TUGAS AKHIR – TM 141585

ANALISIS ENERGI SISTEM *REGENERATIVE BRAKING* PADA TOYOTA PRIUS HEV *2017*

MADE PRADNYANA UTAMA
NRP 02111540000024

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. I Nyoman Sutantra MSc. PhD.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

TUGAS AKHIR – TM 141585

ANALISIS ENERGI SISTEM *REGENERATIVE BRAKING* PADA TOYOTA PRIUS HEV *2017*

MADE PRADNYANA UTAMA
NRP 02111540000024

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. I Nyoman Sutantra MSc. PhD.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

FINAL PROJECT – TM 141585

ENERGY ANALYSIS OF REGENERATIVE BRAKING SYSTEM ON TOYOTA PRIUS HEV *2017*

MADE PRADNYANA UTAMA
NRP 02111540000024

Advisor
Prof. Ir. I Nyoman Sutantra MSc. PhD.

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

ANALISIS ENERGI SISTEM *REGENERATIVE BRAKING* PADA TOYOTA PRIUS *HEV* 2017

TUGAS AKHIR

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

Oleh :

Made Pradnyana Utama
NRP. 02111540000024

Disetujui oleh :

1. Prof. Ir. I Nyomana Sutantra, M.Sc., Ph.D. NIP. 195106051978031002 (Pembimbing)
2. Yohanes, S.T., M.Sc. NIP. 198006272012121003 (Penguji I)
3. Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T. NIP. 197301161997021001 (Penguji II)
4. Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, S.T., M.Eng.Sc. NIP. 197805102001121001 (Penguji III)

SURABAYA
AGUSTUS, 2020

ANALISIS ENERGI SISTEM *REGENERATIVE BRAKING* PADA TOYOTA PRIUS HEV 2017

Nama Mahasiswa : Made Pradnyana Utama
NRP : 02111540000024
Departemen : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D

ABSTRAK

Perkembangan teknologi otomotif saat ini terus meningkat, terlebih lagi dengan pengembangan kendaraan hibrid atau elektrik. Kendaraan elektrik atau hibrid adalah HEV atau *Hybrid Electric Vehicle* dengan memanfaatkan dua komponen penggerak yaitu motor pembakaran dalam dan motor listrik yang dapat dikonfigurasikan secara seri, paralel dan juga seri/paralel. Konsumsi bahan bakar dari kendaraan hibrid tergolong hemat dan ramah lingkungan dengan rata – rata 2,5 – 2,8 liter per 100 km. Sistem *regenerative braking* dapat diaplikasikan guna meningkatkan efisiensi dari kendaraan hibrid. Energi yang dimanfaatkan sistem *regenerative braking* merupakan energi dari pengeraman yang terbuang ketika kendaraan melakukan perlambatan. Energi tersebut berasal dari penurunan kecepatan putar mesin dan energi kinetik kendaraan pada saat kendaraan melakukan pengereman.

Pada penelitian ini, objek yang digunakan adalah Toyota Prius HEV 2017 dengan memanfaatkan data uji jalan yang telah dilakukan. Kendaraan dipasang *data logger* untuk mencatat performa kendaraan saat melakukan uji jalan terutama energi *regenerative braking* yang tercatat oleh *data logger*. Pengujian yang dilakukan dengan mengoperasikan kendaraan di dalam dan luar Kota Surabaya. Selain itu dilakukan juga pendekatan dengan persamaan untuk mengetahui secara teoritis energi *regenerative braking* yang dapat dihasilkan. Data perfoma serta *driving cycle*

yang didapatkan kemudian dianalisis untuk mengetahui konsumsi energi pengereman kendaraan meliputi energi pengereman yang terbuang dan dibutuhkan, energi bangkitan yang dapat dihasilkan dari sistem *regenerative braking*, efisiensi sistem *regenerative braking* dan juga kontribusi dari sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan *road load horsepower* kendaraan.

Dari penelitian ini diketahui bahwa besar energi pengereman yang terbuang mencapai 4140.64 kJ dan yang dibutuhkan sebesar 4968.84 kJ. Dari uji jalan yang telah dilakukan didapatkan energi bangkitan sistem *regenerative braking* mencapai sebesar 536.74 kJ untuk *urban driving cycle* dan 1809.70 kJ untuk *extra urban driving cycle*. Efisiensi potensi energi yang dimanfaatkan mencapai sebesar 36.67%. Kontribusi yang dihasilkan oleh energi bangkitan dari sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan *road load horsepower* mencapai sebesar 57.28% untuk *urban driving cycle* dan sebesar 52.81% untuk *extra urban driving cycle*.

Kata kunci : *Hybrid electric vehicle*, sistem *regenerative braking*, energi pengereman, energi bangkitan, *road load horsepower*

ENERGY ANALYSIS OF REGENERATIVE BRAKING SYSTEM ON TOYOTA PRIUS HEV 2017

Student Name : Made Pradnyana Utama
NRP : 02111540000024
Major : Teknik Mesin
Advisor : Prof. Dr. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D

ABSTRACT

The development of automotive technology is currently increasing, especially with the development of hybrid or electric vehicles. An electric or hybrid vehicle is a HEV or Hybrid Electric Vehicle by utilizing two driving components, namely an internal combustion motor and an electric motor which can be configured in series, parallel and also series / parallel. Fuel consumption from hybrid vehicles is classified as economical and environmentally friendly with an average of 2.5 – 2.8 liters per 100 km. Regenerative braking systems can be applied to increase the efficiency of hybrid vehicles. The energy used by the regenerative braking system is energy from incubation which is wasted when the vehicle decelerates. This energy comes from the decrease in the engine rotational speed and the kinetic energy of the vehicle when the vehicle is braking.

In this study, the object used was the Toyota Prius HEV 2017 by utilizing road test data that had been carried out. The vehicle is installed with a data logger to record the performance of the vehicle during road tests, especially the regenerative braking energy recorded by the data logger. Tests carried out by operating vehicles inside and outside the city of Surabaya. In addition, an equation approach is also carried out to determine theoretically the regenerative braking energy that can be produced. The performance and driving cycle data obtained are then analyzed to

determine the vehicle braking energy consumption including wasted and required braking energy, the energy generated from the regenerative braking system, the efficiency of the regenerative braking system and also the contribution of the regenerative braking system to the road load horsepower needs of the vehicle.

From this research, it is known that the amount of wasted braking energy reaches 4140.64 kJ and the required amount is 4968.84 kJ. From the road tests that have been carried out, the regenerative braking system generated energy reaches 536.74 kJ for the urban driving cycle and 1809.70 kJ for the extra urban driving cycle. The efficiency of the energy potential used reached 36.67%. The contribution generated by the generated energy from the regenerative braking system to the road load horsepower needs reached 57.28% for the urban driving cycle and 52.81% for the extra urban driving cycle.

Key words : Hybrid electric vehicle, regenerative braking system, braking energy, generated energy, road load horsepower

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Ida Sang Hyang Widhi Wasa, oleh karena anugerah-Nya yang melimpah penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul: ANALISIS ENERGI SISTEM *REGENERATIVE BRAKING* PADA TOYOTA PRIUS HEV 2017.

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini guna memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak . Untuk itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc, Ph.D, selaku dosen pembimbing dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Terima kasih atas bimbingan, arahan serta motivasi yang tak kunjung henti,
2. I Nyoman Sutama dan Ni Wayan Giri Adnyani, selaku kedua orang tua penulis yang telah memberi dukungan secara moril dan materil, serta doa yang tak pernah putus sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini,
3. Wayan Wicak Ananduta dan Nyoman Satria Widnyana, selaku kakak dan adik penulis yang telah memberikan semangat serta motivasi bagi penulis untuk menyelesaikan tugas akhir sebaik mungkin,
4. Yohanes, S.T., M.Sc., Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T., Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, S.T., M.Eng.Sc., selaku dosen penguji tugas akhir ini yang memberi banyak arahan, masukan serta kritikan yang sangat membangun,
5. Denissa Trista Diyanti, selaku teman penulis yang selalu memberikan semangat bagi penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini sebaik mungkin,
6. Casa Coffee dan Penghuni Casa, sebagai tempat penulis menyelesaikan tugas akhir ini dan memberikan semangat untuk penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini,

7. Angkatan M-58 Teknik Mesin ITS, selaku teman seangkatan yang berjuang bersama penulis selama masa perkuliahan,
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu. Terima kasih atas bantuan yang telah diberikan.

Besar harapan agar tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi perkembangan teknologi dan lingkungan sekitar. Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan guna kesempurnaan penelitian selanjutnya.

Surabaya, Agustus 2020

DAFTAR ISI

ABSTRAK ..... **i**
ABSTRACT ..... **iii**
KATA PENGANTAR ..... **v**
DAFTAR ISI ..... **vii**
DAFTAR GAMBAR ..... **x**
DAFTAR TABEL ..... **xiii**
BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 4
1.3 Batasan Masalah 5
1.4 Tujuan Penelitian 5
1.5 Manfaat Penelitian 6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA **7**
2.1 Penelitian Terdahulu 7
2.2 Regenerative Braking System 11
2.2.1 Pengaruh Sistem *Regenerative Braking* pada Baterai Kendaraan 12
2.2.2 Konsumsi Energi saat Pengereman 15
2.2.3 Energi Bangkitan dari Sistem *Regenerative Braking* 16
2.3 Sistem Pengereman pada Kendaraan Listrik dan Hibrid .. 17
2.3.1 Distribusi Gaya Pengereman 19
2.3.2 Regulasi Pengereman UN/ECE 23
2.4 Road Load Horsepower 24
2.5 Driving Cycle 26
2.6 Pengisian Daya pada Baterai Nickel – Metal Hydride dan Nickel Cadmium 28
BAB III METODOLOGI PENELITIAN **31**
3.1 Metodologi Penelitian 31
3.1.1 Data Spesifikasi 33
3.1.2 Moda Operasi Kendaraan 34
3.1.3 *Driving Cycle* 36

3.2 Sistem Pengereman Kendaraan Hibrid dengan *Regenerative Braking* 38
3.3 Analisis Energi Sistem *Regenerative Braking* 40
3.3.1 Analisis Konsumsi Energi Pengereman 40
3.3.2 Analisis Energi Bangkitan dari Sistem *Regenerative Braking* 42
3.4 Analisis Efisiensi Sistem *Regenerative Braking* 44
3.5 Analisis Kontribusi Sistem Regenerative Braking terhadap Road Load Horsepower 46
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 49
4.1 Klasifikasi Driving Cycle 49
4.2 Contoh Perhitungan 50
4.2.1 Energi Pengereman yang Terbuang dan Dibutuhkan Kendaraan 50
4.2.2 Energi Bangkitan Sistem *Regenerative Braking* Kendaraan 51
4.2.3 Efisiensi Sistem *Regenerative Braking* Kendaraan ...53
4.2.4 Kontribusi Sistem *Regenerative Braking* Terhadap Kebutuhan *Road Load Horsepower* Kendaraan 53
4.3 Konsumsi Energi Pengereman yang Terbuang dan Dibutuhkan Kendaraan 54
4.3.1 Kondisi Urban Driving Cycle 54
4.3.2 Kondisi Extra Urban Driving Cycle 58
4.4 Energi Bangkitan Sistem *Regenerative Braking* Kendaraan 62
4.4.1 Kondisi Urban Driving Cycle 65
4.4.2 Kondisi Extra Urban Driving Cycle 71
4.5 Kontribusi Sistem *Regenerative Braking* Terhadap Kebutuhan *Road Load Horsepower* Kendaraan 77
4.5.1 Kondisi Urban Driving Cycle 77
4.5.2 Kondisi Extra Urban Driving Cycle 81
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....87
5.1 Kesimpulan 87
5.2 Keterbatasan Penelitian 88

5.3 Saran 88
DAFTAR PUSTAKA 91
LAMPIRAN 95
BIODATA PENULIS 120

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Prediksi penjualan kendaraan dengan motor bakar (ICE) dan hibrid tahun 2010 – 2030. PHEV adalah kendaraan hibrid *plug in*, sedangkan BEV adalah *Battery Electric Vehicle* ...2
Gambar 1.2 Prediksi penjualan kendaraan dengan motor bakar (ICE) dan hibrid 2015 – 2040 3

Gambar 2.1 *Power balance urban driving cycle* (a) dan *extra urban driving cycle* (b) 8
Gambar 2.2 Grafik pemilihan moda operasi daur kemudi dalam kota (a) dan luar kota (b) pada tanggal 1 Desember 2018 9
Gambar 2.3 Sistem *regenerative braking* 12
Gambar 2.4 Perbandingan *calendar aging* dan *cycle aging* pada temperature operasi 10, 25 dan 40 ^{o}C 15
Gambar 2.5 Strategi pengereman secara seri 18
Gambar 2.6 Strategi pengereman secara paralel 19
Gambar 2.7 Grafik distribusi regulasi UN/ECE 24
Gambar 2.8 Daur kemudi New European Driving Cycle (NEDC) 27
Gambar 2.9 Grafik kenaikan temperatur baterai Ni-MH dan Ni-Cd selama pengisian daya 30

Gambar 3.1 Diagram alir penelitian 32
Gambar 3.2 Moda operasi murni penggerak listrik (a), *hybrid parallel* (b), penggerak mesin dengan motor sebagai generator (c), unduh energi pengeraman (d) serta unduh energi pengereman dan energi kinetik mesin (e) 36
Gambar 3.3 *Driving cycle* pada 1 Desember 2018 (a) dan 2 Desember 2018 (b) 38
Gambar 3.4 Aliran energi sistem *regenerative braking* Toyota Prius *HEV* 2017 : unduh energi pengereman (a) dan unduh energi pengereman serta energi kinetik mesin (b) 39

Gambar 3. 5 Diagram alir pengereman kendaraan hibrid dengan *regenerative braking* 40
Gambar 3.6 Diagram alir konsumsi energi pengereman 41
Gambar 3.7 Diagram alir energi bangkitan dari sistem *regenerative braking* 43
Gambar 3.8 Diagram alir efisiensi sistem *regenerative braking* .45
Gambar 3.9 Diagram alir perhitungan *Road Load Horsepower* .48

Gambar 4.1 Grafik data uji jalan 01 Desember 2018 50
Gambar 4.2 Grafik energi pengereman yang terbuang dan daya pengereman yang dibutuhkan kendaraan pada *urban driving cycle* 01 Desember 2018 (a) dan 02 Desember 2018 (b).....55
Gambar 4.3 Grafik energi pengereman yang terbuang dan dibutuhkan kendaraan pada *urban driving cycle* 01 Desember 2018 daerah A (a) dan 02 Desember 2018 daerah B (b) 57
Gambar 4.4 Grafik energi pengereman yang terbuang dan dibutuhkan kendaraan pada *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018.....59
Gambar 4.5 Grafik energi pengereman yang terbuang dan dibutuhkan kendaraan pada *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 daerah C (a) dan 02 Desember 2018 daerah D (b) 61
Gambar 4.6 Grafik energi dan daya bangkitan sistem *regenerative braking* pada *urban driving cycle* 01 Desember 2018 (a) dan 02 Desember 2018 (b) 67
Gambar 4.7 Grafik energi bangkitan sistem *regenerative braking* pada *urban driving cycle* 01 Desember 2018 daerah A (a) dan 02 Desember 2018 daerah B (b).....71
Gambar 4.8 Grafik energi dan daya bangkitan sistem *regenerative braking* pada *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 (a) dan 02 Desember 2018 (b) 73
Gambar 4.9 Grafik energi bangkitan sistem *regenerative braking* pada *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 daerah C (a) dan 02 Desember 2018 daerah D (b).....76

Gambar 4.10 Grafik kontribusi energi bangkitan sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan *road load horsepower* kendaraan pada *urban driving cycle* 01 Desember 2018 (a) dan 02 Desember 2018 (b) 79
Gambar 4.11 Grafik kontribusi energi bangkitan sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan *road load horsepower* kendaraan pada *urban driving cycle* 01 Desember 2018 daerah A (a) dan 02 Desember 2018 daerah B (b).....81
Gambar 4.12 Grafik kontribusi energi bangkitan sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan *road load horsepower* kendaraan pada *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 (a) dan 02 Desember 2018 (b) 83
Gambar 4.13 Grafik kontribusi energi bangkitan sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan *road load horsepower* kendaraan pada *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 daerah C (a) dan 02 Desember 2018 daerah D (b) 85

Gambar A.1 Peta efisiensi motor.....97
Gambar A.2 Grafik titik kerja motor pada *driving cycle* 01 Desember 2018.....97
Gambar A.3 Grafik kerja motor pada *driving cycle* 02 Desember 2018.....98
Gambar A.4 Peta efisiensi mesin.....98
Gambar A.5 Grafik titik kerja mesin pada *driving cycle* 01 Desember 2018.....99
Gambar A.6 Grafik titik kerja mesin pada *driving cycle* 02 Desember 2018.....99

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Intesitas penggunaan moda hibrid pada daur kemudi dalam dan luar kota pada 1 Desember 2018. (Nico Hasoloan, 2019) 10

Tabel 3.1 Spesifikasi Kendaraan 33

Tabel 4.1 Tabel energi bangkitan sistem *regenerative braking* pada *driving cycle* 01 Desember 2018 dan 02 Desember 2018 untuk tiap moda operasi traksi..... 63
Tabel 4.2 Tabel energi bangkitan sistem *regenerative braking* pada *urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan 02 Desember 2018 untuk tiap moda operasi traksi..... 68
Tabel 4.3 Tabel energi bangkitan sistem *regenerative braking* pada *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan 02 Desember 2018 untuk tiap moda operasi traksi..... 74

Tabel A.1 Rasio hasil perhitungan E–CVT 100
Tabel A.2 Energi pengereman yang terbuang dan dibutuhkan pada daerah A 100
Tabel A.3 Energi pengereman yang terbuang dan dibutuhkan pada daerah B 101
Tabel A.4 Energi pengereman yang terbuang dan dibutuhkan pada daerah C 102
Tabel A.5 Energi pengereman yang terbuang dan dibutuhkan pada daerah D 103
Tabel A.6 Energi bangkitan sistem *regenerative braking* pada daerah A 104
Tabel A.7 Energi bangkitan sistem *regenerative braking* pada daerah B..... 105
Tabel A.8 Energi bangkitan sistem *regenerative braking* pada daerah C..... 108

Tabel A.9 Energi bangkitan sistem *regenerative braking* pada daerah D 109
Tabel A.10 Kontribusi energi bangkitan sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan *road load horsepower* kendaraan pada daerah A 110
Tabel A.11 Kontribusi energi bangkitan sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan *road load horsepower* kendaraan pada daerah B 112
Tabel A.12 Kontribusi energi bangkitan sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan *road load horsepower* kendaraan pada daerah C 114
Tabel A.13 Kontribusi energi bangkitan sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan *road load horsepower* kendaraan pada daerah D 117

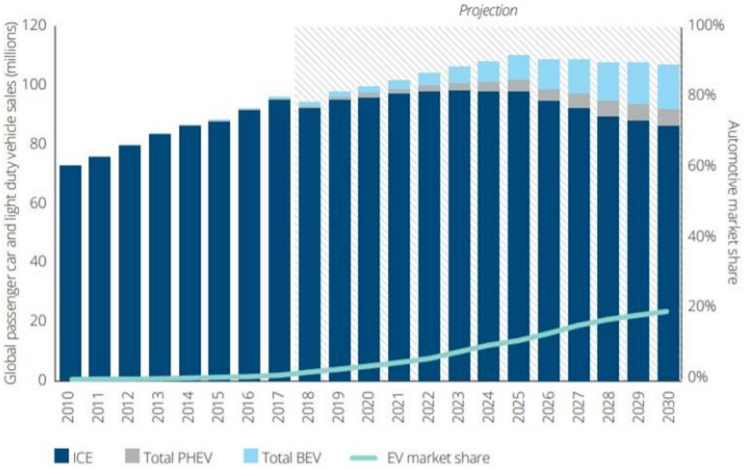
BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

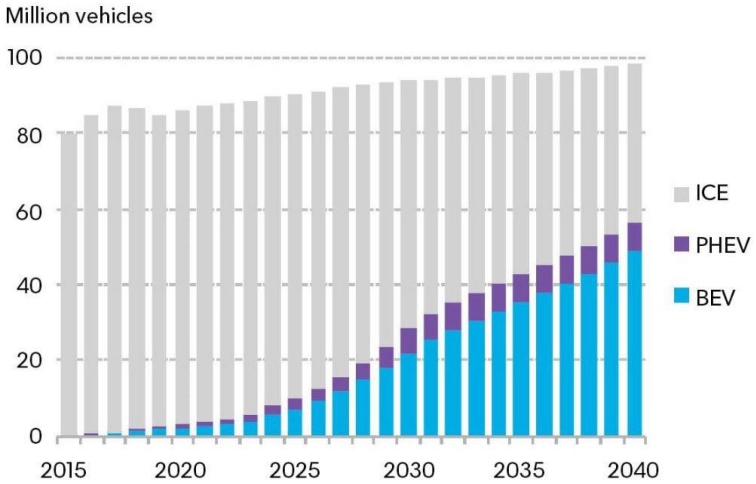
Perkembangan teknologi otomotif saat ini terus meningkat, terlebih lagi dengan pengembangan kendaraan hibrid atau elektrik. Dorongan produksi melalui Kementerian Perindustrian Republik Indonesia untuk kendaraan beremisi karbon rendah atau *low carbon emission vehicle* telah disiapkan *roadmap* hingga tahun 2025 (Kemenperin, 2017). *International Energy Agency* (IEA) serta *deloitte* memprediksi kenaikan penjualan kendaraan berbasis listrik meningkat dari dua juta unit pada tahun 2018 menjadi empat juta unit pada tahun 2020 kemudian akan meningkat menjadi 12 juta unit pada tahun 2025 hingga sebesar 21 juta unit pada tahun 2030 (IEA & Deloitte, 2019). Sementara itu *Bloomberg* juga telah memprediksi penjualan kendaraan berbasis listrik dari tahun 2015 – 2040 mengalami kenaikan yang sangat pesat. Kendaraan penumpang dapat mencapai 10 juta unit pada tahun 2025, kemudian akan meningkat hingga menjadi 28 juta unit pada tahun 2030 dan akan terus meningkat hingga sebanyak 56 juta unit pada tahun 2040. Peningkatan penjualan kendaraan listrik berpenumpang dapat mencapai sebesar 57% serta secara global dengan lebih dari 30% armada kendaraan berpenumpang merupakan kendaraan berbasis listrik pada tahun 2040 (BloombergNEF, 2019).

HEV atau *Hybrid Electric Vehicle* merupakan kendaraan yang menggunakan dua penggerak, yaitu : motor pembakaran dalam atau *Internal Combustion Engine* (ICE) dan motor listrik. Pemasangan motor listrik pada kendaraan dapat meningkatkan efisiensi kendaraan dan konsumsi bahan bakar serta emisi dari motor bakar dapat dikurangi. Pada kendaraan hibrid, pemasangan motor listrik dapat dilakukan secara seri, paralel dan seri/paralel dengan motor pembakaran dalam pada kendaraan. Konsumsi bahan bakar dari kendaraan hibrid

menurut Kementerian Perindustrian Republik Indonesia dan Gabungan Industri Kendaraan Bermotor Indonesia (Gaikindo) tergolong hemat dan ramah lingkungan dengan rata – rata yaitu sebesar 2,5 – 2,8 liter per 100 km (Kemenperin, 2017). Namun, efisiensi pada kendaraan HEV dapat ditingkatkan lebih lanjut lagi dengan menambahkan beberapa teknologi *Energy Recovery System* pada beberapa komponen kendaraan, seperti : sistem rem, sistem suspensi dan mesin kendaraan. Dengan penambahan teknologi tersebut, energi – energi yang biasanya terbuang pada saat kendaraan melakukan pengereman atau perlambatan dapat diunduh dan disimpan untuk kemudian digunakan menggerakan kendaraan atau untuk kebutuhan energi dari asesoris kendaraan sehingga dapat meningkatkan efisiensi dari kendaraan tersebut.



Gambar 1.1 Prediksi penjualan kendaraan dengan motor bakar (ICE) dan hibrid tahun 2010 – 2030. PHEV adalah kendaraan hibrid *plug in*, sedangkan BEV adalah *Battery Electric Vehicle*
Sumber : (IEA & Deloitte, 2019)



Gambar 1.2 Prediksi penjualan kendaraan dengan motor bakar (ICE) dan hibrid 2015 – 2040
Sumber : (BloombergNEF, 2019)

Kendaraan dapat mengunduh energi saat melakukan pengereman dengan menggunakan KERS atau *Kinetic Energy Recovery System* dan *regenerative braking system*. Pada kendaraan yang menggunakan mesin, terdapat dua sumber energi yang hilang yang dapat ditangkap yaitu, energi kinetik dari mesin karena pengurangan kecepetan putar mesin dan energi kinetik kendaraan karena berkurangnya kecepatan kendaraan. Konsep KERS elektrik mengunduh energi yang hilang dari penurunan kecepatan putar mesin dengan cara mengubah energi kinetik yang hilang menjadi energi listik yang dapat disimpan pada baterai kendaraan. Sementara untuk mengunduh energi kinetik yang hilang dari berkurangnya kecepatan kendaraan dapat digunakan konsep *regenerative braking system*. Sistem ini bekerja dengan mengubah motor listrik menjadi generator pada saat dilakukan pengereman guna menangkap dan juga mengkonversi energi kinetik kendaraan

menjadi energi listrik yang kemudian disimpan pada baterai kendaraan atau digunakan untuk kebutuhan energi dari asesoris kendaraan.

Tugas akhir ini difokuskan pada *regenerative braking system.* Dalam tugas akhir ini dilakukan analisis *regenerative braking system* agar dapat mengetahui besar konsumsi energi pengereman pada saat kendaraan melakukan perlambatan dan energi yang dapat dibangkitkan serta disimpan pada baterai kendaraan hibrid. Pada tugas akhir ini, mobil hibrid diuji jalan dengan menggunakan dua moda berkendara, yaitu : moda berkendara di dalam kota dan moda berkendara di luar kota. Dengan melakukan pengujian jalan, didapatkan data daya yang hilang dari proses pengereman kendaraan saat menggunakan motor pembakaran dalam dan motor listrik ditiap tingkat kecepatan dan daya yang dapat dibangkitkan serta disimpan oleh baterai kendaraan. Selain itu, didapat pula nilai efisiensi dari sistem *regenerative braking* pada kendaraan hibrid beserta kontribusi sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan daya jalan atau *road load horsepower* pada *driving cycle* di dalam dan juga luar kota.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang akan dikaji dan diselesaikan dalam proposal tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana konsumsi energi pengereman yang terbuang dan dibutuhkan Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 pada *driving cycle* dalam dan luar kota ?
2. Berapa besar energi bangkitan dari sistem *regenerative braking* pada Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 pada saat moda listrik, hibrid seri dan hibrid paralel pada *driving cycle* dalam dan luar kota ?
3. Bagaimana nilai efisiensi dari sistem *regenerative braking* pada Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 pada *driving cycle* dalam dan luar kota ?

4. Bagaimana kontribusi dari sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan *road load horsepower* pada Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 pada *driving cycle* dalam dan luar kota ?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan penulis dalam proposal tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Parameter kendaraan menggunakan spesifikasi mobil Toyota Prius HEV Seri/Paralel tahun 2017 dengan menggunakan transmisi *Electric Continuous Variable Transmission* atau E-CVT,
2. *Driving cycle* yang digunakan adalah *driving cycle* hasil uji jalan dalam dan luar kota,
3. Analisa perhitungan tidak mencakup sistem kontrol dan *actuator*,
4. Massa kendaraan total dengan dua orang penumpang (70kg tiap penumpang) dan bagasi adalah 1930kg,
5. Sistem penyimpanan daya hanya menggunakan baterai.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan perumusan masalah tersebut, maka tujuan dari penilitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mendapatkan konsumsi energi pengereman yang terbuang dan dibutuhkan Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 pada *driving cycle* dalam dan luar kota,
2. Mengetahui seberapa besar energi bangkitan dari sistem *regenerative braking* pada Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 pada saat moda listrik, hibrid seri dan hibrid paralel pada *driving cycle* dalam dan luar kota,
3. Mendapatkan nilai efisiensi dari sistem *regenerative braking* pada mobil Toyota Prius HEV Seri/Paralel,
4. Mengetahui seberapa besar kontribusi dari sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan *road load*

horsepower pada Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 pada *driving cycle* dalam dan luar kota.

