Tesis - TM 142501

RANCANG BANGUN PURWARUPA *DRIVETRAIN* SEPEDA MOTOR *MULTI-MODE HYBRID* YANG EFISIEN

MUHAMMAD YUNUS
2115205004

DOSEN PEMBIMBING
Alief Wikarta, ST., MSc.Eng., Ph.D.
Dr. Muhammad Nur Yuniarto, ST.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN DESAIN SISTEM MEKANIKAL
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :
Muhammad Yunus
NRP. 2115205004

Tanggal Ujian : 24 Juli 2017
Periode Wisuda : September 2017

Disetujui oleh :

1. **Alief Wikarta, ST, MSc.Eng, PhD** **(Pembimbing I)**
   NIP. 198202102006041002

2. **Dr. Muhammad Nur Yuniarto, ST** **(Pembimbing II)**
   NIP. 197506301998021001

3. **Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, MSc, PhD** **(Penguji)**
   NIP. 195106051978031002

4. **Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA** **(Penguji)**
   NIP. 196509191990031003

5. **Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, ST, M.Eng.Sc** **(Penguji)**
   NIP. 197805102001121001

Dekan Fakultas Teknologi Industri,

Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, ST., MT.
NIP. 196905071995121001

Halaman ini sengaja dikosongkan

RANCANG BANGUN PURWARUPA *DRIVETRAIN* SEPEDA MOTOR *MULTI-MODE HYBRID* YANG EFISIEN

Nama Mahasiswa	: Muhammad Yunus
NRP	: 2115205004
Pembimbing	: Alief Wikarta, ST. MSc.Eng, PhD
ko-Pembimbing	: Dr. Muhammad Nur Yuniarto, ST

ABSTRAK

Kendaraan BBM memiliki paling tidak tiga keterbatasan: efisiensi yang rendah, menghasilkan emisi gas buang, dan memakai energi tak terbarukan. Oleh karena itu diperlukan teknologi untuk mengurangi konsumsi bahan bakar tanpa mengurangi performa kendaraan. Salah satu teknologi yang tepat untuk mengatasi hal tersebut adalah berupa sistem penggerak *hybrid*, yang saat ini masih jarang diaplikasikan pada kendaraan bermotor roda dua. Untuk memungkinkan sistem *hybrid* berfungsi, *planetary gear* akan menjadi penghubung tenaga.

Pemodelan sepeda motor hybrid yang digunakan dalam penelitian ini, disimulasikan dengan menggunakan software matlab dengan menggunakan modul *simscape/simdriveline*. Terdapat 2 *driving cycle* dan 2 kondisi pengoperasian motor bakar yang digunakan dalam simulasi yaitu : yang pertama, *ECE 15 driving cycle* dengan motor bakar beroperasi pada putaran 0 dan >800 rpm; dan yang kedua, *Extra Urban Driving Cycle* dengan motor bakar beroperasi pada putaran 0 dan >800 rpm.

Berdasarkan hasil analisa simulasi pada pemodelan, konsumsi bahan bakar sepeda motor hybrid pada saat motor bakar beroperasi pada putaran >800 rpm berkurang 40% dan 5.6% masing-masing secara berurutan menggunakan *ECE 15* dan *EUDC* driving cycle. Karakter *driving cycle* pada *EUDC* berada pada kecepatan yang tinggi dan waktu berhenti kurang dibandingkan dengan *ECE 15*. Oleh karena itu, pengurangan konsumsi bahan bakar tidak signifikan pada *EUDC*. Artinya sangat tepat menggunakan sepeda motor *hybrid* dengan mode awal motor listrik (atau motor bakar bekerja pada putaran menengah) apabila *driving cycle*-nya banyak situasi berhenti dan jalan dengan kecepatan rendah seperti didaerah perkotaan.

Kata kunci: sepeda motor, *hybrid*, ramah lingkungan, konsumsi bahan bakar, *driving cycle*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN OF MOTORCYCLE MULTI-MODE HYBRID DRIVETRAIN PROTOTYPES WHICH IS EFFICIENT

By	*: Muhammad Yunus*
Student Identity Number	*: 2115205004*
Supervisor	*: Alief Wikarta, ST. MSc.Eng, PhD*
Co-Supervisor	*: Dr. Muhammad Nur Yuniarto, ST*

ABSTRACT

Fuel vehicles have at least three flaws: low efficiency, emissions gas emissions, and non-renewable energy use. Therefore, the technology needed to reduce fuel consumption without reducing the performance of the vehicle. One of the right technologies to overcome this is a hybrid drive system, which is still rarely applied to motorcycles. To enable the hybrid system to function, the planetary gear will become the power hub.

Modeling of hybrid motorcycle used in this research will be simulated in matlab software using simscape / simdriveline module. There are 2 driving cycles and 2 motor fuel operating conditions used in the simulation: first, ECE 15 driving cycles with engines operate at turns 0 and > 800 rpm; And the second, Extra Urban Driving Cycle with engines operate at round 0 and> 800 rpm.

The results of simulation analysis on modeling, fuel consumption of hybrid motorcycle at the time of engine operates at rotation> 800 rpm decreases 40% and 5.6% in the ECE 15 and EUDC driving cycle respectively. The Extra Urban Driving Cycle speed is high and the idling time is less than the ECE 15 driving cycle. Therefore, the reduction in fuel consumption is not significant on EUDC. This means it is very appropriate to use a hybrid motorcycle with the initial mode of the electric motor (or engine work in the middle speed) when the driving cycle of many situations stop and go with low speeds such as urban areas.

Keywords: motorcycle, hybrid, environmentally friendly, fuel consumption, driving cycle.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan pada Tuhan Yang Maha Esa, karena kuasaNYA tesis yang berjudul "Rancang Bangun Purwarupa *drivetrain* Sepeda Motor *Multi-Mode Hybrid* yang Efisien" dapat diselesaikan. Proses penulisan ini merupakan kesempatan bagi saya untuk mempelajari hal-hal baru yang belum didapatkan sebelumnya. Penyusunan tesis dilakukan sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar magister teknik di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri – Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Tesis ini tidak akan selesai tanpa dukungan orang-orang baik disekitar saya tentunya. Banyak pihak yang telah membantu saya dalam menyelesaikan proposal ini, saya mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Alief Wikarta, ST. MSc.Eng, PhD dan Bapak Dr. Muhammad Nur Yuniarto, ST, selaku dosen pembimbing yang selalu siap sedia membimbing dan memberi arahan demi kesempurnaan thesis ini.
2. Bapak Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, MSc, PhD., Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA., dan Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, ST, M.Eng.Sc., selaku dosen penguji proposal dan sidang tesis yang memberikan saran dan masukan sehingga tesis ini semakin baik.
3. Orang tua, istri dan anak-anak tercinta, yang selalu memberikan doa dan semangat demi keberhasilan saya.
4. Rekan-rekan PUI PT SKO (Pusat Unggulan IPTEK Perguruan Tinggi - Sistem Kontrol Otomotif) ITS yang bersedia menjadi teman diskusi, penghibur, selalu mendukung dan membantu baik secara moral maupun materi.
5. Rekan-rekan satu angkatan yang selalu mendukung dan membantu baik secara moral maupun materi.

Tesis ini masih jauh dari kata sempurna. Sebab itu, saya berharap kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan penulisan-penulisan berikutnya.

Saya berharap tesis ini tidak hanya akan menemukan pembacanya, tetapi juga bisa membawa manfaat baru bagi dunia teknologi. Terima kasih telah membaca thesis ini.

Surabaya, 07 Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN ..... **iii**
ABSTRAK ..... **v**
ABSTRACT ..... **vii**
KATA PENGANTAR ..... **viii**
DAFTAR ISI ..... **xi**
DAFTAR GAMBAR ..... **xv**
DAFTAR TABEL ..... **xvii**
BAB 1 PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Perumusan Masalah 3
1.3 Tujuan 3
1.4 Batasan Masalah 3
1.5 Manfaat Penelitian 3
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI **5**
2.1 Kajian Pustaka – *Hybrid* 5
2.1.1 Pengertian *Hybrid* 5
2.1.2 Tingkatan Kendaraan *Hybrid Engine-Electric (HEEV)* 5
2.1.3 Sistem *Multi-Mode Hybrid* 6
2.1.4 Penelitian Sepeda Motor *Hybrid* yang sudah ada 7
2.2 Mesin Pembakaran Dalam / *ICE* 8
2.3 *Axial BLDC Motor* 10
2.4 *Planetary Gear* 12
2.5 Dinamika *Planetary Gear* 13
2.6 Pemodelan Sistem Dinamis 15
2.6.1 Pemodelan Dinamika Kendaraan 17
2.6.2 Pemodelan Dinamika *Planetary Gear* 17
2.7 Perhitungan Torsi dan Tenaga 18
2.7.1 Gaya-gaya Hambat yang terjadi pada Kendaraan 18
2.7.1.1 Gaya Hambat *Rolling* 18

2.7.1.2 Gaya Angin pada Kendaraan 19
2.7.2 Analisa Kebutuhan Torsi dan Tenaga 20
2.7.2.1 Gaya Dorong pada Kecepatan tetap dengan Operasi pada Jalan Datar 20
2.7.2.2 Gaya Dorong pada Kecepatan tetap dengan Operasi pada Jalan Menanjak 20
2.7.2.3 Gaya Dorong pada Kecepatan Berubah dengan Operasi pada Jalan Datar 21
2.7.2.4 Gaya Dorong pada Kecepatan Berubah dengan Operasi pada Jalan Menanjak 21
2.7.3 Kebutuhan Torsi dan Tenaga 21
2.8 Parameter yang Mempengaruhi Konsumsi Bahan Bakar 22
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN 25
3.1 Diagram Alir Penelitian 25
3.2 Tahapan Penelitian 26
3.2.1 Spesifikasi Sepeda Motor 26
3.2.2 Perhitungan Penentuan Sumber Tenaga Penggerak 26
3.2.3 Perhitungan Rasio *Planetary Gear* 28
3.2.4 Pembuatan Pemodelan Sistem *Multi-Mode Hybrid* 29
3.2.4.1 Skema blok manajemen kontrol 29
3.2.4.2 Skema *Powertrain Hybrid* 30
3.2.5 Verifikasi Pemodelan 33
3.2.6 Simulasi pada *Software Matlab* 34
3.2.7 Perancangan *Planetary Gear* 34
3.2.8 Penarikan Kesimpulan dan Pemberian Saran 35
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN 37
4.1 Verifikasi Pemodelan 37
4.2 Hasil Simulasi dan Analisa 40
4.2.1 Simulasi dengan *ECE 15 Driving Cycle (2 Cycle)* 40
4.2.2 Simulasi dengan *Extra Urban Driving Cycle (EUDC)* 41
4.2.3 Perbandingan hasil simulasi 43
4.3 Perancangan *Planetary Gear* 44

4.4 Pembuatan Sepeda Motor *hybrid* 45
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN 47
5.1 Kesimpulan 47
5.2 Saran..... 47
DAFTAR PUSTAKA 49

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Grafik performa moda listrik dan *hybrid* 6
Gambar 2. 2 Pemodelan *Hybrid Electric Vehicle (HEV) Toyota Prius* 7
Gambar 2. 3 Blok diagram hybrid motorcycle powertrain 8
Gambar 2. 4 Karakteristik torsi dan daya pada sepeda motor *hybrid* 9
Gambar 2. 5 Mesin torak, mesin pembakaran dalam 9
Gambar 2. 6 Mesin *rotary, Wankel* 10
Gambar 2. 7 Klasifikasi dan Jenis Motor Listrik *(Duane Hanselman,2003)*..... 11
Gambar 2. 8 *Planetary gear set* 12
Gambar 2. 9 Peta perbandingan dari *Single-*, *double-* dan *triple-PG* 13
Gambar 2. 10 (a) *Planetary Gear Set*, (b) *Sun and Planet gear interaction*, dan (c) *ring and planet gear interaction.* 14
Gambar 2. 11 *Lever diagram of planetary gear set* 15
Gambar 2. 12 Model Dinamika kendaraan dari Simdriveline 16
Gambar 2. 13 Parameter blok dari dinamika kendaraan 16
Gambar 2. 14 Parameter blok roda 17
Gambar 2. 15 Model *Planetary Gear* dan parameter blok *planetary gear* 17
Gambar 2. 16 Gaya-gaya pada kendaraan menanjak dengan kecepatan tetap..... 20
Gambar 2. 17 Gaya-gaya pada kendaraan menanjak dengan percepatan tetap 22
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian 25
Gambar 3. 2 Grafik Tenaga dan Torsi yang dibutuhkan..... 27
Gambar 3. 3 Skema Blok Manajemen Unit Kontrol Kendaraan 30
Gambar 3. 4 Skema sistem powertrain hybrid 31
Gambar 3. 5 Konfigurasi moda hybrid 32
Gambar 3. 6 *ECE 15 Driving Cycle* 33
Gambar 3. 7 *Extra Urban Driving Cycle (EUDC)* 34
Gambar 3. 8 *Axial BLDC Motor 5 kW* 35
Gambar 4. 1 Pemodelan *Hybrid* 37
Gambar 4. 2 Pemodelan Kontrol 37
Gambar 4. 3 Pemodelan Mode Logic 38

Gambar 4. 4 Pemodelan Electrical Sistem 38
Gambar 4. 5 (a) Kecepatan kendaraan, (b) Grafik Fuel Consumption (FC) pada saat motor bakar berfungsi dari putaran 0 rpm dan (c) Grafik FC pada saat motor bakar berfungsi pada saat kecepatan putaran diatas 800 rpm. 40
Gambar 4. 6 (a) Kecepatan kendaraan, (b) Grafik Fuel Consumption (FC) pada saat motor bakar berfungsi dari awal dan (c) Grafik FC pada saat motor bakar berfungsi pada kecepatan putaran diatas 800 rpm. 42
Gambar 4. 7 Planetary gear 45
Gambar 4. 8 Posisi *Input* dan *output* tenaga 45
Gambar 4. 9 Rangka sepeda motor hybrid 46
Gambar 4. 10 Rangka sepeda motor hybrid 46
Gambar 4. 11 Rangka sepeda motor hybrid 46

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan hasil simulasi sepeda motor konvensional dan *hybrid*.... 8
Tabel 3. 1 Penentuan rasio dan dimensi radius roda gigi..... 29
Tabel 3. 2 Moda operasi..... 33
Tabel 4. 1 Perbandingan *hybrid* menggunakan *PG* dan tanpa *PG*..... 39
Tabel 4. 2 perbandingan hasil simulasi..... 43
Tabel 4. 3 Penentuan dimensi diameter *pitch* 44

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemakaian energi nomor 2 dunia yaitu sebesar 27% adalah kegiatan transportasi, dimana energi utama dari kegiatan transportasi adalah minyak bumi. Karena kondisi seperti itu, maka antisipasi utama yang patut dilakukan untuk dapat mengurangi pemakaian minyak bumi, adalah pengembangan teknologi sarana transportasi yang seminimal mungkin menggunakan bahan bakar minyak (Sutantra, 2015). Indonesia telah mendeteksi adanya kemungkinan krisis energi di Indonesia. Presiden RI telah mengeluarkan Perpres No. 41 Tahun 2016 tentang Tata Cara Penetapan dan Penanggulangan Krisis Energi dan Darurat Energi. Di dalam Perpres tersebut disebutkan langkah-langkah strategis agar Indonesia bisa terlepas dari krisis energi. Salah satunya di bidang transportasi dimana Presiden mengamanatkan agar sektor transportasi melakukan program penghematan Bahan Bakar Minyak (BBM) dengan menggunakan *fuel switching* (Perpres No.14 tahun 2016).

