tersedia, Dapat Dimanfaatkan, dan Dapat Ditangkap oleh Generator.....	53

## DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1	Gear Ratio Bus Transjakarta.....	24
Tabel 3. 2	Spesifikasi Teknis Bus Transjakarta.....	24
Tabel 4.1	<i>Driving Cycle</i> Bus Transjakarta.....	32
Tabel 4.2	Gaya Pengereman Pada Setiap Perlambatan.....	36
Tabel 4.3	Putaran <i>Combustion Engine</i> Pada Setiap Perlambatan.....	38
Tabel 4.4	Energi Kinetik Rotasi <i>Flywheel</i> Pada Setiap Perlambatan.....	40
Tabel 4.5	Energi Kinetik Rotasi <i>Crankshaft</i> Pada Setiap Perlambatan.....	42
Tabel 4.6	Total Energi Kinetik Rotasi Kendaraan Pada Setiap Perlambatan.....	43
Tabel 4.7	Energi Kinetik Translasi yang Tersedia Selama Pengereman.....	45
Tabel 4.8	Energi Kinetik Translasi Kendaraan yang Dapat Dimanfaatkan Pada Setiap Perlambatan.....	47
Tabel 4.9	Energi Pengereman Kendaraan yang Tersedia Pada Setiap Perlambatan.....	48
Tabel 4.10	Energi Pengereman Kendaraan yang Dapat Dimanfaatkan Pada Setiap Perlambatan.....	49
Tabel 4.11	Energi Pengereman Kendaraan yang Dapat Ditangkap oleh Generator.....	52



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB 1 PENDAHULUAN

## 1.1. Latar Belakang

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Castrol Magnatec dalam *Castrol MAGNATEC STOP-START Index* tahun 2014 lalu, Jakarta menempati urutan pertama kota dengan tingkat kemacetan terparah di dunia dengan hasil 27,22% waktu perjalanan di Jakarta dihabiskan untuk berhenti. Hal ini tentu bukan merupakan prestasi yang membanggakan. Berbagai usaha telah dilakukan oleh pemerintah Jakarta untuk menanggulangi hal ini, salah satunya dengan proyek *Bus Rapid Transit (BRT)* atau lebih dikenal dengan Bus Transjakarta.

Bus Transjakarta memiliki banyak halte di sepanjang trayek bus tersebut. Dengan adanya halte, maka ada dua perilaku kendaraan yang terjadi yaitu perlambatan (ketika bus mendekati halte) dan percepatan (ketika bus meninggalkan halte). Putaran *combustion engine* yang tidak digunakan untuk memutar roda memiliki potensi energi yang dapat digunakan kembali untuk kebutuhan akselerasi kendaraan. Dengan memanfaatkan energi akibat perlambatan untuk membantu akselerasi ketika bus meninggalkan halte, maka gaya dorong kendaraan tidak akan ditanggung oleh *combustion engine* sepenuhnya. Untuk mencapai hal tersebut maka diperlukan teknologi untuk menyimpan energi akibat perlambatan Bus Transjakarta tersebut.

*Hybrid Electric Vehicle (HEV)* adalah salah satu metode yang dapat digunakan untuk memanfaatkan energi akibat perlambatan kendaraan tersebut. Metode ini menggunakan dua sumber tenaga bangkitan, biasanya merupakan kombinasi dari motor bakar (*combustion engine*) dan motor elektrik (*electric motor*). Energi kinetik yang timbul akibat perlambatan kendaraan akan dikonversi menjadi energi listrik yang kemudian disimpan oleh baterai sebagai *electrical energy storage*.

Pada Bus Transjakarta saat ini sebenarnya sudah terdapat pengaplikasian sistem *charging* baterai (*accumulator*) memanfaatkan energi dari *combustion engine*, yaitu menggunakan

*alternator*. *Alternator* biasa digunakan di industri otomotif untuk mengisi baterai dan untuk memberi daya sistem listrik saat kendaraan beroperasi. Bila beban yang ditanggung *alternator* lebih besar dari kemampuan *alternator* untuk menghasilkan daya maka baterai akan membantu memenuhi kebutuhan sistem kelistrikan kendaraan.

Dalam tugas akhir ini akan dianalisa pengaplikasian sistem *Hybrid Electric Vehicle (HEV)* pada kendaraan umum dengan memanfaatkan generator untuk mengisi daya pada baterai yang kemudian akan digunakan untuk membantu proses akselerasi. Dalam hal ini akan dianalisa energi bangkitan maksimum yang mampu dihasilkan oleh sistem pengereman dan seberapa besar energi yang mampu disimpan oleh baterai berdasarkan peta pengereman kendaraan Bus Transjakarta mengikuti *driving cycle* Pulogadung–Monas CB melalui pemodelan Bus Transjakarta.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Adapun rumusan masalah yang diambil pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa nilai energi pengereman pada kendaraan yang dapat ditangkap dan kemudian disimpan pada baterai?
2. Bagaimana spesifikasi generator yang dibutuhkan oleh kendaraan untuk mengisi baterai sesuai dengan putaran *combustion engine*?
3. Bagaimana spesifikasi baterai berdasarkan kriteria yang dibutuhkan?
4. Bagaimana aplikasi konsep *Hybrid Electrical Vehicle* pada bus Transjakarta?

## **1.3. Tujuan Tugas Akhir**

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

1. Mendapatkan nilai energi pengereman pada kendaraan yang dapat ditangkap dan disimpan dalam baterai.
2. Mendapatkan spesifikasi generator sesuai kebutuhan kendaraan untuk mengisi baterai.

3. Mendapatkan spesifikasi baterai sesuai dengan kebutuhan energi yang dapat ditangkap.
4. Mendapatkan metode pengaplikasian 'KERS' pada bus Transjakarta.

#### 1.4. Batasan Masalah

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

1. Kecepatan angin dianggap nol (udara dalam kondisi diam).
2. Percepatan atau perlambatan pada *driving cycle* adalah linier.
3. Kendaraan berjalan pada jalan datar dan lurus.
4. Radius dinamik roda dianggap konstan.
5. Tinggi pusat berat kendaraan 1/3 tinggi kendaraan.
6. Pemodelan berupa *Kinetic Energy Recovery System (KERS)*.
7. Tidak membahas *system control* terkait *Hybrid Motor-Generator*.
8. Sistem penyimpanan yang digunakan adalah hanya menggunakan baterai.

#### 1.5 Manfaat Tugas Akhir

Tugas akhir ini memiliki manfaat antara lain sebagai berikut :

1. Membantu mengembangkan desain *hybrid electric vehicle* dengan memanfaatkan sistem *KERS* pada kendaraan publik melalui pemodelan kendaraan Bus Transjakarta.
2. Menjadi referensi lebih lanjut untuk penelitian tentang sistem *KERS* di kemudian hari.

#### 1.6 Sistematika Penulisan Laporan

Sistematika penulisan terdiri dari 5 bab yang masing-masing bab berisi sebagai berikut:

1. Bab 1 Pendahuluan. Bab ini berisi latar belakang terkait analisa *KERS*, rumusan masalah, batasan masalah, manfaat tugas akhir dan sistematika penulisan laporan.
2. Bab 2 Dasar Teori dan Kajian Pustaka. Bab ini berisi dasar-dasar ilmu yang mendukung pengerjaan tugas akhir terkait dengan *KERS*.

3. Bab 3 Metodologi Penelitian. Bab ini berisi langkah–langkah pemodelan *KERS* dan berbagai pertimbangan dalam analisa pengereman.
4. Bab 4 Analisa dan Pembahasan. Bab ini berisi pembahasan terkait hasil pemodelan berupa grafik *KERS*, spesifikasi generator yang dibutuhkan, dan juga baterai yang digunakan dari hasil analisa energi pengereman pada Bus Transjakarta.
5. Bab 5 Kesimpulan dan Saran. Bab ini berisi kesimpulan dari hasil analisa yang telah dilakukan serta saran–saran agar tugas akhir ini menjadi lebih baik.

## BAB II DASAR TEORI

### 2.1 TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1.1 Pengertian *Kinetic Energy Recovery System (KERS)*

*Kinetic Energy Recovery System (KERS)* adalah suatu sistem otomotif yang bertujuan untuk memanfaatkan kembali energi kinetik kendaraan yang terbuang selama pengereman. Secara garis besar KERS adalah sebuah sistem pengereman dengan jalan mengkonversikan energi mekanis sistem menjadi bentuk energi lain yang dapat disimpan untuk digunakan kembali nanti pada saat dibutuhkan. Sistem *KERS* yang umum digunakan saat ini adalah secara *electrical* atau *mechanical*. Besarnya energi yang dihasilkan tersebut tergantung pada seberapa besar perlambatan kendaraan yang terjadi saat melewati *driving cycle* tertentu. Pada *driving cycle* perkotaan, kendaraan melakukan perlambatan dengan cukup sering dalam waktu yang cukup singkat.

Energi kinetik yang disimpan, dapat digunakan kembali sebagai tambahan daya dorong kendaraan saat melakukan akselerasi sehingga juga mampu menurunkan konsumsi bahan bakar kendaraan tersebut<sup>[5]</sup>. Energi yang digunakan untuk membantu akselerasi kendaraan dapat diperoleh dari hasil konversi energi listrik melalui putaran motor (*electrical*) ataupun melalui konversi putaran mekanis (*mechanical*). Sistem *KERS* secara *mechanical* biasanya menggunakan komponen berupa *flywheel* dan CVT. *Flywheel* merupakan sistem *KERS* secara mekanis dimana energi yang diserap selanjutnya disimpan dalam bentuk putaran oleh *flywheel* mengikuti perlambatan kendaraan saat itu. Besarnya energi yang mampu disimpan *flywheel* ini dipengaruhi oleh kecepatan sudut dan massa dari *flywheel* yang digunakan<sup>[1]</sup>.

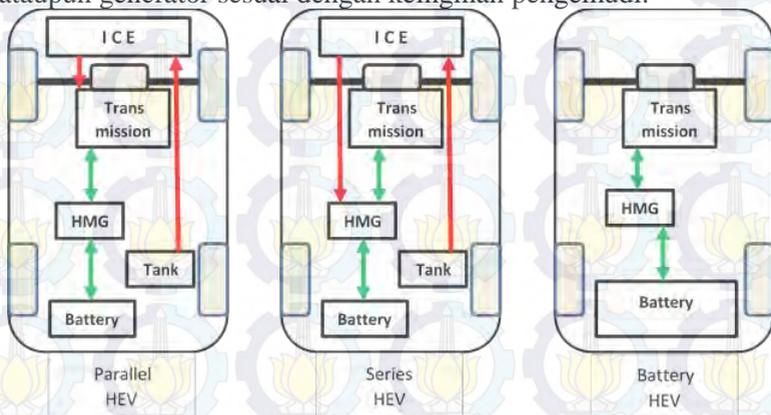
Sedangkan sistem *KERS* secara *electrical* biasanya tersusun atas tiga komponen utama yaitu *Hybrid Motor-Generator* (motor sekaligus generator DC), *Engine Control Unit (ECU)*, dan baterai. *Hybrid Motor-Generator* akan aktif menjadi generator untuk menangkap putaran *combustion engine* yang kemudian digunakan untuk mengisi baterai pada saat pengemudi melepas pedal gas. Pada

saat proses pengereman ini, sebagian energi kinetik digunakan untuk memutar generator, dikonversikan menjadi energi listrik, lalu disimpan di baterai.

### 2.1.2 Kendaraan Hybrid

Kendaraan *hybrid* adalah kendaraan dengan 2 atau lebih sumber tenaga sebagai penggerak kendaraan<sup>[5]</sup>. Sebuah kendaraan *hybrid* memiliki 2 sistem utama yaitu *energy storage* (*electrical* atau *mechanical*) dan *energy transmission* (motor listrik atau CVT). Motor listrik dapat juga berfungsi sebagai generator pengubah energi kinetik menjadi energi listrik yang selanjutnya disimpan oleh baterai sebagai energi kimia.

Sistem *KERS* pada *HEV* (*hybrid electric vehicle*) biasanya tersusun atas tiga komponen utama yaitu *Hybrid Motor-Generator* (motor sekaligus generator DC), *Electronic Control Unit (ECU)*, dan baterai. *Hybrid Motor-Generator* akan aktif menjadi generator hanya pada saat pengemudi melepas pedal gas. Pada saat proses pengereman ini, sebagian energi kinetik digunakan untuk memutar generator, dikonversikan menjadi energi listrik, dan disimpan di baterai. Komponen ECU berfungsi untuk mengontrol *Hybrid Motor-Generator* sehingga ia dapat berfungsi sebagai motor ataupun generator sesuai dengan keinginan pengemudi.



Gambar 2. 1 Klasifikasi Hybrid Electric Vehicle<sup>[10]</sup>

Gambar 2.1 menunjukkan klasifikasi dari *Hybrid Electric Vehicle (HEV)* berdasarkan bagaimana *power* dipasang ke *drivetrain*. Terdapat dua sumber tenaga yang memiliki sistem penyimpanan masing-masing yaitu tangki bahan bakar yang menyuplai *Internal Combustion Engine (ICE)* dan baterai yang menyuplai *Hybrid Motor-Generator (HMG)*. Berdasarkan bagaimana *power* dipasang ke *drivetrain* maka *Hybrid Electric Vehicle (HEV)* dapat diklasifikasikan menjadi 3, yaitu:

- *Parallel Hybrid*

Pada sistem *Parallel Hybrid*, *Internal Combustion Engine (ICE)* dan motor listrik sama-sama terhubung pada transmisi mekanik dan dapat menghasilkan daya secara bergantian, biasanya melalui transmisi konvensional.

- *Series Hybrid*

Pada sistem *Series Hybrid*, hanya motor listrik saja yang menggerakkan *drivetrain*, dan *ICE* berfungsi sebagai menghasilkan daya untuk generator mengisi baterai. *Series Hybrid* biasanya memiliki baterai dengan kapasitas yang lebih besar dibanding *parallel hybrid*, sehingga harganya lebih mahal.

- *Battery Electric Vehicle*

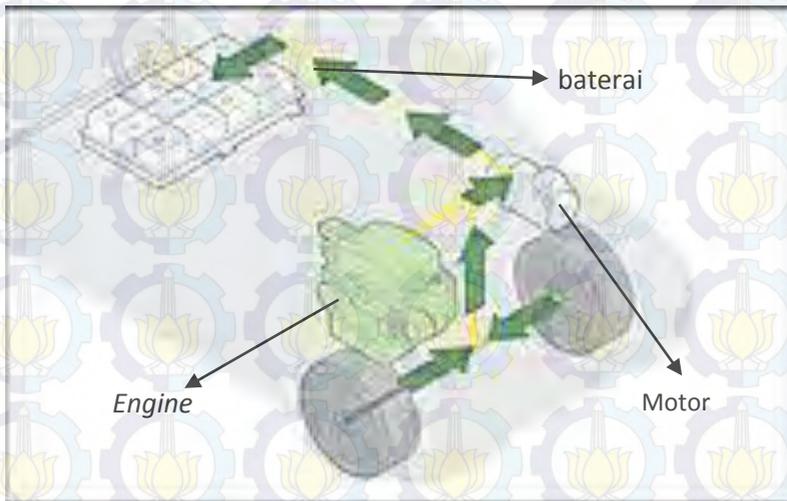
*Battery Electric Vehicle* adalah kendaraan yang sepenuhnya menggunakan daya listrik. *Battery Electric Vehicle* tidak memiliki *ICE* dan harus diisi ulang secara manual yaitu dengan menyambungkannya ke *charger*.