1.5 Manfaat Penelitian

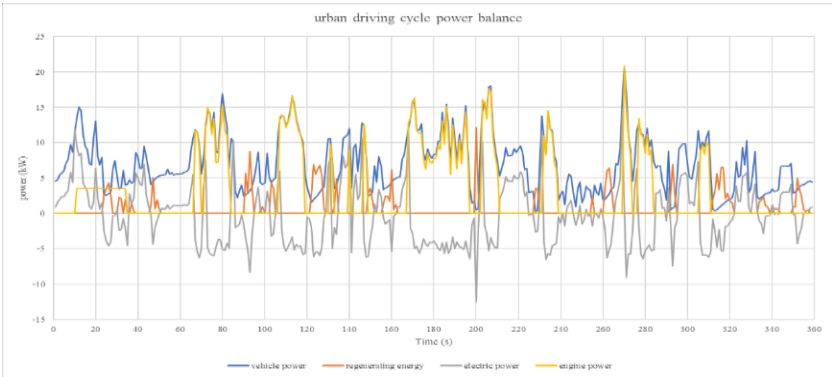
Dari penelitian ini, manfaat dari penelitian ini antara lain adalah :

1. Sebagai referensi dan media penelitian tentang sistem *regenerative brake* pada kendaraan.
2. Memberikan informasi mengenai sistem *regenerative brake* pada kendaraan *hybrid*.

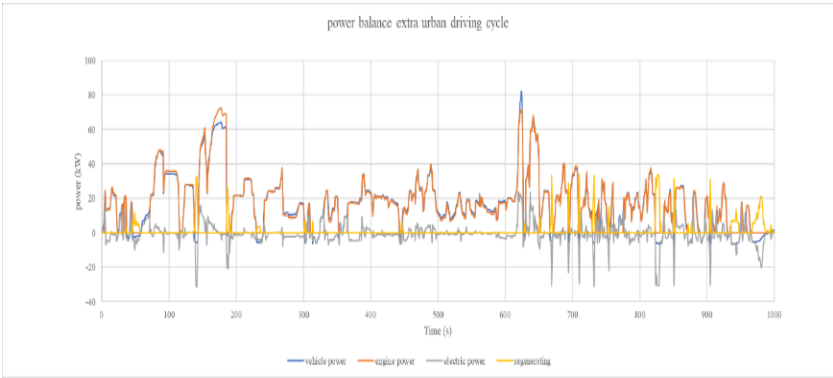
BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian terkait Toyota Prius HEV seri/paralel 2017 telah dilakukan oleh Luthfi Hadi pada tahun 2019 dengan tujuan untuk mengetahui moda operasi, hubungan antara *electric power*, *engine power* dan *vehicle power* pada tiap moda operasi serta menentukan *road load horsepower* berdasarkan *driving cycle* dan juga kebutuhan gaya dorong pada Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 di dalam dan luar kota Surabaya. Pada gambar 2.1 menunjukkan keseimbangan energi dari Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 berdasarkan pada hasil penelitian dari Luthfi Hadi.



(a)



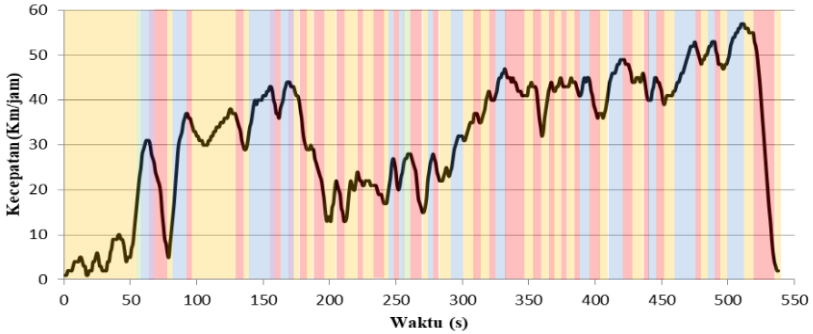
(b)

Gambar 2.1 *Power balance urban driving cycle* (a) dan *extra urban driving cycle* (b)
Sumber : (Luthfi Hadi, 2019)

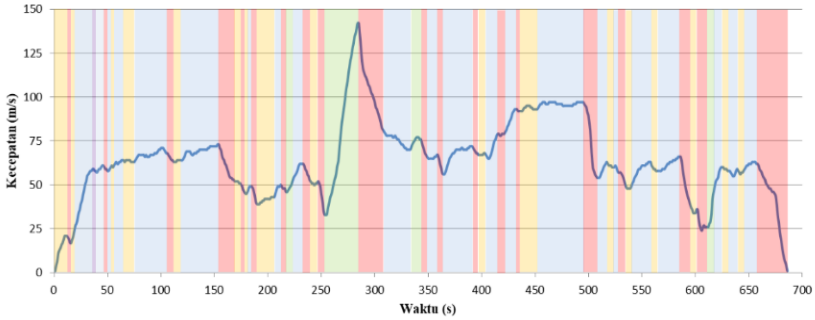
Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 memiliki 3 moda operasi traksi yaitu murni penggerak listrik (*pure electric*), penggerak mesin dan motor sebagai generator (*engine with motor charging*) dan penggerak hibrid paralel. Selain itu juga terdapat 2 moda operasi pengereman yang dapat dilakukan yaitu unduh energi pengereman (*braking energy recovery*) dan unduh energi pengereman dan kinetik mesin (*hybrid battery charging mode)*. Nilai *road load horsepower* yang didapatkan selalu lebih rendah dari sumber tenaga penggerak, dimana menandakan bahwa kelebihan daya yang dihasilkan oleh kendaraan masih dapat digunakan untuk melawan gaya hambat tanjakan dan untuk melakukan percepatan tambahan. Besar gaya hambat total di dalam kota maupun di luar kota memiliki nilai yang bervariatif. Nilai gaya hambat *rolling* dan gaya hambat aerodinamis bernilai jauh lebih besar pada rute jalur bebas hambatan jika dibandingkan dengan jalur dalam kota akibat dari adanya perbedaan kecepatan. Tetapi gaya hambat yang sangat mempengaruhi besarnya gaya hambat total adalah gaya hambat akselerasi, yang artinya profil berkendara dari

pengendara dalam melakukan percepatan dan perlambatan memiliki pengaruh terbesar dalam kebutuhan gaya dorong kendaraan (Luthfi Hadi, 2019).

Penelitian lain terkait Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 juga dilakukan oleh Nico Hasoloan pada tahun 2019 yang memiliki tujuan untuk mengetahui karakteristik pemilihan moda berkendara dan aliran energi, pembagian porsi kerja motor listrik dan motor bakar serta tingkat konsumsi bahan bakar pada kendaraan hibrid.



(a)



(b)

Gambar 2.2 Grafik pemilihan moda operasi daur kemudi dalam kota (a) dan luar kota (b) pada tanggal 1 Desember 2018
Sumber : (Nico Hasoloan, 2019)

Tabel 2.1 Intesitas penggunaan moda hibrid pada daur kemudi dalam dan luar kota pada 1 Desember 2018. (Nico Hasoloan, 2019)

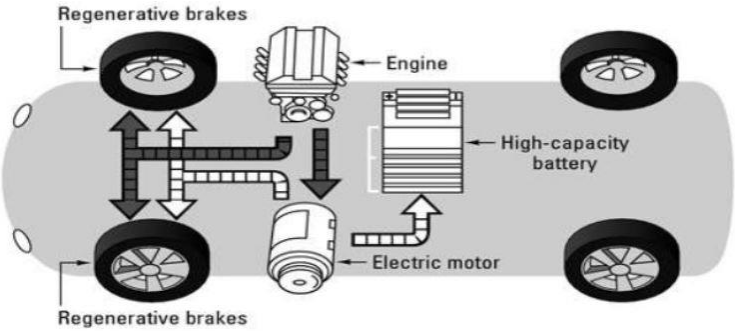
Warna	**Moda operasi**	**Intensitas penggunaan (%)**	
		Daur kemudi dalam kota	**Daur kemudi luar kota**
	Murni penggerak mesin	0	0.29
	Murni penggerak motor	47.21	22.82
	Penggerak hibrid	2.23	8.86
	Penggerak mesin dan mengisi baterai	25.65	45.78
	Unduh energi pengereman	24.42	21.51
	Pengisian baterai	0	0
	Pengisian baterai secara hibrid	1.48	0.72
Total waktu pengoperasian (s)		538	688

Pada penelitian yang dilakukan oleh Nico dijelaskan bahwa pada kondisi daur mengemudi dalam kota dimana kecepatan berkendara kurang dari 50 km/jam, kendaraan cenderung memilih menggunakan moda penggerak murni listrik dengan persentase penggunaan moda operasi murni penggerak listrik sebesar 47,21% untuk daur mengemudi 1 dan sebesar 57,79% untuk daur mengemudi 2. Sementara untuk kondisi daur mengemudi di luar kota dengan kecepatan berkendara lebih dari 50 km/jam, kendaran cenderung menggunakan moda penggerak mesin dan mengisi baterai. Hal ini dibuktikan dengan persentase penggunaan moda operasi penggerak mesin dan mengisi baterai sebesar 45,78% untuk daur mengemudi 1 dan 31,88% untuk daur mengemudi 2. Pada daur mengemudi di

dalam kota sumber tenaga penggerak yang digunakan dominan berasal dari motor saja. Hal tersebut ditunjukkan dengan persentase ZEV (*Zero Emission Vehicle*) yang memiliki rata – rata di atas 50% pada daur mengemudi dalam kota. Untuk konsumsi bahan bakar dari Toyota Prius *Hybrid* Seri/Paralel 2017 pada kondisi daur mengemudi di dalam kota adalah berkisar antara 1,61 – 3,62 L/100 km. Sementara untuk konsumsi bahan bakar pada kondisi daur mengemudi di luar kota berkisar antara 3,62 – 5,48 L/100 km (Nico Hasoloan, 2019). Selain itu juga perlu diperhatikan bahwa besarnya unduh energi pengereman yang dapat dihasilkan daur mengemudi pada 1 Desember 2018 adalah 24,42% untuk daur mengemudi di dalam kota dan sebesar 21,51% untuk daur mengemudi di luar kota.

2.2 *Regenerative Braking System*

Regenerative Braking System (RBS) atau sistem pengereman *regenerative* adalah suatu sistem yang bekerja untuk menangkap dan mengkonversi energi kinetik yang terbuang pada saat kendaraan mengalami perlambatan menjadi energi listrik yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan lain pada kendaraan. Skema kendaraan yang menggunakan RBS ditunjukkan pada gambar 2.3. Pada saat dilakukan pengereman, motor listrik akan berubah menjadi generator untuk menangkap dan juga mengkonversi energi kinetik kendaraan menjadi energi listrik dan oleh sistem pengendali energi listrik disimpan pada baterai atau digunakan untuk kebutuhan asesoris kendaraan. Dengan mengintegrasi antara sistem KERS elektrik untuk menangkap energi kinetik yang terbuang dari putaran mesin serta sistem pengereman *regenerative* yang digunakan untuk menangkap energi kinetik yang hilang karena perlambatan kendaraan dapat menghasilkan energi listrik yang lebih besar. (Sutantra, 2015)



Gambar 2.3 Sistem *regenerative braking*
Sumber : (Parashar, 2014)

2.2.1 Pengaruh Sistem *Regenerative Braking* pada Baterai Kendaraan

Sistem *regenerative braking* selain memengaruhi peningkatan efisiensi dari kendaraan, juga memengaruhi siklus umur dari baterai kendaraan. Kerusakan pada baterai umumnya terjadi karena umur dari baterai yang semakin meningkat, siklus kerusakan pada baterai tersebut mencakupi *calendar aging* dan *cycle aging*. *Calendar aging* merupakan semua proses kerusakan akibat dari umur baterai yang semakin meningkat yang mendegradasi sel baterai terlepas dari siklus mengisi dan mengeluarkan daya baterai. Sementara *cycle aging* adalah proses kerusakan pada baterai ketika baterai pada saat baterai dalam siklus mengisi dan mengeluarkan daya. Pada pengujian terhadap siklus umur baterai dimana standar temperatur operasi berkendara 25 ^{o}C serta tambahan temperature operasi pada temperatur rendah sebesar 10 ^{o}C dan tertinggi 40 ^{o}C untuk mencakup spektrum temperatur operasi pemakaian yang realistis dengan tiga tingkatan *state of charge* (SoC) yaitu SoC rendah, sedang dan tinggi pada tegangan sebesar 3,7 V, 3,9 V dan 4,1 V. Dimana tingkatan SoC tersebut didefinisikan terhadap tegangan pengisian maksimum untuk arus pengisian

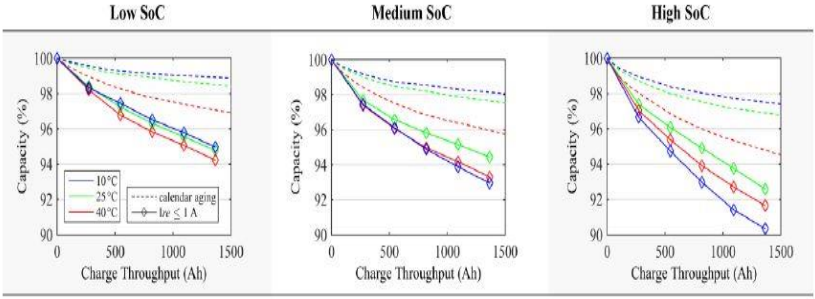
yang konstan pada 0,7 A. Baterai diuji dengan jarak berkendara sejauh 50.000 km.

Kerusakan sel baterai terhadap temperatur operasi semakin meningkat terhadap temperatur operasi berkendara, dimana pada temperatur sebesar 40 ^{o}C, kapasitas baterai yang hilang adalah sebesar 2 – 6%. Angka tersebut merupakan dua kali lebih besar dibandingkan pada temperatur operasi 25 ^{o}C. Ketika menurunkan temperatur operasi juga tidak mengurangi kerusakan tersebut karena pada temperatur operasi 10 ^{o}C kapasitas yang hilang adalah sebesar 0,5 – 3% bergantung pada SoC tersebut. Baterai kendaraan akan terus kehilangan kapasitas secara perlahan, pada temperatur operasi 40 ^{o}C pada SoC rendah dan sedang, tidak menunjukkan adanya ketergantungan terhadap tingkatan dari *regenerative braking* yang pada akhirnya kehilangan kapasitas mendekati 6% pada SoC rendah, 7% pada SoC sedang dan berbeda pada SoC tinggi yang bergantung terhadap *regenerative braking* dimana kehilangan kapasitas sebesar 8 – 10%. Sementara itu berbeda pada temperatur operasi 25 ^{o}C dan 10 ^{o}C, menunjukkan adanya ketergantungan terhadap tingkatan dari *regenerative* braking pada setiap SoC. Pada temperatur operasi 25 ^{o}C kehilangan kapasitas lebih dari 1% dibandinkan pada SoC sedang dan rendah. Jika dibandingkan dengan persentase *calendar aging* pada temperataur operasi 40 ^{o}C sebesar kurang dari 2% dan *cycle aging* lebih dari 1% dari temperatur operasi 25 ^{o}C. Sedangkan pada temperatur operasi 10 ^{o}C kehilangan kapasitas yang disebabkan oleh *calendar aging* adalah sebesar 1% pada SoC rendah, 2% pada SoC sedang dan 2,5% pada SoC tinggi. Tambahan sebesar 4 – 5% kapasitas yang hilang akibat dari *cycle aging* pada SoC rendah dan sedang. Namun kehilangan kapasitas akibat dari *calendar aging* dapat bertambah sebesar 2,5% ketika adanya tingkatan *regenerative braking* yang maksimum, sementara itu akan meningkat sebesar 4% ketika tidak adanya *regenerative braking* pada temperatur operasi 40 ^{o}C. Selain itu pada temperatur operasi 10 ^{o}C, kehilangan

kapasitas akibat *cycle aging* dapat mencapai 6% ketika adanya tingkatan *regenerative braking* yang maksimum dan meningkat menjadi 10% ketika tidak adanya tingkatan *regenerative braking*.

Dapat diketahui bahwa *calendar aging* meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur. Dampak temperatur operasi terhadap kehilangan kapasitas pada *calendar aging* adalah sebesar 2% lebih tinggi dari temperatur operasi 25 ^{o}C dan 2,5% lebih tinggi dari temperatur operasi 10 ^{o}C untuk temperatur operasi 40 ^{o}C. Namun berbeda dengan *cycle aging*, dimana pada SoC rendah pada temperatur operasi 40 ^{o}C menurun sebesar 1% dibandingkan pada temperatur operasi 25 dan 10 ^{o}C. Pada SoC sedang dan temperatur operasi 40 dan 25 ^{o}C nilai perbandingan tersebut rendah namun meningkat pada temperatur operasi 10 ^{o}C. Pada suhu yang rendah menunjukkan nilai kerusakan yang semakin intensif dimana *cycle aging* meningkat pada temperatur operasi 10 dan 25 ^{o}C sebesar 2% dan 1% yang dibandingkan pada SoC sedang.

Selama periode penyimpanan temperatur harus dijaga tetap rendah untuk mengurangi *calendar aging* karena *calendar aging* terus meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur. Sementara ketika pengisian baterai saat berkendara temperatur yang tinggi diperlukan untuk meminimalisir kerusakan akibat dari endapan lithium. Ketika pengisian daya baterai untuk waktu yang lama pada temperatur yang rendah, aliran listrik harus dijaga agar tetap rendah untuk mengurangi endapan lithium. Selain itu SoC juga dapat memengaruhi kerusakan secara substansial, untuk memaksimalkan umur baterai SoC yang tinggi harus dihindari. Pada temperatur operasi 25 ^{o}C merupakan pilihan yang baik terhadap kerusakan *calendar* dan *cycle aging*, dimana degradasi kapasitas dari baterai untuk *regenerative braking* yang maksimum pada SoC rendah dan sedang diprediksi hanya berkisar sebesar 10% setelah jarak berkendara sejauh 100.000 km. (Keil et al, 2015)



Gambar 2.4 Perbandingan *calendar aging* dan *cycle aging* pada temperature operasi 10, 25 dan 40 ^{o}C
Sumber : (Keil et al., 2015)

2.2.2 Konsumsi Energi saat Pengereman

Konsumsi energi yang signifikan diperlukan saat pengereman. Untuk melakukan pengereman kendaraan sebesar 1500 kg dari kecepatan 100 km/jam hingga 0 km/jam mengkonsumsi energi kira – kira sebesar 0,16 kWh, berdasarkan persamaan **2.1** :

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_1^2 - v_2^2). \qquad \textbf{2.1}$$

Ketika kendaraan bergerak dengan pola melaju dan berhenti seperti pada daerah perkotaan, mengkonsumsi energi pengereman yang cukup besar karena pengereman yang sering dilakukan sehingga membutuhkan konsumsi bahan bakar yang tinggi. Jika 25% energi ini dapat diunduh melalui teknik pengereman *regenerative*, maka persamaan **2.1** dapat digunakan untuk memperkirakan energi yang dapat digunakan untuk mempercepat kendaraan dari 0 km/jam hingga 50 km/jam, mengabaikan hambatan aerodinamik, hambatan mekanis dan hambatan *rolling* ketika dalam pengereman dan percepatan. (Steven M. DeMers, 2008)

2.2.3 Energi Bangkitan dari Sistem *Regenerative Braking*

Pada saat kendaraan melakukan perlambatan kemungkinan energi pengereman yang dapat diunduh dapat dianalisa dalam keseimbangan energi berikut ini :

$$E = E_h + E_a + E_t, \qquad \textbf{2.2}$$

dimana E adalah energi yang dibutuhkan kendaraan untuk melawan hambatan kendaraan dan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$E = \int_0^t m \cdot a_h \cdot v(t)dt + \sum_1^n \int_0^t I_k \cdot \varepsilon_k(t) \cdot \omega_k(t)\, dt, \qquad \textbf{2.3}$$

dimana :

m : massa kendaraan (kg)
n : jumlah roda kendaraan
I_k : momen inersia dari roda kendaraan (kg.m^2)
v : kecepatan pengereman linear kendaraan (m/s^2)
ω_k : kecepatan sudut dari roda kendaraan (rad/s^2)
a_h : perlambatan kendaraan (m/s^2)
ε_k : perlambatan roda kendaraan (rad/s^2)

E_h merupakan energi yang diambil oleh sistem pengereman kendaraan dan ketahanan mesin terhadap pengurangan kecepatan, E_a adalah energi yang diambil oleh gaya hambat aerodinamik dan E_t adalah energi yang diambil oleh gaya hambat *rolling*. E_a dan E_t dapat dirumuskan dalam persamaan **2.4** dan **2.5** :

$$E_a = \int_0^t c_x \cdot A \cdot v(t)^2 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v(t)dt, \qquad \textbf{2.4}$$

$$E_t = \int_0^t m \cdot g \cdot f \cdot v(t)dt, \qquad \textbf{2.5}$$

dimana :

c_x : koefisien hambatan aerodinamik
A : luasan daerah *frontal* (m^2)
ρ : massa jenis udara (kg/m^3)
f : koefisien hambatan *rolling*
g : percepatan gravitasi (m/s^2)

Besar jumlah energi yang diambil dari sistem pengereman kendaraan dan ketahanan mesin terhadap pengurangan

kecepatan E_h dapat dirumuskan dalam persamaan **2.6** berikut ini:

$$E_h = E - E_a - E_t, \qquad \textbf{2.6}$$

(Gajek et al., 2015).

Sementara untuk jumlah energi yang dapat disimpan pada baterai atau E_{reg} saat kendaraan melakukan pengereman dapat dirumuskan seperti pada persamaan **2.7** :

$$E_{reg} = \int_{t1}^{t2} V(t) \cdot I(t) dt, \qquad \textbf{2.7}$$

dimana $V(t)$ merupakan besarnya tegangan pada baterai, $I(t)$ merupakan arus listrik pada baterai dan $t_2 - t_1$ merupakan waktu pengisian *regenerative* yang dilakukan selama kendaraan melakukan perlambatan. Ketika kendaraan melakukan pengereman *regenerative*, maka untuk mengetahui seberapa besar daya baterai saat pengereman hanya melalui *powertrain*. Dimana pada kasus ini, jika mesin kendaraan tetap berjalan selama pengereman *regenerative* dan melakukan pengisian terhadap baterai, maka perlu menghilangkan porsi dari daya baterai yang dirumuskan pada persamaan **2.8** berikut :

$$E_{reg} = V \cdot I - P_{mesin} \cdot \eta_{motor}, \qquad \textbf{2.8}$$

dimana P_{mesin} adalah daya yang dibangkitkan oleh mesin dan η_{motor} merupakan efisiensi dari motor. Untuk besarnya nilai efisiensi dapat dikalkulasi dengan persamaan berikut :

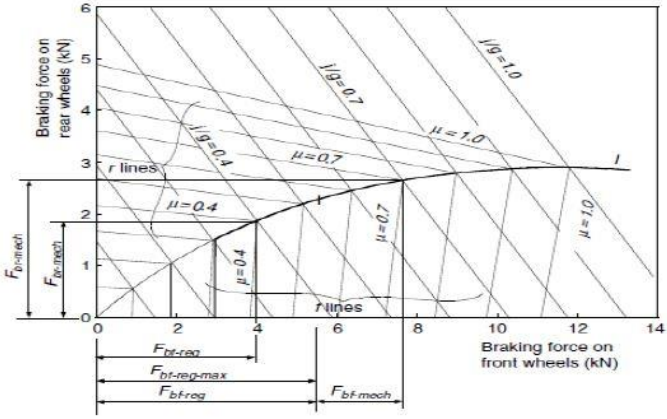
$$\eta_{reg} = \frac{E_{reg}}{E_h} \cdot 100\% \qquad \textbf{2.9}$$

(Liu et al., 2017).