Kendaraan BBM memiliki paling tidak 3 (tiga) keterbatasan: efisiensi yang rendah, menghasilkan emisi gas buang, dan memakai energi tak terbarukan. Bloomberg memprediksi bahwa pada tahun-tahun mendatang teknologi dan sumber energi yang ramah lingkungan (baru dan terbarukan) akan semakin memasyarakat dan akan mendominasi bauran energi dan bauran moda transportasi masa mendatang (*BNEF*, 2016). Untuk itu, di beberapa negara maju kendaraan listrik mulai marak dioperasikan sebagai alternatif solusi, karena sangat efisien, tanpa emisi, dan dapat memberi akselerasi yang cepat. Akan tetapi kendaraan listrik mempunyai kendala waktu pengisian battery yang sangat panjang. Oleh karena itu diperlukan teknologi untuk mengurangi konsumsi bahan bakar tanpa mengurangi performa kendaraan. Teknologi yang tepat untuk mengatasi hal tersebut adalah berupa sistem penggerak *hybrid*, perpaduan mesin BBM dan motor listrik.

Hybrid electric vehicles (HEVs) atau kendaraan listrik hybrid dianggap teknologi yang menjanjikan dimasa depan, karena standard *CAFE (corporate average fuel economy)* semakin ketat, dan kesadaran masyarakat tentang lingkungan semakin meningkat (Zhuang, dkk., 2016). Teknologi sistem penggerak mula *hybrid* saat ini sudah diaplikasikan pada kendaraan bermotor roda empat. Sementara untuk aplikasi pada kendaraan bermotor roda dua atau sepeda motor, teknologi *hybrid* ini belum banyak. Padahal saat ini pasar otomotif di indonesia didominasi oleh sepeda motor. Menurut data *AISI* pada 3 tahun terakhir, angka penjualan sepeda motor di Indonesia mencapai 8 juta unit/tahun.

Penelitian tentang sepeda motor *multi-mode hybrid* dengan menggunakan dua motor listrik masih sangat jarang dilakukan. Banyak penelitian tentang sepeda motor *hybrid* yang ada hanya menambahkan system *hybrid* pada sepeda motor konvensional, seperti, Desain dan Performa *Power-Train* pada Purwarupa Sepeda Motor *Hybrid*, penelitian ini hanya berfokus pada uji eksperimen *Power-Train* yang dipasangkan pada sepeda motor yang sudah ada, penelitian ini hanya menggunakan satu motor listrik (Morandin M., dkk. 2014); dan Perancangan, simulasi, dan produksi purwarupa *parallel hybrid electric motorcycle* yang melalui uji jalan, penelitian ini berfokus pada simulasi dan uji jalan pada kendaraan *parallel hybrid electric motorcycle* (sepeda motor yang sudah ada ditambahkan 1 buah *BLDC motor* – 500 W pada roda depan), (Asaei, dkk., 2013).

Karena belum adanya penelitian sepeda motor *multi-mode hybrid* dengan dua unit motor listrik, maka dalam penelitian ini akan meriset sepeda motor *multi-mode hybrid* dengan dua unit motor listrik sampai tahap simulasi konsumsi bahan bakar. Rancang bangun sepeda motor ini akan berfokus pada penggerak berupa sistem *hybrid* dengan konfigurasi 3 jenis sumber tenaga penggerak yaitu satu unit mesin pembakaran dalam (*ICE*) dan dua jenis motor *BLDC*. Motor listrik 1 beroperasi sebagai motor traksi sedangkan motor listrik 2 dapat beroperasi sebagai motor traksi dan generator listrik untuk mengisi *battery*. Ketiga sumber tenaga penggerak akan dihubungkan dengan satu set *planetary gear*.

Untuk mendapatkan efisiensi yang maksimal maka pola operasi *multi-mode hybrid* yang direncanakan adalah moda listrik akan dioperasikan saat putaran kerja kendaraan berada pada putaran rendah sampai dengan menengah,

jika putaran kendaraan mencapai putaran menengah sampai dengan putaran tinggi maka *mode hybrid* (*parallel*, *parallel & series*, serta *series*) akan dioperasikan. Hal ini dikarenakan efisiensi tertinggi untuk mesin pembakaran dalam tercapai pada putaran mesin menengah sampai putaran atas, sedangkan motor listrik memiliki performa yang sangat baik pada putaran rendah sampai tinggi.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan diatas, maka permasalahan yang akan diselesaikan dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pemodelan dan simulasi sistem *hybrid* pada *Simscape-Driveline* untuk mendapatkan nilai konsumsi bahan bakar.
2. Bagaimana merancang bangun purwarupa *drivetrain* pada sepeda motor *multi-mode hybrid.*

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang dan membuat purwarupa sepeda motor hybrid yang ramah lingkungan. Beberapa yang menjadi capaian yaitu :

1. Pembuatan pemodelan dan simulasi sistem *hybrid* dengan menggunakan *Simscape-Driveline* untuk mendapatkan nilai konsumsi bahan bakar.
2. Menghasilkan purwarupa *drivetrain* pada sepeda motor *multi-mode hybrid.*

1.4 Batasan Masalah

Agar masalah yang dibahas lebih terfokus dan terarah, maka dibuat batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Rancang bangun purwarupa *drivetrain* berfokus pada penentuan rasio *planetary gear* untuk proses simulasi.
2. *Planetary gear* yang dirancang tidak dilakukan analisa kekuatan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengurangi penggunaan bahan bakar minyak pada sepeda motor dengan adanya moda motor listrik.
2. Mengurangi pemanasan global yang diakibatkan polusi udara terutama emisi gas buang pada kendaraan yang hanya bertenaga motor bakar.
3. Jarak tempuh sepeda motor *hybrid* lebih jauh dari sepeda motor konvensional dengan jumlah bahan bakar yang sama.
4. Sebagai referensi atau acuan untuk pengembangan sepeda motor *hybrid* selanjutnya.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Kajian Pustaka – *Hybrid*

2.1.1 Pengertian *Hybrid*

Hybrid adalah kendaraan yang menggunakan sumber tenaga atau bahan bakar lebih dari satu (Sutantra, dkk., 2010). Kendaraan *hybrid* telah menjadi semakin populer karena efisiensi bahan bakar yang tinggi. Ada 3 tipe kendaraan hybrid berdasarkan konfigurasi *powertrain*-nya, yaitu *serial, parallel, and power-split hybrid* (Yi, dkk., 2016). Kendaraan *hybrid Engine-Electric*, atau *Hybrid Engine Electric Vehicle (HEEV)* adalah kendaraan yang menggunakan sumber energinya dari bahan bakar minyak atau gas dan dikombinasikan dengan *battery* atau *accu*, sedangkan sebagai tenaga penggeraknya adalah motor bakar dan motor listrik (Sutantra, 2015).

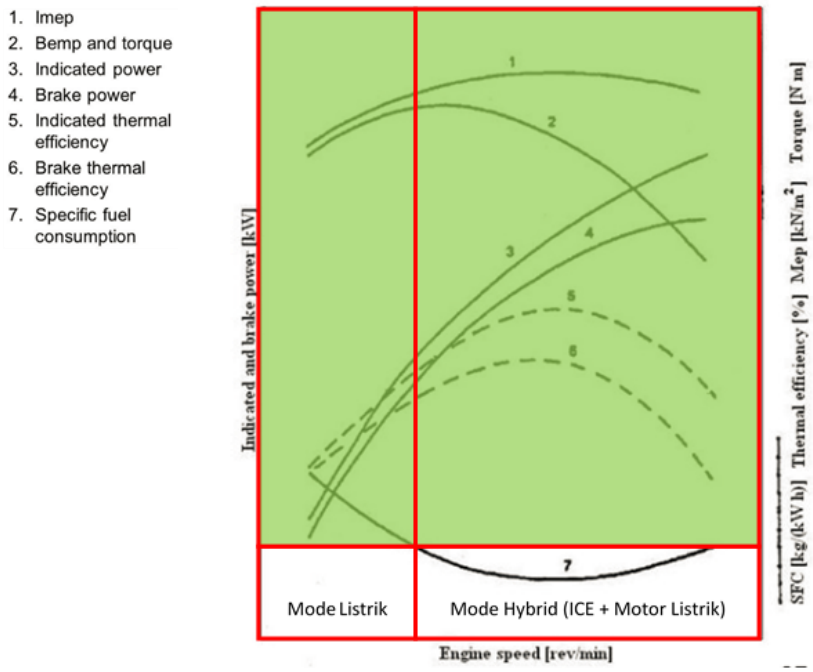
2.1.2 Tingkatan Kendaraan *Hybrid Engine-Electric (HEEV)*

Sesuai dengan proporsi peran *battery* dan motor listrik dalam membangkitkan tenaga penggerak, untuk membantu mesin sebagai penggerak, maka kendaraan *hybrid* dapat dibedakan menjadi beberapa tingkatan yaitu (Sutantra, 2015):

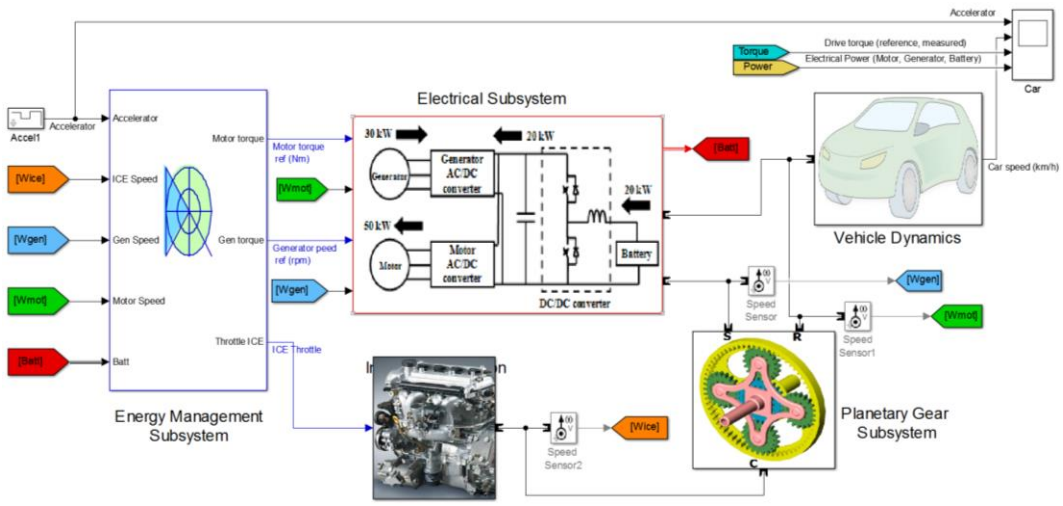
1. *Mikro hybrid* adalah kendaraan *hybrid* dimana tenaga yang bersumber dari battery atau dari motor listrik sangat kecil dibandingkan dengan tenaga dari mesin.
2. *Mild hybrid* adalah kendaraan *hybrid* dimana tenaga yang bersumber dari *battery* atau dari motor listrik masih kecil dibandingkan dengan tenaga dari mesin.
3. *Full hybrid* adalah kendaraan *hybrid* dimana tenaga yang bersumber dari battery atau dari motor listrik besarnya sangat signifikan dibandingkan dengan tenaga dari mesin.

2.1.3 Sistem *Multi-Mode Hybrid*

Sistem *multi-mode hybrid* adalah penggabungan sumber tenaga yang mempunyai banyak mode konfigurasi. Tujuan dari *multi-mode* ini adalah untuk mendapatkan performa dan efisiensi yang tinggi, karena karakteristik sumber tenaga berbeda-beda. Seperti halnya motor bakar mempunyai efisiensi tertinggi pada putaran mesin menengah sampai putaran atas, sedangkan motor listrik memiliki performa yang baik pada putaran rendah sampai tinggi. Apalagi jika motor listrik yang digunakan jenis motor listrik *direct current (DC*). Motor listrik jenis *DC* memiliki torsi maksimal yang besar daripada motor pemabakaran dalam pada putaran 0 rpm sampai putaran mesin tinggi. Sehingga untuk mendapatkan efisiensi yang maksimal maka pola operasi *multi-mode hybrid* yang direncanakan adalah mode listrik akan dioperasikan saat putaran kerja kendaraan berada pada putaran rendah sampai dengan menengah, jika putaran kendaraan mencapai putaran menengah sampai dengan putaran tinggi maka *mode hybrid* (paralel, paralel dan series, serta series) akan dioperasikan, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Grafik performa moda listrik dan *hybrid*



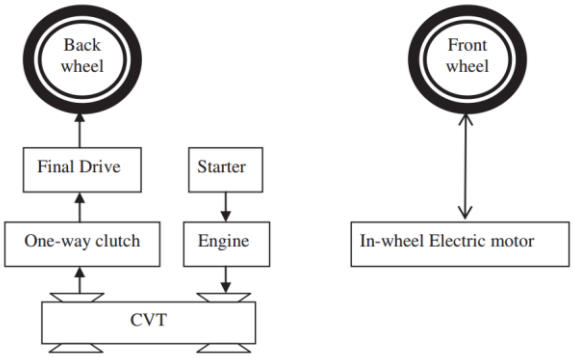
Gambar 2. 2 Pemodelan *Hybrid Electric Vehicle (HEV) Toyota Prius*

Pada gambar 2.2 adalah pemodelan *hybrid electric vehicle* pada kendaraan roda empat Toyota Prius (*www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/33310 -hybrid-electric-vehicle--hev--power-train-using-battery-model*). Moda operasi pada pemodelan tersebut adalah *mode series parallel*. *Power split device* pada kendaraan tersebut menggunakan satu buah *planetary gear set*, dimana motor bakar terhubung pada *carrier/planet gear*, motor listrik pada *ring gear* dan generator pada *sun gear*. Sedangkan output ke poros kendaraan terhubung pada *ring gear*, dengan kata lain antara motor listrik dan poros kendaraan mempunyai rasio putaran 1:1.