### **2.1.3 Sistem KERS Dengan Electric Motor**

Sistem *KERS* dengan *electric motor* merupakan suatu sistem dimana energi kinetik pada *combustion engine* dikonversi ke dalam bentuk energi listrik oleh motor listrik selaku generator. Energi pengereman tersebut kemudian disimpan secara kimiawi dalam baterai mengikuti perlambatan kendaraan saat itu. Besarnya energi yang mampu disimpan oleh baterai dipengaruhi oleh dimensi dan juga material yang digunakan.

### 2.1.3.1 Mode *Charging* dan *Mechanical Braking*

Mode *charging* terjadi saat putaran *combustion engine* yang tidak digunakan ketika pengereman diteruskan ke generator untuk dikonversi menjadi energi listrik untuk kemudian disimpan pada baterai sehingga baterai mencapai kapasitas maksimum mengikuti perlambatan saat itu. Saat pedal gas dilepas, maka ECU (Engine Control Unit) akan mengirimkan sinyal kepada *Hybrid Motor-Generator* sehingga mesin tersebut berfungsi sebagai generator yang mengkonversikan putaran *combustion engine* menjadi energi listrik dan kemudian disimpan pada baterai. Sedangkan *Mechanical Braking* berfungsi normal mengikuti gerakan pedal rem, karena *mechanical braking* diperlukan untuk membantu ketika kendaraan diharuskan berhenti secara mendadak dan membantu supaya kendaraan dapat berhenti secara sempurna.



Gambar 2. 2 Mode Charging pada KERS <sup>[10]</sup>

### 2.1.3.2 Mode *Discharging*

Mode *discharging* terjadi saat baterai terisi hingga mencapai kapasitas tertentu dan sesaat kemudian kendaraan diakselerasikan. Energi listrik yang tersimpan pada baterai akan dikonversi oleh motor listrik menjadi energi kinetik yang kemudian digunakan untuk membantu memutar *combustion engine* kendaraan mengikuti gerakan pedal gas. Dengan demikian akan terjadi peningkatan daya dan torsi yang membantu kendaraan untuk berakselerasi.



Gambar 2. 3 Mode *Discharging* pada KERS<sup>[10]</sup>

## 2.1.4 Operasional Pengereman Dengan KERS

### 2.1.4.1 *Braking*

Saat pedal gas ditarik maka *ECU (engine control unit)* akan mengirimkan sinyal kepada *Hybrid Motor-Generator* sehingga motor berfungsi sebagai generator sehingga putaran *combustion engine* yang tidak digunakan ketika pengereman dapat dikonversi menjadi energi listrik untuk selanjutnya disimpan pada baterai. Setelah putaran *combustion engine* menjadi semakin rendah maka *mechanical braking* dapat digunakan untuk membantu pengereman.

### **2.1.4.2 Acceleration Boost**

Pada saat kendaraan akan melakukan akselerasi maka energi yang tersimpan pada baterai dapat kembali digunakan untuk membantu *combustion engine*. Bersamaan dengan ditekannya pedal gas maka ECU akan mengirimkan sinyal yang memberikan instruksi kepada *Hybrid Motor-Generator* untuk mengkonversi energi listrik pada baterai dan menyalurkannya ke *combustion engine* untuk membantu akselerasi kendaraan.

### **2.1.4.3 Netral**

Saat kapasitas penyimpanan energi pada baterai maksimum namun kendaraan masih melakukan perlambatan, maka ECU akan mengirimkan sinyal kepada *Hybrid Motor-Generator* agar putaran *combustion engine* tidak lagi digunakan untuk melakukan *charging* pada baterai, melainkan hanya untuk memenuhi kebutuhan daya sistem kelistrikan pada kendaraan. Pada kondisi ini gaya pengereman yang dibutuhkan oleh kendaraan untuk melakukan perlambatan akan ditanggung sepenuhnya oleh *mechanical braking*.

## **2.1.5 Komponen Utama Pada KERS**

### **2.1.5.1 Hybrid Motor-Generator**

*Hybrid Motor-Generator* adalah salah satu komponen *Hybrid Electric Vehicle* yang berfungsi untuk mengkonversi energi kinetik dari putaran *combustion engine* ketika terjadi perlambatan menjadi energi listrik yang kemudian disimpan pada baterai, atau sebaliknya. Ketika terjadi pengereman, *Hybrid Motor-Generator* (seperti ditunjukkan pada gambar 2.4) akan berfungsi sebagai generator yang mengkonversi putaran *combustion engine* menjadi energi listrik untuk selanjutnya disimpan pada baterai. Sedangkan ketika kendaraan melakukan akselerasi, *Hybrid Motor-Generator* akan berfungsi sebagai motor yang mengkonversi energi listrik yang sebelumnya tersimpan pada baterai menjadi energi mekanik untuk membantu kerja *combustion engine* dalam memenuhi kebutuhan daya kendaraan untuk melakukan akselerasi. *Hybrid Motor-Generator* diatur oleh suatu *Engine Control Unit (ECU)*.



Gambar 2. 4 Contoh Hybrid Motor-Generator<sup>[11]</sup>

Nilai energi listrik yang mampu dihasilkan oleh generator dapat dihitung dengan cara mengalikan tegangan sistem (generator) dengan kuat arus yang dihasilkan dan waktu, seperti ditunjukkan pada persamaan 2.1.

$$E_{listrik} = V \cdot I \cdot t \quad (2.1)$$

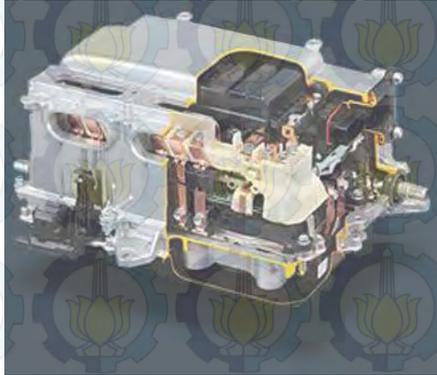
Nilai Efisiensi generator didapatkan dengan membandingkan nilai energi listrik yang dihasilkan generator dan nilai energi kinetik yang masuk ke generator seperti pada persamaan 2.2.

$$\eta = \frac{E_{listrik}}{E_{mekanik}} \times 100\% \quad (2.2)$$

#### 2.1.5.2 Engine Control Unit (ECU)

*Engine Control Unit* merupakan suatu komponen pada kendaraan yang berfungsi untuk melakukan optimisasi kinerja kendaraan. ECU bekerja dengan cara memonitoring sinyal-sinyal yang dihasilkan oleh sensor-sensor yang tersebar pada kendaraan. Melalui sinyal-sinyal yang diterima oleh ECU dari sensor, *Engine Control Unit* akan melakukan perhitungan dan menggunakan peta

kinerja multidimensi (look-up table) untuk melakukan optimasi kinerja dari kendaraan itu sendiri. Contoh *Engine Control Unit* yang digunakan pada Toyota Prius ditunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Toyota's Power Control Unit<sup>[11]</sup>

*ECU* pada kendaraan pada umumnya mengatur beberapa hal, antara lain:

- Kontrol injeksi bahan bakar yang berfungsi untuk mengendalikan penggunaan bahan bakar yang diinjeksikan serta besarnya udara kedalam ruang bakar sehingga penggunaan bahan bakar kendaraan paling efisien,
- Kontrol waktu pengapian yang berfungsi mengendalikan waktu/timing pengapian yang disesuaikan dengan kecepatan dan medan yang dilalui.
- Kontrol waktu katup yang berfungsi mengatur waktu /timing yang paling tepat untuk membuka dan menutup katup pemasukan dan pembuangan.
- Pada kendaraan hybrid atau *HEV*, *ECU* memiliki fungsi khusus sebagai pengatur fungsi *Hybrid Motor-Generator*.

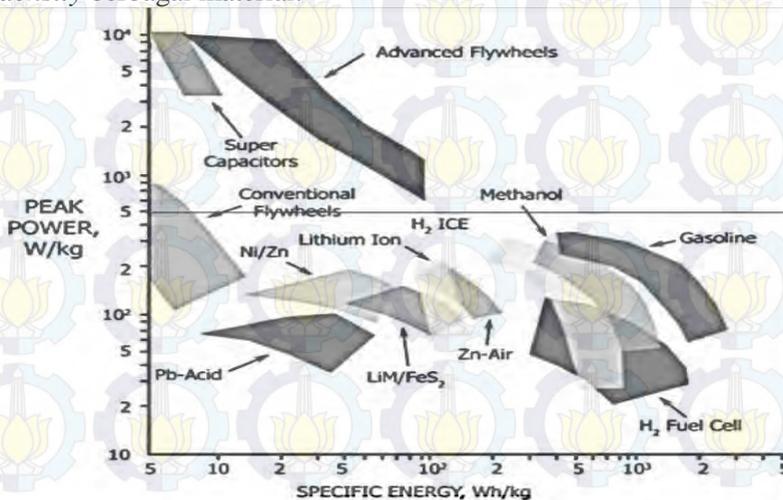
### 2.1.5.3 *Battery*

Sebuah baterai, yang merupakan suatu sel listrik, adalah perangkat yang dapat menghasilkan energi listrik dari suatu reaksi kimia. Ada beberapa faktor yang perlu diperhatikan dalam pemilihan material baterai antara lain *power density* dan *energy*

*density*. Sebelumnya kendaraan *hybrid* masih menggunakan baterai *Nickel Metal Hydride* (NiMH) sebagai penyimpan energi, namun sekarang penggunaan baterai jenis ini mulai digantikan oleh jenis *Lithium Ion* (Li-Ion)<sup>[3]</sup>.

*Energy density* atau rapat energi menyatakan kemampuan baterai untuk menyimpan energi yang dinyatakan dengan Wh/kg. Sedangkan *power density* atau rapat daya menyatakan kemampuan daya dari suatu penyimpan energi yang dinyatakan dengan Watt/kg. *Power density* yang tinggi cocok untuk aplikasi yang memerlukan charge-discharge pada daya yang besar dengan cepat.

Agar mobil bisa melakukan percepatan dan perlambatan dengan cepat maka diperlukan sistem penyimpan energi yang memiliki *power density* besar. *Energy density* yang besar penting agar suatu mobil tidak perlu banyak membawa alat penyimpan energi yang besar dan berat untuk mendapatkan jarak tempuh tertentu. Idealnya, kendaraan memerlukan penyimpan energi yang mempunyai *energy density* dan *power density* yang besar agar tidak terlalu besar dan juga bisa melakukan percepatan dengan baik. Berikut adalah grafik perbandingan *power density* dan *energy density* berbagai material:



Gambar 2. 6 Grafik Power Density dan Energy Density Berbagai Jenis Material<sup>[2]</sup>

### 2.1.5.3.1 Kapasitas Baterai

Kapasitas baterai adalah jumlah muatan listrik yang dapat diberikan oleh baterai pada voltase tertentu. Kapasitas arus listrik baterai yang memiliki satuan ampere-hour (Ah) dapat dihitung dengan cara membagi jumlah energi listrik yang akan disimpan dengan voltase dari baterai itu sendiri, sehingga dapat dirumuskan:

$$Q = \frac{E_{listrik}}{V} \quad (2.3)$$

### 2.1.5.3.2 Rangkaian Baterai

Rangkaian baterai memiliki peranan penting dalam menentukan kapasitas dan juga voltase dari sistem penyimpanan. Terdapat beberapa tipe rangkaian, antara lain:

- Rangkaian Seri

Ketika beberapa baterai dirangkai secara seri, maka nilai tegangan total dari rangkaian baterai tersebut didapat dengan menjumlahkan tiap nilai tegangan dari masing-masing baterai. Nilai Ah dari rangkaian baterai yang dirangkai secara seri adalah tetap (sama dengan nilai Ah dari masing-masing baterai penyusun rangkaian). Cara merangkainya adalah dengan menghubungkan terminal positif dari suatu baterai dengan terminal negatif baterai lain nya.

- Rangkaian Paralel

Ketika beberapa baterai dirangkai secara paralel, maka nilai tegangan total rangkaian baterai tersebut adalah tetap (sama dengan nilai tegangan dari masing-masing baterai penyusun rangkaian). Nilai AH dari rangkaian baterai yang dirangkai secara paralel akan meningkat, yang didapat dengan menjumlahkan tiap nilai Ah dari masing-masing baterai. Cara merangkainya adalah dengan cara menghubungkan terminal positif dari suatu baterai dengan terminal positif baterai lain nya.

- Rangkaian Seri-Paralel

Merupakan kombinasi dari rangkaian seri dan paralel. Pada jenis rangkaian ini, akan terjadi kenaikan nilai tegangan dan nilai Ah sesuai dengan jumlah baterai yang terdapat pada rangkaian.

### 2.1.6 Alternator

Alternator adalah perangkat pada kendaraan yang berfungsi untuk mengubah energi mekanik yang didapatkan dari *combustion engine* menjadi energi listrik<sup>[12]</sup>. Energi kinetik dari *combustion engine* yang berupa gerak putar dihubungkan dengan rotor pada alternator melalui *pulley* dan sebuah *belt*. Pada saat rotor berputar, alternator menghasilkan arus listrik bolak-balik yang kemudian disearahkan oleh diode-diode yang biasa disebut dengan *rectifier*.

Komponen utama yang terdapat pada alternator antara lain rotor coil yang berfungsi untuk menghasilkan medan magnet, stator coil yang berfungsi untuk menghasilkan arus listrik bolak-balik dan beberapa diode yang berfungsi untuk menyearahkan arus. Sedangkan komponen-komponen yang diperlukan dalam alternator antara lain *brush* dan *slip ring* yang berfungsi sebagai penghubung arus listrik yang menuju ke rotor coil, *pulley* yang berfungsi untuk menerima gaya mekanik dari mesin yang dihubungkan melalui sebuah *belt*, dan kipas yang berfungsi untuk mendinginkan rotor, stator, dan diode<sup>[13]</sup>.



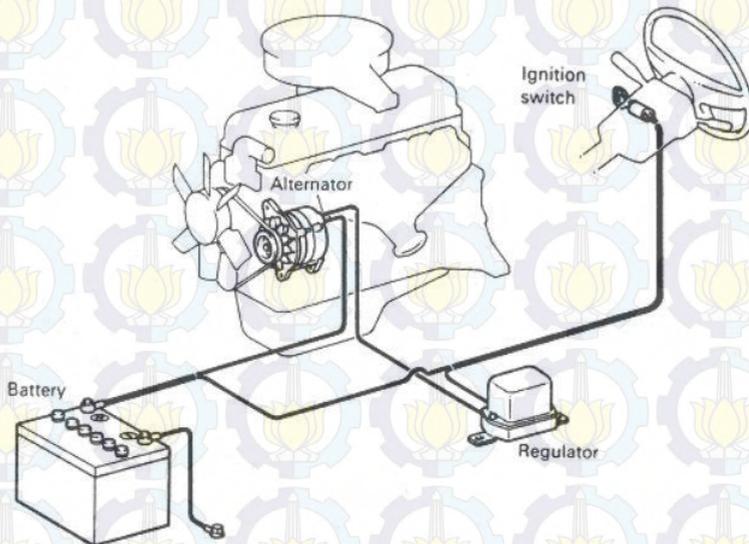
Gambar 2. 7 Komponen pada Alternator<sup>[13]</sup>

Muatan listrik pada baterai akan berkurang seiring pemakaian kendaraan, oleh karena itu diperlukan suatu sistem pengisian ulang agar tidak terjadi penurunan tegangan yang dapat

menyebabkan komponen-komponen yang bergantung pada baterai menjadi rentan akan kerusakan.