2.3 Sistem Pengereman pada Kendaraan Listrik dan Hibrid

Regenerative Braking pada kendaraan listrik dan hibrid menambah kompleksitas pada desain sistem pengereman. Kompleksitas yang dimaksud adalah bagaimana cara mendistribusikan total gaya pengereman antara *regenerative brake* dan pengereman mekanis sehingga dapat mengunduh energi kinetik dari kendaraan sebanyak mungkin, selain itu bagaimana mendistribusikan total gaya pengereman untuk

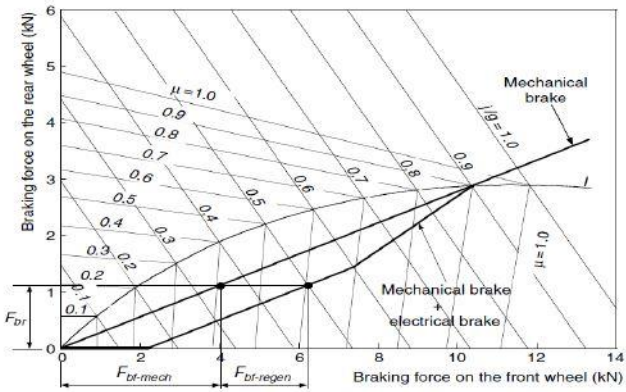
poros roda depan dan belakang sehingga mencapai pengereman yang stabil. *Regenerative brake* biasanya lebih efektif jika diaplikasikan pada poros roda penggerak. Traksi motor harus dikontrol untuk menghasilkan gaya pengereman yang cukup untuk mengunduh energi kinetik sebanyak mungkin dan pada saat yang bersamaan pengereman mekanis harus dapat dikontrol untuk menghasilkan gaya pengereman yang diperlukan oleh pengemudi. Pada dasarnya terdapat dua strategi kontrol pengereman, yaitu pengereman secara seri dan pengereman secara paralel. (Ehsani et al., 2004)



Gambar 2.5 Strategi pengereman secara seri
Sumber : (Ehsani et al., 2004)

Pada pengereman secara seri yang telah diaplikasikan pada kendaraan – kendaraan komersial, lebih bergantung pada *regenerative brake*, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5. Jika kebutuhan gaya pengereman kurang dari torsi maksimum dari motor maka hanya *regenerative brake* yang memenuhi kebutuhan gaya pengereman tersebut. Jika gaya pengereman yang dibutuhkan lebih besar dari gaya maksimum yang dapat dihasilkan oleh motor, pengereman secara mekanis akan memenuhi kebutuhan pengereman tersebut dengan rasio

pengereman yang tetap. Pengereman secara seri memiliki potensi yang signifikan untuk meningkatkan nilai energi yang dapat diunduh saat pengereman dan lebih fleksibel untuk mengatur derajat hibridisasi dari pengereman tersebut. Untuk pengereman secara paralel, pengereman secara mekanis diperlukan untuk memenuhi kebutuhan rasio pengereman tetap dari gaya pengereman untuk poros roda depan dan roda belakang, seperti yang ditunjukkan gambar 2.6. *Regenerative brake* dikontrol untuk memenuhi tambahan kebutuhan gaya pengereman untuk kebutuhan total distribusi gaya pengereman untuk roda depan dan roda belakang. Pada strategi pengereman ini mempunyai batasan untuk meningkatkan efisiensi *regenerative braking* karena pada strategi ini lebih mengutamakan pada pengereman secara mekanis. (Yi Zhang, 2017)



Gambar 2.6 Strategi pengereman secara paralel
Sumber : (Ehsani et al., 2004)

2.3.1 Distribusi Gaya Pengereman

Besar nilai energi yang dapat dibangkitkan selama pengereman bergantung pada besar *regenerative braking* yang bekerja pada kendaraan. Distribusi gaya pengereman yang

terjadi pada roda bagian depan dan roda bagian belakang harus diperhitungkan agar mendapatkan jumlah energi pengereman yang maksimum. Gaya pengereman di kedua roda kendaraan memliki suatu rasio tetap yang dibatasi oleh nilai koefisien gesek dari lintasan yang dilalui serta nilainya harus seimbang dengan beban normal pada kendaraan, sehingga roda bagian depan dan roda bagian belakang kendaraan mendapatkan gaya pengereman yang maksimum secara bersamaan. Jumlah gaya pengereman pada roda bagian dan roda bagian belakang kendaraan harus sama dengan nilai dari koefisien gesek tersebut, yaitu dimana gaya pengereman total adalah :

$$F_b = F_{bf} + F_{br} \qquad \textbf{2.10}$$

dengan gaya pengereman maksimum berikut :

$$F_{b,max} = F_{bf,max} + F_{br,max} \qquad \textbf{2.11}$$

$$F_{b,max} = \mu \cdot \left(W_f + W_r\right) \qquad \textbf{2.12}$$

$$F_{b,max} = \mu \cdot W \qquad \textbf{2.13}$$

sehingga

$$\mu = \frac{F_{bf}}{W} + \frac{F_{br}}{W} \qquad \textbf{2.14}$$

Dalam proses pengereman terjadi perpindahan beban dari sumbu belakang (roda bagian belakang) ke sumbu depan (roda bagian depan) kendaraan. Dengan mempertimbangkan keseimbangan momen melalui titik tumpu roda bagian depan dan belakang, gaya normal pada roda bagian depan (W_f) dan roda bagian belakang (W_r) maka keseimbangan momen pada roda bagian depan dan belakang adalah sebagai berikut :

$$W_f = \frac{W}{L} \cdot \left(L_r - \frac{a}{g} \cdot h\right) \qquad \textbf{2.15}$$

dan

$$W_r = \frac{W}{L} \cdot \left(L_f - \frac{a}{g} \cdot h\right) \qquad \textbf{2.16}$$

Distribusi sistem pengereman yang dirancang bertujuan untuk menjaga keseimbangan gaya pengereman pada roda bagian depan dan roda bagian belakang terhadap beban normal kendaraan sehingga kendaraan berada pada kondisi yang stabil saat berkendara, maka dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{F_{bf}}{F_{br}} = \frac{W_f}{W_r} = \frac{\frac{W}{L}\cdot\left(L_r - \frac{a}{g}\cdot h\right)}{\frac{W}{L}\cdot\left(L_f - \frac{a}{g}\cdot h\right)} \qquad \textbf{2.17}$$

dimana :

F_b : gaya pengereman kendaraan total (N)
F_{bf} : gaya pengereman roda bagian depan kendaraan (N)
F_{br} : gaya pengereman roda bagian belakang kendaraan (N)
L : jarak antara roda depan dan roda belakang kendaraan (m)
L_f : jarak antara titik pusat kendaraan dengan roda bagian depan kendaraan (m)
L_r : jarak antara titik pusat kendaraan dengan roda bagian belakang kendaraan (m)
h : jarak titik pusat kendaraan dengan titik pusat roda kendaraan (m)
W : beban normal kendaraan total (N)

Saat kendaraan melakukan pengereman, maka terjadi perlambatan pada kendaraan tersebut. Nilai perlambatan pada kendaraan tersebut dapat digunakan untuk mendapatkan distribusi dari besar gaya pengereman masing – masing roda kendaraan dengan menggunakan batas maksimum dari nilai koefisien gesek lintasan sebagai jumlah total nilai tersebut. Dengan begitu akan didapatkan grafik distribusi gaya pengereman ideal pada roda bagian depan dan roda bagian belakang kendaraan, yaitu dengan persamaan berikut :

$$F_{bf} + F_{br} = m \cdot a \qquad \textbf{2.18}$$

$$\frac{F_{bf}}{W} = \mu - \frac{F_{br}}{W} \qquad \textbf{2.19}$$

Secara umum, kendaraan memiliki gaya pengereman aktual yang telah disesuaikan dengan pemakaiannya, dimana gaya pengereman pada roda bagian depan dan roda bagian belakang kendaran telah didesain dengan rasio yang tetap (β). Jika proses gaya pengereman aktual terjadi di bawah daerah distribusi pengereman ideal, maka roda bagian depan kendaraan akan terkunci lebih dahulu. Sementara ketika proses gaya pengereman aktual terjadi di atas daerah distribusi pengereman ideal, maka roda bagian belakang kendaraan akan terkunci lebih dahulu. Saat roda bagian belakang yang terkunci lebih dahulu, kendaraan tersebut akan kehilangan kestabilan karena kemampuan roda bagian belakang untuk melawan gaya dorong dari samping akan hilang.

$$\beta = \frac{F_{bf}}{F_b} \qquad \textbf{2.20}$$

Gaya pengereman (F_b) kendaraan merupakan total gaya – gaya hambat yang bekerja terhadap kendaraan pada saat kendaraan melakukan perlambatan. Gaya pengereman tersebut memunculkan torsi pengereman (T_b) yang terjadi pada roda kendaraan yang didapatkan dari pengaruh gaya pengereman terhadap jari – jari roda kendaraan (r), dimana untuk torsi motor (T_m) selama *regenerative braking* dipengaruhi juga oleh rasio transmisi (I_g), rasio gardan (I_g) dan efisiensi dari motor (η_m) tersebut. Kemudian didapatkan daya pengereman (P_b) kendaraan dari torsi pengereman terhadap kecepatan sudut roda dan motor yang dirumuskan sebagai berikut :

$$F_b = F_i - F_a - F_r - F_g \qquad \textbf{2.21}$$

$$T_b = F_b \cdot r \qquad \textbf{2.22}$$

$$T_m = \frac{F_b \cdot r}{I_t \cdot I_g \cdot \eta_{drivetrain}} \qquad \textbf{2.23}$$

$$P_b = T_b \cdot \omega_{roda} \qquad \textbf{2.24}$$

$$P_m = T_m \cdot \omega_{motor} \qquad \textbf{2.25}$$

$$\omega_{roda} = \frac{v}{r} \qquad \textbf{2.26}$$

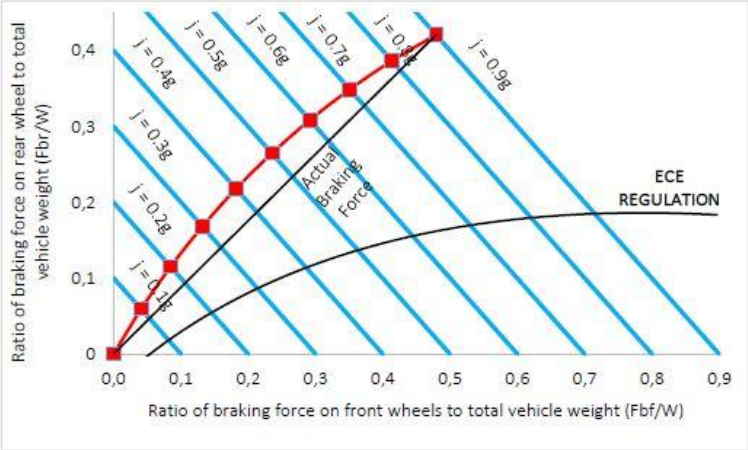
$$\omega_{motor} = \frac{v \cdot I_t \cdot I_g}{r \cdot \pi} \qquad \textbf{2.27}$$

(Sutantra, 2015)

2.3.2 Regulasi Pengereman UN/ECE

Jika distribusi gaya pengereman aktual berada di bawah kurva distribusi gaya pengereman ideal maka roda depan akan terkunci lebih dahulu daripada roda belakang. Saat roda depan mengunci, maka roda belakang menerima gaya pengereman yang minimum. Untuk alasan keamanan, maka regulasi pengereman terus dikembangkan. Dalam hal ini *Economic Commission for Europe of the United Nations* (UN/ECE) mensyaratkan regulasi agar roda belakang tidak pernah terkunci sebelum roda depan agar gaya pengereman aktual selalu berada di bawah kurva distribusi gaya pengereman ideal :

$$\frac{F_{bf}}{W_f} \geq \frac{F_{br}}{W_r} \qquad \textbf{2.28}$$



Gambar 2.7 Grafik distribusi regulasi UN/ECE
Sumber : (Pradipta Bintang, 2018)

Oleh karena itu distribusi gaya pengereman aktual selalu berada dibawah distribusi gaya pengereman ideal. Ketika roda bagian depan terkunci, maka menurut *ECE braking regulation*, gaya pengereman pada roda bagian belakang harus dapat membuat kendaraan untuk bisa menghasilkan nilai perlambatan yang lebih besar dibandingkan dengan perlambatan pada persamaan sebagai berikut :

$$\frac{a}{g} \geq 0{,}1 + 0{,}85 \cdot (\mu - 0{,}2) \qquad \textbf{2.29}$$

(Pradipta Bintang, 2018)

2.4 *Road Load Horsepower*

Mesin dan baterai merupakan beberapa sumber untuk memenuhi kebutuhan daya jalan dari kendaraan hibrid. Untuk menentukan kapasitas mesin dan baterai yang dibutuhkan kendaraan, perlu menganalisa kebutuhan daya kendaraan pada tiap moda operasi. Besar kebutuhan daya jalan (*Road Load Horsepower*) yang diperlukan tersebut tergantung pada besar

gaya dorong yang diperlukan di tiap tingkat kecepatan dan moda operasi kendaraan dan besar gaya traksi kendaraan dipengaruhi oleh gaya hambat yang terjadi di tiap moda operasi.

Jika kendaraan beroperasi pada jalan yang rata dengan kecepatan konstan yang dipengaruhi oleh gaya hambat aerodinamis (F_a) dan gaya hambat *rolling* (F_r), gaya traksi (F_t) yang dibutuhkan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$F_t = F_a + F_r, \qquad \textbf{2.30}$$

$$F_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot {v_A}^2 + W \cdot f_r, \qquad \textbf{2.31}$$

sehingga besar kebutuhan daya jalan (*Rhp*) yang dibutuhkan kendaraan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Rhp = F_t \cdot v_k, \qquad \textbf{2.32}$$

$$Rhp = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot {v_A}^2 + W \cdot f_r\right) \cdot v_k. \qquad \textbf{2.33}$$

Jika kendaraan beroperasi pada jalan yang rata dengan kecepatan berubah, gaya traksi (F_t) juga dipengaruhi oleh gaya hambat akselerasi kendaraan (F_i) dan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$F_t = F_a + F_r + F_i, \qquad \textbf{2.34}$$

$$F_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot {v_A}^2 + W \cdot f_r + m \cdot a, \qquad \textbf{2.35}$$

dimana a adalah percepatan kendaraan. Sehingga besar kebutuhan daya jalan (*Rhp*) yang dibutuhkan kendaraan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Rhp = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot {v_A}^2 + W \cdot f_r + m \cdot a\right) \cdot v_k \qquad \textbf{2.36}$$

Jika kendaraan beroperasi pada jalan menanjak sebesar θ dengan kecepatan konstan, gaya traksi (F_t) juga dipengaruhi oleh gaya hambat *gradient* (F_g) dan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$F_t = F_a + F_r + F_g \qquad \textbf{2.37}$$

$$F_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot {v_A}^2 + N \cdot cos\theta \cdot f_r + W \cdot sin\theta, \qquad \textbf{2.38}$$

sehingga besar kebutuhan daya jalan (*Rhp*) yang dibutuhkan kendaraan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Rhp = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot {v_A}^2 + W \cdot cos\theta \cdot f_r + W \cdot sin\theta\right) \cdot v_k \quad \textbf{2.39}$$

Jika kendaraan beroperasi pada jalan menanjak sebesar θ dengan kecepatan berubah, gaya traksi (*Ft*) yang dibutuhkan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$F_t = F_a + F_r + F_g + F_i \quad \textbf{2.40}$$

$$F_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot {v_A}^2 + W \cdot cos\theta \cdot f_r + W \cdot sin\theta + m \cdot a \quad \textbf{2.41}$$

sehingga besar kebutuhan daya jalan (*Rhp*) yang dibutuhkan kendaraan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Rhp = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot {v_A}^2 + W \cdot cos\theta \cdot f_r + W \cdot sin\theta + m \cdot a\right) \cdot v_k \quad \textbf{2.42}$$

dimana :

Rhp : daya yang dibutuhkan (Watt)
v_k : kecepatan kendaraan (m/s)
m : massa total kendaraan (kg)
a : percepatan kendaraan (m/s^2)

namun secara pendekatan untuk kendaraan penumpang dapat dirumuskan sebagai berikut ini :

$$Rhp = \frac{v}{375}\left[0.012W + 0.00125A_f \cdot v^2\right] \quad \textbf{2.43}$$

atau

$$Rhp = \frac{v}{375}\left[\,0.395\,\frac{W}{P} + 0.00125A_f \cdot v^2\right] \quad \textbf{2.44}$$

dimana :

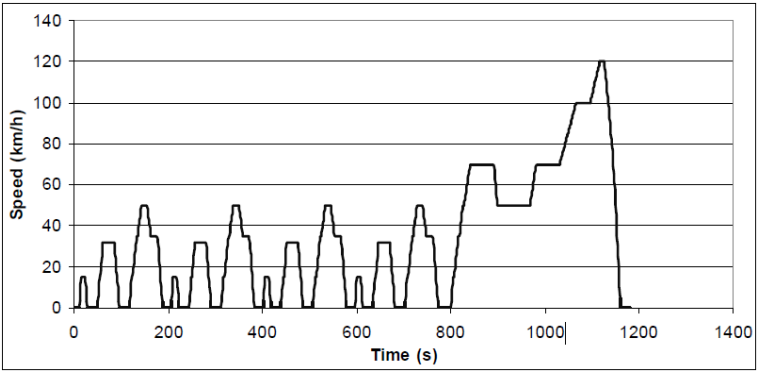
v : kecepatan kendaraan (mph)
W : berat total kendaraan dengan beban (lb)
A_f : luas frontal kendaraan (ft^2)
P : tekanan ban (psig)

(Sutantra, 2015)

2.5 *Driving Cycle*

Driving cycle merupakan kumpulan data kecepatan kendaraan dan pemilihan rasio gigi sebagai fungsi waktu yang

mengindikasikan suatu perilaku berkendara. Berdasarkan perubahan karakteristik kecepatan dan daya mesin, *driving cycle* dapat dibedakan menjadi dua, yaitu: *steady state cycles* dan *transient cycles*. *Steady state cycles* adalah sebuah daur berkendara yang memiliki kecepatan dan daya mesin konstan. Pada umumnya, daur ini digunakan untuk menguji *heavy duty diesel engine*. Sedangkan, *transient cycles* adalah sebuah daur dengan kecepatan dan daya keluaran mesin yang mengalami perubahan terus menerus. Berdasarkan kecepatan kendaraan, secara umum *driving cycles* dapat dibedakan menjadi *Extra Urban Driving Cycles* (moda pada jalan bebas hambatan) dan *Urban Driving Cycles* (moda pada jalan perkotaan). Karena bergantung terhadap kondisi jalan, moda berkendara dan kondisi lingkungan di tiap belahan dunia berbeda – beda, diperlukan sebuah standar *driving cycles* tertentu pada tiap tempat. Salah satunya adalah *New European Driving Cycles* (NEDC) yang ditunjukan pada gambar 2.9. (Barlow et al., n.d.)



Gambar 2.8 Daur kemudi New European Driving Cycle (NEDC)
Sumber : (Barlow et al., n.d.)

Daur berkendara suatu kendaraan dapat dibandingkan berdasarakan informasi statistik kendaraan. Selain data kecepatan kendaraan (v) terhadap waktu pada daur kemudi,

terdapat parameter lainnya yang dapat dikalkulasi, seperti : percepatan (*a*) dan jarak tempuh kendaraan (*s*) yang dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$a(t) = \frac{d}{dt}v(t) \qquad \textbf{2.45}$$

$$S(t) = \int v(t)dt \qquad \textbf{2.46}$$

Setelah data percepatan dan jarak tempuh kendaraan didapat, kecepatan rata – rata dan percepatan rata – rata suatu daur kemudi dapat dirumuskan sebagai berikut :

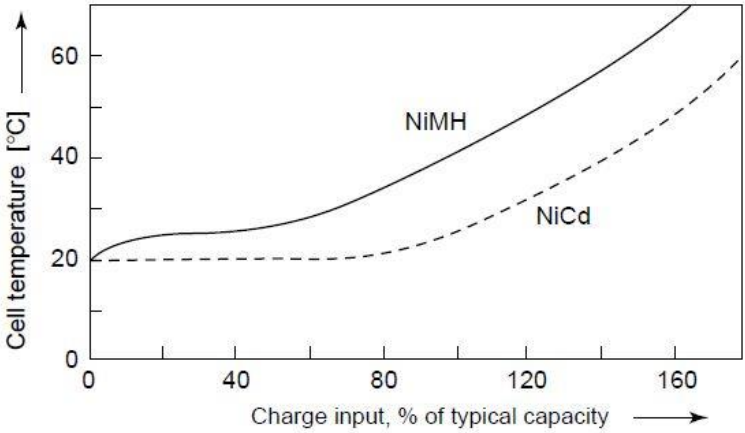
$$v_{av} = \frac{1}{T}\int_0^T v(t)dt = \frac{S}{T} \qquad \textbf{2.47}$$

$$a_{av} = \frac{1}{T}\int_0^T a(t)dt \qquad \textbf{2.48}$$

2.6 Pengisian Daya pada Baterai Nickel – Metal Hydride dan Nickel Cadmium

Saat melakukan pengisian daya, efek degeneratif baterai terus meningkat terlebih lagi jika melakukan pengisian daya secara cepat (*fast charging*) karena terus meningkatnya hambatan internal pada baterai yang diakibatkan dari peningkatan temperatur baterai terhadap peningkatan energi yang terbuang. (Wang et al., 2018) *Nickel – Metal Hydride* (Ni-MH) merupakan jenis baterai yang pengisian daya dilakukan dengan arus yang konstan. Ketika *fast charging* diterapkan, arus tersebut diubah menjadi rendah ketika pemicu *end-of-charge* terjadi. Pemicu tersebut berdasarkan pada waktu pengisian, tegangan atau temperatur. Ketika terdapat pemicu pertama pada saat proses pengisian daya yang mengarahkan pada perubahan arus menjadi rendah, dengan begitu baterai terjaga dari tekanan internal yang berlebihan dan kenaikan temperatur. Sebagai dasar aturan, tingginya arus pengisian daya, perawatan lebih harus dilakukan untuk menghindari baterai dari pengisian daya

berlebih dengan menghentikan arus tinggi tersebut pada waktunya. Oleh karena itu, pertama – tama pemicu tersebut harus bergantung pada arus pengisian daya yang digunakan. Selanjutnya, pilihan pemicu *end-of-charge* tertentu bergantung pada kemampuan siklus hidup dari baterai. Semakin banyak pengisian daya berlebih yang diperbolehkan dengan pemicu *end-of-charge* tertentu, maka semakin pendek umur dari baterai tersebut karena pengisian daya berlebih memiliki dampak yang negatif terhadap siklus hidup baterai. Pemicu *end-of-charge* beragam tergantung pada moda pengisian baterai tersebut, salah satunya adalah pemicu temperatur maksimum, temperatur *ambient* dan perubahan temperatur *ambient* terhadap waktu. Ni-MH merupakan jenis baterai yang sensitif terhadap pengisian daya berlebih, sehingga diperlukan algoritma yang lebih berhati – hati lagi dalam pemilihan *end-of-charge*, karena yang akan berpengaruh pada umur dari baterai. Kurva tegangan baterai Ni-MH kurang tinggi dibandingkan dengan baterai Ni-Cd (*Nickel – Cadmium*). Selain itu kenaikan temperatur pada baterai Ni-Cd juga hanya terjadi ketika mendekati akhir dari pengisian daya. Reaksi *net charge* pada Ni-Cd adalah secara endotermik, dimana pada area dibawah 80% temperatur relatif konstan yang selanjutnya meningkat pada akhir pengisian daya. Sementara pada baterai Ni-MH, reaksi *net charge* yang terjadi adalah secara eksotermik. Dimana temperatur terus meningkat bahkan ketika jauh sebelum mencapai 80% input dari kapasitas baterai yang pada akhirnya meningkat pesat ketika mencapai akhir pengisian daya. Secara umum, reaksi sampingan dari eksotermik adalah peningkatan temperatur baterai yang signifikan ketika pengisian daya baterai penuh. Perilaku temperatur lainnya adalah ketika pengisian yang berlebih. Pada baterai Ni-MH, temperatur terus meningkat selama pengisian daya berlebih. Akibat dari temperatur yang tinggi tersebut adalah merugikan umur baterai dan temperatur tinggi yang muncul terjadi dari awal selama pengisian berlebih tersebut. (Bergveld, 2001)

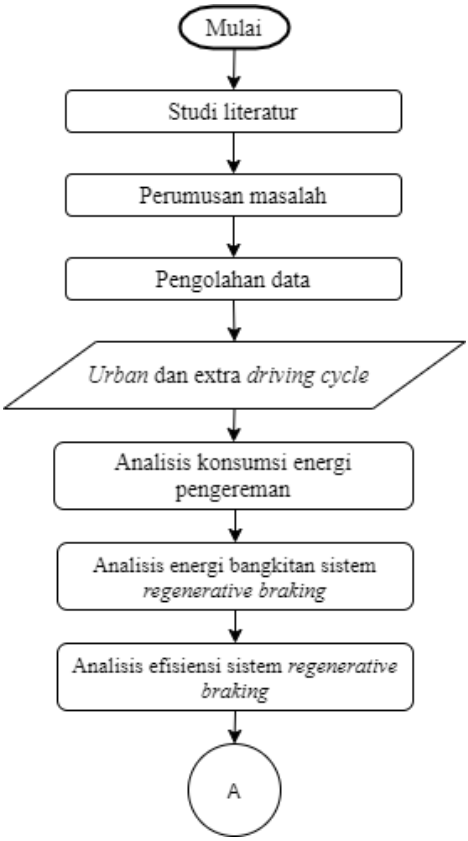


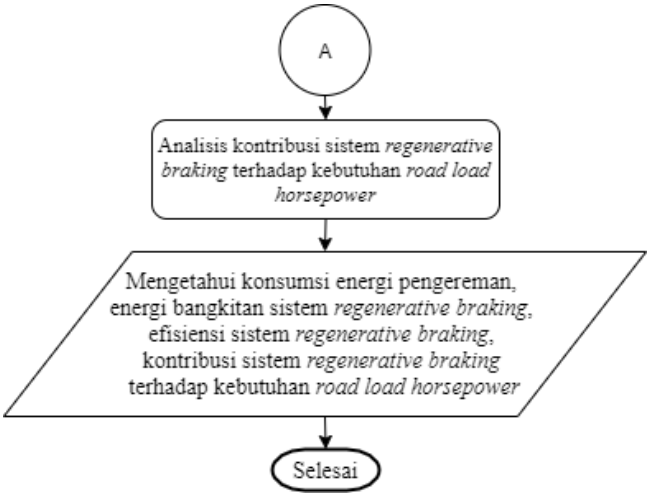
Gambar 2.9 Grafik kenaikan temperatur baterai Ni-MH dan Ni-Cd selama pengisian daya
Sumber : (Bergveld, 2001)

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian

Pada penulisan tugas akhir ini, dilakukan beberapa tahapan pengerjaan yang dilakukan oleh penulis untuk menjawab permasalahan yang telah dirumuskan. Tahapan pengerjaan tersebut dinyatakan dalam diagram alir penelitian seperti pada gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Untuk mengawali penulisan tugas akhir ini, penulis melakukan studi literatur terkait topik terkait. Studi literatur yang dilakukan oleh penulis berguna untuk menambah wawasan serta pengetahuan dan juga memperkaya dasar – dasar teori untuk tugas akhir ini. Literatur yang digunakan dalam penulisan tugas akhir ini berasal dari berbagai buku dan jurnal internasional serta penelitian terdahulu terkait dengan topik tugas akhir ini. Literatur yang diambil oleh penulis selama melakukan penulisan dan pengerjaan tugas akhir ini terkait dengan sistem *regenerative braking* pada kendaraan hibrid, energi pengereman pada kendaraan hibrid dan *road load horsepower*. Untuk mempelajari sistem *regenerative braking* dan energi pengereman pada kendaraan hibrid, penulis menggunakan buku *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles : Fundamentals, Theory and Design* karangan Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastian E. Gay dan Ali Emadi. Sementara untuk mempelajari *road load horsepower*, penulis menggunakan beberapa acuan buku, yaitu : Teknologi Otomotif Edisi Kedua dan Teknologi Otomotif *Hybrid* karangan I Nyoman Sutantra.

Setelah mempelajari literatur – literatur terkait sistem *regenerative braking* dan energi pengereman pada kendaraan hibrid, penulis merumuskan beberapa permasalahan terkait topik tugas akhir ini. Setelah sebelumnya dilakukan penelitian terkait pengelolaan energi dan konsumsi bahan bakar pada Toyota Prius HEV Seri/Paralel Tahun 2017 kali ini penulis merasa perlu dilakukan analisis terhadap sistem *regenerative braking* pada kendaraan hibrid. Analisis tersebut dilakukan untuk mengetahui efisiensi dan kontribusi terhadap *road load horsepower* dari sistem *regenerative braking* pada kendaraan hibrid pada kondisi jalan dan *driving cycle* di Kota Surabaya.