2.1.4 Penelitian Sepeda Motor *Hybrid* yang sudah ada

Penelitian-penelitian terdahulu tentang sepeda motor *hybrid* dapat dijadikan acuan untuk simulasi dan pengujian salah satunya adalah yang dilakukan Asaei, dkk., 2013, hasil simulasi dan uji jalan pada kendaraan *parallel hybrid electric motorcycle* (sepeda motor yang sudah ada ditambahkan 1 buah *BLDC motor* – 500 W pada roda depan, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3) didapat kinerja sepeda motor meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa percepatan dari nol sampai 60 km/jam meningkat sekitar 46%. Selain itu, konsumsi bahan bakar berkurang 22% pada *CYC-ECE driving cycle* dibandingkan sepeda motor biasa. Dalam siklus ini, polusi dari hidrokarbon, karbon monoksida

dan nitrogen oksida telah menurun sebesar 22% dan 7% seperti yang ditunjukkan tabel 2.1. Hasil tersebut tanpa merubah motor pembakaran dalam (125 cc, 6,6 kW) dan roda kendaraan. Kemudian penelitian yang dilakukan oleh Morandin M., dkk. 2014, Desain dan Performa *Power-Train* pada Purwarupa Sepeda Motor *Hybrid*, penelitian ini hanya berfokus pada uji eksperimen *Power-Train* yang dipasangkan pada sepeda motor yang sudah ada, penelitian ini hanya menggunakan satu motor listrik. Hasil penelitian ini torsi mode *hybrid* pada putaran 0 – 7000 rpm lebih besar daripada torsi motor bakar seperti yang ditunjukkan gambar 2.3. Selain itu, waktu percepatan (dari 0 – 60 km/jam) menurun 16% dan kecepatan tertinggi meningkat 18%.



Gambar 2. 3 Blok diagram hybrid motorcycle powertrain

Tabel 2. 1 Perbandingan hasil simulasi sepeda motor konvensional dan *hybrid*

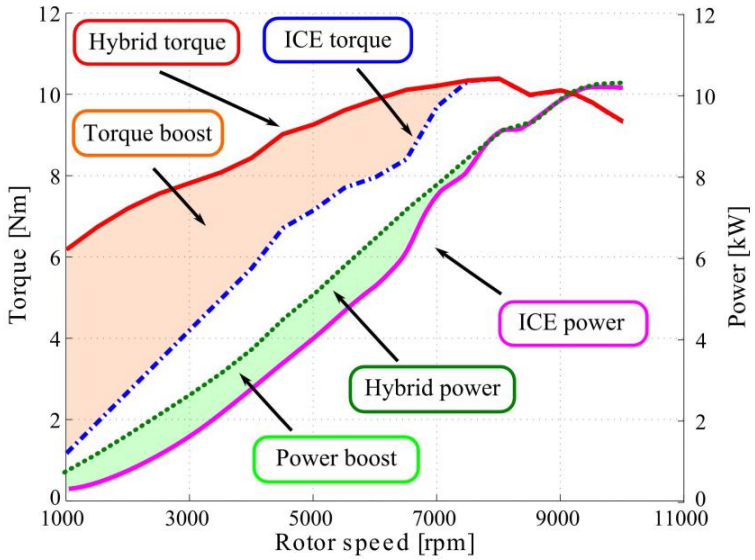
Driving cycle	Type	Fuel consumption (l/100 km)	HC (g/km)	CO (g/km)	NO_x (g/km)
ECE	Conventional	2.7	4.335	18.943	0.209
	Hybrid	2.1	3.381	14.757	0.194
Improvement	22%	22%	22%	7%	
Arterial	Conventional	3.1	4.484	19.585	0.273
	Hybrid	3	4.291	18.74	0.271
Improvement	3%	4%	4%	1%	

Dari uraian diatas, sehingga dalam peneltian ini mesin pembakaran dalam akan dikombinasikan dengan dua buah *axial BLDC* motor menggunakan satu buah *planetary gear* (*single-PG*).

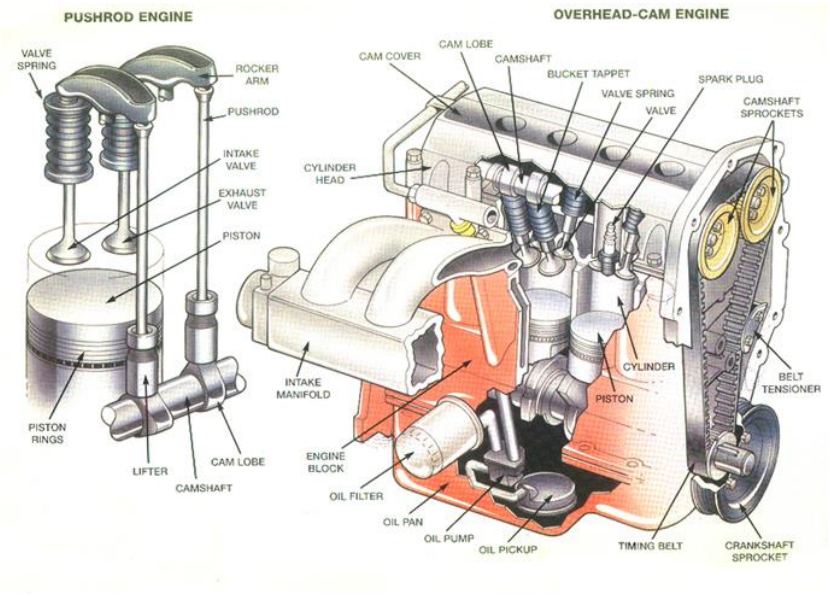
2.2 Mesin Pembakaran Dalam / *ICE*

Komponen pembangkit tenaga adalah kelompok komponen kendaraan yang fungsi utamanya menghasilkan dan merubah tenaga dari pembakaran bahan

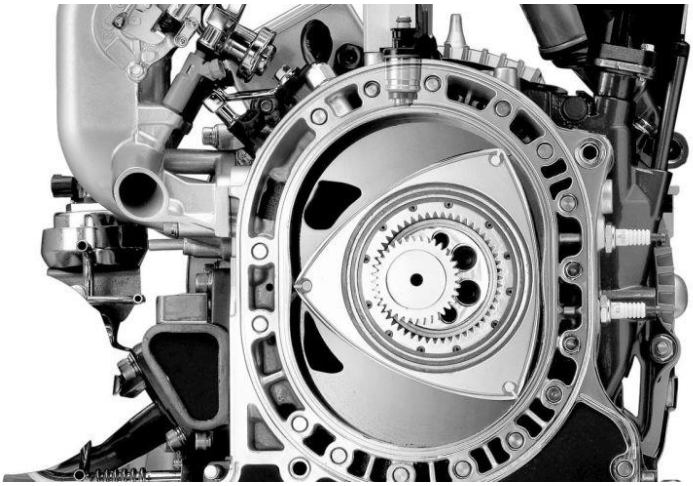
bakar menjadi tenaga mekanis putar sebagai sumber tenaga penggerak kendaraan dan kebutuhan lain kendaraan. Mesin atau pembangkit tenaga dengan bersumber pada tenaga pembakaran bahan bakar didalam mesin disebut mesin pembakaran dalam *(internal combustion engine / ICE)* (sutantra, dkk., 2010). Mesin pembakaran dalam ada mesin torak, seperti ditunjukan pada gambar 2.5, dan mesin *rotary*, seperti ditunjukan pada gambar 2.6.



Gambar 2. 4 Karakteristik torsi dan daya pada sepeda motor *hybrid*



Gambar 2. 5 Mesin torak, mesin pembakaran dalam



Gambar 2. 6 Mesin *rotary, Wankel*

Tenaga yang dihasilkan oleh motor adalah berasal dari adanya pembakaran gas didalam ruang bakar , gas dapat berupa campuran antara bensin dengan udara dalam suatu perbandingan tertentu, sehingga gas tersebut terbakar dengan mudah didalam ruang bakar apabila timbul loncatan bunga api listrik tegangan tinggi pada elektroda busi. Dan alat yang mencampur bensin dan udara supaya menjadi gas pada motor bensin ini adalah karburator.

Pembakaran gas tersebut akan menimbulkan panas. Dan panas ini mengakibatkan gas yang telah terbakar mengembang/ekspansi. Pembakaran dan pengembangan gas ini terjadi di dalam ruang bakar yang sempit dan tertutup/tidak bocor dimana bagian atas dan samping kiri kanan dari ruang bakar adalah statis/tidak bisa bergerak, sedangkan yang dinamis/bisa bergerak hanyalah bagian bawah, yakni piston sehingga dengan sendirinya piston akan terdorong ke bawah dengan kuatnya oleh gas yang terbakar dan mengembang tadi. Pada saat piston terdorong ke bawah akan menghasilakan tenaga, dan tenaga inilah yang diubah menjadi tenaga mekanis putar.

2.3 *Axial BLDC Motor*

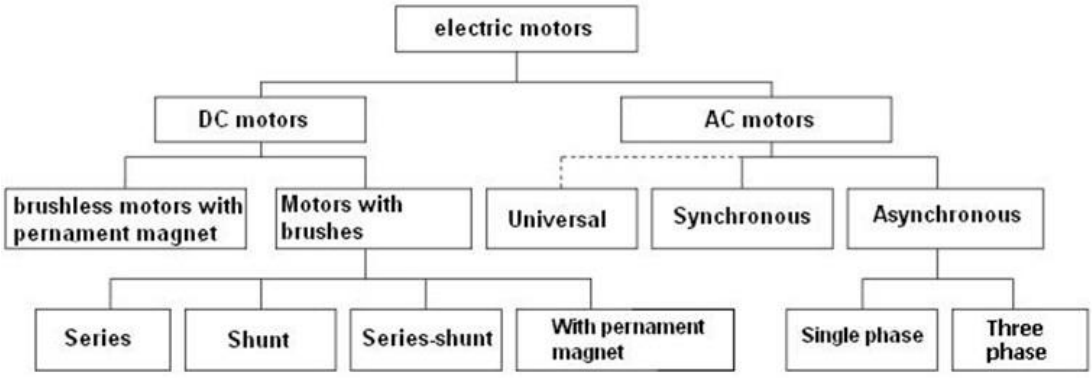
Motor listrik merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Motor listrik sudah menjadi kebutuhan kita sehari-hari untuk menggerakkan peralatan dan mesin yang membantu perkerjaan. Pada kendaraan dengan *engine*, motor listrik digunakan

sebagai motor *starter*, *wiper*, *power window*, *power steering*, dan sebagainya. Penggunaan motor listrik ini semakin berkembang karena memiliki keunggulan dibandingkan motor bakar, misalnya:

- kebisingan dan getaran lebih rendah,
- kecepatan putaran motor bisa diatur,
- lebih bersih,
- hemat dalam pemeliharaan.

Motor listrik memiliki jenis yang bervariasi dalam perkembangannya. Secara garis besar motor listrik dibagi menjadi dua yaitu motor listrik dengan sumber daya arus *AC* dan sumber daya arus *DC* dapat dilihat pada gambar 2.7.

Brushed DC motor yang menggunakan sikat untuk mengalirkan arus ke rotor sering menimbulkan masalah yaitu ausnya sikat dan timbulnya electrical noise. Oleh karena itu motor *DC* tanpa sikat atau motor *DC brushless* dikembangkan yang mempunyai kelebihan yaitu : efisiensi tinggi, umur yang panjang, konsumsi energi yang kecil dan tidak menimbulkan electrical noise. Dimana fungsi dari *brush* digantikan oleh *hall* sensor sebagai penentu orientasi gerak motor listrik tersebut.



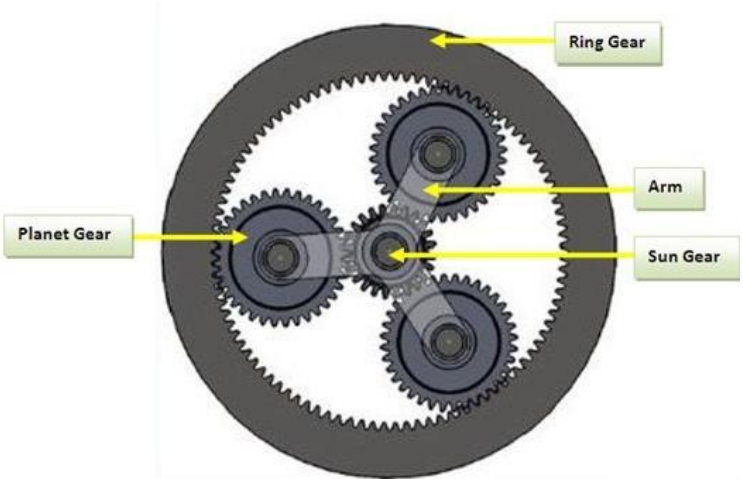
Gambar 2. 7 Klasifikasi dan Jenis Motor Listrik *(Duane Hanselman,2003)*

Terdapat dua jenis motor *brushless DC* jika dilihat dari segi arah aliran *flux*nya, yaitu *radial flux* dan *axial flux brushless DC*. Di kelas motor penggerak untuk kendaraan listrik *axial flux* penggunaannya cukup bersaing dengan *radial flux* dengan beberapa keuntungan dari segi kekuatan penarikan bebannya,

pembuangan panas, air gap, serta penggunaan material punggung rotor. Simsir, dkk., dalam penelitiaannya membandingkan penggunaan *axial flux* dan *radial Flux* dan menyimpulkan bahwa *axial flux* memiliki torsi yang lebih besar daripada *radial flux*. Pergerakan motor pada umumnya tergantung dari jumlah dan kuat dari kutub yang ditimbulkannya sendiri. meskipun motor ini dapat digerakkan seperti motor sinkron lainnya namun berbeda dengan motor *brushless DC* ini yang hanya bisa beroperasi dengan kontroller.