Alternator, yang berfungsi untuk menghasilkan arus listrik, tersambung dengan ICE melalui sebuah *belt*. Seiring dengan perputaran poros *combustion engine* maka alternator akan menghasilkan arus listrik, akan tetapi arus listrik yang dihasilkan oleh alternator tidak stabil karena berubah-ubah seiring dengan putaran *combustion engine*. Oleh karena itu, dibutuhkan *regulator* yang berfungsi untuk mengatur output tegangan dari *alternator* agar tetap stabil pada putaran mesin yang berbeda-beda.

Skema pengisian baterai oleh alternator pada kendaraan ditunjukkan pada gambar 2.8 di bawah ini.



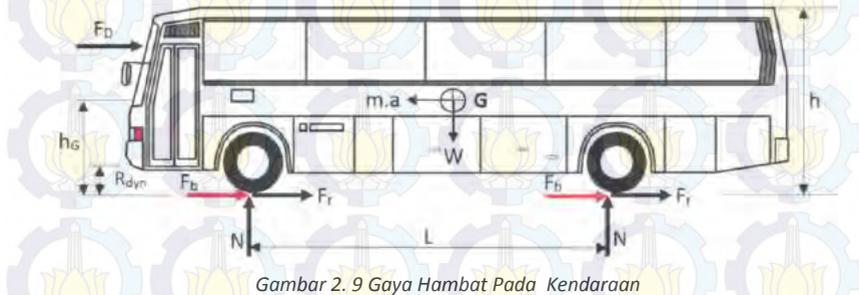
Gambar 2. 8 Sistem Pengisian Baterai Pada Baterai<sup>[13]</sup>

## 2.2 Dinamika Kendaraan

### 2.2.1 Gaya Hambat Kendaraan

Sebuah kendaraan yang melaju ataupun melambat akan mengalami gaya-gaya luar yang menghambat gerak kendaraan tersebut. Pada gambar 2.9 memperlihatkan gaya hambat yang bekerja terhadap kendaraan yang sedang melaju. Saat berjalan,

kendaraan akan mengalami gaya hambat yang meliputi gaya hambat *rolling* ( $F_r$ ); gaya hambat *drag* ( $F_D$ ); Gaya hambat inersia ( $F_a$ ) dan Gaya hambat *gradien* ( $F_g$ ).



Gambar 2. 9 Gaya Hambat Pada Kendaraan

### 2.2.1.1 Gaya Hambat *Drag* ( $F_D$ )

Besarnya gaya hambat drag dipengaruhi oleh kecepatan relatif udara terhadap kendaraan ( $V_u$ ); massa jenis udara ( $\rho_u$ ); luas frontal kendaraan ( $A$ ) dan koefisien *drag* ( $C_D$ )<sup>[8]</sup>. Karena udara dianggap diam maka kecepatan relatif udara terhadap kendaraan sama dengan kecepatan kendaraan itu sendiri. Gaya hambat drag dituliskan pada persamaan 2.4.

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho_u \cdot C_D \cdot A_f \cdot V_u^2 \quad (2.4)$$

### 2.2.1.2 Gaya Hambat *Rolling* ( $F_r$ )

Gaya hambat rolling terjadi akibat gesekan antara roda terhadap jalan yang besarnya dipengaruhi oleh *rolling coefficient* ( $C_r$ ); berat kendaraan ( $W$ ) dan sudut tanjakan pada jalan ( $\theta$ )<sup>[8]</sup>. Gaya hambat rolling ditulis dalam persamaan 2.5.

$$F_r = C_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\theta) \quad (2.5)$$

### 2.2.1.3 Gaya Hambat *Gradien* ( $F_g$ )

Gaya hambat *gradien* terjadi saat kendaraan menanjak yang besarnya dipengaruhi oleh berat kendaraan dan sudut tanjakan<sup>[8]</sup>. Gaya hambat gradien ditulis dalam persamaan 2.6.

$$F_g = m \cdot g \cdot \sin(\theta) \quad (2.6)$$

### 2.2.1.4 Gaya Hambat Inersia Kendaraan ( $F_a$ )

Gaya hambat inersia merupakan gaya hambat yang terjadi saat kendaraan diakselerasikan dari kecepatan rendah hingga tinggi atau sebaliknya dan arahnya berlawanan dengan arah gerak kendaraan. Gaya hambat inersia ditulis dalam persamaan 2.7.

$$F_a = m \cdot a \quad (2.7)$$

### 2.2.1.5 Gaya Pengereman Bus Transjakarta

Gaya pengereman kendaraan merupakan total gaya hambat yang bekerja terhadap kendaraan Bus Transjakarta pada saat kendaraan melakukan perlambatan, yang didapat dari FBD pengereman seperti pada persamaan 2.8.

$$F_b = F_D + F_r + F_g - F_a \quad (2.8)$$

### 2.2.2 Torsi Pengereman Bus Transjakarta

Torsi pengereman yang terjadi pada kendaraan didapat dari perkalian antara gaya pengereman terhadap jari-jari roda kendaraan seperti pada persamaan 2.9.

$$T_b = F_b \times r_{dyn} \quad (2.9)$$

### 2.2.3 Daya Pengereman Bus Transjakarta

Daya pengereman yang terjadi pada kendaraan didapat dari perkalian antara torsi pengereman terhadap kecepatan sudut roda mengikuti driving cycle yang ada seperti pada persamaan 2.10.

$$P_b = T_b \cdot \omega_{roda} \quad (2.10)$$

$$\omega_{roda} = V / R_{dyn} \quad (2.11)$$

### 2.2.4 Torsi Engine Bus Transjakarta

Torsi *engine* dari Bus Transjakarta didapat dari membagi Torsi pengereman terhadap rasio transmisi, rasio gardan, dan juga efisiensi transmisi<sup>[8]</sup>.

$$T_e = \frac{T_b}{i_t \times i_g \times \eta_t} \quad (2.12)$$

### 2.2.5 Putaran *Engine* Bus Transjakarta

Putaran *engine* dari Bus Transjakarta didapat dari membagi daya *engine* (hp) dengan torsi *engine* (lb.in) kemudian dikalikan dengan 63000<sup>[2]</sup>.

$$n_e = \frac{P_b \times 63000}{T_e} \quad (2.13)$$

### 2.2.6 Energi Pengereman Bus Transjakarta

Energi pengereman dari Bus Transjakarta didapatkan melalui perhitungan energi kinetik rotasi *combustion engine* dan energi kinetik translasi yang didapat dari pengereman pada roda kendaraan.

#### 2.2.6.1 Energi Kinetik Rotasi *Combustion Engine*

Energi kinetik rotasi didapat dengan mengurangi energi kinetik rotasi dari *engine* ketika awal pengereman dengan energi kinetik rotasi *engine* di akhir. Energi bangkitan pengereman Bus Transjakarta dicari dengan persamaan 2.14<sup>[4]</sup>.

$$E_{k \text{ rotasi}} = \frac{1}{2} I. \omega_{awal}^2 - \frac{1}{2} I. \omega_{akhir}^2 \quad (2.14)$$

#### 2.2.6.2 Energi Kinetik Translasi Kendaraan

Energi kinetik translasi didapat dengan mengurangi energi kinetik translasi ketika awal pengereman dengan energi kinetik translasi di akhir pengereman. Energi bangkitan pengereman Bus Transjakarta dicari dengan persamaan 2.15<sup>[4]</sup>.

$$E_{k \text{ translasi}} = \frac{1}{2} m. V_{awal}^2 - \frac{1}{2} m. V_{akhir}^2 \quad (2.15)$$



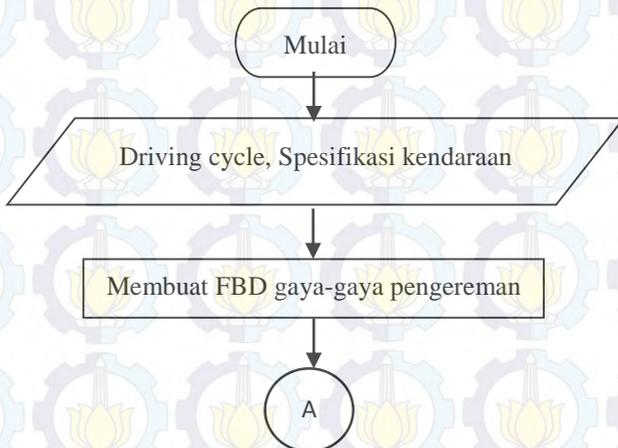
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

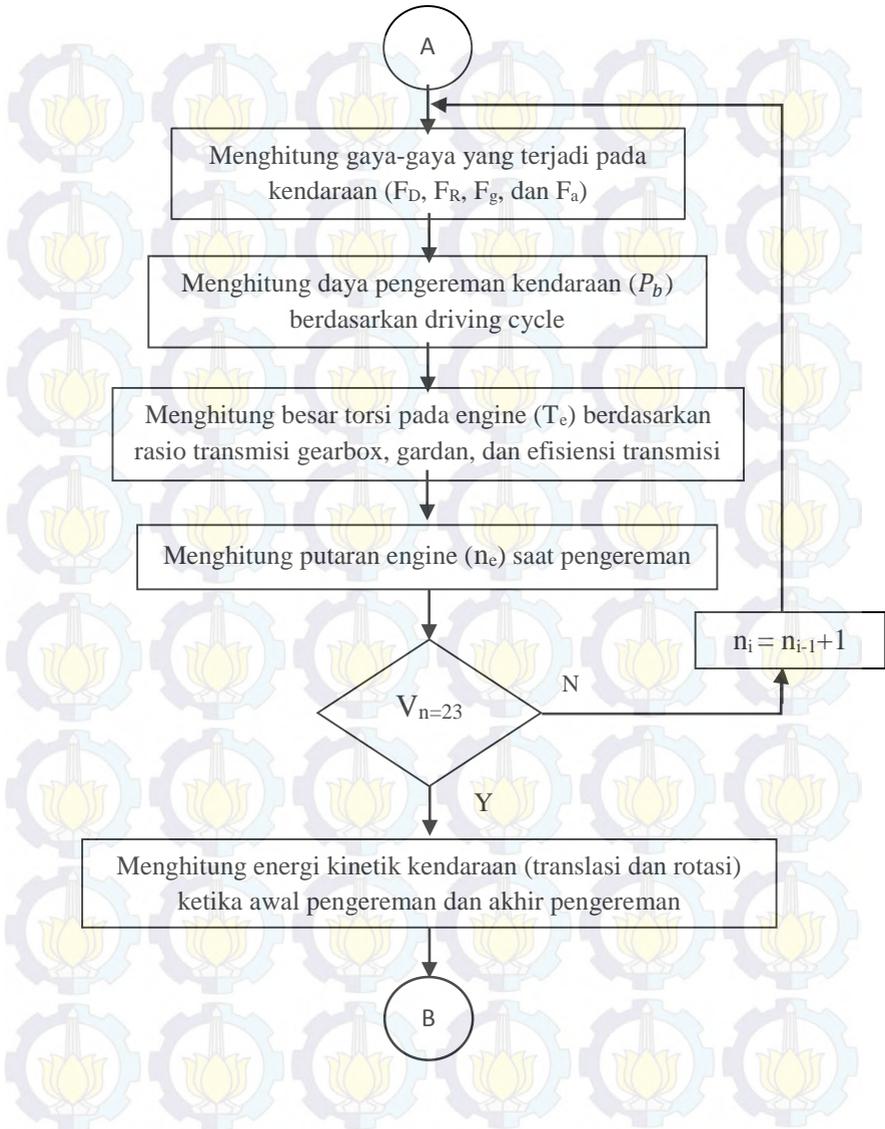
### 3.1 Prosedur Penelitian

Pada penyusunan Tugas Akhir ini prosedur penelitian dilakukan dalam tiga tahap. Tahap awal dari penelitian ini adalah dilakukan studi mengenai analisa-analisa tentang *kinetic energy recovery system* yang berasal dari buku, jurnal, maupun penelitian terdahulu. Tahap yang kedua adalah penentuan jenis mobil yang akan dijadikan obyek penelitian dan metode penyimpanan energi hasil pengereman. Kendaraan yang akan dianalisa dalam penelitian ini adalah Bus Transjakarta dan metode penyimpanan energi yang dipilih adalah menggunakan baterai. Pada tahap ketiga atau tahap terakhir ini setelah didapatkan data spesifikasi dari Bus Transjakarta dan spesifikasi baterai yang akan digunakan maka dilakukan analisa pengereman pada kendaraan tersebut. Setelah didapatkan energi pengereman kendaraan berdasarkan driving cycle maka dapat ditentukan kapasitas baterai yang dibutuhkan.

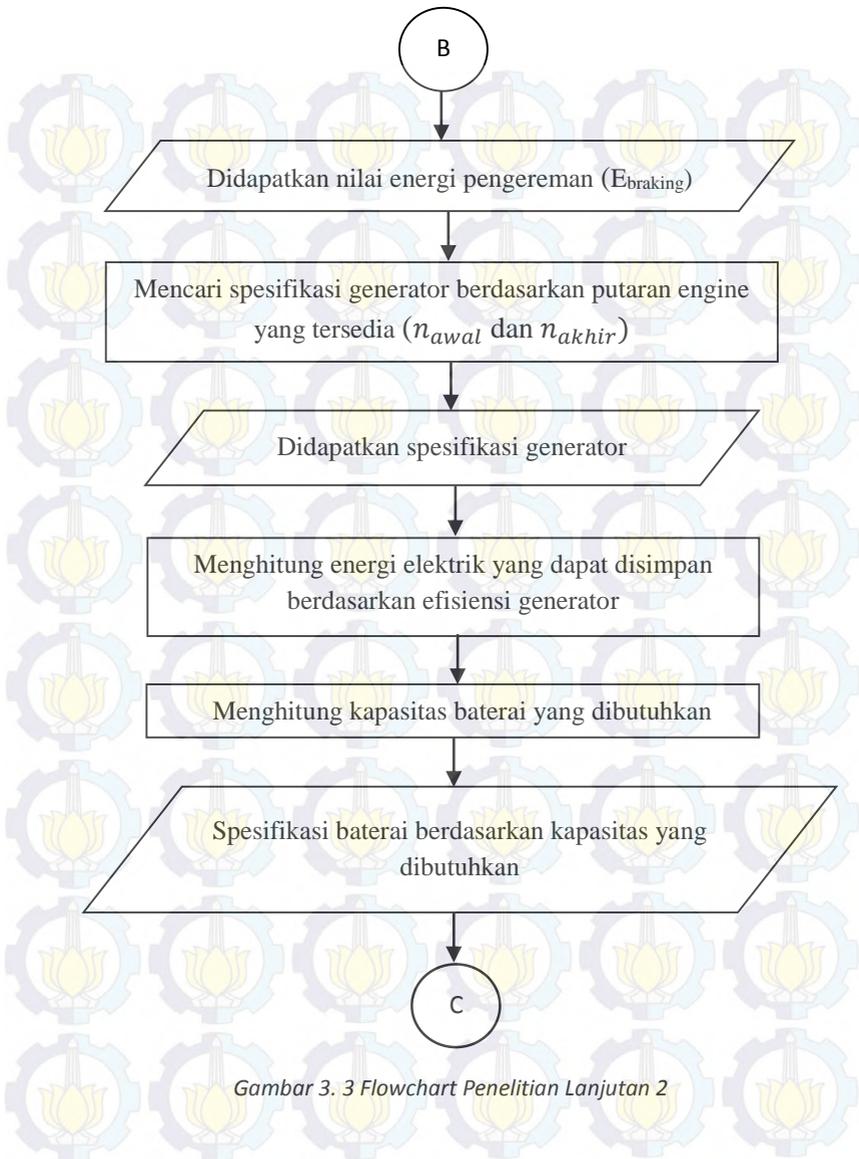
### 3.2 Diagram Alir Pemodelan



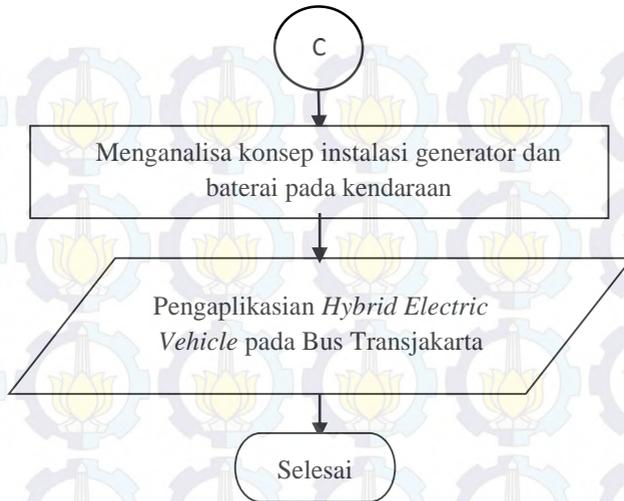
Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian



Gambar 3. 2 Flowchart Penelitian Lanjutan 1



Gambar 3. 3 Flowchart Penelitian Lanjutan 2



Gambar 3. 4 Flowchart Penelitian Lanjutan 3

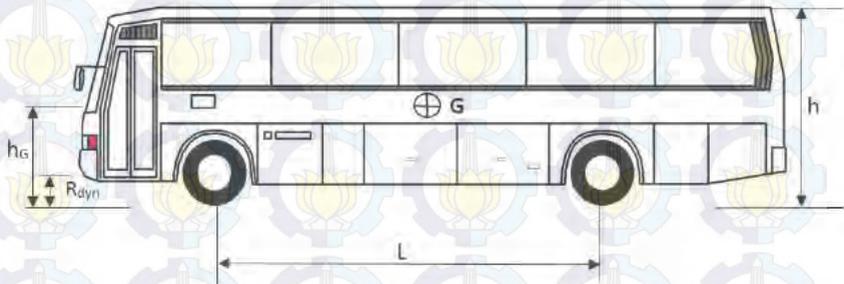
### 3.3 Analisa Pengereman

Untuk dapat menganalisa suatu sistem pengereman Bus Transjakarta, maka data awal yang dibutuhkan berupa data teknis kendaraan dan FBD kendaraan. Untuk mengetahui besar gaya pengereman yang dihasilkan oleh Bus Transjakarta, maka digunakan gaya-gaya luar yang bekerja terhadap Bus Transjakarta saat mengikuti *driving cycle*. Gaya luar yang dimaksud meliputi gaya hambat angin (*drag force*), gaya hambat inersia, gaya pengereman itu sendiri, gaya hambat *rolling* dan gaya hambat terhadap gradien jalan. Gaya hambat ini selanjutnya dimodelkan mengikuti *driving cycle* Bus Transjakarta sehingga dapat diketahui besar gaya, torsi, dan daya pengereman. Selanjutnya berdasarkan efisiensi transmisi maka putaran dari *combustion engine* ketika pengereman dapat diketahui. Sehingga dengan demikian besarnya energi putaran *combustion engine* yang terbuang selama pengereman dapat diketahui. Dengan mengetahui besar energi yang dihasilkan pada setiap perlambatan mengikuti peta distribusi pengeremannya, maka selanjutnya dapat ditentukan spesifikasi

generator dan baterai untuk digunakan sebagai *energy storage system* pada Bus Transjakarta.

### 3.4 Data Kendaraan

Data operasional diperoleh melalui observasi lapangan saat Bus Transjakarta beroperasi pada setiap halte disepanjang rute dalam bentuk *driving cycle* yang konstan. Untuk dimensi Bus Transjakarta dapat dilihat pada gambar 3.5 dan untuk data spesifikasi teknisnya pada table 3.1. Data-data tersebut didapatkan melalui katalog Bus Hino RN 285 CR.



Gambar 3. 5 Dimensi Bus Transjakarta

Tabel 3. 1. Gear Ratio Bus Transjakarta

Gear	1	2	3	4	5	6	Final Gear
Nilai	7,716	4,423	2,854	1,915	1,301	1,000	4,300

Tabel 3. 2 Spesifikasi Bus Transjakarta

Dimensi kendaraan	Simbol	Besaran	Satuan
Luas frontal kendaraan	A	5,4	m <sup>2</sup>
Jarak sumbu roda	L	6,0	m
Jarak roda depan terhadap pusat berat	La	3,636	m
Jarak roda belakang terhadap pusat berat	Lb	2,363	m
Ketinggian pusat berat terhadap permukaan jalan	$h_G$	0,925	m
<b>Massa dan berat kendaraan</b>			

Massa kendaraan	M	16500	Kg
Berat kendaraan	W	161865	N
Massa axel depan	$m_f$	6500	Kg
Berat axel depan	$W_f$	63765	N
Massa axel belakang	$m_r$	10000	Kg
Berat axel belakang	$W_r$	98100	N
<b>Konstanta</b>			
Koefisien drag	$C_D$	0,8	-
Koefisien rolling	$C_r$	0,006	-
Massa jenis udara	$\rho_u$	1,2	Kg/m <sup>3</sup>
Percepatan gravitasi	G	9,81	m/s <sup>2</sup>
<b>Roda</b>			
Diameter	D	1140	mm
Radius dinamik	$r_{dyn}$	0,546	m

### 3.5 Metode Perhitungan

#### 3.5.1 Metode Perhitungan Gaya-Gaya Pengereman Kendaraan

Langkah-langkah yang perlu dilakukan dalam analisa gaya-gaya pengereman kendaraan Bus Transjakarta ini adalah sebagai berikut :

- a. Langkah awal dari perhitungan ini adalah membuat Free Body Diagram dari gaya-gaya pengereman yang terjadi pada kendaraan Bus Transjakarta, antara lain gaya berat kendaraan ( $W$ ), gaya hambat *drag* ( $F_D$ ), gaya hambat *Rolling* ( $F_r$ ), gaya hambat *Gradien* ( $F_g$ ), gaya hambat inersia kendaraan ( $F_a$ ), dan gaya rem ( $F_b$ ).
- b. Menghitung gaya-gaya pengereman yang terjadi pada kendaraan Bus Transjakarta, antara lain gaya berat kendaraan ( $W$ ), gaya hambat *drag* ( $F_D$ ), gaya hambat *Rolling* ( $F_r$ ), gaya hambat *Gradien* ( $F_g$ ), gaya hambat inersia kendaraan ( $F_a$ ), dan gaya pengereman ( $F_b$ ).

### 3.5.2 Metode Perhitungan Energi Kinetik *Engine* Ketika Pengereman

- a. Menghitung torsi pengereman ( $T_b$ ) yang terjadi dengan cara mengalikan gaya pengereman ( $F_b$ ) dengan jari-jari roda kendaraan ( $r_{dyn}$ ).
- b. Menghitung daya pengereman ( $P_b$ ) yang terjadi dengan cara mengalikan torsi pengereman ( $T_b$ ) dengan kecepatan sudut roda ( $\omega_{roda}$ ) mengikuti driving cycle kendaraan.
- c. Menghitung torsi engine bus ( $T_e$ ) dengan cara membagi torsi pengereman ( $T_b$ ) dengan *gear ratio* ( $i_t$ ), *final drive ratio* ( $i_g$ ), dan efisiensi transmisi ( $\eta_t$ ).
- d. Menghitung putaran engine bus ( $n_e$ ) dengan cara mengalikan daya pengereman bus ( $P_b$ ) dengan 63000, kemudian membaginya dengan torsi engine ( $T_e$ ).
- e. Menghitung energi kinetik translasi kendaraan ketika pengereman dan kondisi *clutch* masih terhubung dengan membandingkan perubahan energi kinetik translasi kendaraan pada awal pengereman ( $E_k \text{ translasi awal}$ ) dengan energi kinetik translasi kendaraan di akhir pengereman ( $E_k \text{ translasi akhir}$ ).
- f. Menghitung energi kinetik rotasi *combustion engine* ketika pengereman dan kondisi *clutch* terputus dengan membandingkan perubahan energi kinetik rotasi *combustion engine* pada awal pengereman ( $E_k \text{ rotasi awal}$ ) dengan energi kinetik rotasi *combustion engine* di akhir pengereman ( $E_k \text{ rotasi akhir}$ ).

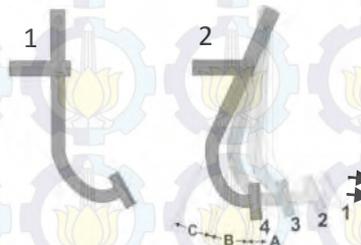
### 3.5.3 Metode Perhitungan Kapasitas Baterai dan Instalasi Baterai

- a. Menghitung energi listrik ( $E_{listrik}$ ) yang dapat dihasilkan oleh generator berdasarkan efisiensi generator ( $\eta$ ).
- b. Menghitung kapasitas baterai ( $Q$ ) yang dibutuhkan berdasarkan total energi bangkitan yang diperoleh melalui proses pengereman yang dihasilkan oleh kendaraan.

- c. Menganalisa instalasi baterai dan generator pada kendaraan dan kesesuaian dimensi baterai dengan ketersediaan ruang pada kendaraan.

### 3.6 Prinsip Kerja *Generator Braking–Mechanical Braking*

Prinsip kerja sistem pengereman yang akan diaplikasikan pada penelitian ini adalah sistem pengereman yang terdiri dari *generator braking* dan *mechanical braking*. Sistem *generator braking* didesain untuk beroperasi ketika pedal gas ditarik, dan menyalurkan energi yang tersimpan pada baterai untuk membantu akselerasi kendaraan ketika pedal gas ditekan hingga posisi tertentu, sedangkan *mechanical braking* berfungsi seperti pada kendaraan lain yaitu melalui pedal rem. *Mechanical braking* tetap diperlukan untuk membantu kendaraan untuk berhenti sempurna. Hal ini terjadi karena semakin kecil kecepatan kendaraan maka semakin kecil energi pengereman yang mampu ditangkap oleh generator. Untuk ilustrasi sistem pengereman, dapat dilihat pada ilustrasi pada gambar 3.6.



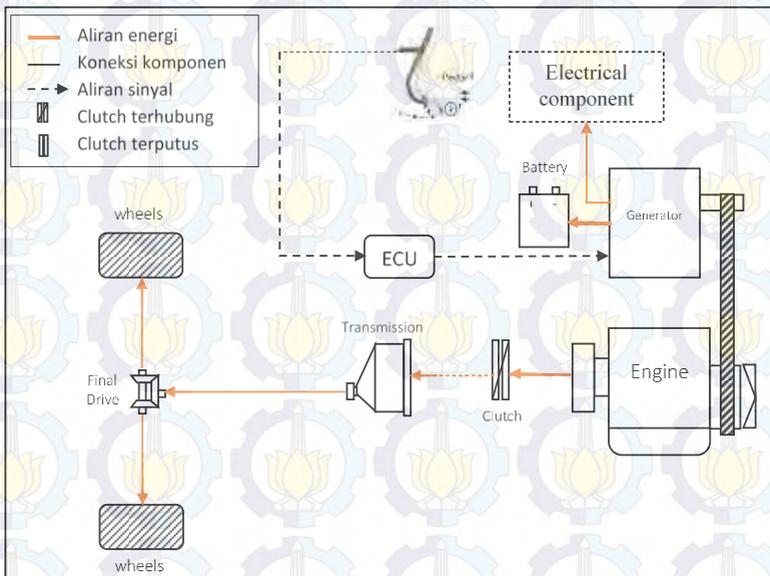
Gambar 3. 6 Operasi Pengereman Pada Berbagai Posisi Pedal Gas

Pada gambar 3.6 (1) menunjukkan posisi pedal gas ketika berada dalam kondisi netral. Sedangkan pada gambar 3.6. (2) menunjukkan berbagai perubahan posisi pada pedal gas. Ketika terjadi perubahan posisi pedal gas karena deselerasi dari posisi (4) menuju ke (3), kemudian ke (2), dan seterusnya maka *generator braking* akan aktif dan menangkap putaran *combustion engine* untuk selanjutnya disimpan pada baterai. Sebaliknya, ketika terjadi perubahan posisi pedal gas karena akselerasi, baik dari posisi (1),

(2), maupun (3), maka motor akan aktif dan menyalurkan energi yang tersimpan pada baterai untuk membantu proses akselerasi.

### 3.6.1 Mode Charging

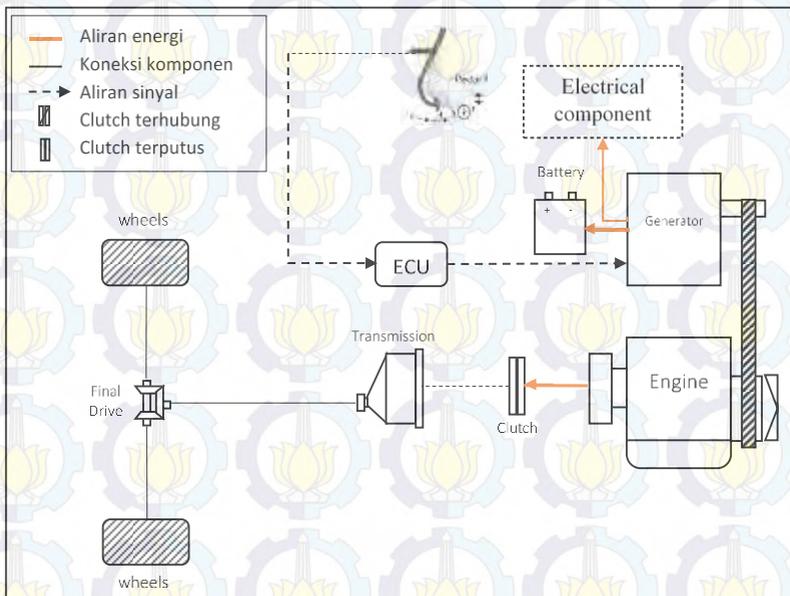
Saat pedal gas dilepas, maka *ECU* (*Engine Control Unit*) akan mengirimkan sinyal kepada *Hybrid Motor-Generator* sehingga mesin tersebut berfungsi sebagai generator yang mengkonversikan energi kinetik dari putaran *combustion engine* yang terjadi ketika pengereman menjadi energi listrik untuk kemudian disimpan pada baterai. Mode *charging* terjadi saat energi kinetik putaran *combustion engine* diteruskan oleh generator untuk dikonversi menjadi energi listrik untuk kemudian disimpan pada baterai sehingga baterai mencapai kapasitas maksimum mengikuti perlambatan saat itu.



Gambar 3. 7 Mode Charging dengan Sambungan Clutch Terhubung

Pada gambar 3.7 ditunjukkan bagaimana skema aliran energi pada mode *charging* dengan sambungan *clutch* antara

*combustion engine* dan gearbox transmisi terhubung. Pada kondisi ini sudah mulai terjadi perlambatan yaitu pengemudi sudah mulai melepas pedal gas sehingga ECU mengirimkan sinyal kepada *Hybrid Motor-Generator* sehingga berfungsi sebagai generator yang menangkap putaran *combustion engine* untuk mengisi baterai dan mendayai sistem kelistrikan pada mobil. Pada kondisi ini generator akan menjadi beban yang mengurangi putaran *combustion engine* sehingga berfungsi hampir seperti *engine brake*. Kondisi ini diasumsikan berlangsung dari awal pengereman hingga setengah dari total waktu pengereman yang terjadi.