3.1.1 Data Spesifikasi

Data spesifikasi yang digunakan adalah dari Toyota Prius *Hybrid Electric Vehicle* Seri/Paralel Tahun 2017 diambil dari penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Nico Hasoloan dan Luthfi Hadi. Spesifikasi tersebut didapatkan dari katalog mobil Toyota Prius *Hybrid Electric Vehicle* Seri/Paralel Tahun 2017. Berikut ini merupakan data spesifikasi Toyota Prius *Hybrid Electric Vehicle* Seri/Paralel Tahun 2017 yang disajikan dalam tabel berikut :

Tabel 3.1 Spesifikasi Kendaraan

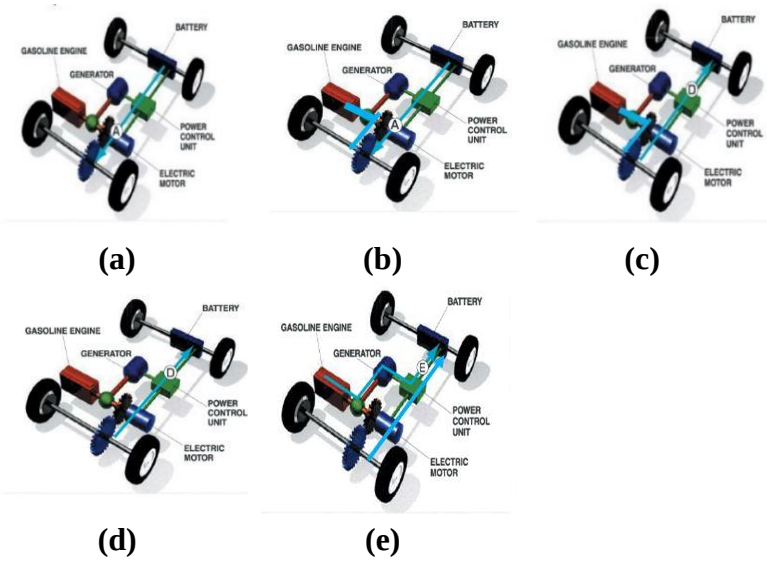
Mesin dan Transmisi	
Sistem penggerak	Sistem penggerak roda depan
Kode mesin	2ZR-FXE
Jumlah silinder	4, *inline*
Isi silinder (cc)	1798
Daya kelauran maksimum (Kw/rpm)	72/5200
Torsi keluaran maksimum (Nm/rpm)	142/3600
Rasio kompresi	13.04:1
Total daya keluaran hibrid (Kw)	90
Transmisi	E-CVT

Motor Listrik	
Tipe	*Permanent magnet AC synchronous motor*
Daya keluaran maksimum (Kw)	53
Torsi keluaran maksimum (Nm)	163
Voltase keluaran maksimum (V)	600
Baterai	
Tipe	*Nickel-Metal Hydride* (Ni-MH)
Nominal voltase (V)	201.6
Jumlah modul baterai	28
Kapasitas baterai (3 Jam/ amp.jam)	6.5
Dimensi	
Panjang (mm)	4540
Lebar (mm)	1760
Tinggi (mm)	1470
Jarak sumbu (mm)	2700
Jarak terendah (mm)	890
Radius putar (m)	10.2
Massa (Kg)	1400
Koefisien *drag*	0.24
Luasan *frontal* (m^2)	2.1865
Ukuran roda	P195/65 R15
Tipe roda	*Tubeless, Radial*
Sistem Pengereman	
Depan	*Ventilated Disc*
Belakang	*Disc*
Sistem Suspensi	
Depan	*MacPherson strut*
Belakang	*Double wishbone*

3.1.2 Moda Operasi Kendaraan

Pada penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Luthfi Hadi terdapat beberapa pembagian moda operasi dari Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017. Terdapat lima moda operasi dari

Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 yang terbagi menjadi dua moda operasi besar yaitu moda operasi traksi dan moda operasi pengereman. Untuk moda operasi traksi dari Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 terbagi menjadi murni penggerak listrik, penggerak *hybrid parallel* dan penggerak mesin dengan motor sebagai generator. Sementara untuk moda operasi pengereman dari Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 terbagi menjadi unduh energi pengereman saja dan unduh energi pengereman serta energi kinetik mesin. Penentuan moda operasi tersebut ditunjukkan pada gambar 3.2, dimana dari tiga moda operasi traksi tersebut selama dalam proses pengereman terdapat dua moda operasi pengereman yaitu unduh energi pengereman saja dan unduh energi pengereman serta energi kinetik mesin yang artinya terdapat 3 moda operasi dasar dari Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017, yaitu : moda listrik ketika kendaraan beroperasi pada moda murni penggerak listrik, moda seri saat kendaraan beroperasi pada moda penggerak mesin dengan motor sebagai generator dan moda paralel ketika kendaraan beroperasi pada moda *hybrid parallel*. Ketika Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 beroperasi pada moda *hybrid parallel* atau moda paralel dan penggerak mesin dengan motor sebagai generator atau moda seri, terdapat tambahan daya yang dihasilkan dari mesin kendaraan untuk mengisi daya baterai saat kendaraan melakukan perlambatan, maka dari itu moda operasi pengereman tersebut adalah unduh energi pengereman serta energi kinetik mesin. Sementara ketika kendaraan melakukan perlambatan saat beroperasi pada moda murni penggerak listrik hanya dapat unduh energi pengereman saja.

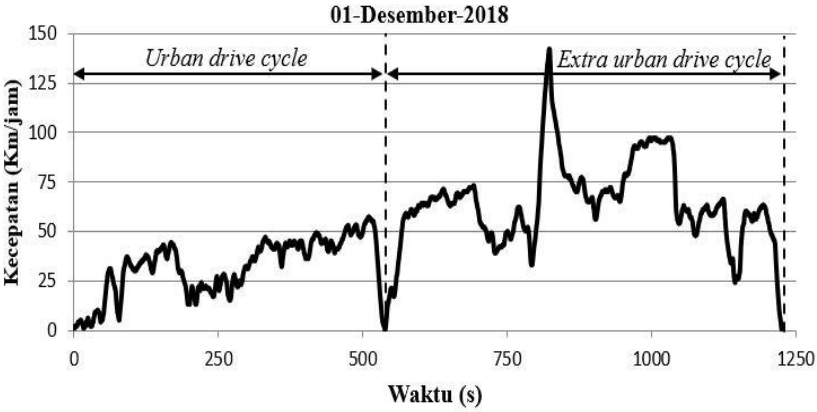


Gambar 3.2 Moda operasi murni penggerak listrik (a), *hybrid parallel* (b), penggerak mesin dengan motor sebagai generator (c), unduh energi pengeraman (d) serta unduh energi pengereman dan energi kinetik mesin (e)
Sumber : (Luthfi Hadi, 2019)

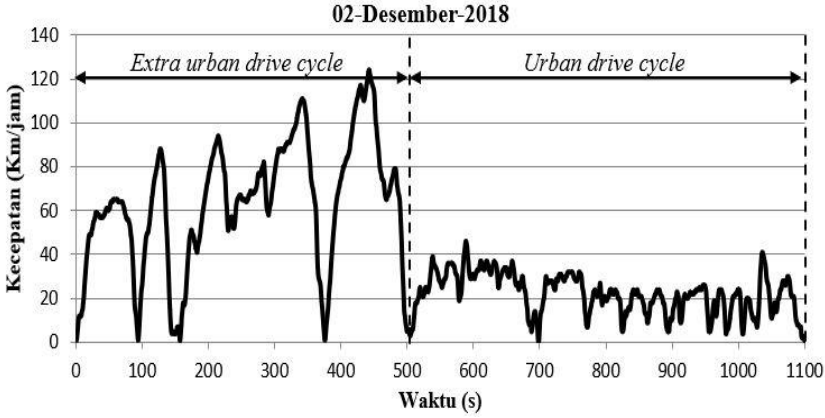
3.1.3 *Driving Cycle*

Dalam penelitian ini, kendaraan Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 menjalani pengujian jalan di Kota Surabaya yang dilakukan pada tanggal 12 November 2018 – 28 Desember 2018. Dalam pengujian tersebut kendaraan dipasangkan *data logger* untuk memonitor dan mencatat performa kendaraan. Setelah *data logger* terintregasi dengan kendaraan, dilakukan pengujian jalan dengan beberapa parameter operasi berkendara. Proses pengujian dihentikan ketika kendaraan dimatikan atau kendaraan tidak bergerak selama lebih dari lima menit. Proses pengambilan data pada *data logger* sendiri memiliki waktu interval pengambilan data sebesar satu detik. Setelah pengujian

selesai, didapatkan beberapa data, yaitu : durasi pengujian, kecepatan kendaraan, daya keluaran kendaraan, daya keluaran motor pembakaran dalam, daya keluaran motor listrik, kecepatan putaran mesin dan jumlah unduh energi. *Driving cycle* yang dihasilkan berupa 2 jenis *driving cycle*, yaitu : *urban driving cycle* dan *extra urban driving cycle* yang penulis dapatkan dari penilitian terdahulu milik Nico Hasoloan dan Luthfi Hadi. *Driving cycle* tersebut merupakan data hasil pengujian jalan pada tanggal 1 Desember 2018 dan 2 Desember 2018 yang dapat dilihat pada gambar 3.3.



(a)

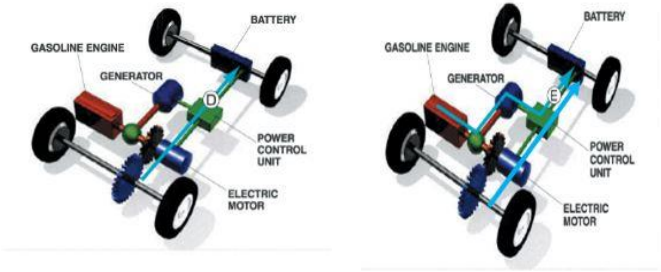


(b)

Gambar 3.3 *Driving cycle* pada 1 Desember 2018 (a) dan 2 Desember 2018 (b)

3.2 Sistem Pengereman Kendaraan Hibrid dengan *Regenerative Braking*

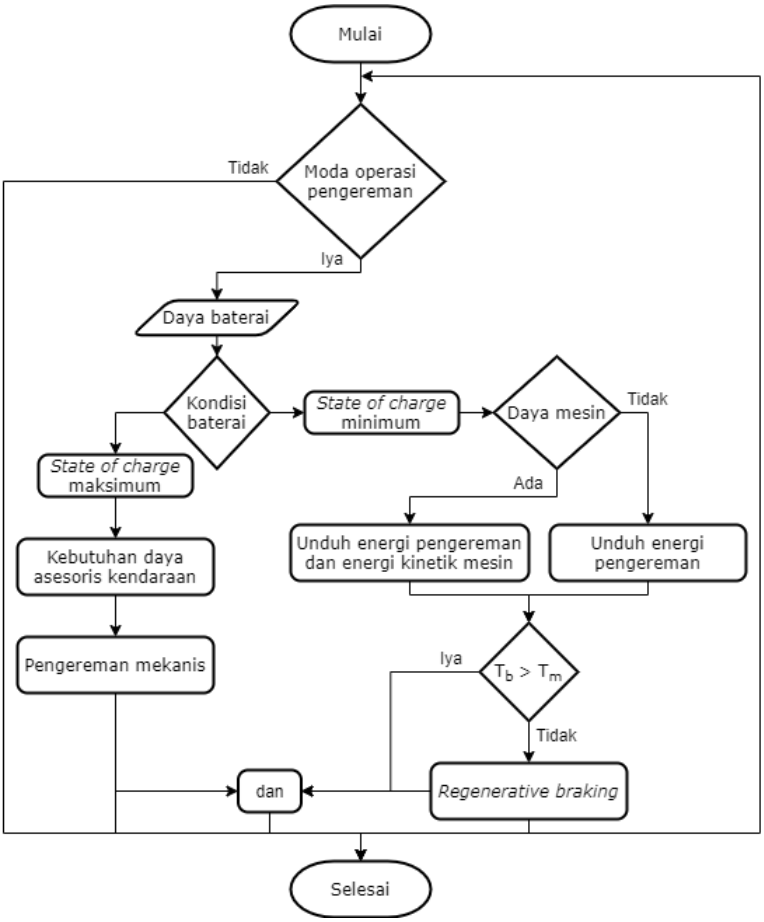
Sistem pengereman kendaraan pada dasarnya membuang energi kinetik dari kendaraan. Pada kendaraan hibrid energi tersebut dapat dimanfaatkan kembali dengan menambahkan *regenerative braking*. Terdapat dua moda pengereman pada Toyota Prius HEV 2017, yaitu unduh energi pengereman dan unduh energi pengereman serta energi kinetik mesin. Pada unduh energi pengereman, energi yang dimanfaatkan adalah energi kinetik yang terbuang pada saat kendaraan diperlambat yaitu energi kinetik dari perlambatan kendaraan dan energi kinetik dari perlambatan roda kendaraan dengan merubah motor menjadi generator yang kemudian merubah energi kinetik yang terbuang tersebut menjadi energi listrik dan pada akhirnya disimpan pada baterai kendaraan seperti pada gambar 3.4 (a).



(a) **(b)**

Gambar 3.4 Aliran energi sistem *regenerative braking* Toyota Prius *HEV* 2017 : unduh energi pengereman (a) dan unduh energi pengereman serta energi kinetik mesin (b)
Sumber : (Luthfi Hadi, 2019)

Berbeda dengan unduh energi pengereman dan energi kinetik mesin, dimana adanya tambahan energi kinetik mesin yang terbuang saat kendaraan beroperasi dengan tambahan daya dari mesin kendaraan. Maka dari itu energi kinetik mesin yang terbuang tersebut dapat dimanfaatkan dengan cara dikonversikan menjadi energi listrik dengan bantuan generator sehingga dapat disimpan pada kendaraan seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.4 (b). Selain itu apabila daya baterai kendaraan terisi penuh maka *regenerative braking* tidak bekerja, berarti kebutuhan gaya pengereman kendaraan dipenuhi oleh pengereman secara mekanis. Selain itu dapat pula dipergunakan untuk kebutuhan aksesoris kendaraan. Sistem pengereman tersebut dijelaskan pada diagram alir gambar 3.5.



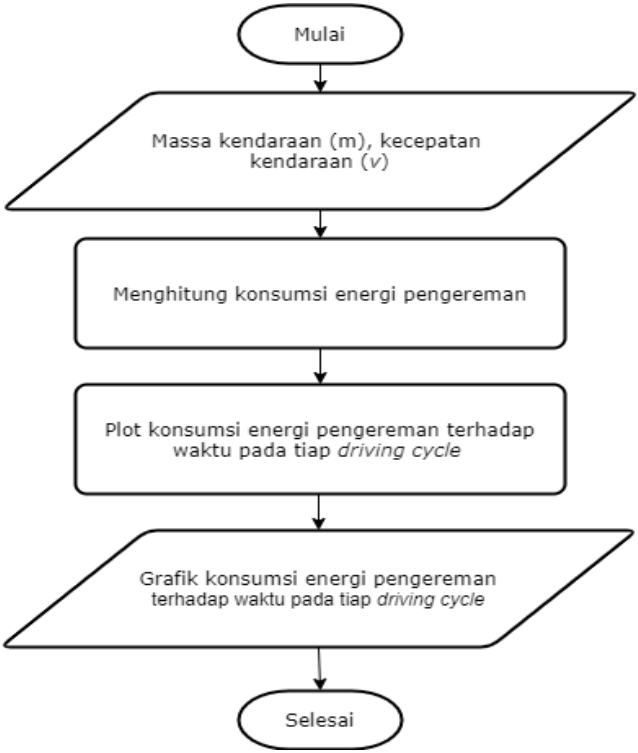
Gambar 3.5 Diagram alir pengereman kendaraan hibrid dengan *regenerative braking*

3.3 Analisis Energi Sistem *Regenerative Braking*

3.3.1 Analisis Konsumsi Energi Pengereman

Pada penelitian ini, dilakukan analisis terkait konsumsi energi energi pengereman yang terbuang dan dibutuhkan kendaraan. Proses analisis konsumsi energi energi pengereman

yang terbuang dan dibutuhkan dilakukan sesuai dengan diagram alir pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 Diagram alir konsumsi energi pengereman

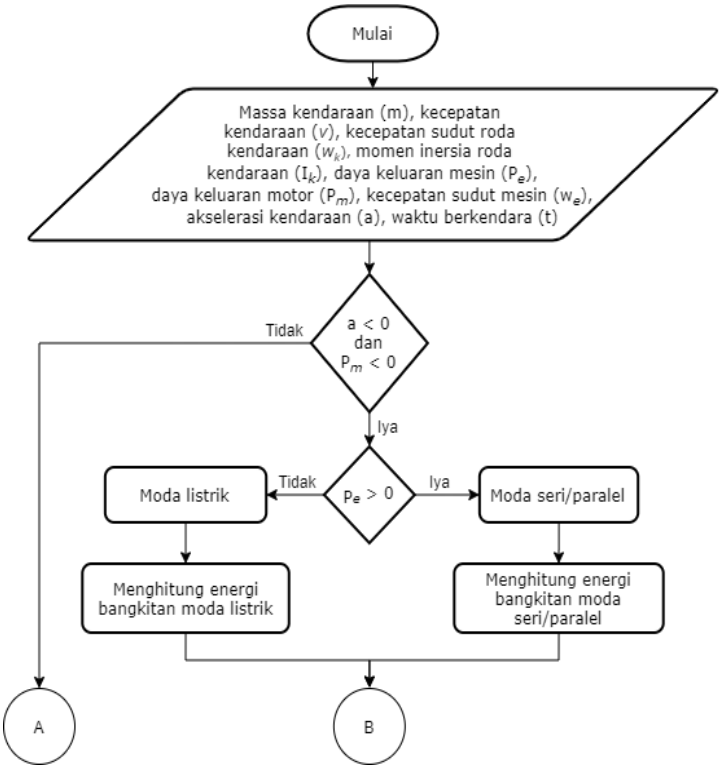
Langkah – langkah menghitung konsumsi energi pengereman adalah sebagai berikut ini :

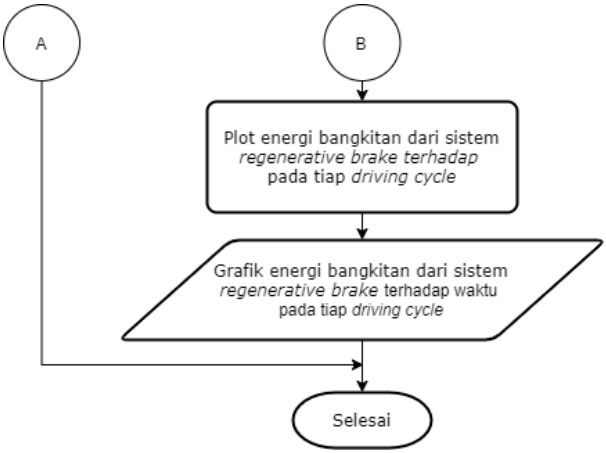
1. Memasukkan spesifikasi kendaraan dan kecepatan kendaraan pada saat melakukan perlambatan,
2. Menghitung konsumsi energi pengereman yang terbuang menggunakan persamaan **2.1**,

3. Menghitung konsumsi energi pengereman yang dibutuhkan menggunaka persamaan **2.24**,
4. Plot hasil perhitungan konsumsi energi pengereman terhadap waktu pada tiap *driving cycle*.

3.3.2 Analisis Energi Bangkitan dari Sistem *Regenerative Braking*

Pada penelitian ini, dilakukan analisis terkait energi bangkitan dari sistem *regenerative braking*. Proses analisis efisiensi dari sistem *regenerative braking* dilakukan sesuai dengan diagram alir pada gambar 3.7.





Gambar 3.7 Diagram alir energi bangkitan dari sistem *regenerative braking*

Langkah – langkah menghitung energi bangkitan dari sistem *regenerative braking* adalah sebagai berikut :

1. Memasukkan spesifikasi kendaraan, kecepatan kendaraan pada saat melakukan perlambatan, momen inersia roda kendaraan, kecepatan sudut roda kendaraan dan daya keluaran dari mesin,
2. Sistem *regenerative braking* pada kendaraan Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 secara aktual diperhitungkan berdasarkan pada gaya kebutuhan gaya pengereman kendaraan persamaan **2.21**, kemudian daya sistem *regenerative braking* aktual dari kendaraan yang dibutuhkan untuk pengereman didapatkan berdasarkan persamaan **2.25** serta adanya efisiensi dari motor dan mesin kendaraan yang mempengaruhi besar daya *regenerative braking* yang dapat ditangkap, sehingga persamaan yang digunakan adalah berikut ini :

$$P_{rb,teori} = \left[\frac{\tau_{motor}}{I_t \cdot I_g \cdot \eta_{drivetrain}} \cdot \omega_{motor} \cdot \eta_{motor}\right] + \left[(P_{e1} - P_{e2}) \cdot \eta_{engine}\right] \qquad \textbf{3.1}$$

3. Pada kendaraan Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 terdapat 3 moda dasar yaitu moda listrik, moda seri dan moda paralel. Berdasarkan pada persamaan **2.3** yang disederhanakan dan penambahan komponen daya mesin pada moda seri/paralel serta besar nilai E_a dan E_t yang relatif kecil sehingga dapat diabaikan, maka persamaan potensi energi *regenerative braking* yang digunakan adalah sebagai berikut :
   a. Moda listrik

$$E_{rb} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2) + \frac{1}{2} \cdot I_k \cdot ({\omega_{k2}}^2 - {\omega_{k1}}^2) \qquad \textbf{3.2}$$

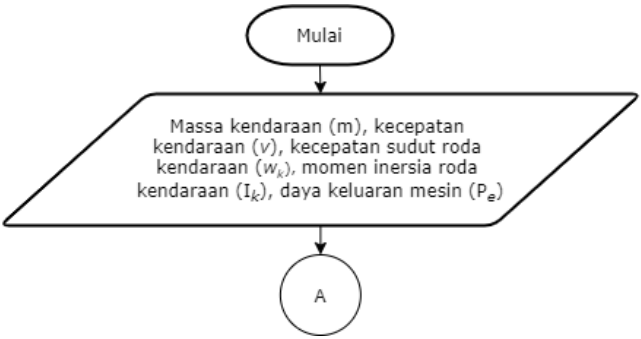
   b. Moda seri/paralel

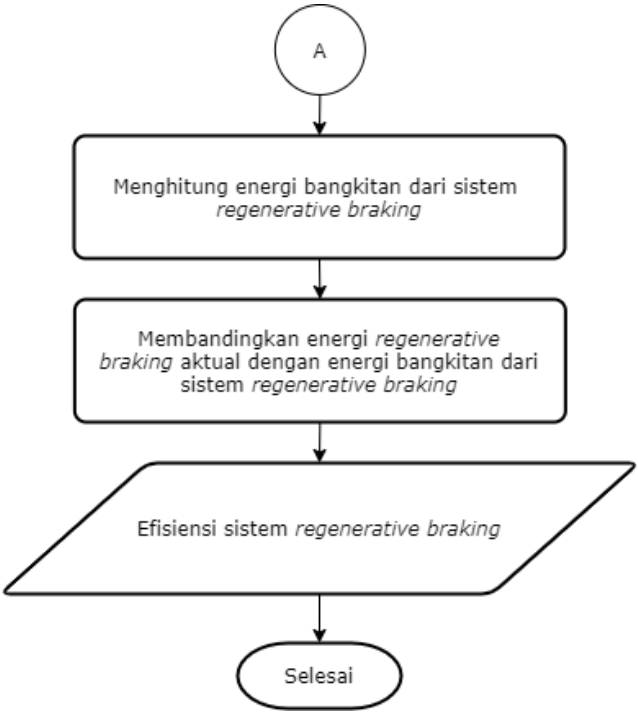
$$E_{rb} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2) + \frac{1}{2} \cdot I_k \cdot ({\omega_{k2}}^2 - {\omega_{k1}}^2) + [(P_{e1} - P_{e2}) \cdot \Delta t] \qquad \textbf{3.3}$$

4. Kemudian plot energi bangkitan yang dapat dihasilkan dari sistem *regenerative braking* terhadap waktu pada tiap *driving cycle*.

3.4 Analisis Efisiensi Sistem *Regenerative Braking*

Pada penelitian ini, dilakukan analisis terkait efisiensi dari sistem *regenerative braking*. Proses analisis efisiensi dari sistem *regenerative braking* dilakukan sesuai dengan diagram alir pada gambar 3.8.





Gambar 3.8 Diagram alir efisiensi sistem *regenerative braking*

Langkah – langkah menghitung efisiensi dari sistem *regenerative braking* adalah sebagai berikut :

1. Memasukkan spesifikasi kendaraan, kecepatan kendaraan pada saat melakukan perlambatan, momen inersia roda kendaraan, kecepatan sudut roda kendaraan dan daya keluaran dari mesin,
2. Menghitung energi bangkitan dari sistem *regenerative braking* aktual,
3. Menghitung potensi energi bangkitan dari sistem *regenerative braking* berdasarkan persamaan **3.2** untuk moda listrik dan persamaan **3.3** untuk moda seri/paralel (sesuai dengan sub bab 3.3.2),

4. Membandingkan energi bangkitan sistem *regenerative braking* aktual dengan potensi energi bangkitan sistem *regenerative braking* sehingga didapatkan estimasi efisiensi dari sistem *regenerative braking*, yaitu dengan persamaan berikut :

$$\eta_{reg} = \frac{E_{rb,aktual}}{E_{rb,potensi}} \cdot 100\% \qquad \textbf{3.4}$$

3.5 Analisis Kontribusi Sistem Regenerative Braking terhadap Road Load Horsepower

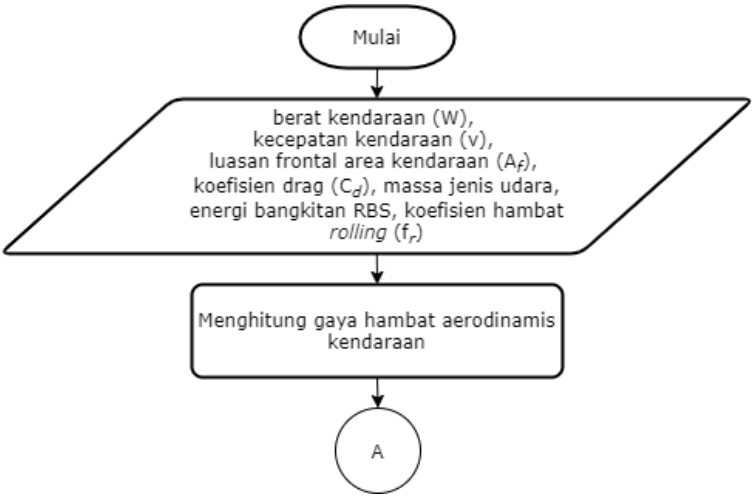
Pada penelitian ini, dilakukan analisis kontribusi sistem *regenerative braking* terhadap *road load horsepower* (*Rhp*) dengan membandingkan antara energi bangkitan dari sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan daya jalan kendaraan dari *driving cycle* pengujian jalan yang telah dilakukan. Perhitungan kebutuhan daya tersebut ditunjukkan pada diagram alir gambar 3.9, dengan memasukkan data spesifikasi kendaraan seperti : berat kendaraan, koefisien *drag*, jenis ban kendaraan dan juga luasan frontal kendaraan. Langkah – langkah perhitungan *road load horsepower* kendaraan dapat dilakukan sebagai berikut ini :

1. Memasukkan data spesifikasi kendaraan, koefisien *drag* kendaraaan, energi bangkitan dari sistem *regenerative braking*,
2. Menghitung gaya hambat *aerodinamis* kendaraan berdasarkan persamaan **2.35**,
3. Menentukan koefisien hambat *rolling* ban kendaraan berdasarkan tekanan ban kendaraan,
4. Menghitung gaya hambat *rolling* kendaraan berdasarkan persamaan **2.35**,
5. Menghitung gaya akselerasi kendaraan berdasarkan perasamaan **2.35**,
6. Menghitung gaya hambat total kendaraan berdasarkan persamaan **2.35**,

7. Menghitung *road load horsepower* kendaraan pada tiap *driving* cycle berdasarkan persamaan **2.36**,
8. Membandingkan energi bangkitan dari sistem *regenerative braking* dan *road load horsepower* terhadap waktu pada tiap *driving cycle* untuk mendapatkan kontribusi sistem *regenerative braking* tersebut terhadap kebutuhan *road load horsepower* dengan persamaan :

$$K_{rbs} = \frac{E_{rb,aktual}}{Rhp} \cdot 100\% \qquad \textbf{3.5}$$

9. Plot energi bangkitan dari sistem *regenerative braking* dan *road load horsepower* terhadap waktu pada tiap *driving cycle*.