2.4 *Planetary Gear*

Planetary gear set (PG) adalah sistem roda gigi yang terdiri dari satu roda gigi ring (*ring gear*) dan satu atau lebih roda gigi planet (*planet gear*) yang bergulir pada roda gigi matahari (*sun gear*), seperti yang ditujukkan gambar 2.8. Planetary gear dapat digunakan untuk mereduksi putaran (satu *input* dan satu *output*) dan mengabungkan dua sumber tenaga (dua *input* dan satu *output*).

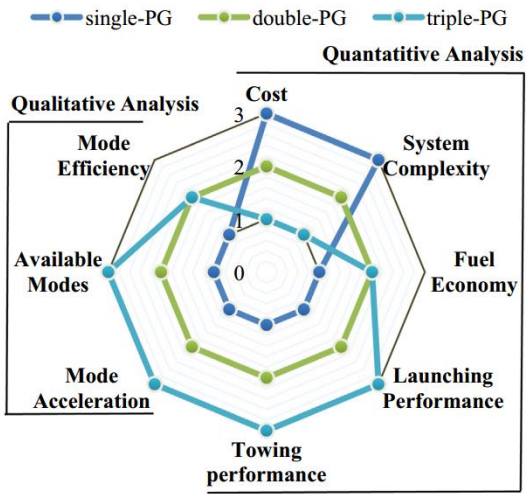


Gambar 2. 8 *Planetary gear set*

PG dapat bekerja sendiri (*single-PG*) atau digabungkan menjadi dua atau lebih untuk mendapatkan kombinasi mode yang diinginkan atau *milti-mode*. Penggabungan dua *PG* dapat disebut *Double-PG*, tiga *PG* = *triple-PG*, dan seterusnya.

Pada gambar 2.9, *single-PG hybrid* merupakan bentuk yang paling sederhana dan ekonomis, tetapi kinerjanya yang paling buruk dibandingkan

Double- dan *triple-PG*. Sedangkan *Triple-PG hybrid* memiliki kinerja percepatan paling baik tetapi peningkatan efisiensinya lebih kecil dibandingkan *double-PG hybrid* (Zhuang, dkk., 2016). *Triple-PG* sangat sesuai untuk *sport utility vehicle (SUV), pick-up, truck* dan bus karena memenuhi persyaratan torsi yang lebih tinggi untuk percepatan, tarikan dan tanjakan. *Double-PG* lebih cocok untuk mobil yang lebih kecil. Sedangkan *single-PG* lebih cocok diaplikasikan pada sepeda motor karena tidak memerlukan ruang yang lebih besar.



Gambar 2. 9 Peta perbandingan dari *Single-*, *double-* dan *triple-PG*

2.5 Dinamika *Planetary Gear*

Planetary gear merupakan bagian utama dari sistem *drivetrain*. Terdapat tiga komponen utama dari *planetary gear* yaitu : *sun gear, planet/carrier gear* dan *ring gear* (gambar 2.10 (a)). Dari gambar 2.10 (b) hubungan antara *sun* dan *planet gear*, maka dapat dibuatkan persamaan sebagai berikut:

$$V_s + V_p = V_c$$

$$R_s\omega_s + R_p\omega_p = (R_s + R_p)\omega_c$$

$$R_s\omega_s + R_p\omega_p - (R_s + R_p)\omega_c = 0 \qquad (2.1)$$

dimana *Vs*, *Vp* dan *Vc* secara berurutan adalah kecepatan sun gear, planet gear dan *carrier*. R_s dan R_p adalah *radius pitch sun gear* dan *planet gear*. ω_s, ω_p dan ω_c secara berurutan adalah kecepatan sudut *sun gear, planet gear* dan *carrier*.

Dari gambar 2.10 (c) hubungan antara *ring* dan *planet gear* maka dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$V_r + V_p = V_c$$

$$R_r\omega_r - R_p\omega_p = (R_r - R_p)\omega_c$$

$$R_r\omega_r - R_p\omega_p - (R_r - R_p)\omega_c = 0 \qquad (2.2)$$

dimana *Vr*, *Rr* dan ω_r secara berurutan adalah kecepatan, radius dan kecepatan sudut ring gear.

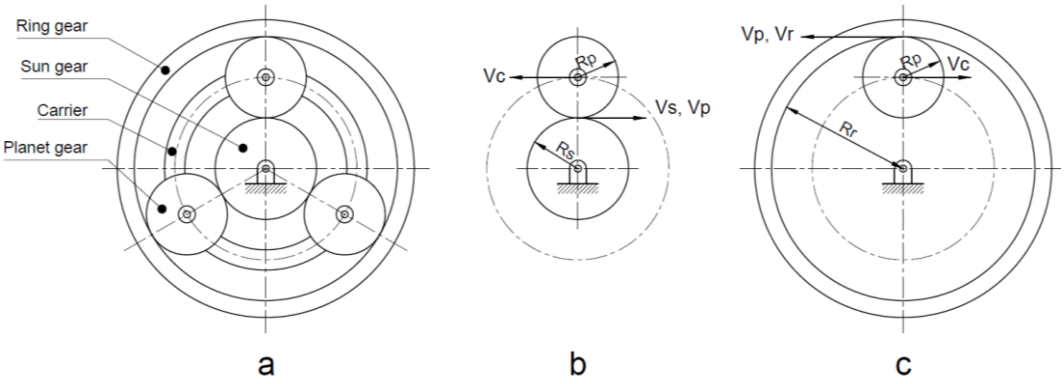
Dari kedua persamaan diatas dapat disubtitusikan agar didapat hubungan antara *ring* dan *sun gear* dengan cara memasukkan persamaan 2.2 kedalam persamaan 2.1 sehingga menjadi persamaan :

$$R_s\omega_s + R_r\omega_r - (R_r - R_p)\omega_c - (R_s + R_p)\omega_c = 0$$

$$R_s\omega_s + R_r\omega_r - (R_r)\omega_c - (R_s)\omega_c = 0$$

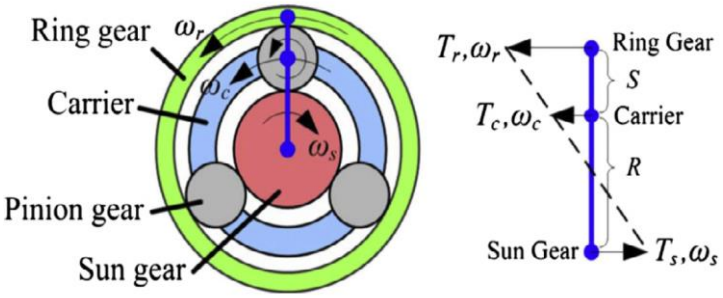
$$R_s(\omega_s - \omega_c) + R_r(\omega_r - \omega_c) = 0$$

$$\frac{R_r}{R_s} = \frac{\omega_s - \omega_c}{-\omega_r + \omega_c} \qquad (2.3)$$



Gambar 2. 10 (a) *Planetary Gear Set*, (b) *Sun and Planet gear interaction*, dan (c) *ring and planet gear interaction*.

Pada gambar 2.11 *planetary gear* dan *equivalent lever diagram* (Montazeri, dkk., 2015). Tiga titik pada equivalent lever diagram menunjukkan *ring gear*, *carrier/planet gear* dan *sun gear* pada *planetary gear*. Setiap titik dihubungkan dengan satu atau lebih sumber tenaga.



Gambar 2. 11 *Lever diagram of planetary gear set*

Dengan menggunakan *lever diagram*, persamaan sistem gerak pada planetary gear dapat dibuat jika inersia dari massa dikecualikan.

$$I_r\alpha_r = FR_r - T_r) \tag{2.4}$$

$$I_c\alpha_c = T_c - FR_r - FR_s \tag{2.5}$$

$$I_s\alpha_s = FR_s - T_s \tag{2.6}$$

dimana *I*, *T* dan *α* adalah inersia, torsi dan percepatan sudut. Penunjuk *r*, *c* dan *s* secara berurutan mewakili *ring*, *carrier/planet* dan *sun gear*. *F* adalah hubungan gaya antara bagian roda gigi yang berbeda.

Dari gambar 2.11 *lever diagram*, dapat dibuatkan persamaan berdasarkan torsi jika inersia dari massa roda gigi diabaikan.

$$\frac{R_r}{R_s} = \frac{T_s - T_c}{T_c - T_r} \tag{2.7}$$

2.6 Pemodelan Sistem Dinamis

Pemodelan sistem dinamis adalah proses merepresentasikan suatu bentuk dinamis kedalam sebuah bentuk pemodelan matematik. Model matematik itu sendiri adalah deskripsi suatu sistem kedalam bentuk persamaan (Close dkk., 2001). Dasar untuk membuat sebuah model dalam suatu sistem adalah hukum-hukum fisika. Terdapat empat analogi sistem pada pemodelan dinamis yaitu mekanikal translasi, mekanikal berputar, elektrikal dan hidlolik.

Pada penelitian ini, analogi yang akan digunakan yaitu mekanikal berputar. Mekanikal berputar dapat dimodelkan dengan teknik yang sama dengan mekanikal translasi hanya saja mekanikal berputar hanya begerak *rotasi* pada

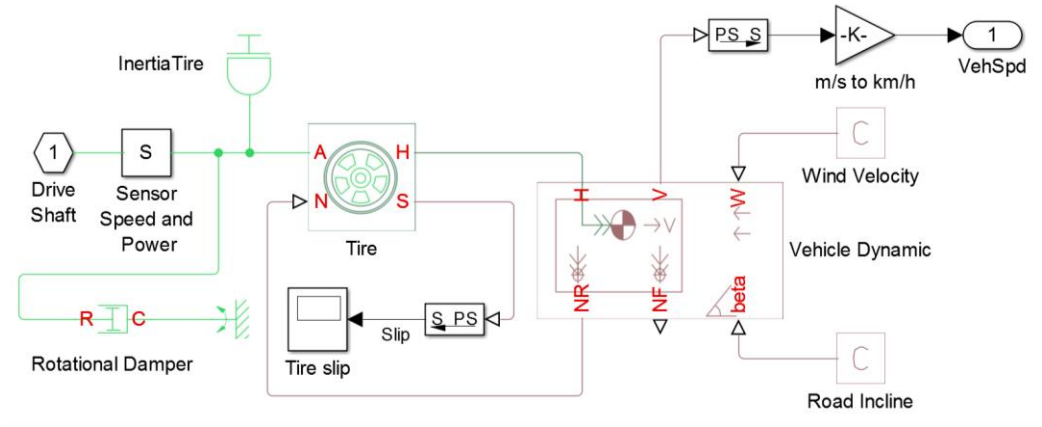
sumbunya. Adapun variable dari system mekanikal berputar adalah (Close dkk., 2001) :

θ, perpindahan angular pada radians (rad)

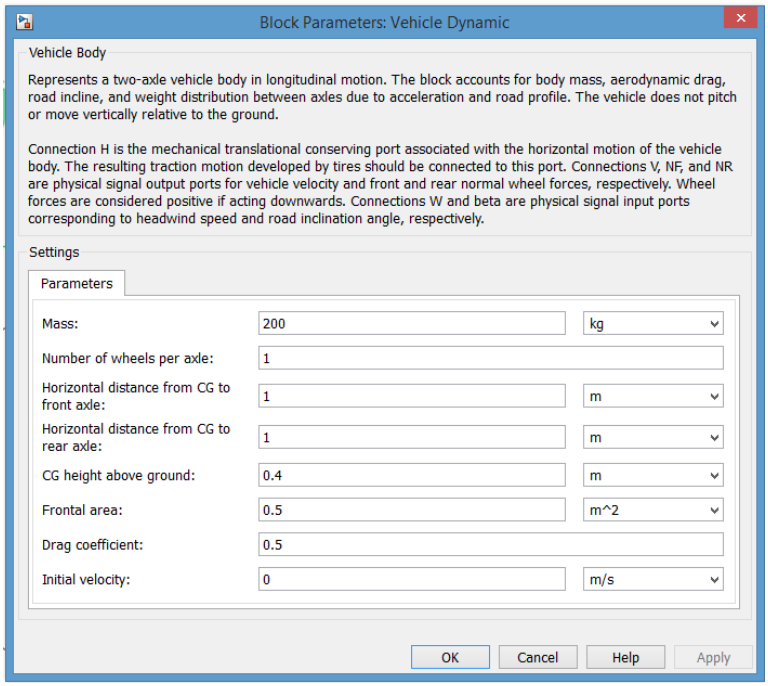
ω, kecepatan angular pada radian per detik (rad/s)

α, percepatan angular pada radian per detik kuadrat (rad/s^2)

τ, torsi dalam Newton-meter (N.m)



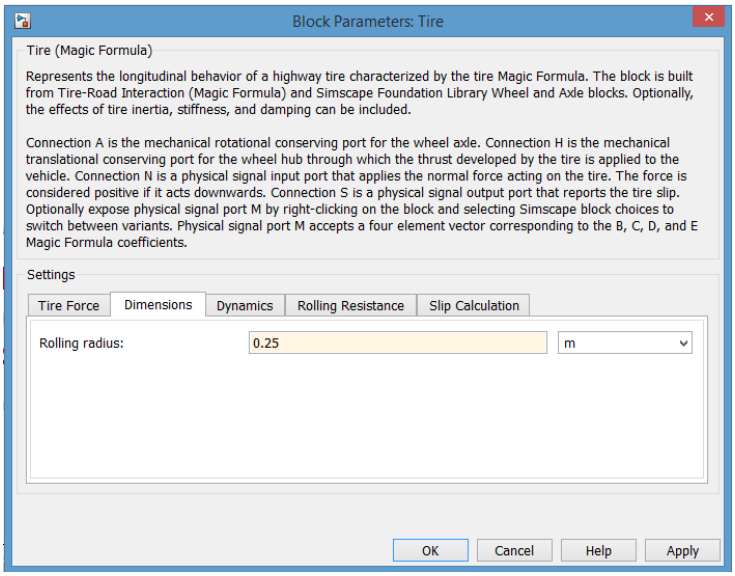
Gambar 2. 12 Model Dinamika kendaraan dari *Simdriveline*