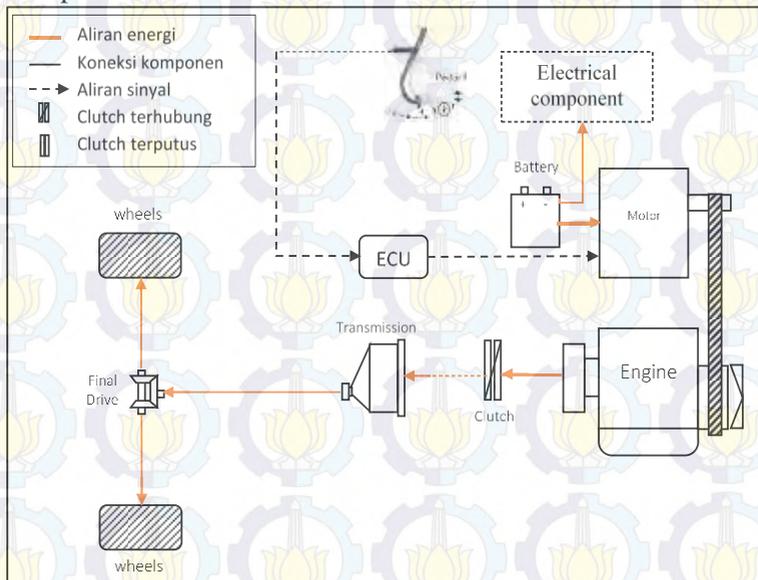
Gambar 3.8 Mode Charging dengan Sambungan Clutch Terputus

Pada gambar 3.8 ditunjukkan bagaimana mode charging ketika sambungan *clutch* antara *combustion engine* dan gearbox transmisi terputus. Pada mode ini putaran *combustion engine* yang tidak digunakan selama pengereman dapat sepenuhnya dimanfaatkan untuk mengisi baterai dan mendayai sistem

kelistrikan pada kendaraan. Kondisi ini diasumsikan berlangsung dari setengah waktu pengereman hingga akhir pengereman (setelah *Mode Charging dengan Sambungan Clutch Terhubung*).

### 3.6.2 Mode Discharging

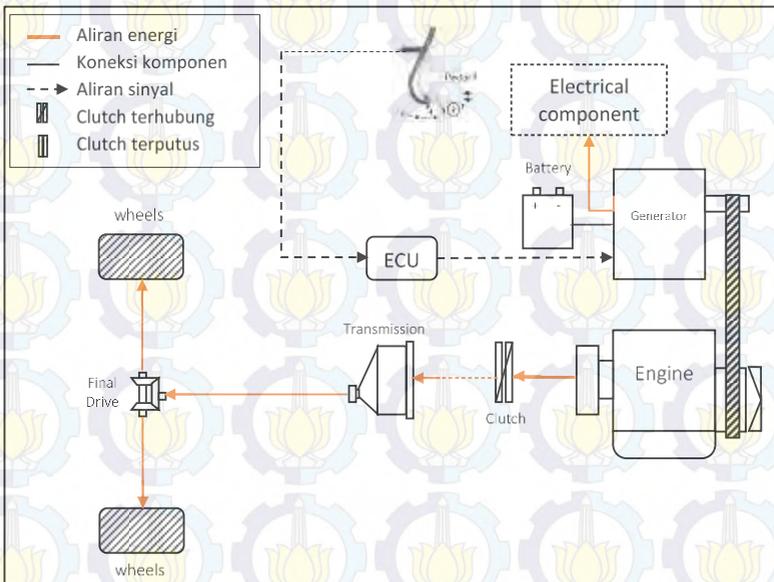
Mode *discharging* terjadi saat baterai terisi hingga kapasitas tertentu dan sesaat kemudian kendaraan diakselerasikan. Ketika pedal gas diinjak sesaat setelah pengereman, ECU akan mengirimkan sinyal kepada *Hybrid Motor-Generator* sehingga *Hybrid Motor-Generator* beralih fungsi menjadi motor yang mengkonversikan energi listrik yang tersimpan pada baterai menjadi energi kinetik yang kemudian digunakan untuk membantu kerja *combustion engine* untuk memenuhi kebutuhan akselerasi kendaraan mengikuti gerakan pedal gas (Gambar 3.9). Pada kondisi ini kebutuhan daya pada sistem kelistrikan dipenuhi daya yang disimpan oleh baterai.



Gambar 3.9 Aliran Energi Pada Mode Discharging

### 3.6.3 Mode *Engine*

Mode *engine* terjadi saat kendaraan dalam keadaan *cruising* atau melaju dengan kecepatan konstan sehingga tidak dibutuhkan energi dalam jumlah besar untuk melakukan akselerasi. Bila tidak terjadi perubahan posisi pada pedal gas yang mengindikasikan bahwa kendaraan melaju dengan kecepatan konstan, maka ECU akan mengirimkan sinyal kepada *Hybrid Motor-Generator* supaya tidak melakukan *charging* baterai. Tetapi *Hybrid Motor-Generator* tetap berjalan sebagai Generator untuk memenuhi kebutuhan daya komponen-komponen elektrik pada kendaraan. Aliran energi untuk mode *engine* ditunjukkan pada gambar 3.10.



Gambar 3.10 Aliran Energi Pada Mode *Engine*

## BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

### 4.1. *Driving Cycle Bus Transjakarta*

Di sepanjang lintasan Bus Transjakarta dari Halte Pulogadung–Monas CB, terdapat 19 halte bus dan 4 simpangan. Halte dan simpangan tersebut memiliki jarak bervariasi dan mengharuskan bus untuk berhenti di setiap halte dan simpangan tersebut. Akibat perilaku ini, maka munculah suatu siklus mengemudi yang disebut sebagai *driving cycle* Bus Transjakarta. Untuk lebih jelasnya, *driving cycle* Bus Transjakarta dapat dilihat pada tabel 4.1.

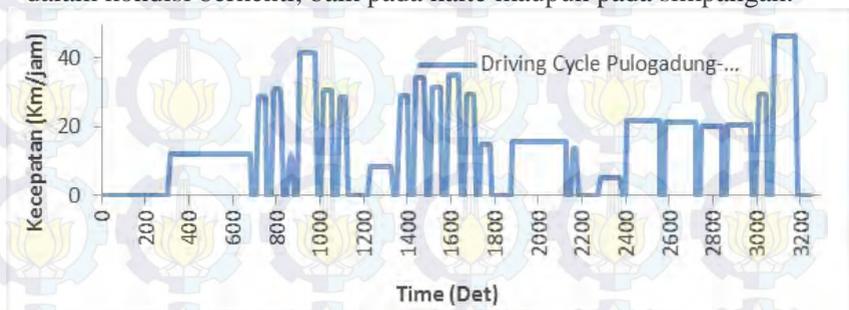
Tabel 4. 1 *Driving Cycle Bus Transjakarta*<sup>[9]</sup>

Halte/Simpangan	Time (det)	Kecepatan (Km/jam)	Halte/Simpangan	Time (det)	Kecepatan (Km/jam)
Pulogadung	0	0		1674,86	29,31
	300	0		1706,49	29,31
Halte RS ediros	313,89	12	Halte Galur	1715,75	0
	680,98	12		1731,75	0
	690,24	0	Simpang Galur	1737,54	14,96
	706,24	0		1780,67	14,96
Halte Gading	720,13	28,68	Halte Ps Senen	1784,53	0
	749,8	28,68		1874,53	0
	759,06	0	Simpang Kramat Raya	1880,32	15,74
	775,06	0		2126,62	15,74
Simpang K Gading	788,95	31,25	Halte Ps Senen	2130,48	0
	823,34	31,25		2146,48	0
	832,6	0		2160,37	13,5
	848,6	0		2173,29	13,5
	862,49	11,68		2182,55	0
	873,58	11,68		2272,55	0

	882,84	0		2286,44	5,19
Halte pulomas	898,84	0		2374,48	5,19
	911,84	41,66		2383,74	0
	979,78	41,66	Halte Atrium	2399,74	0
	989,04	0		2405,53	21,66
Halte Asmi	1005,04	0		2555,39	21,66
	1018,93	30,57		2559,25	0
	1052	30,57	Halte Deplu	2575,25	0
	1061,26	0		2581,04	21,48
Halte ps pendongkelan	1077,26	0		2719,44	21,48
	1091,15	28,49		2723,3	0
	1120,51	28,49	Halte gambir 1	2739,3	0
	1129,77	0		2745,09	19,94
Simpang coca- cola	1219,77	0		2838,41	19,94
	1233,66	8,55		2842,27	0
	1328,96	8,55	Halte Istiqlal	2858,27	0
	1338,22	0		2864,06	20,69
Halte Cempaka Mas	1354,22	0		2975,94	20,69
	1368,11	28,93		2979,8	0
	1399,12	28,93	Halte Juanda	2995,8	0
	1408,38	0		3009,69	29,29
Halte kodam	1424,38	0		3041,02	29,29
	1438,27	34,16		3050,28	0
	1479,16	34,16	Halte Pecenongan	3066,28	0
	1488,42	0		3080,17	46,29
Halte lippo	1504,42	0		3178,63	46,29
	1518,31	31,31		3187,89	0

	1553,29	31,31	Monas Central Busway	3247,89	0
	1562,55	0			
Halte Ps Cempaka Putih	1578,55	0			
	1592,44	34,92			
	1635,71	34,92			
	1644,97	0			
Halte Rawa Selatan	1660,97	0			

Pada akhir pengereman maupun pada awal akselerasi kecepatan kendaraan selalu nol karena Bus Transjakarta berada dalam kondisi berhenti, baik pada halte maupun pada simpangan.



Grafik 4. 1 Driving Cycle Bus Transjakarta

#### 4.2. Perhitungan Nilai Putaran *Combustion Engine* Pada Setiap Perlambatan

Untuk menghitung besarnya putaran *combustion engine* ketika perlambatan diperlukan data berupa besarnya gaya pengereman yang terjadi selama pengereman. Besarnya gaya pengereman yang terjadi selama pengereman dapat dihitung menggunakan persamaan 2.8 dan dengan bantuan *Free Body Diagram* pada gambar 2.9.

Untuk menghitung besarnya gaya pengereman, maka terlebih dahulu perlu dilakukan penghitungan untuk mencari gaya-gaya yang terjadi pada kendaraan selama perlambatan. Sebagai contoh akan

diambil perlambatan ke-18 (Halte Deplu), dengan kecepatan awal kendaraan 21,66 km/h selama 3,86 detik.

- Gaya Hambat Drag

$$\begin{aligned} F_D &= \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{udara}} \cdot C_d \cdot A_f \cdot V_{\text{udara}}^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 1,2 \text{ kg/m}^2 \times 0,8 \times 5,4 \text{ m}^2 \times (6,0167 \text{ m/s})^2 \\ &= 93,83112 \text{ N} \end{aligned}$$

- Gaya Hambat Rolling

$$\begin{aligned} F_R &= C_r \cdot m \cdot g \cdot \cos \theta \\ &= 0,06 \times 20000 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times \cos(0) \\ &= 11772 \text{ N} \end{aligned}$$

- Gaya Hambat Gradien

$$F_G = m \cdot g \cdot \sin(\theta)$$

Sesuai dengan batasan masalah poin 3 yang menyatakan bahwa kendaraan berjalan pada jalan datar dan lurus maka nilai  $\theta = 0$ , sehingga nilai  $F_g$  pada tiap perlambatan adalah nol (0).

- Gaya Inersia Kendaraan

$$\begin{aligned} F_a &= m \cdot a \\ &= 20000 \text{ kg} \times \frac{0 - 6,0167}{3,86} \text{ m/s}^2 \\ &= -31174,44 \text{ N} \end{aligned}$$

Setelah gaya-gaya yang terjadi pada kendaraan diketahui maka nilai gaya pengereman dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.8.

$$\begin{aligned} F_{\text{braking}} &= F_D + F_r + F_g - F_a \\ &= 93,831 \text{ N} + 11772 \text{ N} + 0 - (-31174,44 \text{ N}) \\ &= 43040,271 \text{ N} \end{aligned}$$

Berikut adalah hasil perhitungan besarnya gaya pengereman Bus Transjakarta pada setiap perlambatan berdasarkan *driving cycle*:

Tabel 4. 2 Gaya Pengereman Pada Setiap Perlambatan

Perlambatan ke	v (km/h)	$F_{braking}$ (N)	Perlambatan ke	v (km/h)	$F_{braking}$ (N)
1	12	19000,22405	13	29,31	29528,40845
2	28,68	29143,13195	14	14,96	33348,13626
3	31,25	30715,81262	15	15,74	34475,55067
4	11,68	18806,72388	16	13,5	19907,80205
5	41,66	37113,1116	17	5,19	14891,13812
6	30,57	30299,43774	18	21,66	43040,26981
7	28,49	29026,96861	19	21,48	42779,64941
8	8,55	16916,21013	20	19,94	40550,42688
9	28,93	29296,00045	21	20,69	41635,9687
10	34,16	32499,74157	22	29,29	29516,17501
11	31,31	30752,56046	23	46,29	39972,33108
12	34,92	32966,20525			

Berdasarkan penghitungan didapatkan gaya pengereman terbesar didapatkan pada perlambatan ke-18, yaitu dari kecepatan awal 21,66 km/h sebesar 43040,26981 N. Hasil ini didapatkan karena pada perlambatan ke-18 terjadi nilai perlambatan ( $a$ ) paling besar yaitu  $1,5587 \text{ m/s}^2$ . Sedangkan gaya pengereman terkecil didapatkan pada perlambatan ke-17, yaitu dari kecepatan awal 5,19 km/h sebesar 14891,13812 N. Hasil ini didapatkan karena pada perlambatan ke-17 terjadi nilai perlambatan ( $a$ ) paling kecil yaitu  $0,15569 \text{ m/s}^2$ .

Setelah didapatkan besarnya gaya pengereman di tiap perlambatan, maka dapat dicari besarnya putaran *combustion engine* di setiap perlambatan. Untuk mendapatkan nilai putaran *combustion engine* maka terlebih dahulu harus diketahui nilai torsi pengereman Bus Transjakarta ( $T_b$ ), Daya Pengereman Bus Transjakarta ( $P_b$ ), dan torsi *combustion engine* ( $T_e$ ). Kita gunakan contoh pada perlambatan ke-18 yaitu pada halte Deplu.