Gambar 3.9 Diagram alir perhitungan *Road Load Horsepower*

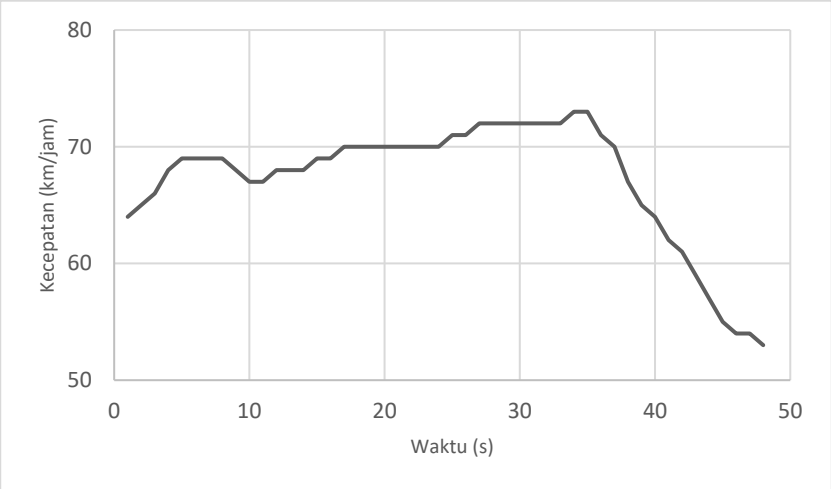
BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Klasifikasi Driving Cycle

Berdasarkan pada penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh Nico Hasoloan dan Luthfi Hadi, dimana data *driving cycle* kendaraan didapatkan dari uji jalan kendaraan yang dilakukan pada 12 Nopember hingga 28 Desember 2018 yang dipilih dua data *driving cycle*. Data *driving cycle* tersebut adalah data uji jalan pada 01 Desember 2018 dan 02 Desember 2018 yang dapat dilihat pada gambar 3.3. Pada gambar 3.3 (a) dapat dilihat grafik *driving cycle* yang dilakukan pada tanggal 01 Desember 2018, dimana kendaraan diuji selama 1126 detik dan kendaraan dipacu hingga mencapai kecepatan 142 km/jam. Untuk *driving cycle* 02 Desember 2018 pada gambar 3.3 (b), kendaraan diuji selama 1102 detik dan kendaraan dipacu hingga mencapai kecepatan 124 km/jam. *Driving cycle* tersebut kemudian dibagi menjadi dua bagian berdasarkan pada moda berkendara, yaitu *urban driving cycle* atau moda berkendara dalam kota dengan kecepatan rata – rata kurang dari 50 km/jam dan *extra urban driving cycle* atau moda berkendara luar kota dengan kecepatan rata – rata lebih dari 50 km/jam. Pada *driving cycle* 01 Desember tersebut *urban driving cycle* diklasifikasikan pada detik ke-0 hingga detik ke-540 karena kecepatan rata – rata kendaraan kurang dari 50 km/jam sementara *extra urban driving cycle* pada detik ke-541 hingga ke-1126 karena kecepatan rata – rata kendaraan lebih dari 50 km/jam. Sementara pada *driving cycle* 02 Desember 2018, *urban driving cycle* diklasifikasikan pada detik ke-508 hingga ke-1102 karena kecepatan rata – rata kendaraan kurang dari 50 km/jam dan untuk *extra urban driving cycle* pada detik ke-0 hingga ke-507 karena kecepatan rata – rata kendaraan lebih dari 50 km/jam.

4.2 Contoh Perhitungan

Berikut ini merupakan contoh dari beberapa perhitungan yang dilakukan penulis pada tugas akhir ini. Perhitungan ini menggunakan data spesifikasi kendaraan pada tabel 3.1 dan potongan grafik data uji jalan kendaraan yang dilakukan pada 01 Desember 2018, seperti pada gambar 4.3. Perhitungan yang dilakukan dalam analisis ini meliputi: perhitungan konsumsi energi pengereman kendaraan, perhitungan torsi dan energi pengereman yang dibutuhkan oleh kendaraan, perhitungan energi bangkitan sistem *regenerative braking* kendaraan serta perhitungan kontribusi sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan *road load horsepower* kendaraan.



Gambar 4.1 Grafik data uji jalan 01 Desember 2018

4.2.1 Energi Pengereman yang Terbuang dan Dibutuhkan Kendaraan

Dengan massa kendaraan total dengan penumpang beserta bagasi sebesar 1930 kg, data kecepatan kendaraan saat mengalami pengereman ditunjukkan pada gambar 4.3.

Kebutuhan energi pengereman kendaraan didapatkan dengan mempertimbangkan gaya hambat yang bekerja pada saat kendaraan melakukan perlambatan. Berikut ini merupakan contoh perhitungan konsumsi energi pengereman kendaraan dengan menggunakan persamaan **2.1** dan energi pengereman yang dibutuhkan kendaraan dengan menggunakan persamaan **2.24** :

1. Energi pengereman yang terbuang :

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2)$$

$$E_{total} = -\ 207{,}89 \text{ kW}$$

2. Daya pengereman yang dibutuhkan :

$$P_b = T_b \cdot \omega_{roda}$$

$$P_{b,total} = -\ 276.12 \text{ kW}$$

Energi pengereman yang dibutuhkan kendaraan merupakan daya pengereman yang diperlukan tiap waktu kendaraan melakukan pengereman/perlambatan. Total energi pengereman yang dibutuhkan kendaraan didapatkan dengan persamaan :

$$E_b = \int P_b \cdot dt$$

dengan metode *first-order hold*, dimana pada tiap data daya diinterpolasikan dengan pendekatan linear untuk mendapatkan nilai energi yang tidak diketahui. Sehingga energi pengereman yang dibutuhkan kendaraan adalah :

$$E_b = \int P_b \cdot dt$$

$$E_{b,total} = -\ 270.24\ kJ$$

4.2.2 Energi Bangkitan Sistem *Regenerative Braking* Kendaraan

Berikut merupakan perhitungan potensi energi pengeraman yang dapat dibangkitkan oleh sistem *regenerative braking* dengan menggunakan inersia roda sebesar 0,71 kg.m^2. Kondisi kendaraan dalam moda traksi penggerak mesin dengan motor sebagai generator pada detik ke-1 hingga ke-34 dan

regenerative brake terjadi pada detik ke-35 hingga ke-48, secara teori dengan sistem *regenerative braking* Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 dengan persamaan **3.1** dan potensi energi bangkitan dengan persamaan **3.3** karena moda kendaraan sebelum pengereman adalah penggerak mesin dengan motor sebagai generator :

1. Potensi energi bangkitan sistem *regenerative braking* kendaraan :

   $$E_{rb,potensi} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2) + \frac{1}{2} \cdot I_k \cdot ({\omega_{k2}}^2 - {\omega_{k1}}^2) + [(P_{e1} - P_{e2}) \cdot \Delta t]$$

   $$E_{rb,total} = 387.92\ kJ$$

2. Daya bangkitan sistem *regenerative braking* kendaraan secara teoritis :

   Untuk daya bangkitan sistem *regenerative braking* Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 yang memiliki rasio gardan sebesar 4.11 dan rasio CVT yang telah dihitung seperti pada lampiran tabel A.1 dengan mengasumsikan torsi kerja motor merupakan kemampuan maksimal torsi motor, asumsi efisiensi CVT dan gardan adalah 0.95 dan 0.97. Sementara itu efisiensi dari motor dan mesin didapatkan berdasarkan peta grafik efisiensi motor pada gambar A.1 dan peta grafik efisiensi mesin pada gambar A.4 dengan grafik kerja motor yang dapat dilihat pada gambar A.2 dan A.3 serta grafik kerja mesin yang dapat dilihat pada gambar A.5 dan A.6. Sehingga daya bangkitan dari sistem *regenerative braking* kendaraan adalah :

   $$P_{rb} = \left[\frac{F_b \cdot r}{I_t \cdot I_g \cdot \eta_{drivetrain}} \cdot \omega_{motor} \cdot \eta_{motor}\right] + [(P_{e1} - P_{e2}) \cdot \eta_{engine}]$$

   $$P_{rb,total} = 126.45\ kW$$

   Dengan menggunakan metode *first-order hold*, maka energi bangkitan sistem *regenerative braking* kendaraan, adalah :

   $$E_{rb} = \int P_{rb} \cdot dt$$

   $$E_{rb,total} = 122.84\ kJ$$

4.2.3 Efisiensi Sistem *Regenerative Braking* Kendaraan

Dari data uji jalan kendaraan juga didapatkan energi *regenerative* yaitu sebesar 68.03 kJ pada potongan data grafik tersebut. Potensi energi bangkitan sistem *regenerative braking* sebesar 387.92 kJ dan energi bangkitan sistem *regenerative braking* kendaraan adalah sebesar 122.84 kJ. Maka dengan persamaan **3.4**, efisiensi dari sistem *regenerative braking* kendaraan adalah :

1. Efisiensi potensi energi yang dimanfaatkan oleh sistem *regenerative braking* :

$$\eta_{reg} = \frac{E_{rb,aktual}}{E_{rb,potensi}} \cdot 100\%$$

$$\eta_{reg} = 17.54\ \%$$

4.2.4 Kontribusi Sistem *Regenerative Braking* Terhadap Kebutuhan *Road Load Horsepower* Kendaraan

Berikut perhitungan kebutuhan *road load horsepower* dengan persamaan **2.36** pada potongan *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 dengan menggunakan luasan frontal kendaraan sebesar 2.1865 m^2, massa jenis udara sebesar 1.275 kg/m^3, koefisien *drag* sebesar 0.24, koefisien gesek sebesar 0.01004. Kemudian energi sistem *regenerative braking* dibandingkan dengan kebutuhan *road load horsepower* tersebut untuk didapatkan kontribusi dari sistem *regenerative braking* tersebut terhadap kebutuhan *road load horsepower* kendaraan dengan menggunakan persamaan **3.5** berikut ini merupakan perhitungan tersebut :

1. Kebutuhan *road load horsepower* kendaraan :

$$Rhp = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot {v_A}^2 + N \cdot f_r + m \cdot a\right) \cdot v_k$$

$$Rhp_{total} = 185.69 \text{ kW}$$

Sementara itu untuk mendapatkan kebutuhan energi untuk memenuhi *road load horsepower* kendaraan dilakukan dengan

metode *first-order hold*, sehingga kebutuhan energi untuk *road load horsepower* kendaraan adalah :

$$E_{rhp} = \int Rhp \cdot dt$$

$$E_{rhp} = 190.34\ kJ$$

2. Kontribusi energi sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan *road load horsepower* kendaraan :

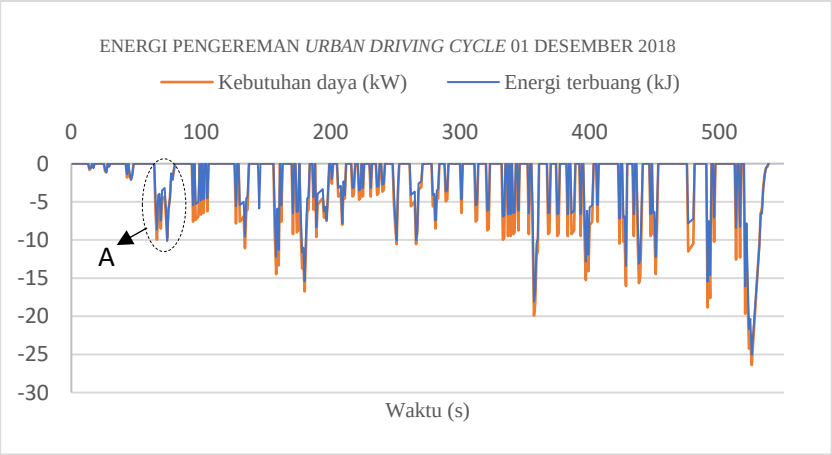
$$K_{rbs} = \frac{E_{rb,aktual}}{E_{rhp}} \cdot 100\%$$

$$K_{rbs} = 35.74\ \%$$

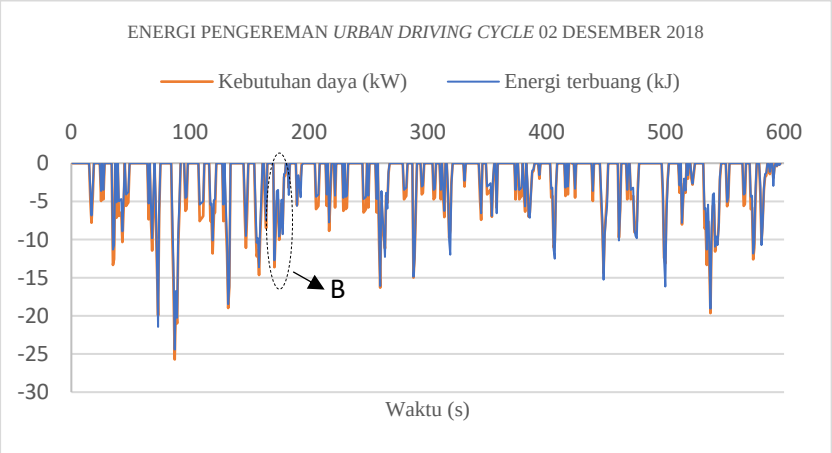
4.3 Konsumsi Energi Pengereman yang Terbuang dan Dibutuhkan Kendaraan

4.3.1 Kondisi Urban Driving Cycle

Pada saat kendaraan dipacu dan kemudian melakukan pengereman atau penurunan kecepatan, terdapat energi kinetik dari kendaraan yang terbuang. Energi kinetik tersebut berasal dari penurunan kecepatan kendaraan. Seperti pada gambar 4.2 (a) dan (b) dapat dilihat bahwa total energi kinetik kendaraan yang terbuang adalah sebesar 1195.30 kJ untuk *urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan sebesar 1286.44 kJ untuk *urban driving cycle* 02 Desember 2018. Besar nilai energi pengereman yang terbuang dapat mencapai sebesar 25.02 kJ pada *urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan sebesar 24.42 kJ pada *urban driving cyle* 02 Desember 2018. Pada gambar 4.2 (a) grafik energi yang terbuang pada *urban driving cycle* 01 Desember 2018, nilai energi pengereman yang terbuang memiliki kecenderungan nilai yang semakin meningkat akibat dari kendaraan yang terus dipacu sehingga perubahan kecepatan saat kendaraan melakukan pengereman memiliki nilai yang signifikan. Sementara pada gambar 4.2 (b) grafik energi yang terbuang pada *urban driving cycle* 02 Desember 2018, nilai energi pengereman yang terbuang memiliki kecenderungan nilai yang semakin menurun akibat dari kendaraan yang terus mengalami perlambatan hingga kendaraan berhenti.



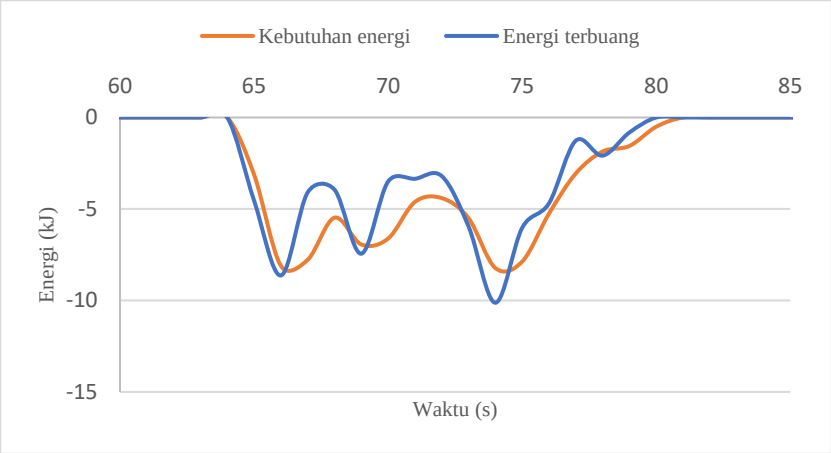
(a)



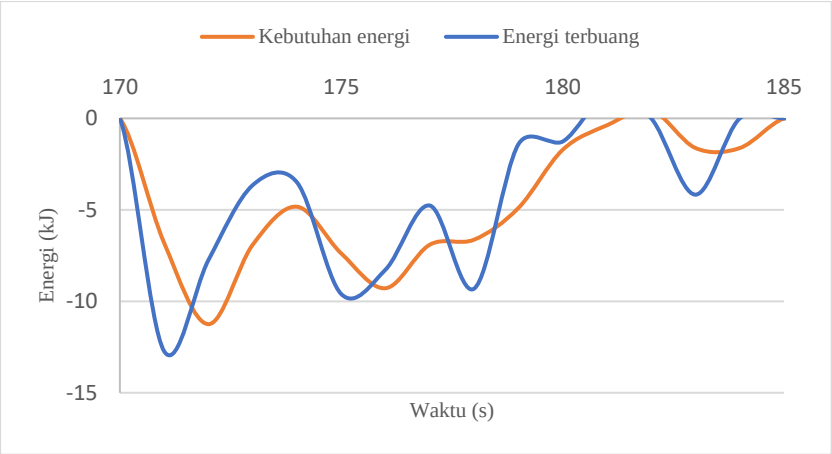
(b)

Gambar 4.2 Grafik energi pengereman yang terbuang dan daya pengereman yang dibutuhkan kendaraan pada *urban driving cycle* 01 Desember 2018 (a) dan 02 Desember 2018 (b)

Selama melakukan pengereman kendaraan juga membutuhkan daya, daya pengereman yang dibutuhkan tersebut berasal dari gaya hambat yang bekerja pada kendaraan. Besar total daya pengereman yang dibutuhkan kendaraan selama *urban driving cycle* pada 01 Desember 2018 dan 02 Desember 2018 adalah sebesar 1492.20 kW dan 1441.96 kW. Torsi pengereman maksimum yang diperlukan kendaraan pada *urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan 02 Desember 2018 adalah sebesar 452.55 N.m dan 751.71 N.m. Dengan besar torsi pengereman tersebut maka kemampuan dari torsi maksimum motor yang sebesar 163 N.m tidak dapat memenuhi kebutuhan torsi pengereman kendaraan pada *urban driving cycle* tersebut, sehingga diperlukan tambahan torsi pengereman secara mekanis untuk memenuhi torsi pengereman tersebut.



(a)



(b)

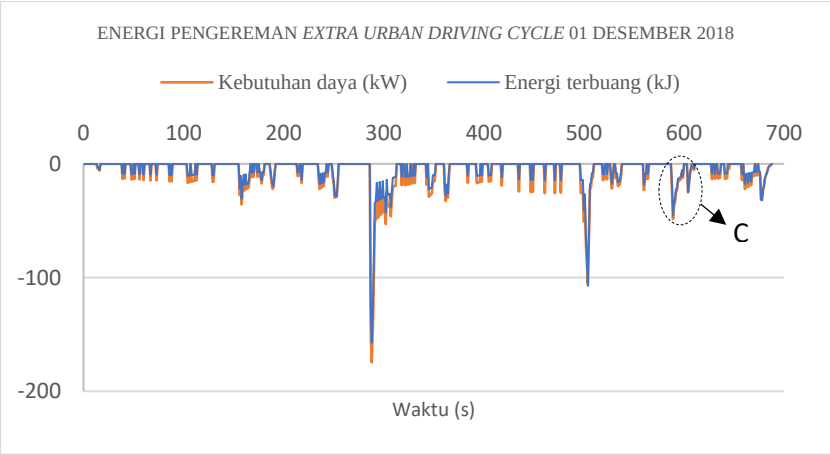
Gambar 4.3 Grafik energi pengereman yang terbuang dan dibutuhkan kendaraan pada *urban driving cycle* 01 Desember 2018 daerah A (a) dan 02 Desember 2018 daerah B (b)

Dari gambar 4.3 dapat dilihat grafik energi pengereman yang terbuang dan dibutuhkan kendaraan pada daerah A dan B. Besar energi pengereman yang dibutuhkan kendaraan didapatkan dengan metode *first-order hold*, dimana dilakukan interpolasi dengan pendekatan linear pada grafik kebutuhan daya pengereman kendaraan yang diintegralkan terhadap waktu. Total nilai energi pengereman yang dibutuhkan kendaraan cenderung lebih besar dari energi pengereman yang terbuang, yaitu sebesar 1492.20 kJ untuk *urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan sebesar 1442.27 kJ untuk *urban driving cycle* 02 Desember 2018. Hal ini dikarenakan energi pengereman yang dibutuhkan kendaraan merupakan energi yang berasal dari gaya hambat yang bekerja pada kendaraan saat kendaraan mengalami pengereman, sementara energi pengereman yang terbuang hanya berasal dari energi kinetik kendaraan ketika kendaraan mengalami pengereman. Pada kedua *urban driving cycle*, konsumsi energi pengereman yang

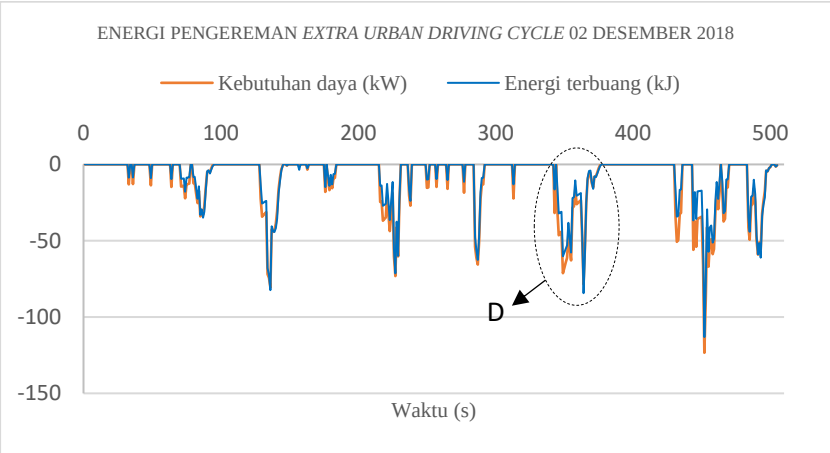
terbuang dan dibutuhkan kendaraan sering terjadi karena pada *urban driving cycle* gaya berkendara cenderung berhenti dan melaju (*stop and go*).

4.3.2 Kondisi Extra Urban Driving Cycle

Konsumsi nergi pengereman yang terbuang pada *extra urban driving cycle* sedikit berbeda dengan *urban driving cycle.* Selama *extra urban driving cycle* kendaraan cenderung pada kecepatan yang lebih stabil dibandingkan terhadap *urban driving cycle,* dimana kendaraan cenderung bergerak secara melaju dan berhenti (*stop and go*). Namun selama *extra urban driving cycle* hasil dari energi kinetik yang terbuang dapat lebih besar karena perubahan kecepatan ketika kendaraan melakukan pengereman sangat signifikan. Dapat dilihat pada grafik gambar 4.4 (a) dan (b), total energi pengereman yang terbuang selama *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan 02 Desember 2018 adalah sebesar 3658.51 kJ dan 4140.64 kJ. Besar energi pengereman yang terbuang selama *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 dapat mencapai sebesar 174.52 kJ dan untuk *extra urban driving cycle* 02 Desember 2018 dapat mencapai sebesar 123.41 kJ. Energi pengereman yang terbuang sebesar itu dihasilkan akibat ketika kendaraan dipacu dengan kecepatan yang tinggi kemudian dilakukan perlambatan atau pengereman hingga kecepatan kendaraan menurun drastis.



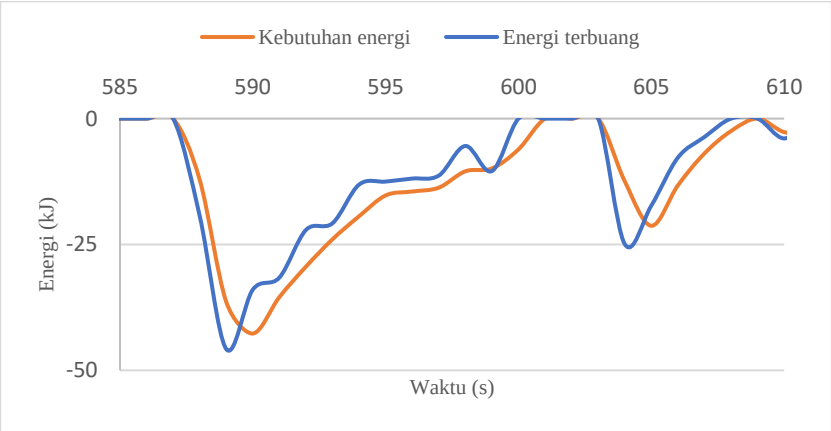
(a)



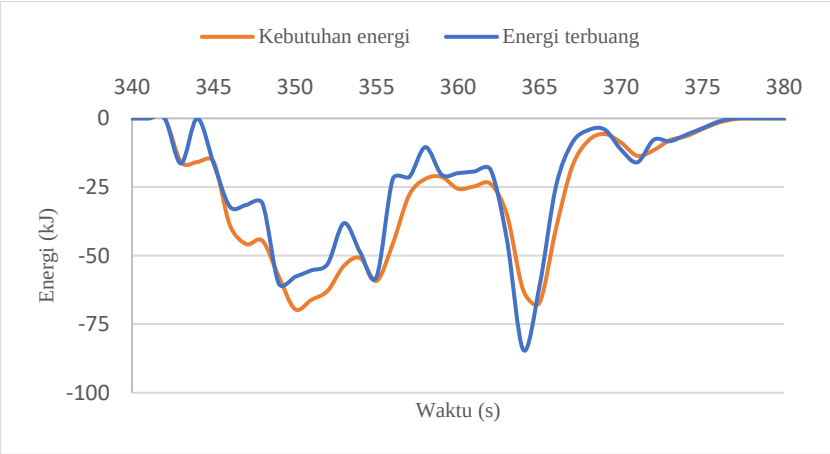
(b)

Gambar 4.4 Grafik energi pengereman yang terbuang dan dibutuhkan kendaraan pada *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018

Selain itu juga selama kendaraan melakukan pengereman, total kebutuhan daya pengereman kendaraan selama *extra urban driving cycle* adalah sebesar 4772.57 kW untuk *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan 4969.14 kW untuk *extra urban driving cycle* 02 Desember 2018. Dengan kebutuhan torsi pengereman maksimum pada *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 sebesar 1079.73 N.m dan pada *extra urban driving cycle* 02 Desember 2018 sebesar 1170 N.m. Dengan kebutuhan torsi pengereman maksimum sebesar itu selama *extra urban driving cycle* tersebut, tidak dapat dipenuhi oleh kemampuan torsi motor maksimum yang hanya sebesar 163 N.m. Selama kendaraan beroperasi pada *urban driving cycle* dan *extra urban driving cycle* pada 01 Desember 2018 dan 02 Desember 2018 diperlukan tambahan torsi pengereman secara mekanis untuk memenuhi kebutuhan torsi pengereman maksimum pada kedua *driving cycle* tersebut. Berbeda dengan kebutuhan daya pengereman pada *urban driving cycle* dimana pengereman sering terjadi namun perubahan kecepatan yang dihasilkan akibat pengereman atau perlambatan tidak berubah drastis, sehingga daya yang diperlukan tidak begitu signifikan.



(a)



(b)

Gambar 4.5 Grafik energi pengereman yang terbuang dan dibutuhkan kendaraan pada *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 daerah C (a) dan 02 Desember 2018 daerah D (b)

Dari gambar 4.5 dapat dilihat grafik energi pengereman yang terbuang dan dibutuhkan kendaraan pada daerah C dan D. Energi pengerean yang dibutuhkan kendaraan didapatkan dengan metode *first-order hold*, dimana dilakukan interpolasi dengan pendekatan linear pada grafik kebutuhan daya pengereman kendaraan yang diintegralkan terhadap waktu. Total nilai energi pengereman yang dibutuhkan kendaraan cenderung lebih besar dibandingkan energi pengereman yang terbuang, yaitu sebesar 4772.57 kJ untuk *extra urban driving cycle* 01 Dsember 2018 dan sebesar 4968.84 kJ untuk *extra urban driving cycle* 02 Desember 2018. Hal ini dikarenakan energi pengereman yang dibutuhkan berasal dari gaya – gaya hambat pada kendaraan yang bekerja. Sementara energi pengereman yang terbuang hanya berasal dari energi kinetik ketika kendaraan diperlambat. Energi pengereman yang terbuang dan dibutuhkan kendaraan cenderung lebih sering terjadi pada *urban driving cycle* baik 01 Desember 2018

maupun 02 Desember 2018 dibandingkan pada *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 maupun 02 Desember 2018, dikarenakan gaya berkendara pada *urban driving cycle* yang cenderung lebih banyak berhenti dan melaju. Namun energi pengereman yang terbuang dan dibutuhkan memiliki nilai yang tinggi pada *extra urban driving cycle* dibandingkan *urban driving cycle.* Hal ini dikarenakan perubahan kecepatan ketika kendaraan diperlambat memiliki nilai yang sangat signifikan.