Gambar 2. 13 Parameter blok dari dinamika kendaraan

2.6.1 Pemodelan Dinamika Kendaraan

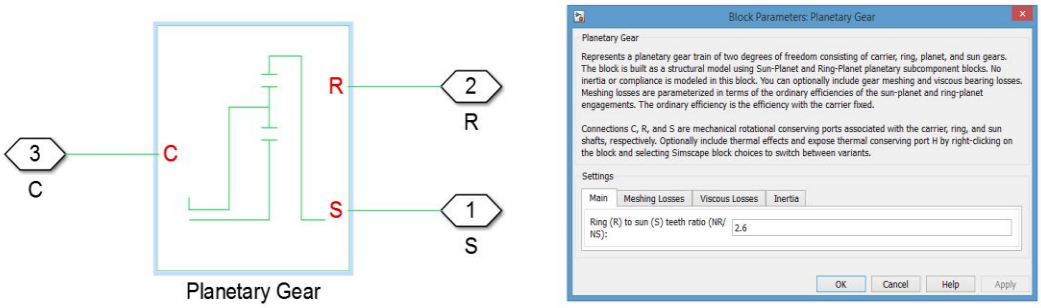
pemodelan pada dinamika kendaraan menggunakan *simscape-simdriveline* pada *software Matlab*. Pada simdriveline model dinamika kendaraan sudah ada seperti yang terlihat pada gambar 2.12. Pada gambar 2.13 dan 2.14 adalah parameter blok untuk memasukkan parameter dari kendaraan dan roda.



Gambar 2. 14 Parameter blok roda

2.6.2 Pemodelan Dinamika *Planetary Gear*

pemodelan dinamika *planetary gear* menggunakan *simscape-simdriveline* pada *software Matlab*. Pada *simdriveline*, model dinamika *planetary gear* sudah ada. Data parameter dapat dimasukkan pada parameter blok seperti yang terlihat pada gambar 2.15.



Gambar 2. 15 Model *Planetary Gear* dan parameter blok *planetary gear*

2.7 Perhitungan Torsi dan Tenaga

Besarnya tenaga yang diberikan oleh mesin haruslah sama atau lebih besar dari tenaga yang dibutuhkan untuk menggerakkan kendaraan pada kecepatan yang ingin dihasilkan, dan untuk melawan segala hambatan yang terjadi. Torsi yang dihasilkan mesin dan kemudian ditransmisikan dan ditranspormasikan oleh penyalur daya atau *drivetrain*, harus mempunyai besar sedemikian rupa agar dapat menghasilkan gaya dorong atau gaya traksi yang mampu melawan semua gaya-gaya hambat pada setiap moda gerakan kendaraan. Ada beberapa moda gerak yang penting adalah gerak pada kecepatan konstan, pada percepatan konstan, dan pada saat perlambatan, baik itu pada jalan datar, menanjak, maupun menurun. Pada setiap moda gerak tersebut membutuhkan gaya dorong yang berbeda. Gaya dorong dari kendaraan yang terjadi pada roda penggeraknya harus mampu melawan berbagai gaya hambat yang timbul (Sutantra, 2015).

2.7.1 Gaya-gaya Hambat yang terjadi pada Kendaraan

Pada saat kendaraan berjalan akan terjadi beberapa gaya hambat yang dapat menghambat laju kendaraan dan pada akhirnya akan dapat meningkatkan konsumsi bahan bakar. Secara umum ada 3 gaya hambat utama pada saat kendaraan yaitu gaya hambat *rolling (rolling resistance)*, gaya hambat angin *(aerodynamic resistance)*, dan gaya hambat tanjakan (*grade resistance*). Disamping itu juga ada gaya rem yang menghambat gerak kendaraan untuk mengurangi kecepatan dan menghentikan kendaraan. Pada saat melakukan percepatan, kendaraan juga akan mengalami gaya hambat berupa gaya inertia dari kendaraan. Pada perancangan dan pemilihan komponen-komponen kendaraan harus dilakukan sedemikian rupa agar gaya-gaya hambat tersebut menjadi sekecil mungkin.

2.7.1.1 Gaya Hambat *Rolling*

Gaya hambat *rolling* (R_r) adalah gaya yang terjadi antara ban dan jalan akibat adanya defleksi pada roda yang berputar, yang arah gayanya berlawanan dengan arah gaya dorong dari kendaraan. Akibat adanya defleksi pada roda yang berputar maka akan terjadi distribusi tekanan yang tidak simetris antara jalan dan

roda sehingga terjadi *pneumatic trail* (t). Dengan adanya *pneumatic trail* tersebut maka terjadi momen tahanan *rolling* yaitu (M_r) yang melawan arah momen gerak roda. Momen hambatan rolling tersbut dapat dikonversikan menjadi gaya hambat *rolling* (R_r) antara roda dan jalan yang arahnya berlawanan dengan gaya dorong (F_t). Adapun besarnya hambatan *rolling* dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$R_r = \frac{M_r}{r} = \frac{t.N}{r} = \frac{t}{r}N = f_r.N \tag{2.8}$$

dimana *N* adalah gaya normal dan f_r adalah koefisien hambatan *rolling*.

2.7.1.2 Gaya Angin pada Kendaraan

Ada tiga gaya angin yang mungkin timbul dari kendaraan yang sedang bergerak yaitu gaya hambat angin (F_d), gaya angkat angin (F_l), dan gaya samping angin (F_s). Untuk membahas prilaku traksi dari kendaraan atau gerakan longitudinal kendaraan, yang paling berpengaruh adalah gaya hambat angin dan juga gaya angkat angin, maka dari itu hanya dibahas dua gaya tersebut. Gaya hambat angin akan menghambat laju kendaraan, sedangkan gaya angkat akan berpengaruh pada gaya normal pada roda yang akhirnya akan berpengaruh pada gaya hambat *rolling* (R_r).

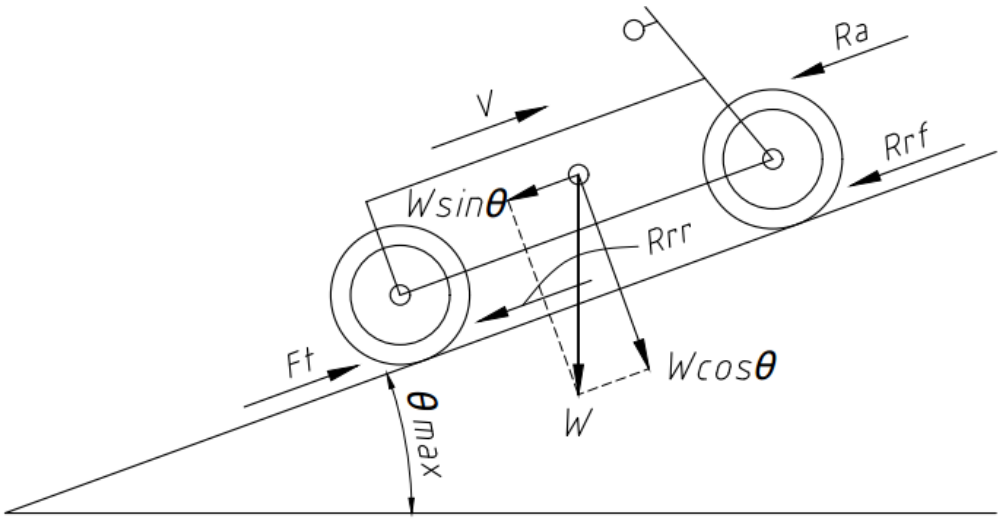
Dengan mengetahui koefisien gaya dari suatu kendaraan, maka semua gaya pada berbagai kecepatan dari kendaraan tersebut dapat dihitung dengan perumusan sebagai berikut.

$$F_d = 0{,}50.C_d.\rho.A_f.V_a^2 \tag{2.9}$$

$$F_l = 0{,}50.C_l.\rho.A_f.V_a^2 \tag{2.10}$$

$$F_s = 0{,}50.C_s.\rho.A_f.\beta_a.V_a^2 \tag{2.11}$$

dimana $C_{d,}$ C_l dan C_s secara berurutan adalah koefisien gaya hambat aerodinamika, koefisien gaya angkat aerodinamika dan koefisien gaya samping aerodinamika. Sedangkan $\rho, A_f, V_a,$ dan β_a adalah densitas udara, luas frontal kendaraan, kecepatan relatif udara dengan kendaraan, dan sudut serang angin pada kendaraan.



Gambar 2. 16 Gaya-gaya pada kendaraan menanjak dengan kecepatan tetap

2.7.2 Analisa Kebutuhan Torsi dan Tenaga

2.7.2.1 Gaya Dorong pada Kecepatan tetap dengan Operasi pada Jalan Datar

Kendaraan berjalan pada jalan datar dengan kecepatan konstan membutuhkan gaya dorong (F_t) hanya untuk melawan gaya hambat rolling (R_r), dan gaya hambat angin (R_r). Besar gaya dorong yang dibutuhkan dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$F_t = R_r + R_d = f_r.M.g + 0{,}50.\rho.C_d.A_f.V_a^2 \qquad (2.12)$$

2.7.2.2 Gaya Dorong pada Kecepatan tetap dengan Operasi pada Jalan Menanjak

Kendaraan yang berjalan pada jalan menanjak dengan sudut tanjak θ dan dengan kecepatan tetap (V_k) harus memiliki gaya dorong yang dapat melawan semua gaya-gaya hambat. Ada tiga gaya hambat yang terjadi pada kendaraan saat tanjakan yaitu, gaya hambat *rolling* (R_r), gaya hambat angin (R_a), dan gaya hambat tanjakan (R_g). Gaya hambat rolling dan tanjakan tergantung pada berat (W) kendaraan, sudut tanjaka, dan koefisien dari hambatan *rolling* (f_r). Diagram benda bebas yang menunjukan gaya-gaya yang bekerja pada kendaraan menanjak ditunjukan pada gambar 2.16. Besarnya gaya dorong yang dibutuhkan kendaraan yang saat menanjak dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$F_t = R_r + R_d + R_g = f_r.W.cos\theta + 0{,}50.\rho.A_f.V_a^2 + W.sin\theta \qquad (2.13)$$

2.7.2.3 Gaya Dorong pada Kecepatan Berubah dengan Operasi pada Jalan Datar

Gaya dorong yang dibutuhkan (F_t) oleh kendaraan yang berjalan pada jalan datar dengan percepatan tetap (a_k) harus mampu melawan gaya hambatan rolling (R_r), gaya hambat angin (R_a) dan gaya inertia (F_i). Besarnya gaya dorong yang dibutuhkan dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$F_t = R_r + R_a + F_i = f_r.M.g + 0{,}50.\rho.C_d.A_f.V_a^2 + M.a_k \qquad (2.14)$$

dimana *M* adakah massa kendaraan dan a_k adalah percepatan kendaraan.

2.7.2.4 Gaya Dorong pada Kecepatan Berubah dengan Operasi pada Jalan Menanjak

Kendaraan yang berjalan pada jalan menanjak dengan sudut tanjak θ dan dengan percepatan tetap (a_k) harus memiliki gaya dorong yang mampu melawan gaya hambat rolling (R_r), gaya hambat angin (R_a), dan gaya hambat tanjakan (R_g) dan gaya inertia (F_i), seperti yang ditunjukan pada gambar 2.17. Besarnya gaya dorong yang dibutuhkan dapat dirumuskan sebagai berikut.

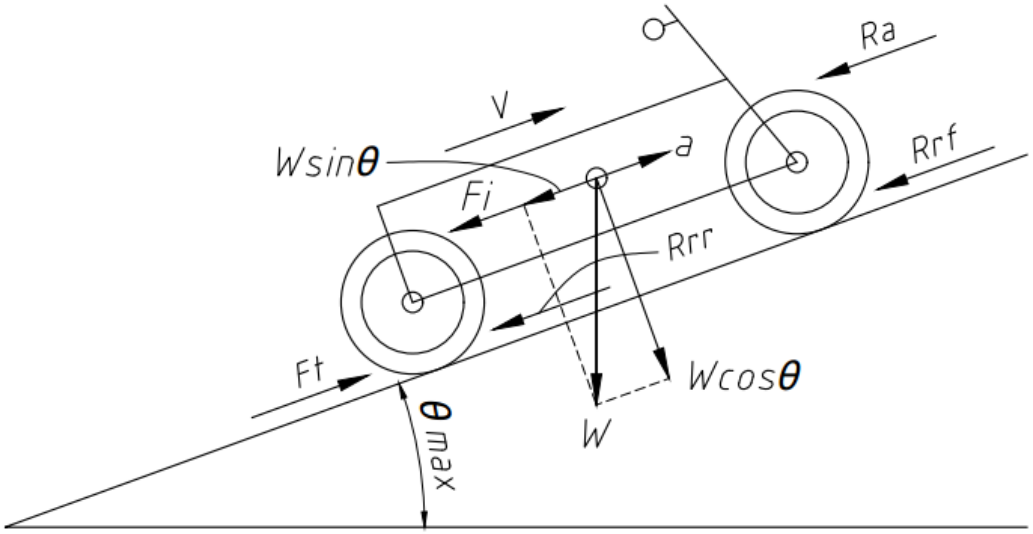
$$F_t = R_r + R_a + R_g + F_i \qquad (2.15)$$

$$F_t = f_r.W.cos\theta + 0{,}50.\rho.C_d.A_f.V_a^2 + W.sin\theta + M.a_k \qquad (2.16)$$

2.7.3 Kebutuhan Torsi dan Tenaga

Untuk mendapatkan gaya dorong pada roda, dibutuhkan torsi (Tp) yang bekerja pada poros penggerak kendaraan. Besarnya torsi poros penggerak yang dibutuhkan untuk dapat menggerakkan kendaraan tergantung pada besarnya gaya dorong yang dibutuhkan (F_t) dan jari-jari roda penggerak yang digunakan (*R*). Torsi yang dibutuhkan poros penggerak (T_p) dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$T_p = R.F_t \qquad (2.17)$$



Gambar 2. 17 Gaya-gaya pada kendaraan menanjak dengan percepatan tetap

Tenaga yang dibutuhkan untuk menggerakkan kendaraan pada beban dan kecepatan tertentu dinamakan tenaga pada beban jalan atau *road load horse power* (R_{hp}). Besarnya tenaga yang dibutuhkan tergantung pada besarnya gaya dorong (F_t) dan kecepatan dari kendaraan (V_k). Tenaga yang dibutuhkan dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$P = F_t . V_k \tag{2.18}$$

dimana P, V_k dan F_t secara berurutan adalah tenaga yang dibutuhkan (W), kecepatan kendaraan (m/s) dan gaya dorong kendaraan (N).