- $Tb = Fb \times r_{dyn}$

$$= 43040,2698 \text{ N} \times 0,527 \text{ m}$$

$$= 22682,22218 \text{ Nm}$$

- $Pb = Tb \times \frac{v}{r_{dyn}}$

$$= 22682,22218 \text{ Nm} \times \frac{6,0167 \text{ m/s}}{0,527 \text{ m}}$$

$$= 258960,3913 \text{ watt}$$

- $T_e = \frac{T_b}{i_t \times i_g \times \eta_t}$

$$= \frac{22682,22218 \text{ Nm}}{4,423 \times 4,3 \times 0,9}$$

$$= 1325,127588 \text{ Nm}$$

Setelah kita mendapatkan nilai torsi *combustion engine* dan daya pengereman kendaraan maka selanjutnya dapat dihitung besarnya putaran *combustion engine* pada awal perlambatan.

$$\begin{aligned} n_e(\text{rpm}) &= \frac{Pb(\text{hp}) \times 63000}{T_e(\text{lb. in})} \\ &= \frac{347,266739 \text{ hp} \times 63000}{11728,36784 \text{ lb. in}} \\ &= 1865,375034 \text{ rpm} = 195,3416 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

Karena di akhir perlambatan mobil selalu dalam keadaan berhenti (diam), maka putaran *combustion engine* di akhir perlambatan diasumsikan sebesar putaran stationer engine yaitu sebesar 52,36 rad/s. Hasil penghitungan lengkap nilai putaran *combustion engine* pada setiap perlambatan ditunjukkan pada tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Putaran Combustion Engine Pada Setiap Perlambatan

Perlambatan ke	Time (s)	$n_e$ (rad/s)	Perlambatan ke	Time (s)	$n_e$ (rad/s)
1	680,98	108,2225023	13	1706,49	170,5647
	690,24	52,36		1715,75	52,36
2	749,8	166,8985262	14	1780,67	134,9174
	759,06	52,36		1784,53	52,36
3	823,34	181,854217	15	2126,62	141,9518
	832,6	52,36		2130,48	52,36
4	873,58	105,3365689	16	2173,29	121,7503
	882,84	52,36		2182,55	52,36
5	979,78	162,6699862	17	2374,48	81,65428
	989,04	52,36		2383,74	52,36
6	1052	177,8970692	18	2555,39	195,3416
	1061,26	52,36		2559,25	52,36
7	1120,51	165,7928525	19	2719,44	193,7183
	1129,77	52,36		2723,3	52,36
8	1328,96	134,5171692	20	2838,41	179,8297
	1338,22	52,36		2842,27	52,36
9	1399,12	168,3533599	21	2975,94	186,5936
	1408,38	52,36		2979,8	52,36
10	1479,16	198,7884816	22	3041,02	170,4483
	1488,42	52,36		3050,28	52,36
11	1553,29	182,2033771	23	3178,63	180,7488
	1562,55	52,36		3187,89	52,36
12	1635,71	203,2111762			
	1644,97	52,36			



Grafik 4. 2 Putaran Combustion Engine Pada Setiap Perlambatan

Berdasarkan perhitungan putaran *combustion engine* didapatkan putaran *combustion engine* paling besar terjadi pada perlambatan ke-12, yaitu dari putaran awal sebesar 203,211762 rad/s hingga 52,36 rad/s selama 9,26 detik. Sedangkan putaran *combustion engine* paling kecil terjadi pada perlambatan ke-17, yaitu dari putaran awal sebesar 81,654 rad/s hingga 52,36 rad/s selama 9,26 detik.

Sehingga berdasarkan *driving cycle* Pulogadung-Monas CB didapatkan putaran maksimal *combustion engine* adalah 203,211 rad/s, sedangkan putaran minimal adalah sebesar 52,36 rad/s.

#### 4.3. Perhitungan Nilai Energi Kinetik Rotasi *Combustion Engine* Pada Setiap Perlambatan

Setelah mendapatkan putaran *combustion engine* pada setiap perlambatan maka kita dapat mengetahui besarnya energi kinetik rotasi yang dihasilkan pada setiap perlambatan. Pada penelitian ini komponen yang diperhitungkan energi kinetik rotasinya adalah *crankshaft* dan *flywheel* dari *combustion engine*. Spesifikasi *flywheel* dari bus HINO RN 285 CR adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} m &= 40 \text{ pound} = 18 \text{ kg} \\ R &= 25 \text{ inch} = 0,635 \text{ m} \end{aligned}$$

Karena *flywheel* dan *crankshaft combustion engine* merupakan silinder pejal, maka nilai inersianya dapat dicari dengan menggunakan rumus:

$$I = \frac{1}{2} mR^2$$

Inersia dari *flywheel* adalah:

$$I = \frac{1}{2} mR^2 = \frac{1}{2} \times 18 \text{ kg} \times (0,635 \text{ m})^2 = 3,629025 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Setelah nilai inersia dari *flywheel* diketahui maka kita dapat menghitung besarnya energi putaran *flywheel* yang dapat dimanfaatkan ketika terjadi pengereman dengan cara menghitung besarnya energi kinetik rotasi pada *flywheel* selama pengereman dengan persamaan 2.14.

Pada perlambatan ke-12 diketahui bahwa putaran *combustion engine* pada awal pengereman adalah sebesar 203,211 rad/s dan putaran *combustion engine* pada akhir pengereman adalah 52,36 rad/s (stationer), maka besarnya energi kinetik rotasi *flywheel* adalah sebesar:

$$\begin{aligned} Ek_{flywheel} &= \frac{1}{2} I \cdot \omega_{awal}^2 - \frac{1}{2} I \cdot \omega_{akhir}^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 3,629025 \times (203,211 \text{ rad/s})^2 - \frac{1}{2} \times 3,629025 \times (52,36 \text{ rad/s})^2 \\ &= 69955,15612 \text{ J} \end{aligned}$$

Besarnya energi kinetik rotasi pada *flywheel* selama pengereman pada setiap perlambatan ditunjukkan pada tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Nilai Energi Kinetik Rotasi Flywheel Pada Setiap Perlambatan

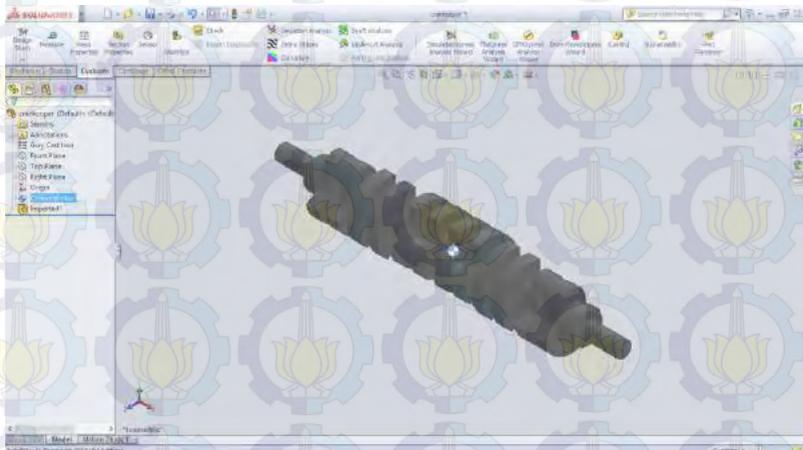
Perlambatan ke	Ek rot (joule)	Perlambatan ke	Ek rot (joule)
1	16277,158	13	47813,765
2	45568,848	14	28054,416
3	55033,051	15	31588,409
4	15158,842	16	21922,159
5	43040,154	17	7123,5077
6	52449,931	18	64264,186
7	44901,383	19	63118,184

8	27858,753	20	53704,417
9	46453,85	21	58201,602
10	66729,225	22	47741,748
11	55263,702	23	54305,723
12	69955,286		

Berdasarkan perhitungan energi kinetik rotasi pada *flywheel* didapatkan energi kinetik rotasi *flywheel* paling besar terjadi pada perlambatan ke-12, yaitu dari sebesar 69955,286 J. Sedangkan energi kinetik rotasi *combustion engine* paling kecil terjadi pada perlambatan ke-17, yaitu sebesar 7123,5077 J.

Sedangkan pada *crankshaft combustion engine* untuk menghitung nilai momen inersia harus terlebih dahulu dilakukan pemodelan menggunakan *software* 'Solidwork' karena *crankshaft combustion engine* termasuk benda tegar tidak beraturan.

Berikut adalah hasil pemodelan menggunakan *software* 'Solidwork 2013':



Gambar 4. 1 Pemodelan Crankshaft Combustion Engine Pada Solidwork

Setelah dilakukan pemodelan pada *software* 'Solidwork 2013' dan memberi input berupa material yang digunakan yaitu

*Grey Cast Iron (fc-150)*, maka didapatkan nilai momen inersia dari *crankshaft* pada sumbu x adalah sebesar  $0,01848 \text{ kg.m}^2$

Setelah nilai inersia dari *crankshaft* diketahui maka kita dapat menghitung besarnya energi putaran *crankshaft* yang dapat dimanfaatkan ketika terjadi pengereman dengan cara menghitung besarnya energi kinetik rotasi pada *crankshaft* selama pengereman menggunakan persamaan 2.14.

Pada perlambatan ke-12 diketahui bahwa putaran *combustion engine* pada awal pengereman adalah sebesar  $203,211 \text{ rad/s}$  dan putaran *combustion engine* pada akhir pengereman adalah  $52,36 \text{ rad/s}$  (stationer), maka besarnya energi kinetik rotasi *crankshaft* adalah sebesar:

$$\begin{aligned} Ek_{crankshaft} &= \frac{1}{2} I \cdot \omega_{awal}^2 - \frac{1}{2} I \cdot \omega_{akhir}^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 0,01848 \times (203,211 \text{ rad/s})^2 - \frac{1}{2} \times 0,01848 \times (52,36 \text{ rad/s})^2 \\ &= 356,2310221 \text{ J} \end{aligned}$$

Besarnya enegi kinetik rotasi pada *crankshaft* selama pengereman pada setiap perlambatan adalah seperti ditunjukkan pada tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Nilai Energi Kinetik Rotasi Crankshaft Pada Setiap Perlambatan

Perlambatan ke	Ek rot (Joule)	Perlambatan ke	Ek rot (Joule)
1	82,88779324	13	243,4809275
2	232,0491875	14	142,8608549
3	280,2435324	15	160,8569218
4	77,1930218	16	111,6337032
5	219,1723823	17	36,27487355
6	267,0895701	18	327,2510247
7	228,6502712	19	321,4152668
8	141,8644848	20	273,4777606
9	236,5558659	21	296,3786689

10	339,8036873	22	243,1141977
11	281,4180694	23	276,5397779
12	356,2316838		

Berdasarkan perhitungan energi kinetik rotasi pada *crankshaft* didapatkan energi kinetik rotasi *crankshaft* paling besar terjadi pada perlambatan ke-12, yaitu dari sebesar 356,2316838J. Sedangkan energi kinetik rotasi *crankshaft* paling kecil terjadi pada perlambatan ke-17, yaitu sebesar 36,27487355 J.

Setelah mendapatkan besarnya nilai energi kinetik rotasi pada *crankshaft* dan *flywheel*, maka nilai energi kinetik rotasi Bus Transjakarta selama pengereman berdasarkan *driving cycle* dapat diperoleh dengan menjumlahkan besarnya nilai energi kinetik rotasi pada *crankshaft* dan besarnya energi kinetik rotasi pada *flywheel* (tabel 4.6).

Tabel 4. 6 Total Energi Kinetik Rotasi Kendaraan Pada Setiap Perlambatan

Perlambatan ke	Ek rot total (joule)	Perlambatan ke	Ek rot total (joule)
1	16360,04547	13	48057,2457
2	45800,89674	14	28197,2772
3	55313,29469	15	31749,26551
4	15236,03534	16	22033,79278
5	43259,32686	17	7159,78261
6	52717,02069	18	64591,43662
7	45130,03287	19	63439,59917
8	28000,61783	20	53977,89498
9	46690,40604	21	58497,98034
10	67069,0286	22	47984,8621
11	55545,11986	23	54582,26313
12	70311,51774		

Berdasarkan perhitungan didapatkan energi kinetik rotasi paling besar terjadi pada perlambatan ke-12, yaitu dari sebesar 70311,51774 J. Sedangkan energi kinetik rotasi paling kecil terjadi pada perlambatan ke-17, yaitu sebesar 7159,78261 J.

#### 4.4. Perhitungan Nilai Energi Kinetik Translasi Kendaraan Pada Setiap Perlambatan

Ketika kendaraan melakukan perlambatan, terjadi perubahan kecepatan yang menghasilkan energi kinetik translasi kendaraan itu sendiri (persamaan 2.15). Hal ini merupakan energi perlambatan yang sangat potensial untuk dimanfaatkan. Akan tetapi ketika perlambatan tidak selamanya *clutch* terhubung sehingga ketika sambungan *clutch* terputus (Gambar 3.7) maka aliran energi kinetik translasi kendaraan dari roda tidak lagi tersalurkan sehingga tidak dapat ditangkap oleh generator.

Misalkan kita mengambil contoh penghitungan pada perlambatan ke-12, kendaraan melaju dengan kecepatan sebesar 34,92 km/h atau 9,7 m/s selama 9,26 detik, maka nilai energi kinetik translasi kendaraan yang tersedia selama terjadi perlambatan adalah sebesar:

$$\begin{aligned} E_{k \text{ translasi}} &= \frac{1}{2}m.V_{awal}^2 - \frac{1}{2}m.V_{akhir}^2 \\ &= \left(\frac{1}{2} \cdot 20000 \text{ kg} \cdot (9,7 \text{ m/s})^2\right) - \left(\frac{1}{2} \cdot 20000 \text{ kg} \cdot (0 \text{ m/s})^2\right) \\ &= 940900 \text{ J} \end{aligned}$$

Besarnya nilai energi kinetik translasi kendaraan yang tersedia selama terjadinya pengereman pada tiap perlambatan ditunjukkan pada tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Energi Kinetik Translasi yang Tersedia Selama Pengereman

Perlambatan ke	Ek tersedia (J)	Perlambatan ke	Ek tersedia (J)
1	111112,8889	13	662877,967
2	634687,9327	14	172689,1827
3	753532,5039	15	191166,3302
4	105265,8818	16	140627,25
5	1339184,698	17	20784,36032
6	721095,5652	18	362008,5698
7	626306,3942	19	356016,8073
8	56407,1525	20	306797,8099
9	645801,1506	21	330310,9176
10	900404,5298	22	661973,6316
11	756428,8465	23	1653393,815
12	940900,0545		

Energi tersebut tidak dapat dimanfaatkan seluruhnya karena selama terjadinya perlambatan, *clutch* tidak selalu terhubung sehingga energi kinetik translasi kendaraan juga tidak seluruhnya tersalurkan.

Ketika pengereman dengan mode *Charging dengan Sambungan Clutch Terhubung* (Gambar 3.6), *clutch* masih terhubung sehingga putaran pada roda masih tersambung pada *combustion engine* melalui gearbox dan *final gear* sehingga energi translasi roda dapat dimanfaatkan untuk melakukan *charging* pada baterai. Mode Charging dengan Sambungan Clutch Terhubung diasumsikan terjadi selama setengah waktu pengereman. Besarnya energi kinetik translasi kendaraan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.15.

Pada perlambatan ke-12, kendaraan melaju dengan kecepatan sebesar 34,92 km/h atau 9,7 m/s selama 9,26 detik. Karena mode *charging* dengan *clutch* terhubung diasumsikan terjadi selama setengah dari waktu perlambatan maka:

$$t_{translasi} = \frac{1}{2} \times 9,26 \text{ s} = 4,63 \text{ s}$$

Untuk menghitung besarnya energi kinetik translasi dari kendaraan maka kita perlu untuk menghitung kecepatan kendaraan pada akhir mode *clarging* dengan *clutch* terhubung dengan menggunakan rumus:

$$Vt = V_0 - a \cdot t$$

Nilai perlambatan kendaraan pada perlambatan ke-12 adalah:

$$a_{12} = \frac{V_{akhir} - V_{awal}}{t} = \frac{9,7 \text{ m/s} - 0 \text{ m/s}}{9,26 \text{ s}} = 1,0475 \text{ m/s}^2$$

Kecepatan akhir kendaraan pada mode *charging* dengan *clutch* terhubung adalah:

$$Vt = V_0 - a \cdot t_{translasi}$$

$$= 9,7 \text{ m/s} - 1,0475 \text{ m/s}^2 \times 4,63 \text{ s}$$

$$= 4,85 \text{ m/s}$$

Setelah besarnya kecepatan kendaraan pada akhir mode *charging* dengan *clutch* terhubung diketahui maka nilai energi kinetik translasi kendaraan dapat dihitung:

$$\begin{aligned} E_{k \text{ translasi}} &= \frac{1}{2} m \cdot V_{awal}^2 - \frac{1}{2} m \cdot V_{akhir}^2 \\ &= \left( \frac{1}{2} \cdot 20000 \text{ kg} \cdot (9,7 \text{ m/s})^2 \right) - \left( \frac{1}{2} \cdot 20000 \text{ kg} \cdot (4,85 \text{ m/s})^2 \right) \\ &= 705675 \text{ J} \end{aligned}$$

Besarnya nilai energi kinetik translasi kendaraan yang terjadi selama mode *charging* dengan *clutch* terhubung pada tiap perlambatan ditunjukkan pada tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Energi Kinetik Translasi Kendaraan yang Dapat Dimanfaatkan Pada Setiap Perlambatan

Perlambatan ke	Ek (kJ)	Perlambatan ke	Ek (kJ)
1	83,33422222	13	497,1558238
2	476,0134108	14	129,5161963
3	565,1463638	15	143,373983
4	78,94899026	16	105,469875
5	1004,383167	17	15,58818711
6	540,8187895	18	271,5049794
7	469,7272905	19	267,0111814
8	42,30513875	20	230,0971303
9	484,3482798	21	309,6654943
10	675,2997957	22	496,4775758
11	567,3186092	23	1240,038748
12	705,6825272		

Berdasarkan perhitungan besarnya energi kinetik translasi pada Bus Transjakarta selama pengereman didapatkan nilai energi kinetik translasi terbesar didapatkan pada pengereman ke-23, yaitu sebesar 1240,038758 kJ. Hal ini disebabkan oleh perbedaan kecepatan pada perlambatan ke-23 paling besar dibanding perlambatan lain. Dan nilai energi kinetik translasi paling kecil didapatkan pada pengereman ke-17, yaitu sebesar 15,58818711 kJ. Hal ini disebabkan oleh perbedaan kecepatan pada perlambatan ke-17 paling kecil dibanding perlambatan lain.