4.4 Energi Bangkitan Sistem *Regenerative Braking* Kendaraan

Pada pengujian Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 didapatkan grafik daya bangkitan sistem *regenerative braking* yang kemudian dengan metode *first-order hold* dilakukan interpolasi dengan pendekatan linear pada grafik daya bangkitan sistem *regenerative braking* yang diintegralkan terhadap waktu. Sehingga didapatkan energi bangkitan sistem *regenerative braking* aktual dengan total sebesar 1281.97 kJ untuk *driving cycle* 01 Desember 2018 dan total sebesar 2346.44 kJ untuk *driving cycle* 02 Desember 2018. Dimana ketika kendaraan beroperasi pada moda traksi murni penggerak listrik dan *regenerative braking* bekerja ketika kendaraan diperlambat, didapatkan energi bangkitan sistem *regenerative braking* total sebesar 444.69 kJ untuk *driving cycle* 01 Desember 2018 dan total sebesar 538.92 kJ untuk *driving cycle* 02 Desember 2018. Untuk moda traksi penggerak mesin dan motor sebagai generator, total energi bangkitan sistem *regenerative braking* yang dihasilkan adalah 531.44 kJ untuk *driving cycle* 01 Desember 2018 dan 1553.22 kJ untuk *driving cycle* 02 Desember 2018. Sementara ketika moda operasi traksi penggerak hibrid, total energi bangkitan sistem *regenerative braking* yang dihasilkan untuk *driving cycle* 01 Desember 2018 dan 02 Desember 2018 adalah sebesar 305.84 kJ dan 254.30 kJ. Total energi bangkitan sistem *regenerative braking* secara teori untuk *driving cycle* 01 Desember 2018 dan 02 Desember 2018

sebesar 1884.83 kJ dan 2522.08 kJ. Sementara total potensi energi bangkitan sistem *regenerative braking* adalah sebesar 5055.78 kJ untuk *driving cycle* 01 Desember 2018 dan sebesar 6398.51 kJ untuk *driving cycle* 02 Desember 2018. Maka, efisiensi sistem *regenerative braking* Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 untuk *driving cycle* 01 Desember 2018 adalah sebesar 68.02% dan untuk *driving cycle* 02 Desember 2018 adalah sebesar 93.04%. Dengan nilai efisiensi potensi energi yang dimanfaatkan adalah sebesar 25.36% untuk *driving cycle* 01 Desember 2018 dan sebesar 36.67% untuk *driving cycle* 02 Desember 2018.

Tabel 4.1 Tabel energi bangkitan sistem *regenerative braking* pada *driving cycle* 01 Desember 2018 dan 02 Desember 2018 untuk tiap moda operasi traksi

Moda Operasi	**01 Desember 2018**			**02 Desember 2018**		
	Aktual	**Teori**	**Potensi**	**Aktual**	**Teori**	**Potensi**
Murni penggerak listrik	444.69	347.70	1075.95	538.92	401.85	920.25
Penggerak mesin dan motor sebagai generator	531.44	963.64	2821.58	1553.22	1898.38	4772.49
Penggerak hibrid	305.84	573.49	1158.26	254.30	221.84	705.77
Total (kJ)	1281.97	1884.83	5055.78	2346.44	2522.08	6398.51
Efisiensi potensi sistem *regenerative braking* (%)	25.36			36.67		

Secara teori, energi bangkitan sistem *regenerative braking* berasal dari gaya hambat yang bekerja pada kendaraan ketika kendaraan diperlambat serta tambahan energi yang dihasilkan mesin kendaraan saat beroperasi. Namun potensi energi bangkitan sistem *regenerative braking* berasal dari energi kinetik kendaraan yang terbuang yang berasal dari penurunan kecepetan kendaraan, putaran roda dan energi kinetik mesin kendaraan. Dapat dilihat pada tabel 4.1, energi bangkitan sistem *regenerative braking* lebih banyak dihasilkan ketika kendaraan berada pada moda operasi traksi penggerak mesin dan motor sebagai generator, hal ini dikarenakan adanya tambahan energi kinetik dari mesin kendaraan yang bekerja dan ketika dilakukan pengereman energi kinetik dari mesin yang terbuang tersebut diubah oleh generator. Sementara itu pada moda operasi traksi murni penggerak listrik terutama pada *driving cycle* 01 Desember 2018, ketika melakukan pengereman *regenerative* memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dua moda operasi traksi lainnya ketika diperlambat, hal ini dikarenakan tidak adanya tambahan energi kinetik dari mesin. Untuk moda operasi traksi penggerak hibrid pada *driving cycle* 02 Desember 2018 menghasilkan energi bangkitan yang lebih kecil pula dibandingkan dua moda operasi traksi lainnya ketika melakukan pengereman. Kecilnya energi bangkitan yang dihasilkan ketika kendaraan melakukan pengereman *regenerative* pada moda operasi traksi penggerak hibrid disebabkan karena pada moda operasi tersebut kendaraan cenderung lebih sering berganti moda operasi traksi lainnya sebelum dilakukan pengereman.

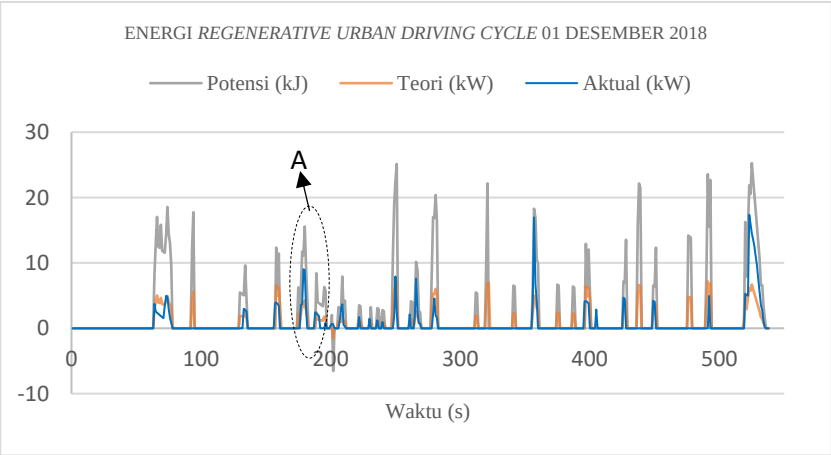
Dalam melakukan analisis terkait sistem *regenerative brake* secara teori, terdapat keterbatasan data karena kurangnya sensor pada *data logger* sehingga tidak adanya data kecepatan putaran motor Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 sehingga mengasumsikan torsi motor yang bekerja merupakan torsi

maksimum motor, tidak adanya data perubahan rasio transmisi serta tidak adanya data SOC (*State of Charge*) baterai sehingga tidak diketahui kapasitas baterai saat terjadi *regenerative braking*. Selain itu juga dikarenakan efisiensi yang digunakan menggunakan pendekatan dari titik kerja motor dan mesin kendaraan dengan peta efisiensi motor gambar A.1 memiliki spesifikasi yang berbeda dengan spesifikasi motor Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017, begitu pula dengan peta efisiensi mesin gambar A.3 yang kurang tepat dengan spesifikasi dari mesin Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017. Namun dengan keterbatasan data tersebut, sistem *regenerative braking* Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 mampu memaksimalkan kemampuannya, dimana mampu menghasilkan energi bangkitan hingga mencapai estimasi efisiensi sebesar 25.36% dengan memanfaatkan potensi energi bangkitan sistem *regenerative braking* hingga sebesar 36.67%.

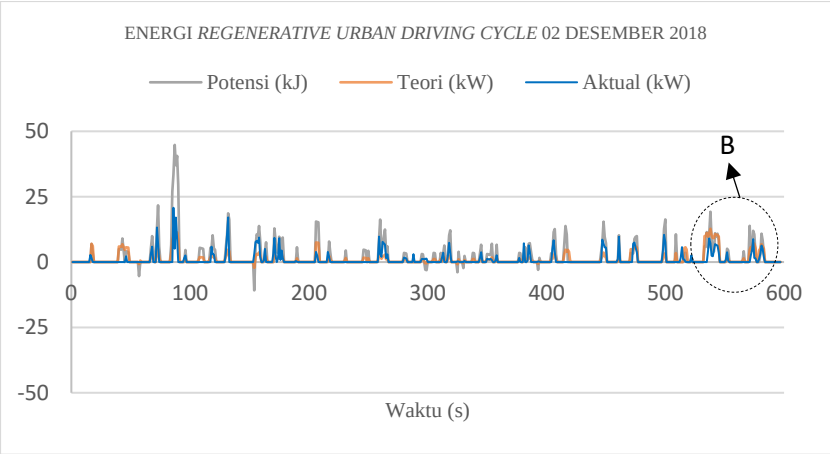
4.4.1 Kondisi Urban Driving Cycle

Pada kondisi *urban driving cycle* gambar 4.6 (a) dan (b), Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 menghasilkan energi bangkitan sistem *regenerative braking* aktual dengan total sebesar 355.55 kJ untuk *urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan total sebesar 536.74 kJ untuk *urban driving cycle* 02 Desember 2018. Dimana pada tiap moda operasi traksi kendaraan dan kemudian *regenerative braking* bekerja ketika kendaraan diperlambat, didapatkan energi bangkitan sistem *regenerative braking* total sebesar 260.64 kJ untuk *urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan total sebesar 358.2 kJ untuk *urban driving cycle* 02 Desember 2018 untuk moda operasi murni penggerak listrik, 94.91 kJ untuk *urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan 178.54 kJ untuk *urban driving cycle* 02 Desember 2018 pada moda operasi penggerak mesin dengan motor sebagai generator. Sementara ketika moda operasi traksi penggerak hibrid tidak terjadi pengereman secara

regenerative. Total energi bangkitan yang dapat dihasilkan sistem *regenerative braking* secara teori untuk *urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan 02 Desember 2018 adalah sebesar 415.96 kJ dan sebesar 613.32 kJ. Energi bangkitan sistem *regenerative braking* baik secara teori maupun aktual didapatkan dari grafik daya bangkitan sistem *regenerative braking* yang diinterpolasikan dengan pendekatan linear, kemudian diintegralkan terhadap waktu. Sementara total potensi energi bangkitan sistem *regenerative braking* adalah sebesar 1247.61 kJ untuk *urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan sebesar 1237.72 kJ untuk *urban driving cycle* 02 Desember 2018. Maka, efisiensi potensi energi yang dimanfaatkan adalah sebesar 28.50% untuk *driving cycle* 01 Desember 2018 dan sebesar 43.37% untuk *driving cycle* 02 Desember 2018.



(a)



(b)

Gambar 4.6 Grafik energi dan daya bangkitan sistem *regenerative braking* pada *urban driving cycle* 01 Desember 2018 (a) dan 02 Desember 2018 (b)

Selama kondisi *urban driving cycle* 01 Desember 2018 maupun 02 Desember 2018, Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 lebih cenderung memanfaatkan tenaga yang dihasilkan dari mesin saja maupun motor saja, dapat dilihat pada tabel 4.2. Maka dari itu, tidak terdapat energi bangkitan sistem *regenerative braking* yang dihasilkan ketika kendaraan beroperasi pada moda operasi traksi penggerak hibrid yang kemudian melakukan pengereman. Selain itu energi bangkitan sistem *regenerative braking* yang dihasilkan pada moda operasi traksi murni penggerak listrik baik pada *urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan 02 Desember 2018 lebih besar dibandingkan moda operasi traksi penggerak mesin dan motor sebagai generator. Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 cenderung menggunakan moda operasi traksi murni penggerak listrik ketika melaju pada kondisi *urban driving cycle* sebelum kendaraan melakukan pengereman. Seperti yang telah

dijelaskan sebelumnya, perbedaan efisiensi energi bangkitan sistem *regenerative braking* serta potensi energi bangkitan sistem *regenerative braking* Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 adalah dikarenakan kurangnya data kecepatan putaran motor yang mempengaruhi nilai energi bangkitan sistem *regenerative braking* secara teori, tidak adanya data perubahan rasio transmisi dan juga data SOC baterai sehingga tidak diketahui kapasitas baterai sebelum kendaraan melakukan pengereman. Selain itu, perbedaan efisiensi energi bangkitan sistem *regenerative braking* dikarenakan perubahan kecepatan kendaraan yang tidak terlalu signifikan, gaya berkendara pengemudi, kondisi jalan ketika dilakukan pengujian. Energi bangkitan sistem *regenerative braking* yang dapat dihasilkan tidak sepenuhnya dapat diubah menjadi energi listrik, karena pada tiap komponen terjadi kehilangan energi terutama energi kinetik yang berubah menjadi energi panas pula. Namun dari keterbatasan data tersebut selama kendaraan melaju pada *urban driving cycle*¸ efisiensi potensi energi bangkitan yang dapat dimanfaatkan oleh sistem *regenerative braking* Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 ini cukup besar, karena mampu memanfaatkan hingga 43.37% potensi energi bangkitan sistem *regenerative braking*.

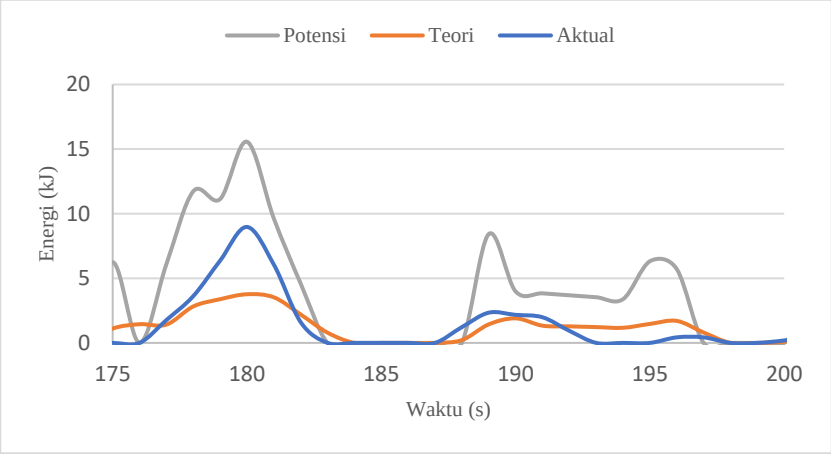
Tabel 4.2 Tabel energi bangkitan sistem *regenerative braking* pada *urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan 02 Desember 2018 untuk tiap moda operasi traksi

Moda Operasi	**01 Desember 2018**			**02 Desember 2018**		
	Aktual	**Teori**	**Potensi**	**Aktual**	**Teori**	**Potensi**
Murni penggerak listrik	260.64	186.41	606.76	358.20	287.50	690.62
Penggerak mesin dan motor	94.91	229.55	640.86	178.54	325.82	547.10

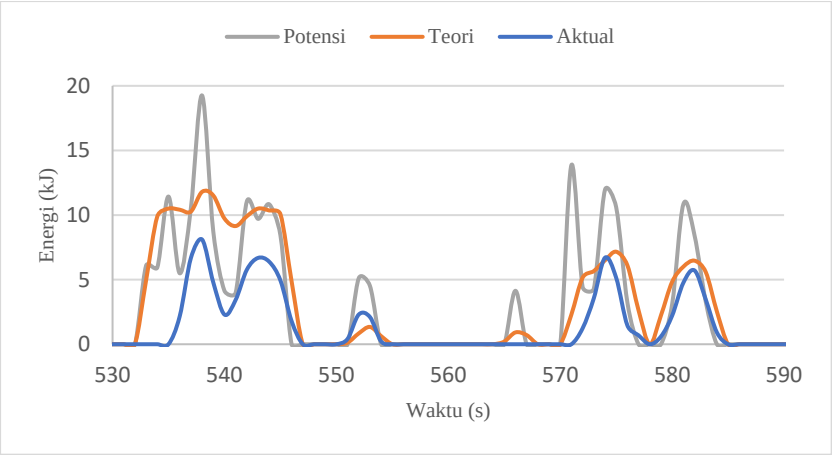
sebagai generator						
Penggerak hibrid	0	0	0	0	0	0
Total (kJ)	355.55	415.96	1247.61	536.74	613.32	1237.72
Efisiensi potensi sistem *regenerative braking* (%)	28.50			43.37		

Dapat dilihat pada gambar 4.7 merupakan grafik energi bangkitan sistem *regenerative braking* pada *urban driving cycle* daerah A dan B. Energi tersebut didapatkan dengan berdasarkan metode *first-order hold*, dimana dilakukan interpolasi dengan pendekatan linear pada grafik daya bangkitan sistem *regenerative braking* yang kemudian diintegralkan terhadap waktu. Nilai potensi energi bangkitan sistem *regenerative braking* merupakan energi kinetik kendaraan yang terbuang saat dilakukan perlambatan atau pengereman. Sementara energi bangkitan sistem *regenerative braking* berasal dari gaya hambat kendaraan saat kendaraan melakukan pengereman. Besar potensi energi kinetik kendaraan tersebut tidak sepenuhnya dapat dikonversikan menjadi energi listrik oleh kendaraan. Maka dari itu besar potensi energi bangkitan bernilai selalu lebih besar dari energi bangkitan sistem *regenerative braking* baik aktual maupun teori. Sementara itu energi bangkitan sistem *regenerative braking* tidak selalu terjadi ketika kendaraan melakukan perlambatan atau pengereman, karena besar kemungkinan daya baterai yang penuh. Selain itu dapat dilihat pada detik ke-180, ke-190 pada gambar 4.7 (a) dan detik ke-553 pada gambar 4.7 (b) dimana nilai energi bangkitan sistem

regenerative braking bernilai lebih besar secara aktual dibandingkan teori. Hal itu dikarenakan adanya kekurangan data kecepatan putar motor sehingga tidak diketahui titik kerja motor ketika beroperasi. Namun secara keseluruhan grafik energi bangkitan sistem *regenerative braking* secara teori cenderung memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan secara aktual.



(a)



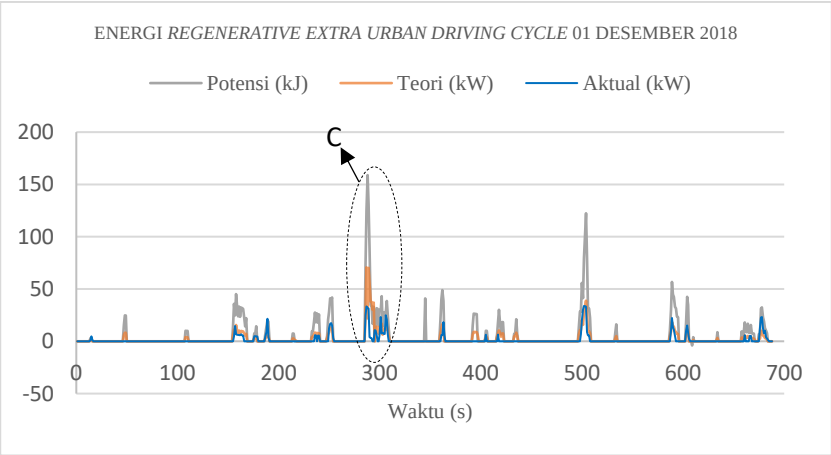
(b)

Gambar 4.7 Grafik energi bangkitan sistem *regenerative braking* pada *urban driving cycle* 01 Desember 2018 daerah A (a) dan 02 Desember 2018 daerah B (b)

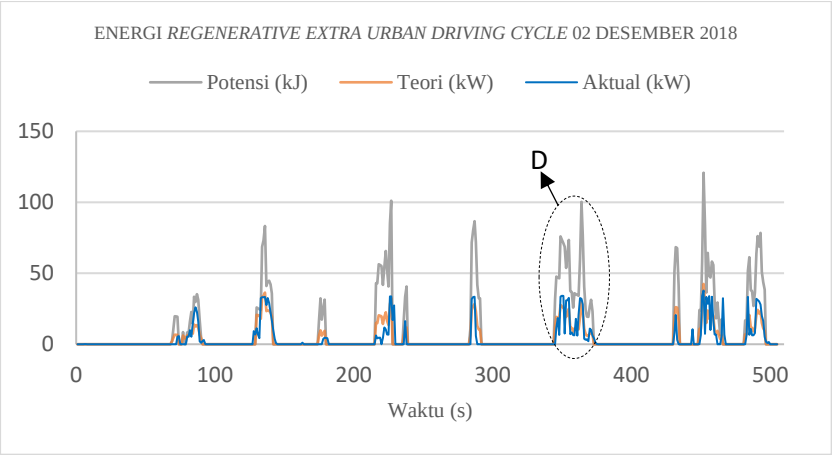
4.4.2 Kondisi Extra Urban Driving Cycle

Dapat dilihat pada gambar 4.8 (a) dan (b), selama Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 melaju pada *extra urban driving cycle* menghasilkan energi bangkitan sistem *regenerative braking* baik secara teori maupun aktual didapatkan dengam metode *first-order hold* grafik daya bangkitan sistem *regenerative braking* dengan interpolasi pendekatan linear yang kemudian diintegralkan terhadap waktu. Energi bangkitan yang dihasilkan dari sistem *regenerative braking* secara aktual, memiliki total sebesar 926.42 kJ untuk *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan sebesar 1809.70 kJ untuk *extra urban driving cycle* 02 Desember 2018. Dimana ketika kendaraan beroperasi pada moda traksi murni penggerak listrik dan *regenerative braking* bekerja ketika kendaraan diperlambat, energi bangkitan sistem *regenerative braking* total yang dihasilkan adalah sebesar 184.05 kJ untuk *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan sebesar 180.72 kJ untuk *extra*

urban driving cycle 02 Desember 2018. Untuk moda traksi penggerak mesin dan motor sebagai generator, total energi bangkitan sistem *regenerative braking* yang dihasilkan adalah 436.53 kJ untuk *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan 1374.68 kJ untuk *extra urban driving cycle* 02 Desember 2018. Sementara ketika moda operasi traksi penggerak hibrid, total energi bangkitan sistem *regenerative braking* yang dihasilkan untuk *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan 02 Desember 2018 adalah sebesar 305.84 kJ dan 254.30 kJ. Total energi bangkitan sistem *regenerative braking* secara teori untuk *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan 02 Desember 2018 sebesar 1468.88 kJ dan 1908.76 kJ. Sementara total potensi energi bangkitan sistem *regenerative braking* adalah sebesar 3808.17 kJ untuk *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan sebesar 5160.79 kJ untuk *extra urban driving cycle* 02 Desember 2018. Maka, efisiensi potensi energi yang dimanfaatkan adalah sebesar 24.33% untuk *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan sebesar 35.07% untuk *extra urban driving cycle* 02 Desember 2018.



(a)



(b)

Gambar 4.8 Grafik energi dan daya bangkitan sistem *regenerative braking* pada *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 (a) dan 02 Desember 2018 (b)

Ketika Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 melaju pada *extra urban driving cycle* cenderung lebih banyak memanfaatkan moda operasi traksi penggerak mesin dan motor sebagai generator dapat dilihat pada tabel 4.3 energi bangkitan yang dihasilkan pada moda operasi traksi ini yang kemudian melakukan pengereman *regenerative* lebih besar dibandingkan energi bangkitan sistem *regenerative braking* yang dihasilkan oleh moda operasi traksi murni penggerak listrik. Tentu saja energi bangkitan sistem *regenerative braking* secara teori pada moda operasi traksi murni penggerak listrik berbeda cukup signifikan akibat dari keterbatasan data yang telah dijelaskan sebelumnya. Energi bangkitan sistem *regenerative braking* Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 cukup besar karena mampu memanfaatkan potensi energi bangkitan sistem *regenerative braking* hingga sebesar 35.07%. Karena kecenderungan gerak kendaraan yang berhenti dan melaju pada

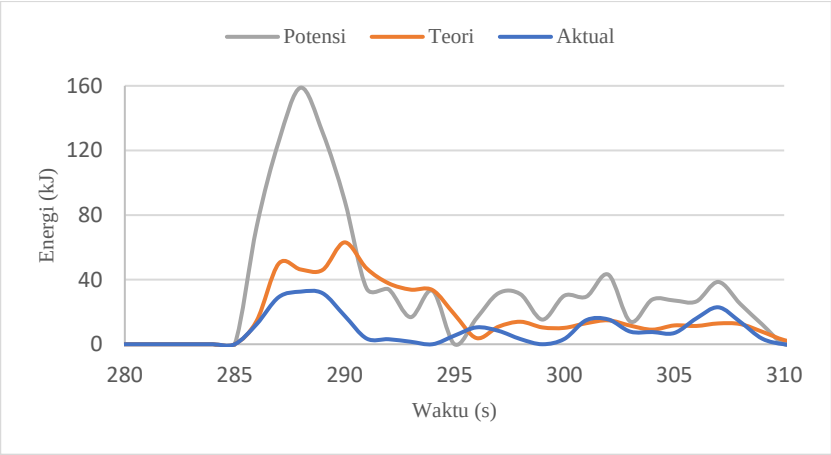
urban driving cycle 01 Desember 2018 dan 02 Desember 2018, energi bangkitan sistem *regenerative braking* sering terjadi. Namun energi bangkitan sistem *regenerative braking* yang dihasilkan lebih besar pada *extra urban driving cycle* dikarenakan perubahan kecepatan yang sangat signifikan ketika kendaraan melakukan pengereman, sehingga gaya hambat yang bekerja juga semakin besar.

Tabel 4.3 Tabel energi bangkitan sistem *regenerative braking* pada *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan 02 Desember 2018 untuk tiap moda operasi traksi

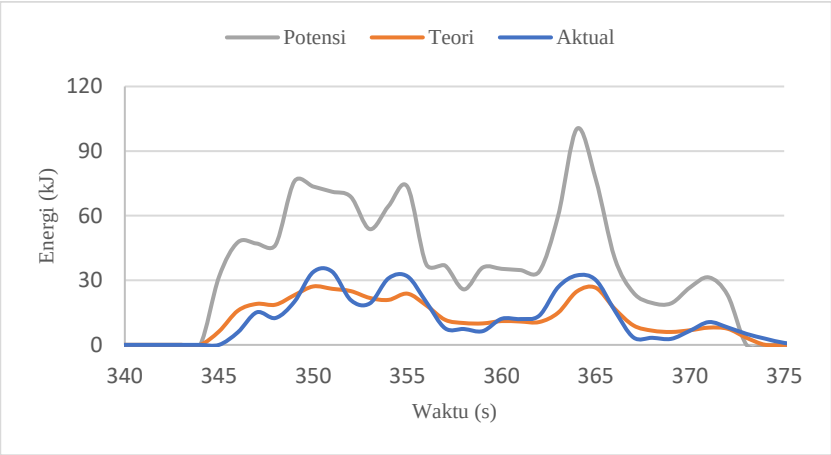
Moda Operasi	**01 Desember 2018**			**02 Desember 2018**		
	Aktual	**Teori**	**Potensi**	**Aktual**	**Teori**	**Potensi**
Murni penggerak listrik	184.05	161.30	469.19	180.72	114.35	229.63
Penggerak mesin dan motor sebagai generator	436.53	734.09	2180.72	1374.68	1572.56	4225.39
Penggerak hibrid	305.84	573.49	1158.26	254.30	221.84	705.77
Total (kJ)	926.42	1468.88	3808.17	1809.70	1908.76	5160.79
Efisiensi potensi sistem *regenerative braking* (%)	24.33			35.07		

Pada gambar 4.9 (a) dan (b) dapat dilihat grafik energi bangkitan sistem *regenerative braking* pada *extra urban driving cycle* daerah A dan B. Energi tersebut didapatkan dengan

berdasarkan metode *first-order hold*, dimana dilakukan interpolasi dengan pendekatan linear pada grafik daya bangkitan sistem *regenerative braking* yang kemudian diintegralkan terhadap waktu. Nilai potensi energi bangkitan sistem *regenerative braking* merupakan energi kinetik kendaraan yang terbuang saat dilakukan perlambatan atau pengereman. Sementara energi bangkitan sistem *regenerative braking* berasal dari gaya hambat kendaraan saat kendaraan melakukan pengereman. Besar potensi energi kinetik kendaraan tersebut tidak sepenuhnya dapat dikonversikan menjadi energi listrik oleh kendaraan. Maka dari itu besar potensi energi bangkitan bernilai selalu lebih besar dari energi bangkitan sistem *regenerative braking* baik aktual maupun teori. Sementara itu energi bangkitan sistem *regenerative braking* tidak selalu terjadi ketika kendaraan melakukan perlambatan atau pengereman, karena besar kemungkinan daya baterai yang penuh seperti pada detik ke-294 dan detik ke-299 gambar 4.9 (a). Grafik energi bangkitan secara teori memiliki *trendline* yang mendekati dengan energi bangkitan secara aktual, namun perhitungan secara teori memiliki kekurangan karena tidak adanya data kecepatan putar motor sehingga tidak diketahui titik kerja motor ketika beroperasi. Namun secara keseluruhan grafik energi bangkitan sistem *regenerative braking* secara teori cenderung memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan secara aktual.