2.8 Parameter yang Mempengaruhi Konsumsi Bahan Bakar

Konsumsi bahan bakar dipengaruhi oleh besarnya tenaga yang harus diberikan pada kendaraan dan *spesific fuel consumption (SFC)* dari motor bakar. *SFC* adalah ukuran seberapa besar efisiensi bahan bakar yang dikonsumsi mesin untuk menghasilkan tenaga. Nilai *SFC* yang rendah sangat diharapkan karena untuk menghasilkan daya tertentu hanya membutuhkan konsumsi bahan bakar yang lebih sedikit. Sehingga konsumsi bahan bakar dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$FC = \frac{SFC.P_e}{1000} \tag{2.19}$$

dimana P_e adalah tenaga (Kw), *FC* adalah konsumsi bahan bakar (Kg/jam) dan *SFC* adalah *spesific fuel consumption* ((Kg/Jam)/Kw).

Konsumsi bahan bakar (*total fuel concumption* = *tfc*) dalam liter per 100 km travel untuk kecepatan dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$\text{tfc} = \frac{\text{FC.100}}{\rho_{\text{bb}}.\text{V.3,6}} \tag{2.20}$$

dimana ρ_{bb} adalah massa jenis bahan bakar (kg/liter).

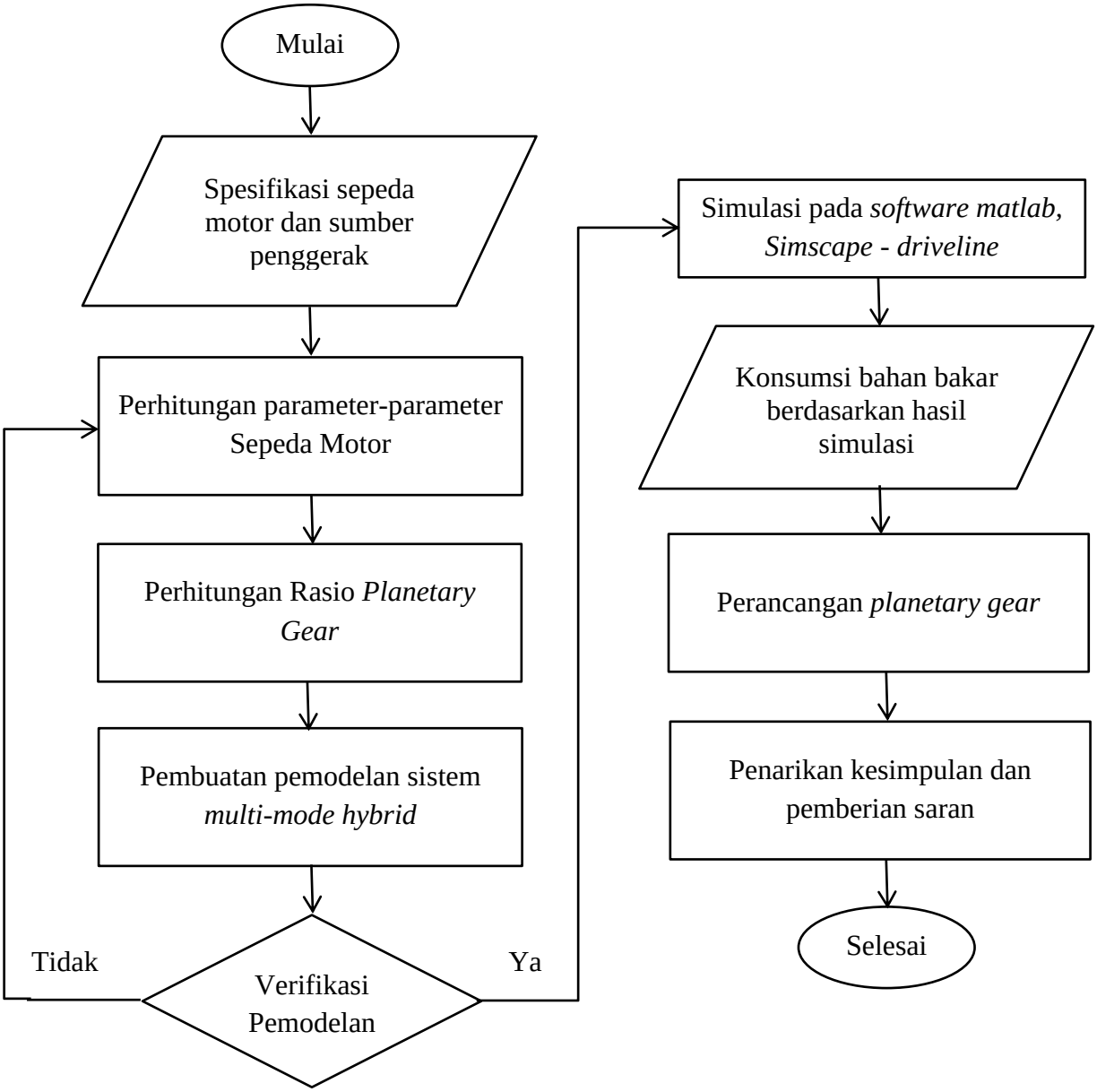
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Secara garis besar, langkah-langkah dalam penelitian ini, dapat dilihat pada gambar 3.1 dibawah ini:



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Tahapan Penelitian

Penelitian dilakukan dalam beberapa tahapan untuk mencapai hasil yang diinginkan. Tahapan-tahapan tersebut mencerminkan kemajuan ataupun ketercapain dalam penelitian ini. Berikut akan dijelaskan tahapan penelitian yang dilakukan.

3.2.1 Spesifikasi Sepeda Motor

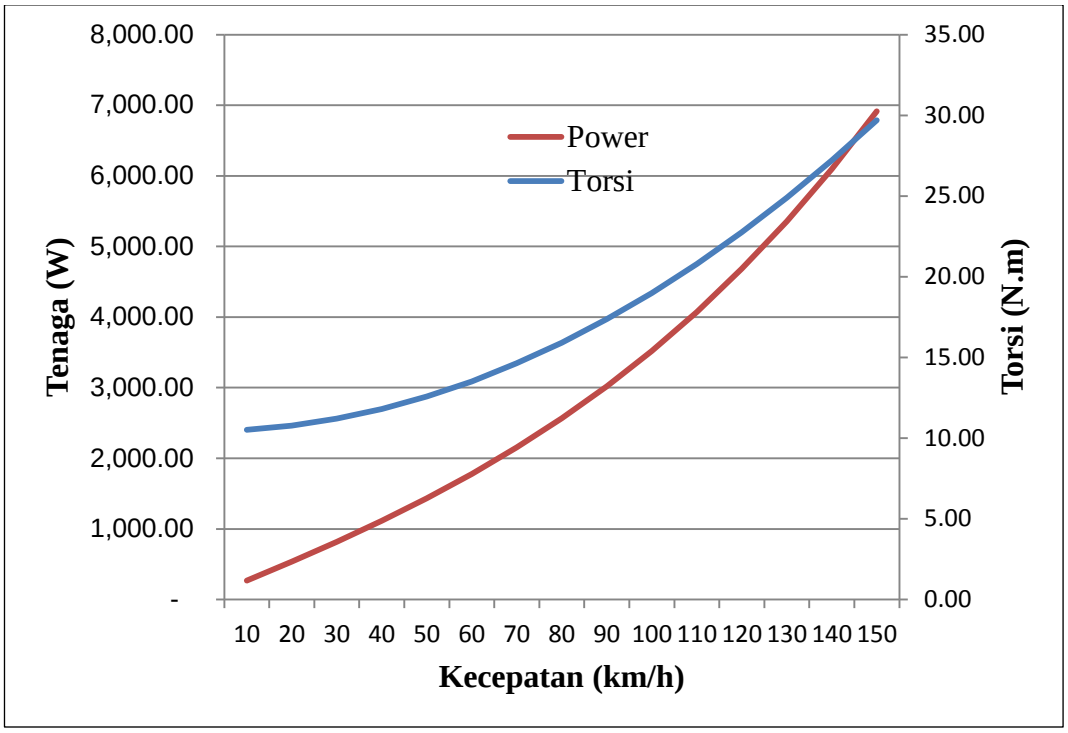
Data yang dikumpulkan merupakan data yang dibutuhkan terkait dalam penelitian. Pada proses pengumpulan data dapat dilakukan dengan cara asumsi, observasi atau studi literatur. Metode observasi dilakukan dengan terjun langsung ke lapangan, sedangkan studi literatur dilakukan dengan pengambilan data dibuku maupun jurnal. Dibawah ini adalah data yang diperoleh dari asumsi dan penelitian terdahulu :

- *Velocity (max.)* = 150 km/h (asumsi)
- *Time to accerate to speed* = (0 – 60 km/h) 13s (asumsi)
- *Front Area of vehicle* = 0,6 m^2 (asumsi)
- *Total mass* = 200 kg (asumsi)
- *Drive efficiency* = 0,974 (c-siro motor)
- *Drag Coeffisient* = *0.5*
- *Tire rolling resitance coeffisient* = 0,009
- *Brake and Steering resistance* = 0,01
- *Air Density* = 1,2 kg/m^3
- *Wheel radius* = 0,25 m (R14)

3.2.2 Perhitungan Penentuan Sumber Tenaga Penggerak

Perhitungan parameter sepeda motor bertujuan untuk menentukan sumber penggerak yang akan digunakan dalam hal ini motor listrik dan motor bakar. Perhitungan yang dilakukan adalah menentukan total tenaga (*power*) yang dibutuhkan untuk menggerakkan kendaraan untuk mencapai kecepatan kendaraan 150 km/h. Perhitungan ini dilakukan pada jalan datar dengan percepatan tetap (0.56 m/s^2). Untuk menghitung tenaga yang dibutuhkan menggunakan persamaan

2.21 sedangkan perhitungan torsi menggunakan persamaan 2.20. Adapun hasil perhitungan yang telah dilakukan didapat maksimum *power* dan torsi yang dibutuhkan masing-masing adalah 6.92 kW dan 29.7 Nm (seperti yang ditunjukan gambar 3.2).



Gambar 3. 2 Grafik Tenaga dan Torsi yang dibutuhkan

Dari perhitungan tersebut maka spesifikasi sumber tenaga yang akan digunakan khususnya motor bakar dan motor listrik 1 harus mempunyai tenaga maksimal diatas 6.92 kW karena motor bakar dan motor listrik 1 dapat berfungsi sendiri sebagai motor traksi. Adapun data sumber tenaga penggerak yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. Motor bakar (*ICE*)
   a) *Cylinder volume* : *125 cc*
   b) *Power Max.* : *7,0 kW*
   c) *Torque Max.* : *9,6 Nm*
   d) *RPM max.* : *8000 RPM*
2. Motor listrik 5 kw (*Axial BLDC motor*)

a) *Rated power* : *5 kW*
b) *Peak power* : *8 kW*
c) *Rated torque* : *18 Nm*
d) *Peak torque* : *36 Nm*
e) *Rpm* : *4000 RPM*
f) *Eff* : *>90%*
g) *Cooling system* : *Air cooling / Water Cooling*

3.2.3 Perhitungan Rasio *Planetary Gear*

Perhitungan rasio planetary gear bertujuan untuk input analisa awal pada pemodelan simulasi pada penelitian ini. Perancangan awal planetary gear, menghitung rasio berdasarkan asumsi awal. Adapun persamaan dalam menentukan rasio antara ring dan sun gear menggunakan persamaan 2.7. Jika diketahui, torsi motor 18 Nm, torsi motor bakar 9.6 Nm dan diasumsikan motor generator tidak beroperasi, maka perhitungannya sebagai berikut :

$$\frac{R_r}{R_s} = \frac{0 - 9.6}{9.6 - 18} = 1.143$$

Nilai rasio antara ring dan sun gear terlalu kecil sehingga tidak memungkinkan untuk dibuat. Sehingga perhitungan selanjutnya diasumsikan motor listrik dan motor bakar bekerja bersama (mode hybrid parallel) dimana kecepatan maksimal dari moda parallel adalah 100 km/jam. Sehingga torsi yang dibutuhkan untuk mencapai kecepatan tersebut adalah 20 Nm, karena jumlah torsi motor listrik dan motor bakar adalah 27.6, maka hanya dibutuhkan 72.5% dari torsi total untuk mencapai kecepatan tersebut. Sehingga didapat torsi motor listrik 13 Nm dan torsi motor bakar 7 Nm. Maka :

$$\frac{R_r}{R_s} = \frac{0 - 7}{7 - 13} = 1.17$$

Nilai rasio yang didapat masih terlalu kecil. Karena jika diasumsikan radius pitch sun gear adalah 15mm, maka didapat :

$$R_r = R_r . 1{,}17 = 15.1{,}17 = 17{,}5mm$$

Jika diameter pitch ring gear hanya 17,5mm, maka

$$R_p = \frac{R_r - R_s}{2}$$

$$R_p = \frac{17.5 - 15}{2} = 1.75$$

radius pitch 1.75 tidak memungkinkan untuk dibuat. Untuk memudahkan dalam menentukan rasio maka dibuatkan daftar seperti yang terlihat pada tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Penentuan rasio dan dimensi radius *pitch* roda gigi