#### 4.5. Perhitungan Nilai Energi Pengereman Bus Transjakarta

Setelah besarnya nilai energi kinetik rotasi dari *combustion engine* dan besarnya nilai energi kinetik translasi kendaraan diketahui, maka besarnya nilai energi pengereman Bus Transjakarta yang tersedia dan energi pengereman Bus Transjakarta yang dapat dimanfaatkan dari setiap pengereman bisa dihitung.

Untuk mengetahui besarnya energi pengereman Bus Transjakarta yang tersedia maka kita menjumlahkan seluruh energi kinetik translasi yang terjadi selama pengereman dan energi kinetik rotasi dari *combustion engine*. Nilai energi pengereman Bus Transjakarta yang tersedia selama pengereman ditunjukkan pada tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Energi Pengereman Kendaraan yang Tersedia Pada Setiap Perlambatan

Perlambatan ke	E Pengereman Tersedia (kJ)	Perlambatan ke	E Pengereman Tersedia (kJ)
1	127,4729	13	710,9352
2	680,4888	14	200,8865
3	808,8458	15	222,9156
4	120,5019	16	162,661
5	1382,444	17	27,94414
6	773,8126	18	426,6
7	671,4364	19	419,4564
8	84,40777	20	360,7757
9	692,4916	21	388,8089
10	967,4736	22	709,9585
11	811,974	23	1707,976
12	1011,227		

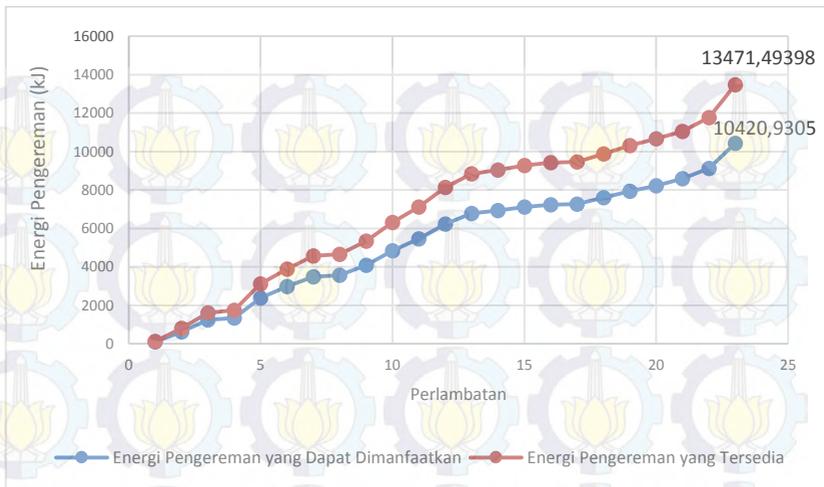
Berdasarkan perhitungan nilai energi pengereman Bus Transjakarta yang tersedia berdasarkan *Driving Cycle* didapatkan energi pengereman terbesar terjadi pada perlambatan ke-23 yaitu sebesar 1707,976 kJ. Dan nilai energi pengereman terkecil terjadi pada perlambatan ke-17 yaitu sebesar 27,94414 kJ.

Sedangkan untuk mengetahui besarnya energi pengereman Bus Transjakarta yang dapat dimanfaatkan maka kita menjumlahkan besarnya nilai energi kinetik rotasi dari *combustion engine* dan energi kinetik translasi kendaraan selama *clutch* masih terhubung. Nilai energi pengereman Bus Transjakarta ditunjukkan pada tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Energi Pengereman Kendaraan Yang Dapat Dimanfaatkan Pada Setiap Perlambatan

Perlambatan ke	E Pengereman (kJ)	Perlambatan ke	E Pengereman (kJ)
1	99,69427	13	545,2131
2	521,8143	14	157,7135
3	620,4597	15	175,1232
4	94,18503	16	127,5037
5	1047,642	17	22,74797
6	593,5358	18	336,0964
7	514,8573	19	330,4508
8	70,30576	20	284,075
9	531,0387	21	368,1635
10	742,3688	22	544,4624
11	622,8637	23	1294,621
12	775,994		

Berdasarkan perhitungan nilai energi pengereman Bus Transjakarta yang dapat dimanfaatkan berdasarkan *Driving Cycle* didapatkan energi pengereman terbesar terjadi pada perlambatan ke-23 yaitu sebesar 1294,621 kJ. Dan nilai energi pengereman terkecil terjadi pada perlambatan ke-17 yaitu sebesar 22,74797 kJ.



Grafik 4. 3 Perbandingan Total Energi Pengereman Yang Tersedia Dan Energi Pengereman yang Dapat Dimanfaatkan

Berdasarkan grafik 4.3 didapatkan total energi pengereman kendaraan yang tersedia selama perlambatan adalah 13471,49398 kJ. Dan total energi pengereman kendaraan yang dapat dimanfaatkan berdasarkan *Driving Cycle* Bus Transjakarta rute Pulogadung-Monas CB adalah sebesar 10420,9305 kJ.

#### 4.6 Spesifikasi *Hybrid Motor-Generator* yang Akan Digunakan

Setelah kita mendapatkan besarnya nilai energi pengereman Bus Transjakarta yang dapat dimanfaatkan untuk melakukan *charging* baterai dan besarnya putaran *combustion engine* berdasarkan *driving cycle* maka kita dapat menentukan spesifikasi *Hybrid Motor-Generator* yang akan digunakan.

Berdasarkan perhitungan didapatkan:

- Nilai putaran engine: 500 rpm (52,36 rad/s) sampai 1940.522 rpm (203,211 rad/s)
- Nilai torsi pengereman pada engine: 2074,388 Nm

Maka dengan memperhatikan parameter-parameter tersebut ditentukan *Hybrid Motor-Generator* yang akan digunakan adalah Dynastart SG-430.



Gambar 4. 2 Dynastart SG-430<sup>[14]</sup>

The DynaStart SG-430 memiliki spesifikasi sebagai berikut<sup>[14]</sup>:

- Diameter : 430 mm
- Arus maksimal : 350 A
- Torsi maksimal : 2100 Nm
- RPM maksimal : 4500 rpm
- Voltase : 550 V – 700 V
- Daya Maksimal : 110 kW – 150 kW
- Efisiensi motor : 85% - 90%

#### 4.7 Nilai Energi Pengereman Yang Dapat Ditangkap Oleh Generator Dan Dikonversi Menjadi Energi Listrik

Setelah mendapatkan nilai total energi pengereman yang dapat dimanfaatkan pada tiap perlambatan berdasarkan *driving cycle* dan spesifikasi *Hybrid Motor-Generator* maka besarnya energi pengereman yang dapat ditangkap dapat diketahui. Energi pengereman yang ditangkap oleh *Hybrid Motor-Generator*

selanjutnya disimpan pada baterai dalam bentuk arus-jam (Ampere-hour).

Untuk mengetahui kapasitas yang dapat ditangkap oleh *Hybrid Motor-Generator* terlebih dahulu perlu dilakukan konversi energi pengereman yang berupa energi mekanik menjadi energi listrik melalui generator dengan menggunakan persamaan 2.2.

Diketahui bahwa pada perlambatan ke-12 energi perlambatan yang dapat dimanfaatkan adalah sebesar 622,8637291kJ. Dan berdasarkan spesifikasi *Hybrid Motor-Generator* memiliki efisiensi sebesar 85%-90%, maka besarnya energi listrik yang dapat ditangkap oleh generator adalah sebesar:

$$E_{\text{listrik}} = \eta \times E_{\text{mekanik}} = 90\% \times 622,8637291 \text{ kJ} = 560,577 \text{ kJ}$$

Besarnya energi perlambatan yang dapat ditangkap oleh *Hybrid Motor-Generator* ditunjukkan pada tabel 4.11.

Tabel 4. 11 Energi Pengereman Kendaraan yang Dapat Ditangkap oleh Generator

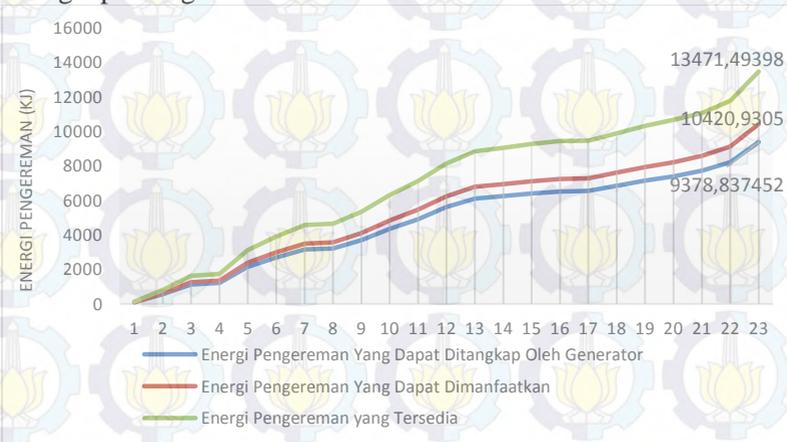
Perlambatan ke	E listrik (kJ)	Perlambatan ke	E listrik (kJ)
1	89,72484	13	490,6918
2	469,6329	14	141,9421
3	558,4137	15	157,6109
4	84,76652	16	114,7533
5	942,8782	17	20,47317
6	534,1822	18	302,4868
7	463,3716	19	297,4057
8	63,27518	20	255,6675
9	477,9348	21	331,3471
10	668,1319	22	490,0162
11	560,5774	23	1165,159
12	698,3946		



Grafik 4. 4 Energi Pengereman yang Dapat Ditangkap Oleh Generator

Berdasarkan tabel diketahui bahwa nilai energi listrik terbesar yang dapat dihasilkan oleh generator adalah sebesar 1165,159 kJ. Dan nilai energi listrik terkecil yang dapat dihasilkan oleh generator adalah sebesar 20,47317 kJ. Selain itu berdasarkan grafik juga dapat diketahui nilai total energi listrik yang dapat dihasilkan oleh generator adalah sebesar 9378,837452 kJ.

Berikut adalah grafik yang menunjukkan perbandingan antara nilai energi pengereman yang tersedia, nilai energi pengereman yang dapat dimanfaatkan, dan nilai energi pengereman yang dapat ditangkap oleh generator:



Grafik 4. 5 Perbandingan Energi Pengereman yang Tersedia, Dapat Dimanfaatkan, dan Dapat Ditangkap Oleh Generator

Pada grafik 4.5 ditunjukkan bahwa berdasarkan trendline tidak terjadi perbedaan yang cukup signifikan antara nilai energi pengereman yang dapat dimanfaatkan dan nilai energi pengereman yang dapat ditangkap oleh generator. Tetapi bila ditinjau dari nilai energi pengereman yang tersedia selama perlambatan maka energi pengereman yang hilang cukup besar.

Bila ditinjau dari nilai energi pengereman yang tersedia selama perlambatan dan nilai energi pengereman yang dapat ditangkap oleh generator maka nilai efisiensi sistem adalah sebesar:

$$\begin{aligned}\eta_{sistem} &= \frac{\text{Energi Pengereman yang Dapat Ditangkap}}{\text{Energi Pengereman yang Tersedia}} \times 100\% \\ &= \frac{9378,837452 \text{ kJ}}{13471,49398 \text{ kJ}} \times 100\% \\ &= 69,61987635 \%\end{aligned}$$

#### 4.8 Nilai Kapasitas Baterai Yang Diperlukan Untuk Menyimpan Energi Pengereman Bus Transjakarta

Setelah kita mengetahui besarnya energi pengereman yang dapat ditangkap oleh generator maka kita dapat menghitung nilai kapasitas baterai yang diperlukan (Q) untuk menyimpan energi pengereman Bus Transjakarta dengan menggunakan persamaan 2.3.

$$\begin{aligned}Q &= \frac{E_{listrik}}{\text{Voltase}} \\ &= \frac{9378,837452 \text{ kJ}}{550 \text{ V}} \\ &= 17,0524 \text{ Ah}\end{aligned}$$

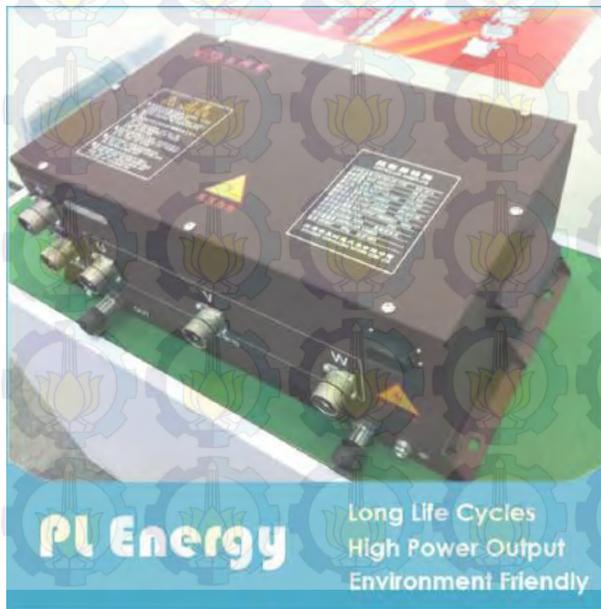
Jadi untuk menyimpan energi yang dapat ditangkap selama pengereman kendaraan dibutuhkan baterai dengan kapasitas minimal 17,0524 Ah.

#### 4.9 Spesifikasi Baterai Yang Akan Digunakan Untuk Menyimpan Energi Hasil Pengereman Bus Transjakarta

Setelah nilai kapasitas ( $Q$ ) total yang diperlukan pada tiap perlambatan diketahui maka dapat ditentukan spesifikasi baterai yang akan digunakan untuk menyimpan kapasitas tersebut.