(a)



(b)

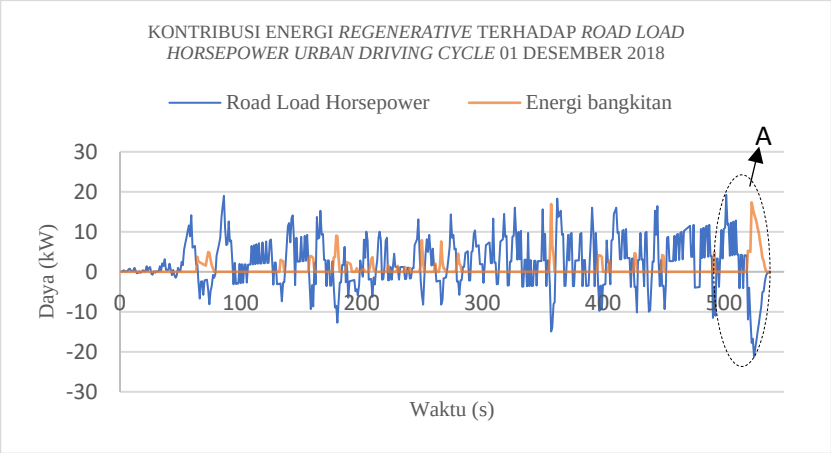
Gambar 4.9 Grafik energi bangkitan sistem *regenerative braking* pada *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 daerah C (a) dan 02 Desember 2018 daerah D (b)

4.5 Kontribusi Sistem *Regenerative Braking* Terhadap Kebutuhan *Road Load Horsepower* Kendaraan

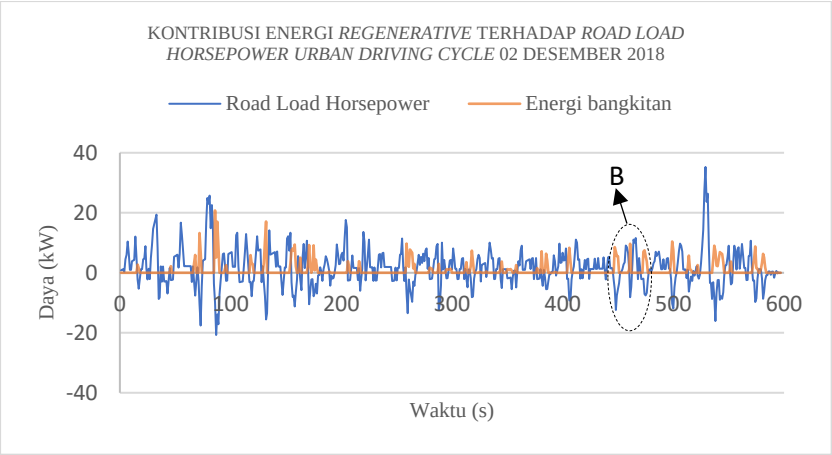
4.5.1 Kondisi Urban Driving Cycle

Pada saat kendaraan beroperasi terdapat gaya – gaya hambat yang perlu dilawan agar kendaraan dapat melaju, gaya hambat tersebut merupakan gaya hambat aerodinamis, gaya hambat *rolling*, gaya hambat percepatan. Dapat dilihat pada gambar 4.10 (a) dan (b), saat kendaraan melaju pada kondisi *urban driving cycle*, total kebutuhan *road load horsepower* kendaraan adalah sebesar 1181.69 kW untuk *urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan sebesar 937.23 kW untuk *urban driving cycle* 02 Desember 2018. Kebutuhan *road load horsepower* maksimum kendaraan yang diperlukan pada *urban driving cycle* 01 Desember 2018 adalah sebesar 19.24 kW dan sebesar 35.28 kW pada *urban riving cycle* 02 Desember 2018. Besar nilai energi bangkitan sistem *regenerative braking* yang dapat dihasilkan pada *urban driving cycle* 01 Desember 2018 adalah sebesar 17.37 kW dan pada *urban driving cycle* 02 Desember 2018 adalah sebesar 20.77 kW. Total energi bangkitan sistem *regenerative braking* selama kondisi *urban driving cycle* adalah 355.55 kW untuk *urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan 536.74 kW untuk *urban driving cycle* 02 Desember 2018. Dengan metode *first-order hold*, dimana dilakukan interpolasi dengan pendekatan linear terhadap grafik data *road load horsepower* kendaraan pada *urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan 02 Desember 2018 yang kemudian diintegralkan terhadap waktu seperti ditunjukkan pada gambar 4.11 (a) dan (b) untuk daerah A dan daerah B. Energi untuk memenuhi kebutuhan *road load horsepower* kendaraan adalah sebesar 1181.64 kJ untuk *urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan sebesar 937.09 kJ untuk *urban driving cycle* 02 Desember 2018. Dengan itu energi bangkitan sistem *regenerative braking* tersebut dapat berkontribusi untuk memenuhi kebutuhan *road load horsepower* kendaraan. Kontribusi yang dihasilkan dari sistem *regenerative braking* Toyota Prius HEV Seri/Paralel

2017 adalah sebesar 30.09% untuk *urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan sebesar 57.28% untuk *urban driving cycle* 02 Desember 2018.



(a)

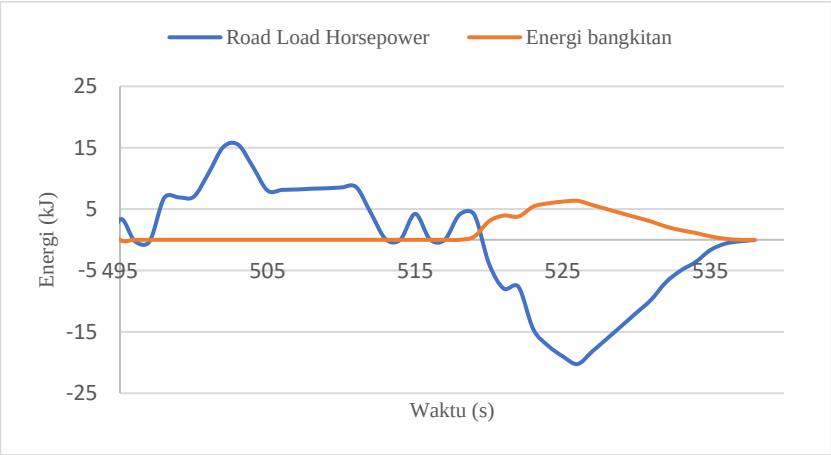


(b)

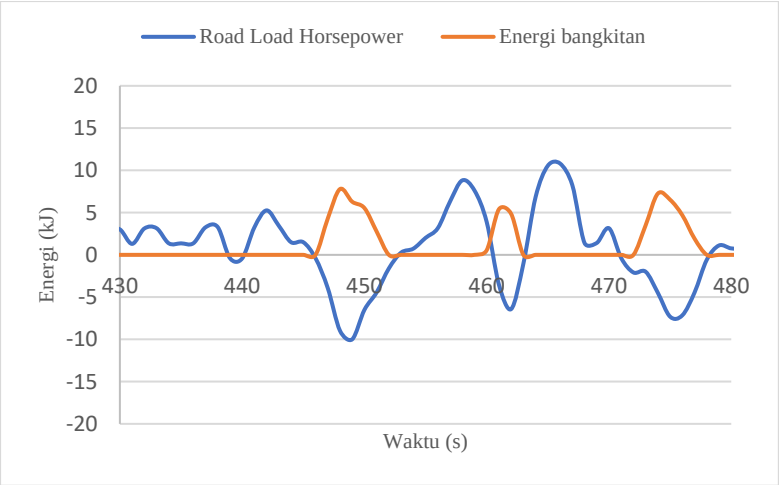
Gambar 4.10 Grafik kontribusi energi bangkitan sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan *road load horsepower* kendaraan pada *urban driving cycle* 01 Desember 2018 (a) dan 02 Desember 2018 (b)

Pada saat Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 melaju selama *urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan 02 Desember 2018 memiliki nilai kontribusi energi bangkitan terhadap kebutuhan *road load horsepower* yang berbeda akibat dari kebutuhan *road load horsepower* kendaraan, terutama akibat dari gaya hambat yang bekerja saat kendaraan dipacu. Ketika kendaraan melakukan percepatan, gaya hambat aerodinamis dan gaya hambat percepatan kendaraan cukup signifikan mempengaruhi kebutuhan *road load horsepower* kendaraan baik pada *urban driving cycle* 01 Desember 2018 maupun 02 Desember 2018. Kondisi berkendara yang lebih banyak berhenti dan melaju juga mempengaruhi kebutuhan *road load horsepower* kendaraan karena gaya hambat kendaraan yang bekerja juga semakin lebih besar. Dengan kemampuan sistem *regenerative braking* Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017, energi bangkitan sistem *regenerative braking*

dapat berkontribusi hingga sebesar 57.28% untuk memenuhi kebutuhan *road load horsepower* kendaraan selama melaju pada *urban driving cycle*. Dengan besar nilai kontribusi tersebut pula, artinya sistem *regenerative braking* Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 meningkatkan efisiensi kendaraan tersebut.



(a)



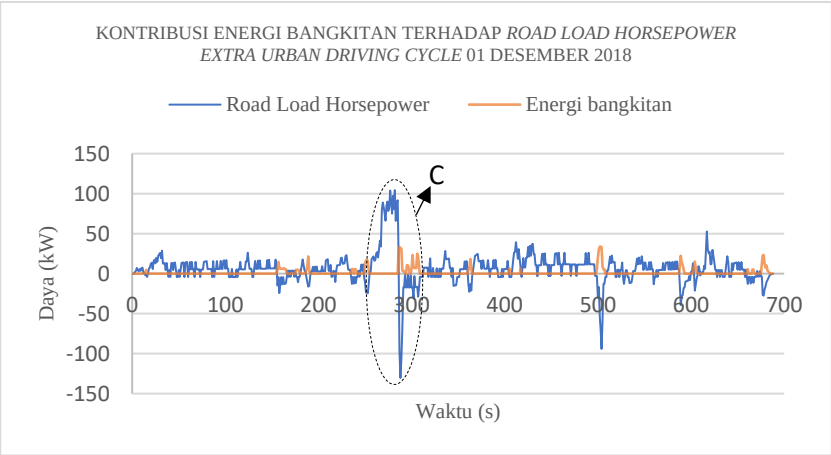
(b)

Gambar 4.11 Grafik kontribusi energi bangkitan sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan *road load horsepower* kendaraan pada *urban driving cycle* 01 Desember 2018 daerah A (a) dan 02 Desember 2018 daerah B (b)

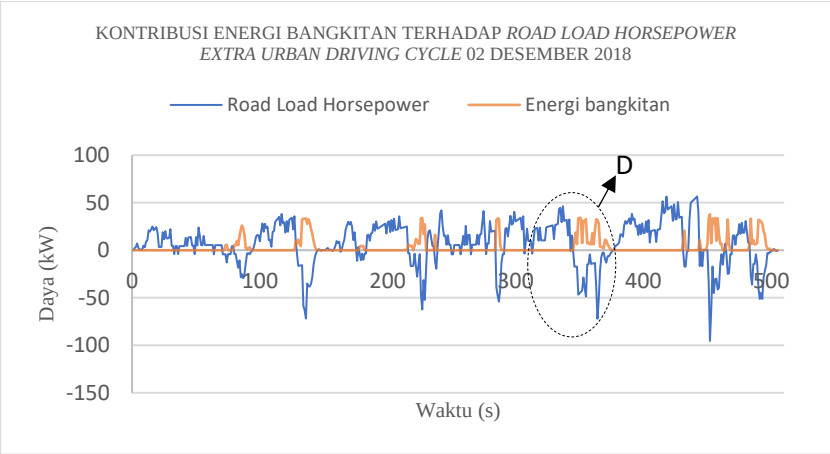
4.5.2 Kondisi Extra Urban Driving Cycle

Kebutuhan *road load horsepower* kendaraan selama *extra urban driving cycle* dapat dilihat pada gambar 4.14 (a) dan (b). Grafik yang dihasilkan memiliki *trendline* yang cukup fluktuatif. Saat kendaraan melaju pada kondisi *extra urban driving cycle*, kebutuhan *road load horsepower* maksimum kendaraan yang diperlukan pada *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 adalah sebesar 104.42 kW dan sebesar 56.47 kW pada *extra urban riving cycle* 02 Desember 2018. Dengan total kebutuhan *road load horsepower* kendaraan adalah sebesar 4255.50 kW untuk *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan sebesar 3426.94 kW untuk *extra urban driving cycle* 02 Desember 2018. Dengan metode *first-order hold*, dimana dilakukan interpolasi dengan pendekatan linear terhadap grafik data *road load horsepower* kendaraan pada

extra urban driving cycle 01 Desember 2018 dan 02 Desember 2018 yang kemudian diintegralkan terhadap waktu seperti ditunjukkan pada gambar 4.15 (a) dan (b) untuk daerah C dan daerah D. Energi untuk memenuhi kebutuhan *road load horsepower* kendaraan adalah sebesar 4255.55 kJ untuk *urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan sebesar 3427.09 kJ untuk *urban driving cycle* 02 Desember 2018. Total energi bangkitan sistem *regenerative braking* selama kondisi *extra urban driving cycle* adalah 926.42 kJ untuk *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan 1809.70 kJ untuk *extra urban driving cycle* 02 Desember 2018. Kontribusi yang dihasilkan dari sistem *regenerative braking* Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 adalah sebesar 21.77% untuk *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 dan sebesar 52.81% untuk *extra urban driving cycle* 02 Desember 2018.



(a)

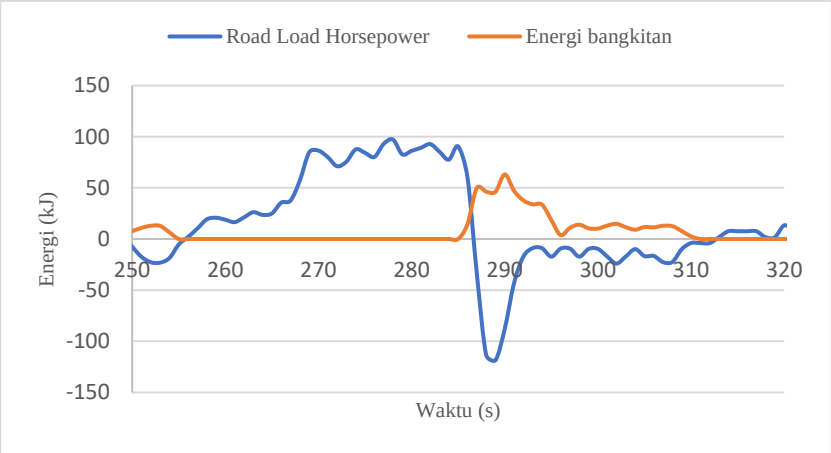


(b)

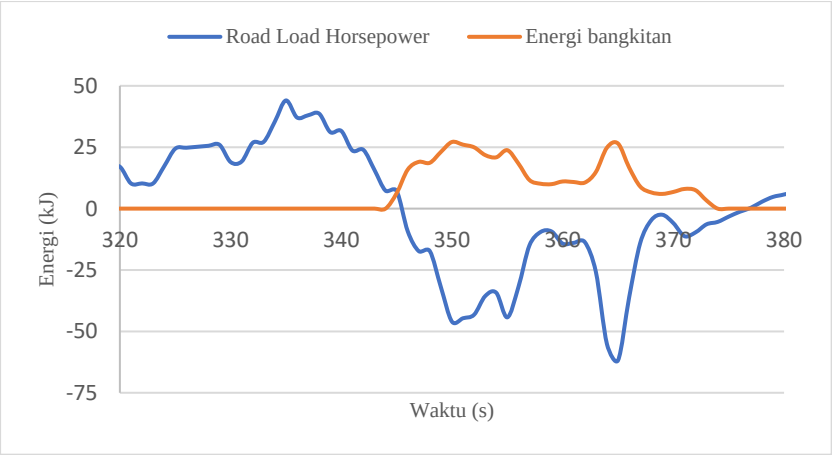
Gambar 4.12 Grafik kontribusi energi bangkitan sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan *road load horsepower* kendaraan pada *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 (a) dan 02 Desember 2018 (b)

Besar perbedaan nilai kontribusi sistem *regenerative braking* Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 terhadap kebutuhan *road load horsepower* antara *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 dengan 02 Desember 2018 adalah akibat dari besar gaya hambat yang bekerja ketika kendaraan melaju. Selain itu gaya berkendara pengendara juga dapat mempengaruhi besar kebutuhan *road load horsepower* kendaraan. Kebutuhan *road load horsepower* kendaraan pada kondisi *urban driving cycle* dan *extra urban driving cycle* juga berbeda akibat dari gaya hambat percepatan yang bekerja. Pada *extra urban driving cycle* kendaraan cenderung memiliki kenaikan percepatan yang signifikan sehingga menghasilkan gaya hambat yang besar dan kebutuhan *road load horsepower* yang dibutuhkan juga besar. Walaupun nilai gaya hambat yang dapat dihasilkan tidak sebesar pada *extra urban driving cycle*, kebutuhan *road load horsepower* Toyota Prius HEV

Seri/Paralel 2017 pada *urban driving cycle* pada 01 Desember 2018 maupun 02 Desember 2018 lebih fluktuatif. Kecenderungan nilai kebutuhan *road load horsepower* yang fluktuatif ini merupakan akibat dari gerak kendaraan yang cenderung lebih banyak berhenti dan melaju, sehingga nilai yang dihasilkan sangat variatif. Selama Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 melaju pada *extra urban driving cycle*, sistem *regenerative braking* kendaraan tersebut mampu berkontribusi hingga mencapai sebesar 52.81%. Dengan nilai kontribusi sebesar itu, sistem *regenerative braking* Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 mampu meningkatkan efisiensi dari kendaraan tersebut.



(a)



(b)

Gambar 4.13 Grafik kontribusi energi bangkitan sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan *road load horsepower* kendaraan pada *extra urban driving cycle* 01 Desember 2018 daerah C (a) dan 02 Desember 2018 daerah D (b)

(*Halaman ini sengaja dikosongkan)*

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berikut merupakan beberapa kesimpulan pada penelitian ini berdasarkan data dan analisis yang telah dilakukan, yaitu :

1. Konsumsi energi pengereman yang terbuang secara total ketika kendaraan Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 diperlambat pada saat *urban driving cycle* mencapai sebesar 1262.47 kJ. Dengan total kebutuhan energi pengereman kendaraan pada saat *urban driving cycle* mencapai sebesar 1492.20 kJ. Sementara pada saat *extra urban driving cycle*, total konsumsi energi pengereman yang terbuang mencapai sebesar 4140.64 kJ. Kebutuhan energi pengereman kendaraan total pada *extra urban driving cycle* mencapai sebesar 4968.84 kJ.
2. Energi bangkitan sistem *regenerative braking* Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 selama *urban driving cycle* pada tiap moda operasi traksi yang kemudian kendaraan melakukan pengereman *regenerative* lebih banyak dihasilkan oleh moda operasi traksi murni penggerak listrik (*pure electric*) yaitu dapat mencapai sebesar 358.20 kJ, penggerak mesin dan motor sebagai generator (*engine traction with charging*) mencapai sebesar 178.54 kJ dan tidak ada energi bangkitan ketika moda operasi traksi kendaraan penggerak hibrid (*hybrid traction*). Sementara selama *extra urban driving cycle* lebih banyak dihasilkan oleh moda operasi traksi penggerak mesin dan motor sebagai generator yaitu dapat mencapai sebesar 1374.68 kJ, murni penggerak listrik mencapai sebesar 184.72 kJ dan penggerak hibrid mencapai sebesar 305.84 kJ. Energi bangkitan sistem *regenerative braking* total yang dihasilkan selama *urban driving cycle* dapat mencapai sebesar 536.74 kJ. Untuk *extra urban*

driving cycle, total energi bangkitan sistem *regenerative braking* dapat mencapai sebesar 1809.7 kJ.

3. Efisiensi potensi sistem *regenerative braking* Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 pada saat *urban driving cycle* mencapai sebesar 43.37%. Sementara untuk efisiensi sistem *regenerative braking* Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 selama *extra urban driving cycle* mencapai sebesar 35.07%.
4. Kontribusi dari sistem *regenerative braking* Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 terhadap kebutuhan *road load horsepower* kendaraan pada saat *urban driving cycle* dan *extra urban driving cycle* dapat mencapai sebesar 57.28% dan 52.81%.

5.2 Keterbatasan Penelitian

Dalam melakukan analisis, penulis menghadapi beberapa keterbatasan yang mempengaruhi hasil dari penelitian ini. Adapun keterbatasan tersebut adalah sebagai berikut ini :

1. Kurangnya data kecepatan putar motor akibat tidak adanya peletakkan sensor pada motor,
2. Kurangnya data perubahan rasio transmisi kendaraan karena tidak diletakkan sensor pada transmisi kendaraan,
3. Kurangnya data SOC kendaraan karena tidak adanya peletakkan sensor pada baterai kendaraan,
4. Peta efisiensi motor dan mesin tidak sesuai dengan spesifikasi maksimum dari Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017.

5.3 Saran

Berdasarkan beberapa kesimpulan yang telah dijelaskan dan penelitian yang telah dilakukan, berikut ini merupakan saran yang dapat penulis berikan :

1. Untuk mengetahui energi bangkitan sistem *regenerative braking* Toyota Prius HEV Seri/Paralel 2017 yang lebih

akurat perlu diletakkan sensor untuk menghitung kecepatan putar dari motor, sensor perubahan transmisi kendaraan serta sensor SOC baterai kendaraan untuk mengetahui kapasitas baterai kendaraan,

2. Untuk penelitian selanjutnya, dapat dilakukan analisis mengenai model sistem kontrol pengereman *regenerative* dengan menilai besar energi bangkitan yang dapat ditingkatkan.

(*Halaman ini sengaja dikosongkan)*

DAFTAR PUSTAKA

Barlow, T. J., Latham, S., Mccrae, I. S., & Boulter, P. G. (n.d.). *A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions*.

Bergveld, H. J., 2001. *Battery Management Systems: Design by Modelling*. Eindhoven : Philips Research Laboratories.

BloombergNEF (2019). "*Electric Vehicle Outlook 2019*". Dikutip 10 Agustus 2019 dari BloombergNEF: https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/#toc-viewreport.

Bintang, Pradipta. 2018. *Analisa Penggunaan Regenerative Braking Pada Mobil Multiguna Pedesaan Bertenaga Listrik*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Cikanek, S.R., Bailey, K.E. 2002. *Regenerative Braking System For A Hybrid Electric Vehicle.* Ford Research Laboratory : American Control Conference.

Deloitte (2019). "*New Market. New Entrants. New Challenges. Battery Electric Vehicles".* Deloitte:https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/uk/Documents/manufacturing/deloitte-uk-battery-electric-vehicles.pdf.

DeMers, Steven M. 2008. *Mechanical and Regenerative Braking Integration for a Hybrid Electric Vehicle.* Kanada : University of Waterloo.

Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S. E., & Emadi, A. 2004. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles Fundamentals, Theory, and Design.* Florida: CRC Press.

Gajek, Andrzej., Strzępek, Piotr. 2015. *Examining The Braking Energy Recovery in a Vehicle with a Hybrid Drive System.* Warsawa : Cracow University of Technology.

Hasoloan, Nico. 2019. *Analisis Pengelolaan Energi dan Konsumsi Bahan Bakar pada Kendaraan Hibrid*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

International Energy Agency (2019, 27 Mei). "*Global EV Outlook 2019".* Dikutip 10 Agustus 2019 dari International Energy Agency: https://www.iea.org/publications/reports/globalevoutlook 2019/

Keil, P., Jossen, A. 2015. *Aging of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Impact of Regenerative Braking.* Munich: Technische Universitat Munchen.

Kemenperin (2017, 27 Agustus). "Kemenperin Dorong Produksi Mobil Hybrid dan Listrik". Kemenperin:https://www.kemenperin.go.id/artikel/18068/ Kemenperin-Dorong-Produksi-Mobil-Hybrid-dan-Listrik.

Liu, Z., Ortmann, W. J., Nefcy, B., Colvin, D., Connolly, F. 2017. *Methods of Measuring Regenerative Braking Efficiency in a Test Cycle. SAE Int. J. Alt. Power. 6(1):2017, doi:10.4271/2017-01-1168.*

Luthfi, Hadi. 2019. *Pemetaan Moda Operasi, Aliran Daya dan Analisis Karakteristik Traksi Kendaraan Hybrid Seri-Paralel pada Driving Cycle Tertentu (Studi Kasus Toyota Prius Hybrid).* Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Mansour, C., Clodic D. 2011. *Dynamic Modelling of The Electro-Mechanical Configuration of The Toyota Hybrid System Series/Parallel Power Train.* Palaiseau : MINES ParisTech, *doi:10.1007/s12239−012−0013−8*.

Parashar, Divyanshu (2014, 22 Maret). "*Regenerative Brake System".* Diakses 3 September 2019 dari Slideshare: https://www.slideshare.net/divyanshu2k/regenerative-braking-system-32602945.

Sutantra, I Nyoman. 2015. *Teknologi Otomotif Hybrid Edisi Pertama.* Surabaya: Guna Widya.

Sutantra, I Nyoman dan Bambang Sampurno. 2010. *Teknologi Otomotif Edisi Kedua.* Surabaya: Guna Widya.

Wang, Shun-Chung., Chen Guan-Jhu., Liu, Yi-Hua., 2018. *Adaptive Charging Strategy With Temperature Rise*

Mitigation and Cycle Life Extension for Li-ion Batteries. Taiwan : Lunghwa University of Science and Technology.

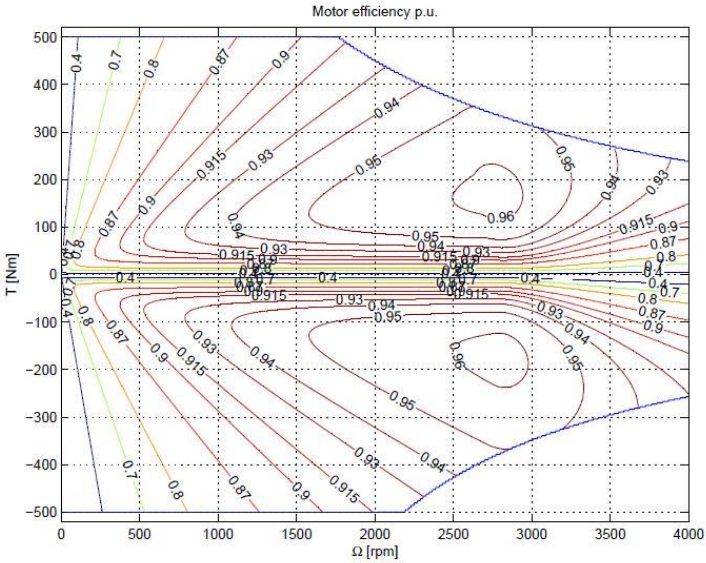
Yeo, H., Hwang, S., Kim, H. 2006. *Regenerative Braking Algorithm For A Hybrid Electric Vehicle With CVT Ratio Control*. Gyunggi-do : Sungkyunkwan University.