No.	Torsi ICE (Nm)	Torsi Motor (Nm)	Ratio	Radius Sun Gear (mm) (asumsi)	Radius Ring Gear (mm)	Radius Planet Gear (mm)
1	7.00	13.00	1.17	15	17.50	1.25
2	7.35	12.65	1.39	15	20.80	2.90
3	7.70	12.30	1.67	15	25.11	5.05
4	8.05	11.95	2.06	15	30.96	7.98
5	8.40	11.60	2.63	15	39.38	12.19
6	8.75	11.25	3.50	15	52.50	18.75
7	9.10	10.90	5.06	15	75.83	30.42

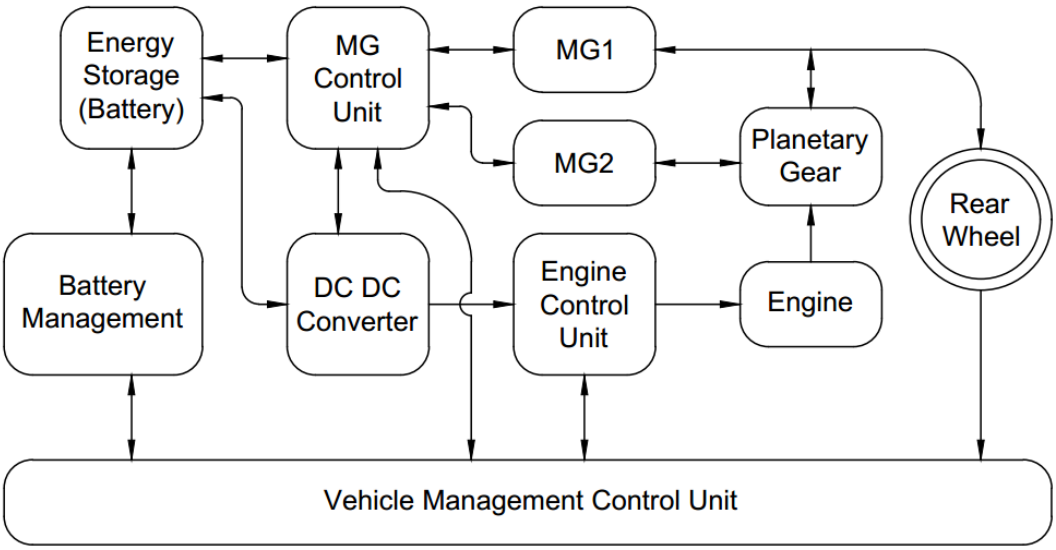
Rasio yang paling pas dan memungkinkan apabila melihat daftar pada tabel 3.1 adalah rasio 2.63. Karena ratio 2.06, radius planet gear terlalu kecil hanya 7.98mm. Sedangkan pada rasio 3.50 dimensi roda gigi yang didapatkan terlalu besar. Untuk memudahkan dalam pembuatan roda gigi maka rasio antara ring dan sun gear dibulatkan menjadi 2.6, sehingga didapat radius pitch sun, ring dan planet gear secara berurutan adalah 15, 39 dan 12 mm. Apabila diasumsikan modul roda gigi adalah 1, maka jumlah gigi sun, ring dan planet gear secara berurutan adalah 30, 78 dan 24 buah.

3.2.4 Pembuatan Pemodelan Sistem *Multi-Mode Hybrid*

3.2.4.1 Skema blok manajemen kontrol

Skema blok manajemen unit kontrol kendaraan (gambar 3.3) sebagai acuan dalam pembuatan pemodelan pada penelitian ini. Pada skema blok menunjukkan pengaturan penggunaan energi (baik energi dari bahan bakar

maupun dari *battery*) dan tenaga yang dibutuhkan kendaraan agar didapatkan efisiensi penggunaan bahan bakar yang paling baik. Manajemen baterai berfungsi untuk balancing antar cell, protection (over voltage, current & temp.), dan monitoring voltage, current, temp. & capacity, yang nantinya akan memberikan informasi pada manajemen unit kontrol kendaraan. MG control unit berfungsi untuk mengatur penggunaan energi baterai dan motor listrik baik sebagai motor traksi maupun sebagai generator. Sedangkan Engine Control Unit akan berfungsi sebagai pengatur konsumsi bahan bakar dan tenaga dari motor bakar.



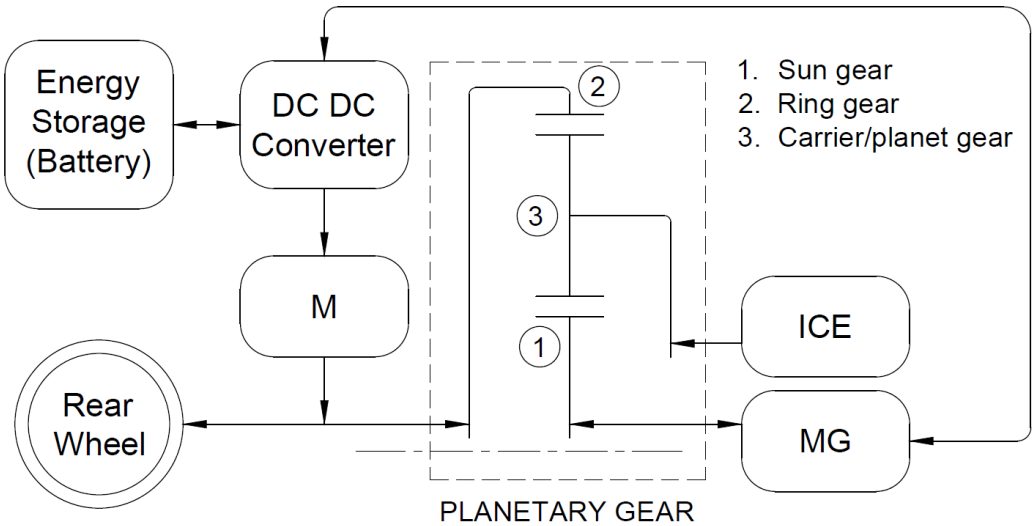
Gambar 3. 3 Skema Blok Manajemen Unit Kontrol Kendaraan

3.2.4.2 Skema *Powertrain Hybrid*

Untuk mendapatkan efisiensi yang tinggi maka dibutuhkan moda konfigurasi penggunaan sumber penggerak yang tepat, karena sumber penggerak yang berbeda mempunyai karakteristik yang berbeda dan efisiensi pada kecepatan kendaraan yang berbeda. Grafik *Spesifik Fuel Consumption (SFC)* motor bakar dapat dijadikan acuan awal dalam menentukan kecepatan penggunaan sumber tenaga yang tepat. Kecepatan setiap mode operasi akan diubah-ubah untuk mendapatkan efisiensi yang lebih baik dari penentuan kecepatan awal.

Untuk memudahkan dalam membuat moda operasinya maka akan dibuatkan skema sistem *powertrain hybrid* (lihat gambar 3.4). Dimana sumber

penggerak *M*, *ICE* dan *MG* secara berurutan adalah motor listrik, motor bakar dan motor generator. *M*, *ICE* dan *MG* secara berurutan akan dihubungkan dengan (2) *ring gear*, (3) *carrier/planet gear* dan (1) *sun gear*.

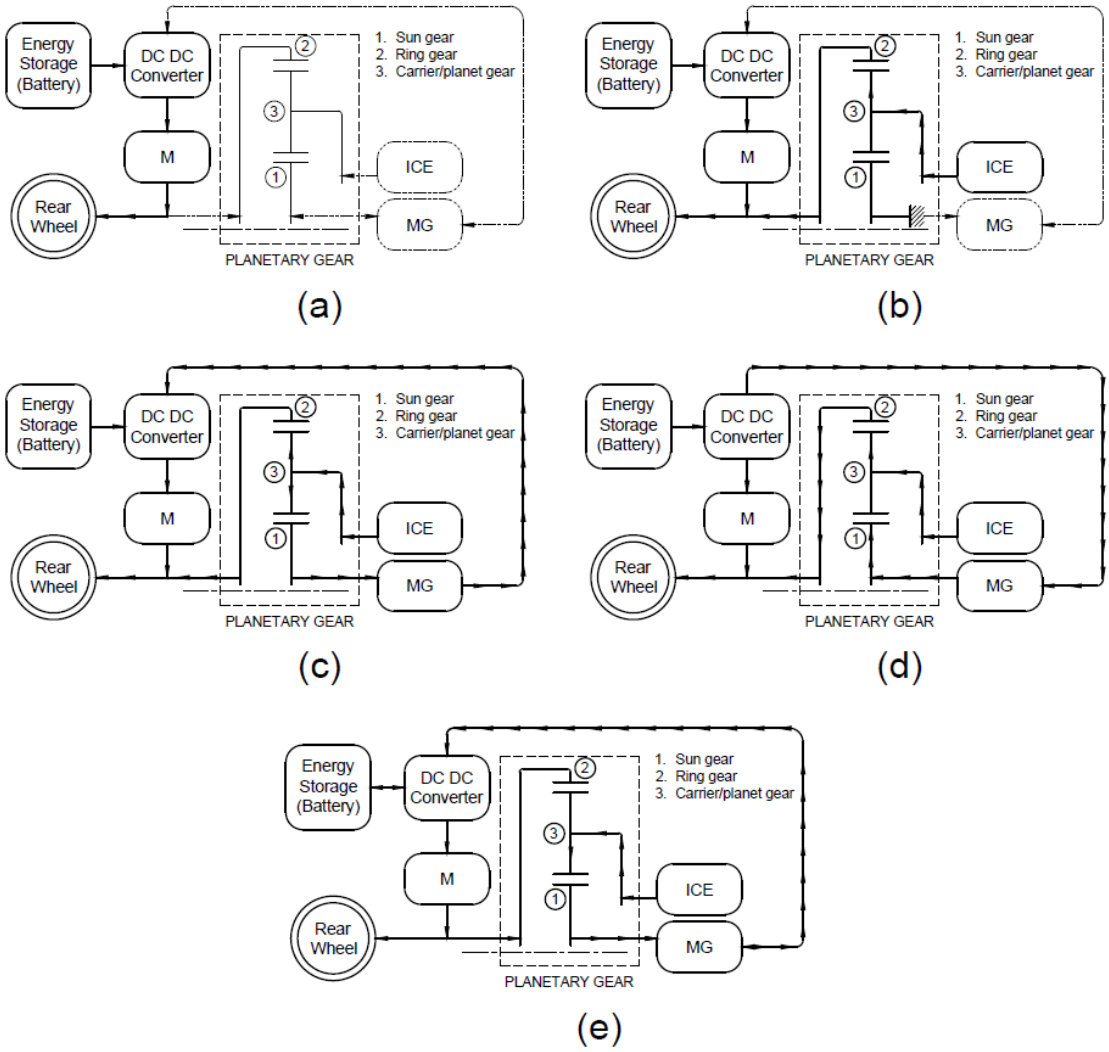


Gambar 3. 4 Skema sistem powertrain hybrid

Ada 5 moda konfiguasi yang memungkinkan untuk dioperasikan (lihat tabel 3.1) yaitu moda motor listrik (gambar 3.5 (a)), moda hybrid paralle (gambar 3.5 (b)), moda hybrid series-paralle (gambar 3.5 (c)), moda hybrid compound split (gambar 3.5 (d)), dan moda charge (gambar 3.5 (e)). Adapun penjelasan masing-masing moda adalah sebagai berikut :

1. Moda motor listrik, motor listrik beroperasi langsung menggerakkan poros roda kendaraan dengan rasio 1:1. Sedangkan planetary gear dan sumber input yang lain hanya ikut berputar tanpa memberikan maupun menerima torsi. Moda ini beroperasi pada kecepatan 0 – 40 km/jam, dengan tujuan agar mengurangi konsumsi bahan bakar minyak.
2. Moda hybrid parallel, motor listrik dan motor bakar secara bersama-sama memberikan traksi untuk menggerakkan kendaraan, sedangkan motor generator harus diam agar torsi yang diberikan motor bakar bekerja optimal membantu motor bakar menggerakkan kendaraan. Moda ini dioperasikan pada kecepatan 0 – 80 km/jam. Tujuan moda ini untuk mengurangi konsumsi battery pada kecepatan awal sampai menengah.

3. Moda hybrid series-parallel, motor listrik tetap menjadi motor traksi sedangkan motor bakar selain menjadi motor traksi, motor bakar juga memberikan torsi untuk generator untuk menghasikan listrik yang nantinya digunakan untuk menggerakkan motor listrik 1. Moda ini dioperasikan pada kecepatan 40 – 100 km/jam. Moda ini bertujuan untuk mengurangi penggunaan konsumsi battery dan bahan bakar minyak.



Gambar 3. 5 Konfigurasi moda hybrid

4. Moda hybrid compound split, motor bakar, motor bakar dan motor generator bergerak bersama-sama memberikan traksi untuk menggerakkan kendaraan. Moda ini dibutuhkan apabila kecepatan yang dibutuhkan 100 – 150 km/jam.

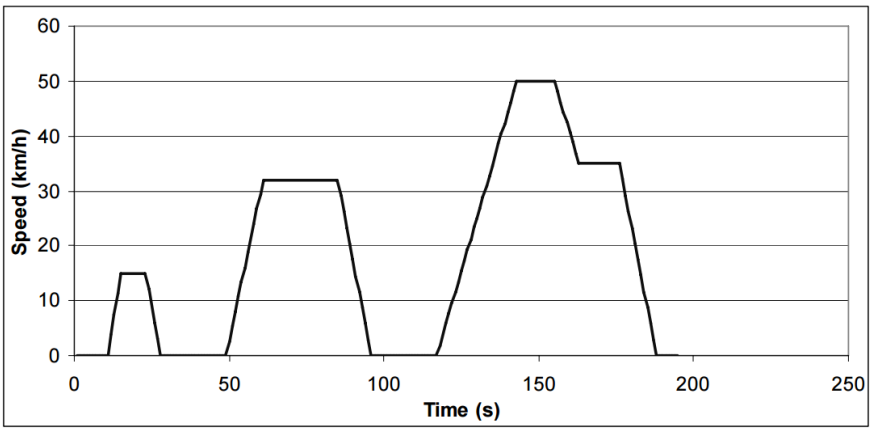
5. Moda charge, motor listrik tetap menjadi motor traksi sedangkan motor bakar memberikan daya untuk generator untuk mengecas battery apabila kapasitas battery dibawah 30%. Dan apabila kapasitas battery diatas 99% maka moda charge tidak aktif. Kecapatan pada moda ini sekitar 0 – 80 km/jam.