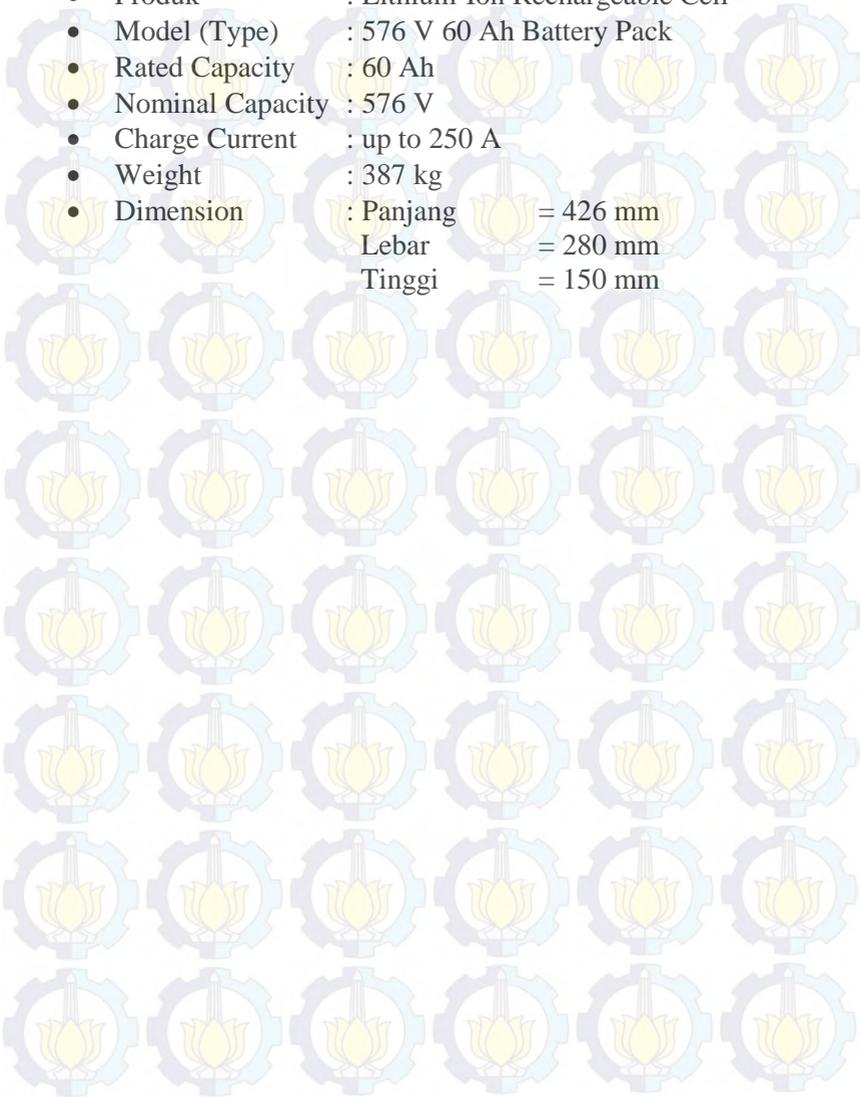
Spesifikasi baterai yang akan digunakan untuk menyimpan energi hasil pengereman harus dapat memenuhi parameter yang dibutuhkan yaitu berupa kapasitas minimal sebesar 17,0524 Ah. Selain harus memiliki kapasitas sesuai kebutuhan, baterai juga harus memiliki dimensi yang tidak terlalu besar dan juga massa yang seminimal mungkin.

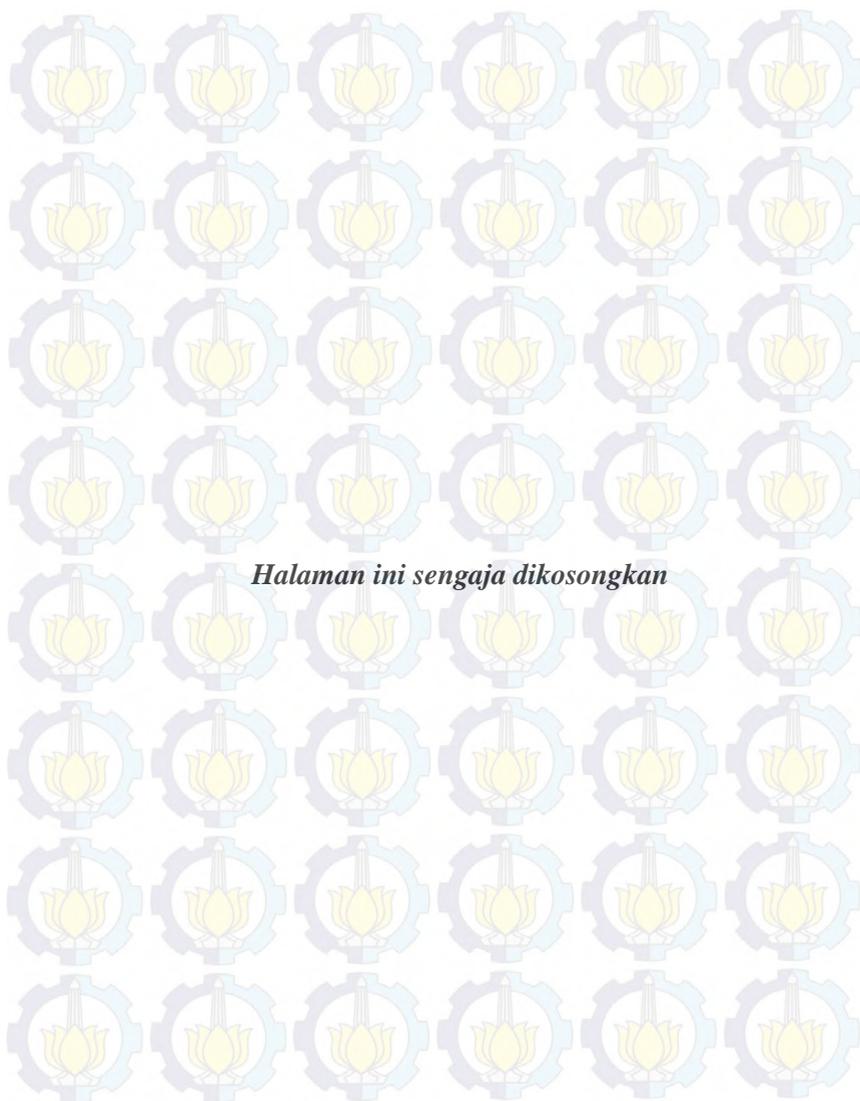
Maka dengan mempertimbangkan hal-hal tersebut ditentukan baterai yang digunakan adalah baterai yang berbahan dasar Lithium-Ion Rechargeable Cell, seperti yang biasa digunakan pada kendaraan-kendaraan hybrid pada umumnya. Berikut adalah spesifikasi lengkap dari baterai yang akan digunakan:



Gambar 4.3 576 V 60 Ah Battery Pack<sup>[15]</sup>

- **Manufaktur** : Shenzhen Polinovel Technology Co, Ltd.
- **Produk** : Lithium-Ion Rechargeable Cell
- **Model (Type)** : 576 V 60 Ah Battery Pack
- **Rated Capacity** : 60 Ah
- **Nominal Capacity** : 576 V
- **Charge Current** : up to 250 A
- **Weight** : 387 kg
- **Dimension** : Panjang = 426 mm  
Lebar = 280 mm  
Tinggi = 150 mm





*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1. Kesimpulan**

Dari hasil analisa pengaplikasian *Kinetic Energy Recovery System* Pada Bus Transjakarta, dapat disimpulkan bahwa:

##### **1. Energi Pengereman**

- Total nilai energi pengereman yang tersedia adalah 13471,49398 kJ.
- Total nilai energi pengereman yang dapat dimanfaatkan adalah 10420,9305 kJ.
- Total nilai energi pengereman yang dapat ditangkap adalah 9378,837452 kJ.

##### **2. Spesifikasi Generator**

- Produk : Dynastart SG-430
- Manufaktur : ZF Friedrichshafen AG
- Diameter : 430 mm
- Arus maksimal : 350 A
- Torsi maksimal : 2100 Nm
- RPM maksimal : 4500 rpm
- Voltase : 550 V – 700 V
- Daya Maksimal : 110 kW – 150 kW
- Efisiensi motor : 85% - 90%

##### **3. Spesifikasi Baterai**

Spesifikasi baterai yang akan digunakan adalah sebagai berikut:

- Manufaktur : Shenzhen Polinovel Technology Co, Ltd.
- Produk : Lithium-Ion Rechargeable Cell
- Model (Type) : 576 V 60 Ah Battery Pack
- Rated Capacity : 60 Ah
- Nominal Capacity: 576 V
- Charge Current : up to 250 A
- Weight : 387 kg

- Dimension : Panjang = 426 mm  
Lebar = 280 mm  
Tinggi = 150 mm

#### 4. Metode

Untuk mempermudah pengaplikasian dan pengoperasian sistem *Kinetic Energy Recovery System* pada Bus Transjakarta maka digunakan 4 mode yang terdiri dari:

- Mode *charging* dengan *clutch* terhubung (Gambar 3.7)
- Mode *charging* dengan *clutch* terputus (Gambar 3.8)
- Mode *discharging* (Gambar 3.9)
- Mode *engine* (Gambar 3.10)

### 5.2. Saran

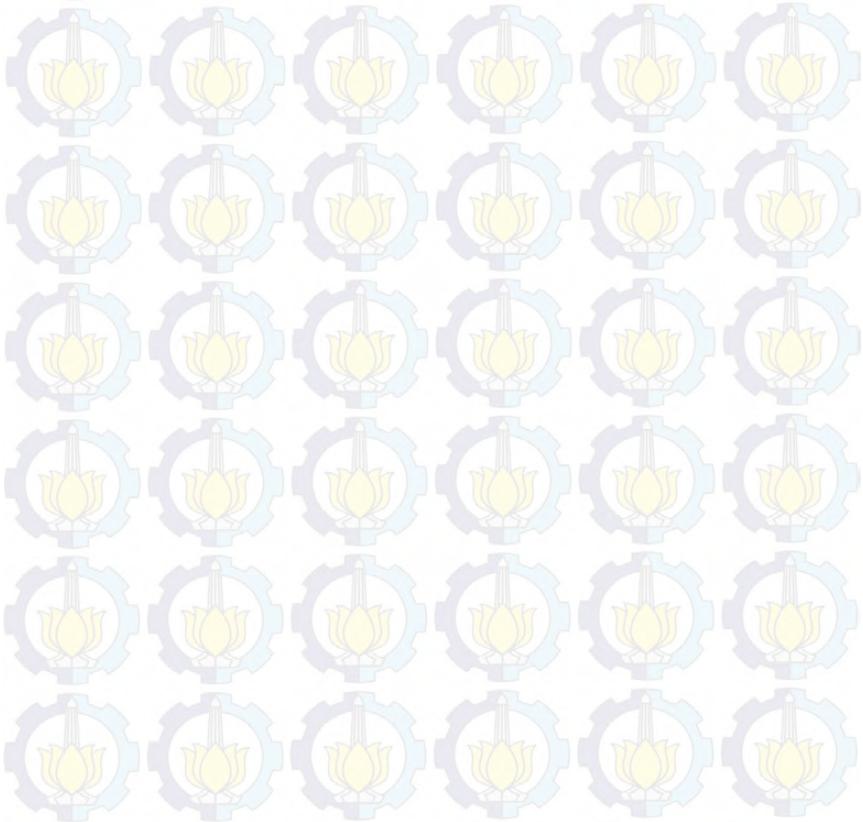
Dari analisa yang telah dilakukan, saran untuk penelitian selanjutnya sebagai berikut:

1. Sebaiknya digunakan *driving cycle* yang benar-benar menunjukkan nilai rpm kendaraan berdasarkan fungsi waktu, sehingga dapat mendapatkan hasil yang lebih akurat.
2. Pada penelitian selanjutnya dapat mencoba untuk menghitung besarnya kebutuhan energi kendaraan untuk berakselerasi, sehingga dapat dibandingkan antara kebutuhan energi kendaraan untuk berakselerasi dan energi hasil tangkapan *KERS* untuk membantu kebutuhan akselerasi kendaraan.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Bender, Donald A. 2000. *Flywheels for Renewable Energy and Power Quality Applications*. Trinity Flywheel Power. San Francisco.
2. Deutschman, Aaron D. 1975. *Machine Design Theory And Practice*. New York: Macmillan Publishing Co.,
3. Ehsani, Mehrdad dan Yimin Gao. 2010. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicle Fundamentals, Theory, and Design*. New York: CRC Press.
4. Hamrock, Bernard J., Jacobson, Bo., Schmid, Steven R. 1999. *Fundamentals of Machine Elements*. Singapore: Mc Graw Hill.
5. Mi, Chris, et al. 2010. *Hybrid Electric Vehicles, Principles, and Application with Practical Perspectives*. United Kingdom: Wiley.
6. Novnheimer, Harald, et al. 2011. *Automotive Transmissions: Fundamentals, Selection, Design, and Application*. New York: Springer.
7. Saputra, Oktanto Darma. 2014. *Analisa Energi Pengereman Bus Transjakarta dengan Sistem Flywheel Regenerative Brake untuk Menentukan Kapasitas Daya Tampung Energi Flywheel*. Laporan Tugas Akhir. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
8. Sutantra, I Nyoman, dan Bambang Sampurno. 2010. *Teknologi Otomotif*. Surabaya: Widya Guna.
9. Tedji, Hadit .B., 2014. *Perancangan Flywheel Untuk Sistem Hybrid Pada ATC Bus Transjakarta Berdasarkan Model Dinamika Kendaraan Yang Menyertakan Interaksi Pengemudi Kendaraan Driving Cycle Pulogadung-Monas CB*. Laporan Tugas Akhir. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
10. <https://blogs.umass.edu/p139eck/2012/10/23/the-science-behind-hybrid-vehicles/> diakses 11 Mei 2015 pukul 20.31
11. [http://www.toyota-global.com/innovation/environmental\\_technology/technology\\_file/plug-in\\_hybrid.html](http://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/technology_file/plug-in_hybrid.html) diakses pada tanggal 5 Oktober 2014 pukul 11.22

12. [www.atggoleta.com/services/services-we-provide/alternator-repair-2/](http://www.atggoleta.com/services/services-we-provide/alternator-repair-2/) diakses pada tanggal 23 Juli 2015 pukul 14.30
13. <http://www.bimmerforums.com/forum/showthread.php?1453975-1998-528i-Bosch-Alternator-Rebuild-for-30!> diakses pada tanggal 23 Juli 2015 pukul 16.03
14. [http://www.zf.com/electric\\_motor/hybrid\\_drive](http://www.zf.com/electric_motor/hybrid_drive) diakses pada tanggal 5 Agustus 2015 pukul 20.17
15. [http://www.top1lithiumbattery.com/ProductDetail/537V-60Ah-lifepo4-ev-battery-pack\\_1128.html](http://www.top1lithiumbattery.com/ProductDetail/537V-60Ah-lifepo4-ev-battery-pack_1128.html) diakses pada tanggal 8 Agustus 2015





Penulis dilahirkan di Yogyakarta pada tanggal 11 Mei 1992 dan merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di Tarakanita Magelang (1998-2004), SMPN 1 Magelang (2004-2007), SMAN 1 Magelang (2007-2010). Setelah lulus studi di SMAN 1 Magelang, penulis melanjutkan studi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2010 dan menyelesaikan studi S1 pada bulan Maret 2016.

Selama menjalani masa perkuliahan, penulis aktif di berbagai kegiatan kemahasiswaan, antara lain menjadi pengurus himpunan periode 2011-2012 dan 2012-2013, pengurus KMK periode 2011-2012 dan 2012-2013, menjadi Steering Committee Pembekalan, Orientasi, dan Sosialisasi 2014, dan berbagai kegiatan lainnya.

Keinginan untuk belajar dan kebutuhan di dunia industri mendorong penulis untuk mengambil topik Tugas Akhir “Analisa Pengaplikasian Sistem ‘KERS’ Pada Bus Transjakarta Dengan Sistem Penyimpanan Pada Baterai”. Penulis berharap agar ilmu yang telah didapatkan dapat berguna untuk masyarakat, bangsa, dan negara. Penulis dapat dihubungi melalui email dengan alamat “[christopher.resza@yahoo.com](mailto:christopher.resza@yahoo.com)”.