Zhang, Yi. 2017. *The Application of Regenerative Braking System to the Commercial Hybrid Vehicles with All-Wheel Drive System*. Kanada : University of Windsor.

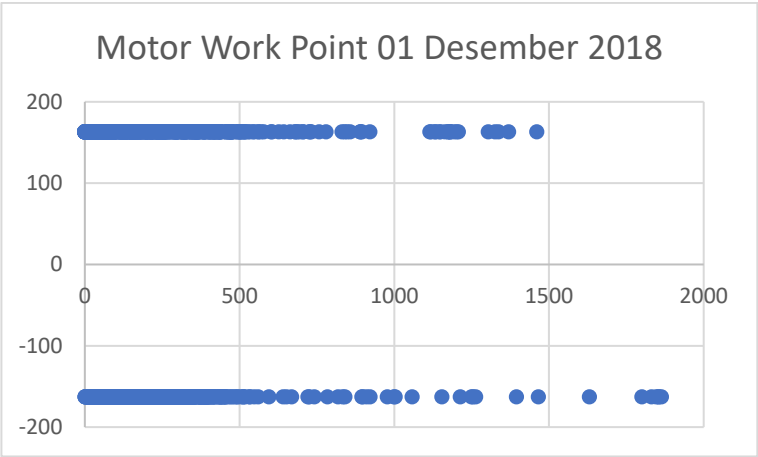
(*Halaman ini sengaja dikosongkan)*

LAMPIRAN

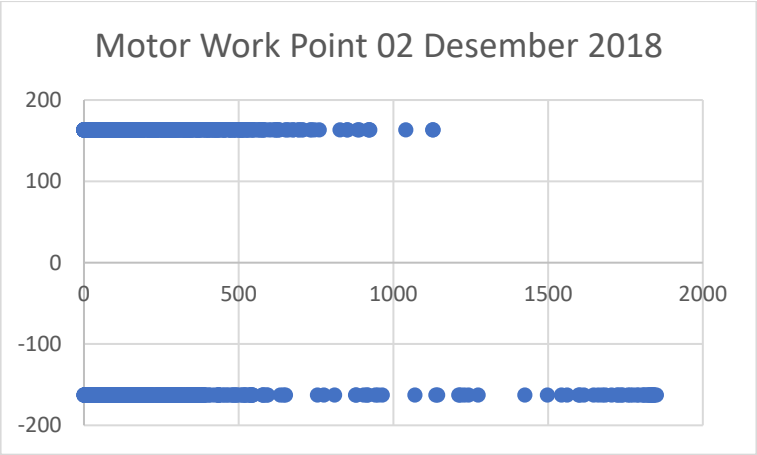
(*Halaman ini sengaja dikosongkan)*



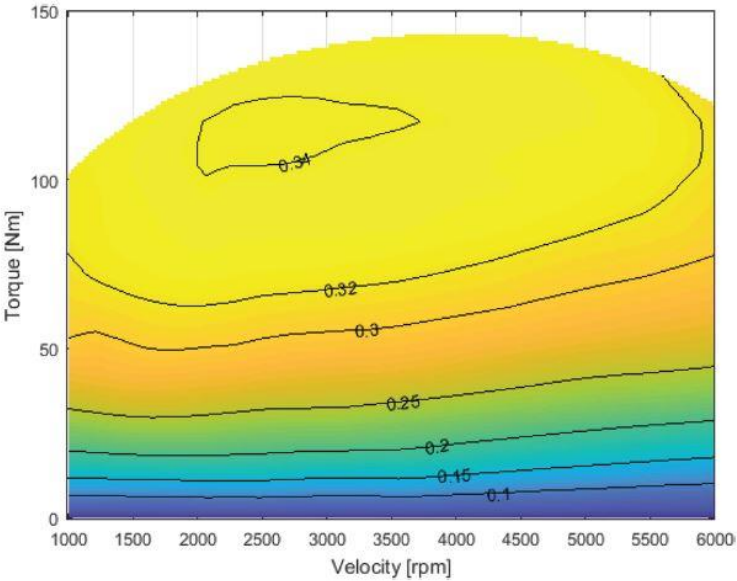
Gambar A.1 Peta efisiensi motor



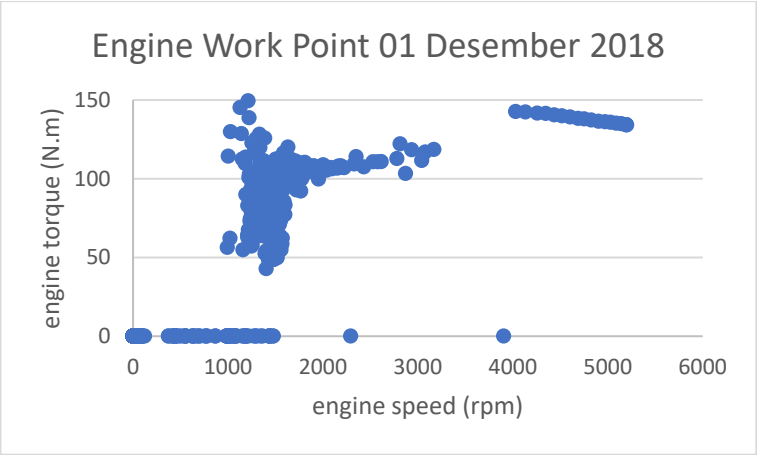
Gambar A.2 Grafik titik kerja motor pada *driving cycle* 01 Desember 2018



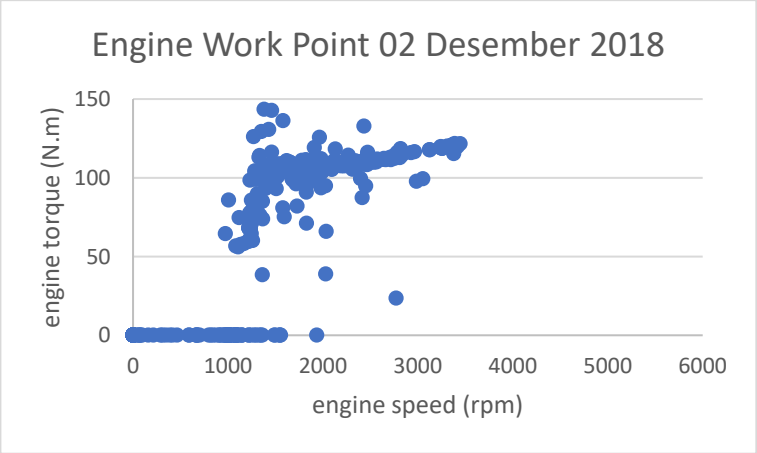
Gambar A.3 Grafik kerja motor pada *driving cycle* 02 Desember 2018



Gambar A.4 Peta efisiensi mesin



Gambar A.5 Grafik titik kerja mesin pada *driving cycle* 01 Desember 2018



Gambar A.6 Grafik titik kerja mesin pada *driving cycle* 02 Desember 2018

Tabel A.1 Rasio hasil perhitungan E–CVT

Driving Cycle	01 Desember 2018	1.62×10^{-5} – 1.716
	02 Desember 2018	1.64×10^{-5} – 1.887

Tabel A.2 Energi pengereman yang terbuang dan dibutuhkan pada daerah A

Time	Vehicle Speed	Wasted Braking Energy	Braking Energy Requirement
s	km/jam	kJ	
60	29	0.00	0.00
61	30	0.00	0.00
62	31	0.00	0.00
63	31	0.00	0.00
64	31	0.00	0.00
65	30	-4.54	-3.12
66	28	-8.64	-8.11
67	27	-4.10	-7.78
68	26	-3.95	-5.48
69	24	-7.45	-6.94
70	23	-3.50	-6.62
71	22	-3.35	-4.62
72	21	-3.20	-4.41
73	19	-5.96	-5.50
74	15	-10.13	-8.23
75	12	-6.03	-7.88
76	9	-4.69	-5.25
77	8	-1.27	-3.06
78	6	-2.08	-1.86
79	5	-0.82	-1.56

80	8	0.00	-0.50
81	11	0.00	0.00
82	14	0.00	0.00
83	17	0.00	0.00
84	21	0.00	0.00
85	25	0.00	0.00

Tabel A.3 Energi pengereman yang terbuang dan dibutuhkan pada daerah B

Time	Vehicle Speed	Wasted Braking Energy	Braking Energy Requirement
s	km/jam	kJ	
170	30	0.00	0.00
171	27	-12.73	-6.81
172	25	-7.74	-11.25
173	24	-3.65	-6.91
174	23	-3.50	-4.83
175	20	-9.61	-7.38
176	17	-8.27	-9.29
177	15	-4.77	-6.90
178	10	-9.31	-6.63
179	9	-1.41	-4.90
180	8	-1.27	-1.72
181	9	1.27	-0.38
182	9	0.00	0.43
183	5	-4.17	-1.62
184	6	0.00	-1.62
185	8	0.00	0.00

Tabel A.4 Energi pengereman yang terbuang dan dibutuhkan pada daerah C

Time	Vehicle Speed	Wasted Braking Energy	Braking Energy Requirement
s	km/jam	kJ	
585	66	0.00	0.00
586	66	0.00	0.00
587	66	0.00	0.00
588	64	-19.36	-12.17
589	59	-45.79	-36.43
590	55	-33.95	-42.69
591	51	-31.57	-35.44
592	48	-22.11	-29.40
593	45	-20.77	-23.95
594	43	-13.10	-19.39
595	41	-12.51	-15.26
596	39	-11.91	-14.48
597	37	-11.32	-13.72
598	36	-5.44	-10.46
599	34	-10.42	-9.90
600	34	0.00	-6.10
601	34	0.00	0.00
602	36	0.00	0.00
603	36	0.00	0.00
604	31	-24.94	-12.46
605	27	-17.27	-21.29
606	25	-7.74	-13.26
607	24	-3.65	-6.91
608	26	0.00	-2.47

609	27	0.00	0.00
610	26	-3.95	-2.68

Tabel A.5 Energi pengereman yang terbuang dan dibutuhkan pada daerah D

Time	Vehicle Speed	Wasted Braking Energy	Braking Energy Requirement
s	km/jam	kJ	
340	110	0.00	0.00
341	110	0.00	0.00
342	111	0.00	0.00
343	110	-16.46	-15.93
344	110	0.00	-15.93
345	109	-16.31	-15.70
346	107	-32.17	-38.91
347	105	-31.57	-45.82
348	103	-30.98	-44.64
349	99	-60.16	-57.65
350	95	-57.78	-69.53
351	91	-55.40	-66.15
352	87	-53.02	-62.83
353	84	-38.20	-53.72
354	80	-48.85	-50.92
355	75	-57.71	-59.22
356	73	-22.04	-45.63
357	71	-21.44	-27.95
358	70	-10.50	-22.04
359	68	-20.55	-21.36
360	66	-19.96	-25.67
361	64	-19.36	-24.77

362	62	-18.76	-23.89
363	57	-44.30	-35.12
364	46	-84.36	-62.63
365	36	-61.06	-67.16
366	31	-24.94	-40.39
367	29	-8.94	-17.63
368	28	-4.24	-8.07
369	27	-4.10	-5.69
370	24	-11.39	-8.83
371	19	-16.01	-13.64
372	16	-7.82	-11.61
373	12	-8.34	-7.91
374	8	-5.96	-6.49
375	4	-3.57	-3.89
376	1	-1.12	-1.55
377	3	0.00	-0.25
378	7	0.00	0.00
379	10	0.00	0.00
380	13	0.00	0.00

Tabel A.6 Energi bangkitan sistem *regenerative braking* pada daerah A

Time	Vehicle Speed	Regenerative Braking Actual	Regenerative Braking Theory	Potency Regenerative Braking
s	km/jam	kJ		
175	41	0.00	1.11	6.24
176	41	0.00	1.45	0.00
177	40	1.77	1.42	6.09
178	38	3.62	2.82	11.73
179	36	6.37	3.38	11.13

180	33	8.98	3.77	15.57
181	31	6.06	3.53	9.63
182	30	1.61	2.20	4.59
183	29	0.00	0.79	0.00
184	29	0.00	0.00	0.00
185	29	0.00	0.00	0.00
186	30	0.00	0.00	0.00
187	29	0.00	0.00	0.00
188	29	1.22	0.22	0.00
189	27	2.34	1.43	8.42
190	26	2.17	1.90	3.99
191	25	1.99	1.33	3.84
192	24	0.94	1.28	3.69
193	23	0.00	1.23	3.54
194	22	0.00	1.17	3.38
195	20	0.00	1.47	6.32
196	18	0.43	1.70	5.72
197	15	0.43	0.81	0.00
198	13	0.00	0.00	0.00
199	14	0.00	0.00	0.00
200	14	0.19	0.10	0.00

Tabel A.7 Energi bangkitan sistem *regenerative braking* pada daerah B

Time	Vehicle Speed	Regenerative Braking Actual	Regenerative Braking Theory	Potency Regenerative Braking
s	km/jam	kJ		
530	36	0.00	0.00	0.00
531	40	0.00	0.00	0.00
532	41	0.00	0.00	0.00

533	40	0.00	4.96	6.09
534	39	0.00	9.89	5.94
535	37	0.00	10.50	11.43
536	36	2.16	10.41	5.49
537	34	6.67	10.27	10.53
538	30	8.11	11.80	19.25
539	28	4.79	11.51	8.72
540	27	2.30	9.73	4.14
541	26	3.44	9.15	3.99
542	23	5.77	9.91	11.06
543	20	6.68	10.50	9.70
544	16	6.39	10.35	10.83
545	12	4.94	10.07	8.42
546	11	1.79	4.87	0.00
547	12	0.00	0.00	0.00
548	13	0.00	0.00	0.00
549	15	0.00	0.00	0.00
550	18	0.00	0.00	0.00
551	18	0.42	0.13	0.00
552	16	2.30	0.84	5.11
553	14	2.11	1.34	4.51
554	15	0.22	0.62	0.00
555	18	0.00	0.00	0.00
556	20	0.00	0.00	0.00
557	20	0.00	0.00	0.00
558	22	0.00	0.00	0.00
559	24	0.00	0.00	0.00
560	24	0.00	0.00	0.00
561	25	0.00	0.00	0.00
562	27	0.00	0.00	0.00

563	28	0.00	0.00	0.00
564	28	0.00	0.00	0.00
565	28	0.00	0.21	0.00
566	27	0.00	0.92	4.14
567	26	0.00	0.71	0.00
568	27	0.00	0.00	0.00
569	28	0.00	0.00	0.00
570	30	0.00	0.00	0.00
571	30	0.00	2.31	13.87
572	29	1.23	5.15	4.44
573	28	3.56	5.66	4.29
574	25	6.70	6.49	11.96
575	22	5.15	7.16	10.61
576	21	1.46	6.11	3.23
577	21	0.69	2.63	0.00
578	21	0.00	0.00	0.00
579	21	0.60	2.23	0.00
580	20	2.21	4.83	3.08
581	16	4.76	6.00	10.83
582	12	5.71	6.47	8.42
583	10	3.48	5.59	3.31
584	9	0.91	2.53	0.00
585	8	0.00	0.00	0.00
586	8	0.00	0.00	0.00
587	8	0.00	0.00	0.00
588	7	0.00	0.00	0.00
589	7	0.00	0.00	0.00
590	7	0.00	0.00	0.00

Tabel A.8 Energi bangkitan sistem *regenerative braking* pada daerah C

Time	Vehicle Speed	Regenerative Braking Actual	Regenerative Braking Theory	Potency Regenerative Braking
s	km/jam	kJ		
280	127	0.00	0.00	0.00
281	130	0.00	0.00	0.00
282	134	0.00	0.00	0.00
283	136	0.00	0.00	0.00
284	139	0.00	0.00	0.00
285	142	0.00	0.00	0.00
286	142	12.47	14.55	73.00
287	136	29.16	49.89	125.46
288	128	32.57	46.29	158.85
289	121	31.56	46.02	131.10
290	116	17.65	63.07	89.13
291	114	3.53	46.97	34.60
292	112	3.12	37.75	34.00
293	111	1.56	33.83	16.77
294	109	0.00	33.53	33.09
295	107	5.34	18.48	0.00
296	106	10.44	3.81	16.02
297	104	8.30	10.87	31.59
298	102	3.21	13.93	30.99
299	101	0.00	10.41	15.27
300	99	3.30	10.14	30.09
301	97	14.91	13.03	29.48
302	94	15.34	14.80	43.10
303	93	7.80	11.50	14.07
304	91	7.55	9.03	27.68

305	89	6.96	11.65	27.08
306	87	15.97	11.32	26.48
307	84	22.87	12.89	38.59
308	82	13.85	12.49	24.97
309	81	3.46	7.74	12.26
310	80	0.00	2.56	0.00

Tabel A.9 Energi bangkitan sistem *regenerative braking* pada daerah D

Time	Vehicle Speed	Regenerative Braking Actual	Regenerative Braking Theory	Potency Regenerative Braking
s	km/jam	kJ		
340	110	0.00	0.00	0.00
341	110	0.00	0.00	0.00
342	111	0.00	0.00	0.00
343	110	0.00	0.00	0.00
344	110	0.00	0.00	0.00
345	109	0.00	6.26	31.63
346	107	5.85	15.87	47.65
347	105	15.11	19.04	47.05
348	103	12.49	18.66	46.45
349	99	20.02	23.09	75.93
350	95	33.83	27.14	73.53
351	91	34.04	26.04	71.12
352	87	20.77	24.96	68.71
353	84	19.23	21.80	53.75
354	80	30.93	20.89	64.50
355	75	31.81	23.79	73.45
356	73	19.90	18.36	37.42
357	71	7.70	11.64	36.82

358	70	7.37	10.14	25.77
359	68	6.40	9.97	35.92
360	66	12.12	11.06	35.32
361	64	11.99	10.83	34.72
362	62	13.58	10.61	34.11
363	57	26.80	14.92	59.91
364	46	32.27	24.83	100.38
365	36	30.10	26.50	76.84
366	31	15.99	16.78	40.36
367	29	3.44	9.02	24.19
368	28	3.28	6.60	19.45
369	27	2.80	5.99	19.30
370	24	6.57	6.79	26.67
371	19	10.58	8.01	31.33
372	16	8.11	7.49	23.06
373	12	5.11	3.29	0.00
374	8	2.87	0.00	0.00
375	4	0.92	0.00	0.00

Tabel A.10 Kontribusi energi bangkitan sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan *road load horsepower* kendaraan pada daerah A

Time	Vehicle Speed	Regenerative Braking Actual	Road Load Horsepower Energy
s	km/jam	kJ	
495	48	0.00	3.33
496	47	0.00	-0.22
497	47	0.00	-0.27
498	48	0.00	6.85
499	48	0.00	6.90
500	49	0.00	7.03

501	50	0.00	10.86
502	52	0.00	15.11
503	53	0.00	15.50
504	54	0.00	11.89
505	54	0.00	8.00
506	55	0.00	8.14
507	55	0.00	8.20
508	56	0.00	8.33
509	56	0.00	8.39
510	57	0.00	8.53
511	57	0.00	8.59
512	57	0.00	4.34
513	56	0.00	0.11
514	56	0.00	0.05
515	56	0.00	4.22
516	55	0.00	0.07
517	55	0.00	0.01
518	55	0.00	4.10
519	55	0.00	4.10
520	53	2.64	-3.91
521	52	5.20	-7.95
522	50	5.06	-7.67
523	47	11.19	-14.56
524	44	16.67	-17.25
525	40	15.24	-18.99
526	36	14.06	-20.24
527	32	13.08	-18.18
528	28	11.80	-16.09
529	24	10.35	-13.99
530	20	8.63	-11.87

531	16	6.64	-9.73
532	13	4.62	-6.88
533	9	3.16	-5.00
534	6	1.92	-3.62
535	4	0.62	-1.67
536	3	0.08	-0.63
537	2	0.00	-0.24
538	2	0.00	-0.04

Tabel A.11 Kontribusi energi bangkitan sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan *road load horsepower* kendaraan pada daerah B

Time	Vehicle Speed	Regenerative Braking Actual	Road Load Horsepower Energy
s	km/jam	kJ	
430	23	0.00	0.00
431	23	0.00	0.00
432	24	0.00	0.00
433	24	0.00	0.00
434	24	0.00	0.00
435	24	0.00	0.00
436	24	0.00	0.00
437	25	0.00	0.00
438	25	0.00	0.00
439	24	0.00	0.00
440	24	0.00	0.00
441	25	0.00	0.00
442	26	0.00	0.00
443	26	0.00	0.00
444	26	0.00	0.00
445	26	0.00	0.00

446	25	0.00	1.02
447	23	4.29	4.28
448	18	7.79	5.08
449	14	6.29	3.68
450	10	5.54	3.37
451	5	2.75	0.00
452	5	0.00	0.00
453	5	0.00	0.00
454	6	0.00	0.00
455	8	0.00	0.00
456	10	0.00	0.00
457	14	0.00	0.00
458	17	0.00	0.00
459	19	0.00	0.00
460	19	0.55	28.92
461	15	5.40	6.27
462	12	4.85	0.00
463	13	0.00	0.00
464	17	0.00	0.00
465	20	0.00	0.00
466	23	0.00	0.00
467	24	0.00	0.00
468	23	0.00	0.00
469	24	0.00	0.00
470	24	0.00	0.00
471	23	0.00	1.06
472	22	0.00	0.70
473	21	3.51	4.70
474	18	7.26	5.59
475	14	6.52	2.74

476	8	4.69	2.45
477	4	1.91	0.00
478	5	0.00	0.00
479	6	0.00	0.00
480	6	0.00	0.00

Tabel A.12 Kontribusi energi bangkitan sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan *road load horsepower* kendaraan pada daerah C

Time	Vehicle Speed	Regenerative Braking Actual	Road Load Horsepower Energy
s	km/jam	kJ	
250	49	6.18	-7.56
251	45	14.55	-17.47
252	41	17.05	-22.77
253	36	16.26	-23.17
254	33	9.11	-18.66
255	33	1.54	-5.37
256	33	0.00	2.00
257	36	0.00	10.16
258	39	0.00	19.11
259	42	0.00	20.71
260	44	0.00	18.77
261	46	0.00	16.43
262	49	0.00	21.07
263	52	0.00	26.15
264	54	0.00	23.53
265	57	0.00	24.94
266	61	0.00	35.50
267	64	0.00	37.53

268	71	0.00	57.11
269	78	0.00	84.61
270	84	0.00	86.32
271	89	0.00	79.93
272	93	0.00	71.11
273	98	0.00	75.56
274	103	0.00	87.52
275	107	0.00	84.18
276	111	0.00	80.11
277	116	0.00	92.89
278	120	0.00	97.12
279	123	0.00	82.69
280	127	0.00	86.13
281	130	0.00	89.11
282	134	0.00	92.68
283	136	0.00	85.22
284	139	0.00	77.51
285	142	0.00	90.41
286	142	12.47	60.09
287	136	29.16	-33.82
288	128	32.57	-113.24
289	121	31.56	-118.66
290	116	17.65	-87.88
291	114	3.53	-43.03
292	112	3.12	-17.20
293	111	1.56	-8.98
294	109	0.00	-9.01
295	107	5.34	-17.31
296	106	10.44	-9.43
297	104	8.30	-9.42

298	102	3.21	-17.30
299	101	0.00	-9.76
300	99	3.30	-9.72
301	97	14.91	-17.18
302	94	15.34	-24.08
303	93	7.80	-17.06
304	91	7.55	-9.97
305	89	6.96	-16.77
306	87	15.97	-16.62
307	84	22.87	-22.67
308	82	13.85	-22.45
309	81	3.46	-10.02
310	80	0.00	-3.96
311	79	0.00	-4.00
312	78	0.00	-4.04
313	78	0.00	1.74
314	78	0.00	7.55
315	78	0.00	7.55
316	78	0.00	7.55
317	78	0.00	7.55
318	77	0.00	1.73
319	77	0.00	1.64
320	78	0.00	13.27

Tabel A.13 Kontribusi energi bangkitan sistem *regenerative braking* terhadap kebutuhan *road load horsepower* kendaraan pada daerah D

Time	Vehicle Speed	Regenerative Braking Actual	Road Load Horsepower Energy
s	km/jam	kJ	
320	91	0.00	17.05
321	91	0.00	10.27
322	91	0.00	10.27
323	91	0.00	10.27
324	92	0.00	17.24
325	93	0.00	24.40
326	94	0.00	24.79
327	95	0.00	25.19
328	96	0.00	25.58
329	97	0.00	25.99
330	97	0.00	18.97
331	98	0.00	19.17
332	99	0.00	26.81
333	100	0.00	27.22
334	102	0.00	35.45
335	104	0.00	44.05
336	105	0.00	37.11
337	107	0.00	38.00
338	108	0.00	38.68
339	109	0.00	31.17
340	110	0.00	31.63
341	110	0.00	23.67
342	111	0.00	23.91
343	110	0.00	15.72

344	110	0.00	7.29
345	109	0.00	7.21
346	107	5.85	-9.19
347	105	15.11	-17.32
348	103	12.49	-17.31
349	99	20.02	-32.00
350	95	33.83	-46.03
351	91	34.04	-44.65
352	87	20.77	-43.20
353	84	19.23	-35.63
354	80	30.93	-34.26
355	75	31.81	-44.28
356	73	19.90	-31.95
357	71	7.70	-14.94
358	70	7.37	-9.53
359	68	6.40	-9.32
360	66	12.12	-14.24
361	64	11.99	-13.94
362	62	13.58	-13.63
363	57	26.80	-25.79
364	46	32.27	-55.16
365	36	30.10	-61.80
366	31	15.99	-36.31
367	29	3.44	-14.09
368	28	3.28	-4.74
369	27	2.80	-2.50
370	24	6.57	-5.91
371	19	10.58	-11.23
372	16	8.11	-9.69
373	12	5.11	-6.39

374	8	2.87	-5.42
375	4	0.92	-3.26
376	1	0.12	-1.28
377	3	0.00	0.33
378	7	0.00	2.80
379	10	0.00	4.77
380	13	0.00	5.75

BIODATA PENULIS

Penulis dilahirkan di Bekasi pada tanggal 5 Maret 1997 dan merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal pada sekolah dasar SDN Bojong Rawalumbu IX (2003 – 2009), sekolah menengah SMPN 2 Bekasi (2009 – 2012) dan SMAN 68 Jakarta (2012 – 2015). Setelah menyelesaikan pendidikan SMA, penulis melanjutkan pendidikan sarjana pada Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2015 dan menyelesaikan studi pada tahun 2020.

Selama masa studi di ITS, penulis aktif dalam kegiatan akademis maupun organisasi selama perkuliahan. Pada organisasi institut, penulis mengikuti organisasi mahasiswa Tim Pembina Kerohanian Hindu sebagai staf pada tahun 2016. Sementara pada organisasi departemen, penulis mengikuti organisasi mahasiswa Himpunan Mahasiswa Mesin sebagai staf pada tahun 2016 dan pada tahun selanjutnya sebagai Kepala Departemen Kesejahteraan Mahasiswa HMM. Selain itu penulis juga mengikuti beberapa kegiatan pelatihan pengembangan kepribadian baik dari Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem dan juga tingkat institut yang diadakan oleh Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis memiliki prinsip bahwa kesuksesan merupakan suatu hal yang harus diraih dengan pengorbanan yang jujur dan gigih. Apabila terdapat keluh kesah dan juga pertanyaan terkait tugas akhir ini bisa menghubungi penulis melalui email : madepradnyana6@gmail.com.