Tabel 3. 2 Moda operasi

M	MG		ICE		Moda	Perkiraan Kecepatan awal (km/jam)
Traksi	Traksi	Gen.	Traksi	Supp. Gen.		
1	0	0	0	0	*Electric Vehicle*	0 - 40
1	0	0	1	0	*Hybrid Parallel*	0 - 80
1	0	1	1	1	*Charge*	0 - 80
1	0	1	1	1	*Hybrid Parallel Series*	40 - 100
1	1	0	1	0	*Hybrid Plug-In/Compound Split*	100 - 150

3.2.5 Verifikasi Pemodelan

Verifikasi pemodelan dilakukan dengan cara membandingkan hasil pemodelan yang dibuat dengan yang sudah ada dalam penelitian terdahulu. Jika perbandingan selisih nilai konsumsi bahan bakar (L/100 km) pada kedua pemodelan dibawah 10% maka pemodelan yang akan digunakan pada penelitian ini dianggap terverifikasi atau valid.

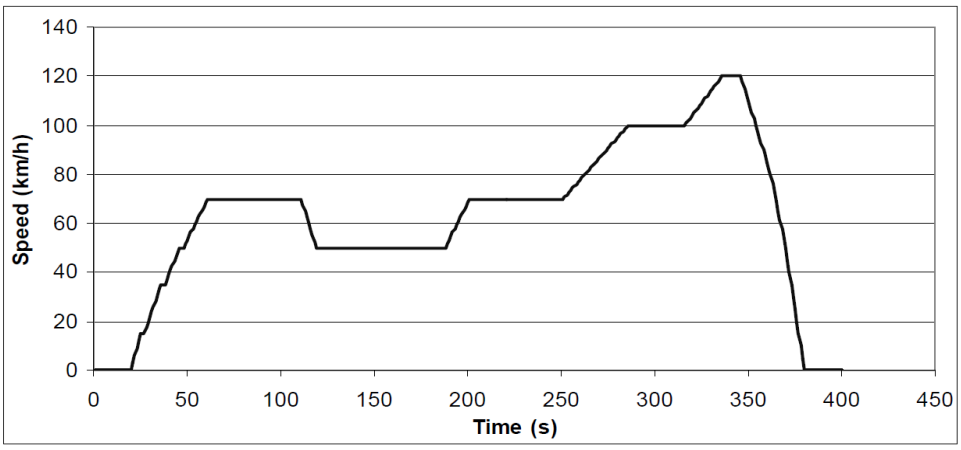


Gambar 3. 6 *ECE 15 Driving Cycle*

Design, simulation, and prototype production of a through the road parallel hybrid electric motorcycle, penelitian yang dilakukan oleh Asaei, dkk., akan dijadikan acuan pembanding karena sumber penggerak yang digunakan dianggap paling mirip dengan penelitian yang akan dilakukan. *Driving cycle* yang akan digunakan dalam penelitian ini sama dengan salah satu yg digunakan dalam penelitian yang dilakukan Asaei, dkk., yaitu *ECE 15 Driving Cycle* (lihat gambar 3.6). Satu cycle *ECE 15 Driving Cycle* menempuh jarak 995 meter dalam waktu 195 detik dengan kecepatan rata-rata 18,4 km/jam.

3.2.6 Simulasi pada *Software Matlab*

Software Matlab akan digunakan dalam simulasi ini. Pada software tersebut, akan menggunakan modul yang ada pada *Simulink* yaitu *Simscape-Driveline*. Simulasi ini bertujuan untuk mendapatkan grafik efisiensi penggunaan bahan bakar dari mekanisme transmisi yang dibuat.



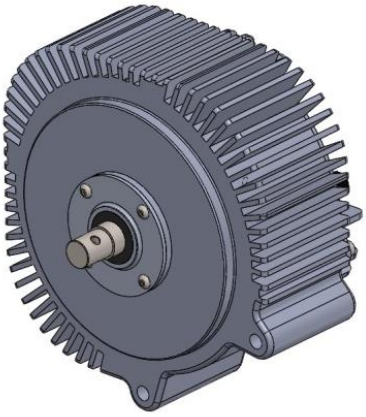
Gambar 3. 7 *Extra Urban Driving Cycle (EUDC)*

Driving cycle yang digunakan dalam penelitian ini adalah *ECE 15 Driving Cycle* (gambar 3.6) dan *Extra Urban Driving Cycle* (EUDC) (gambar 3.7).

3.2.7 Perancangan *Planetary Gear*

Perancangan sepeda motor ini berfokus pada sistem *multi-mode hybrid* atau *planetary gear*. Bagaimana cara menggabungkan tiga unit sumber tenaga (1

unit motor bakar dan 2 unit motor listrik) dengan menggunakan satu set *planetary gear*. Motor bakar yang digunakan adalah motor bakar yang sudah ada dengan kapasitas seperti yang tercantum pada sub-bab 3.2.1, sedangkan motor listrik yang digunakan adalah motor listrik 5kW yang merupakan hasil penelitian PUI SKO – ITS, seperti yang ditunjukan pada gambar 3.8.



Gambar 3. 8 *Axial BLDC Motor 5 kW*

3.2.8 Penarikan Kesimpulan dan Pemberian Saran

Penarikan kesimpulan dilakukan berdasarkan tujuan penelitian, yaitu mendapatkan rancangan *drivetrain* sepeda motor *multi-mode hybrid* yang efisien. Sedangkan pemberian saran berdasarkan kekurangan yang dirasakan pada saat penelitian ini.

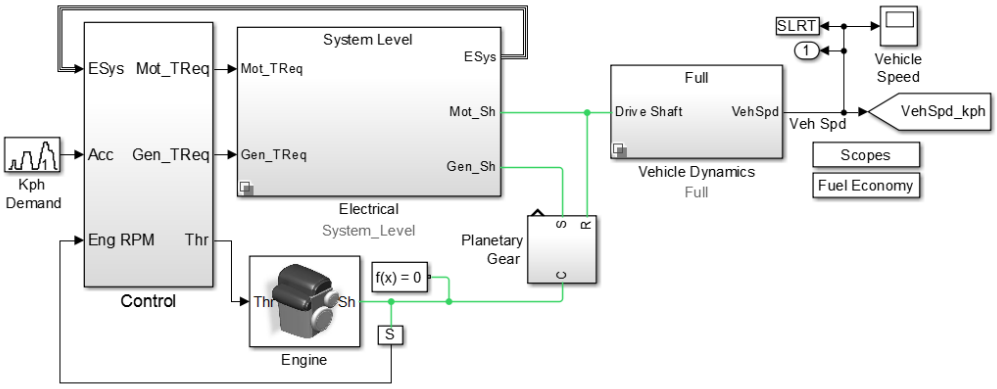
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

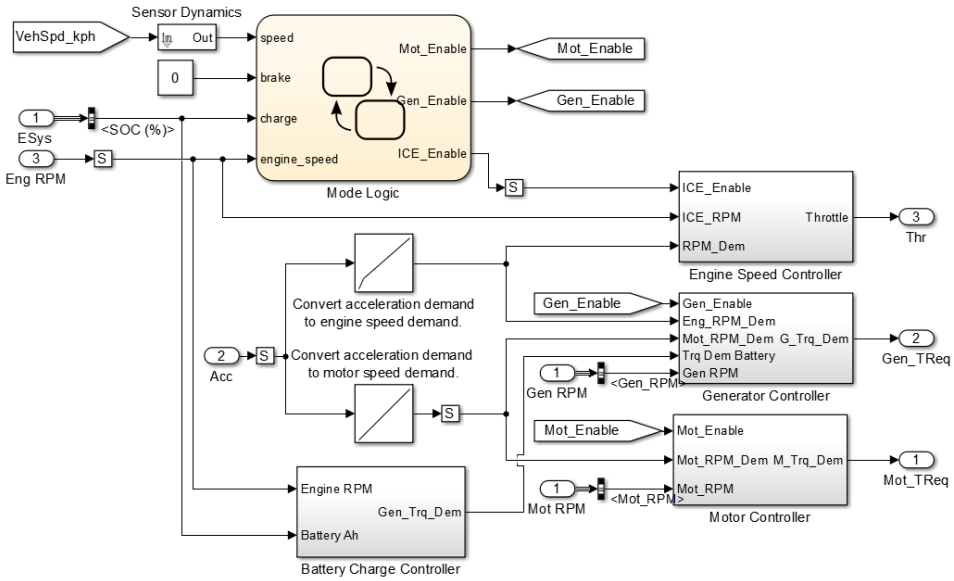
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Verifikasi Pemodelan

Pemodelan pada penelitian ini menggunakan simdriveline pada simscape/matlab. Pemodelan terdiri dari sistem utama (model hybrid) dan subsistem (kontrol, sistem elektrik, dan dinamika kendaraan). Adapun pemodelan pada penelitian ini yang diverifikasi dapat dilihat pada gambar 4.1.

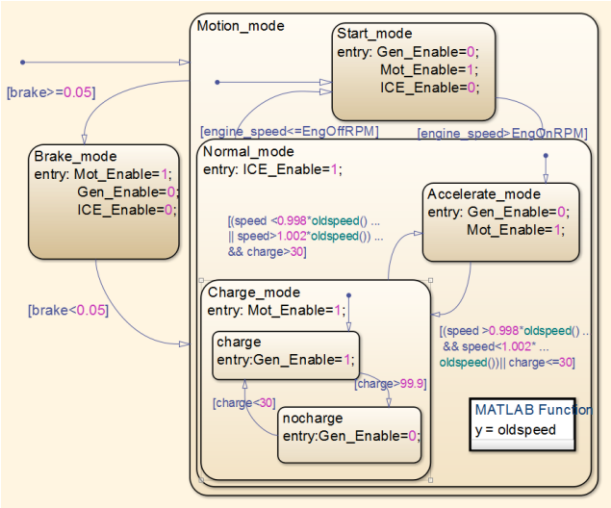


Gambar 4. 1 Pemodelan *Hybrid*

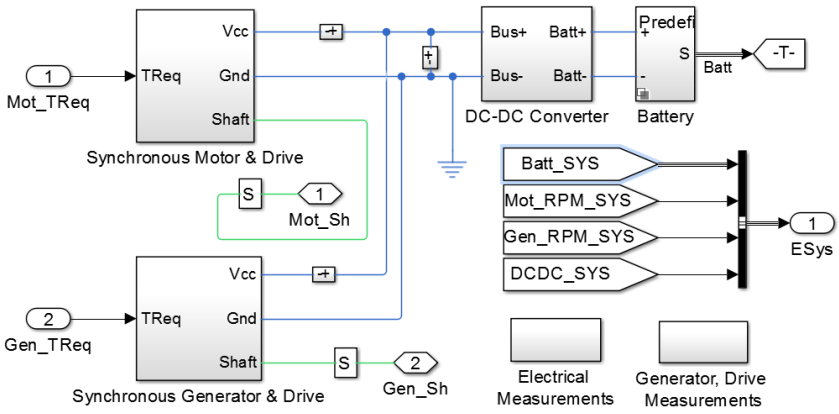


Gambar 4. 2 Pemodelan Kontrol

Pemodelan mode logic yang dapat dilihat pada gambar 4.3 adalah sub sistem dari pemodelan kontrol (gambar 4.2). Mode logic berfungsi untuk mengatur mode operasi pada kendaraan hybrid. Pada start mode, motor listrik akan beroperasi menggerakkan kendaraan atau dapat disebut mode listrik. Apabila putaran motor bakar diatas nilai yang dimasukkan (misalnya : EngOnRPM = 800) maka akan masuk pada mode normal. Apabila kecepatan kendaraan berada pada kecepatan rata-rata kecepatan penyangga dan persentase battery <=30 % maka akan masuk pada mode cruise dan generator akan berfungsi untuk mengecas battery. Ketika persentase battery diatas 99.9% maka generator akan berhenti berfungsi.



Gambar 4. 3 Pemodelan Mode Logic



Gambar 4. 4 Pemodelan Electrical Sistem

Pemodelan electrical sistem (gambar 4.4) merupakan sub sistem dari pemodelan utama. Parameter motor listrik dan generator dapat dilihat pada sub bab 3.2.2. Sedangkan parameter *battery* yang dimasukkan adalah *nominal voltage* = 86.4 V, *rated capacity* 34 Ah, *initial SOC* = 75 % dan *series resistance* = 0.02 ohm.

Verifikasi pemodelan dilakukan supaya pemodelan yang digunakan dianggap valid. Untuk memverifikasi pemodelan tersebut, dilakukan dengan cara membandingkan hasil konsumsi bahan bakar dalam satuan Liter per 100 km dengan penelitian terdahulu. Adapun hasil penelitian yang akan dibandingkan adalah penelitian yang dilakukan oleh Asaei, dkk., hasil simulasinya dapat dilihat pada tabel 2.1. Sedangkan data motor bakar kendaraan yang dibandingkan adalah *Cylinder volume 125 cc, Power Max. 7,0 kW, Torque Max. 9,6 Nm, RPM max. 8000 RPM.* Selain itu hal yang paling penting adalah Fuel Consumption Model yaitu 3,2 L/h @ 5500 atau 10 mg/rev.

Driving cycle yang digunakan untuk simulasi dalam membandingkan kedua pemodelan adalah *ECE 15* dengan 2 *cycle.* Dimana *ECE 15* mempunyai parameter (dikali 2), total jarak tempuh 1989.2 m, total waktu tempuh 390 detik, rata-rata kecepatan mengendara 23.87 km/jam, persentase waktu mengemudi, percepatan dan perlambatan adalah masing-masing secara berurutan 76.92 %, 27.18% dan 24.62 %.

Tabel 4. 1 Perbandingan *hybrid* menggunakan *PG* dan tanpa *PG*

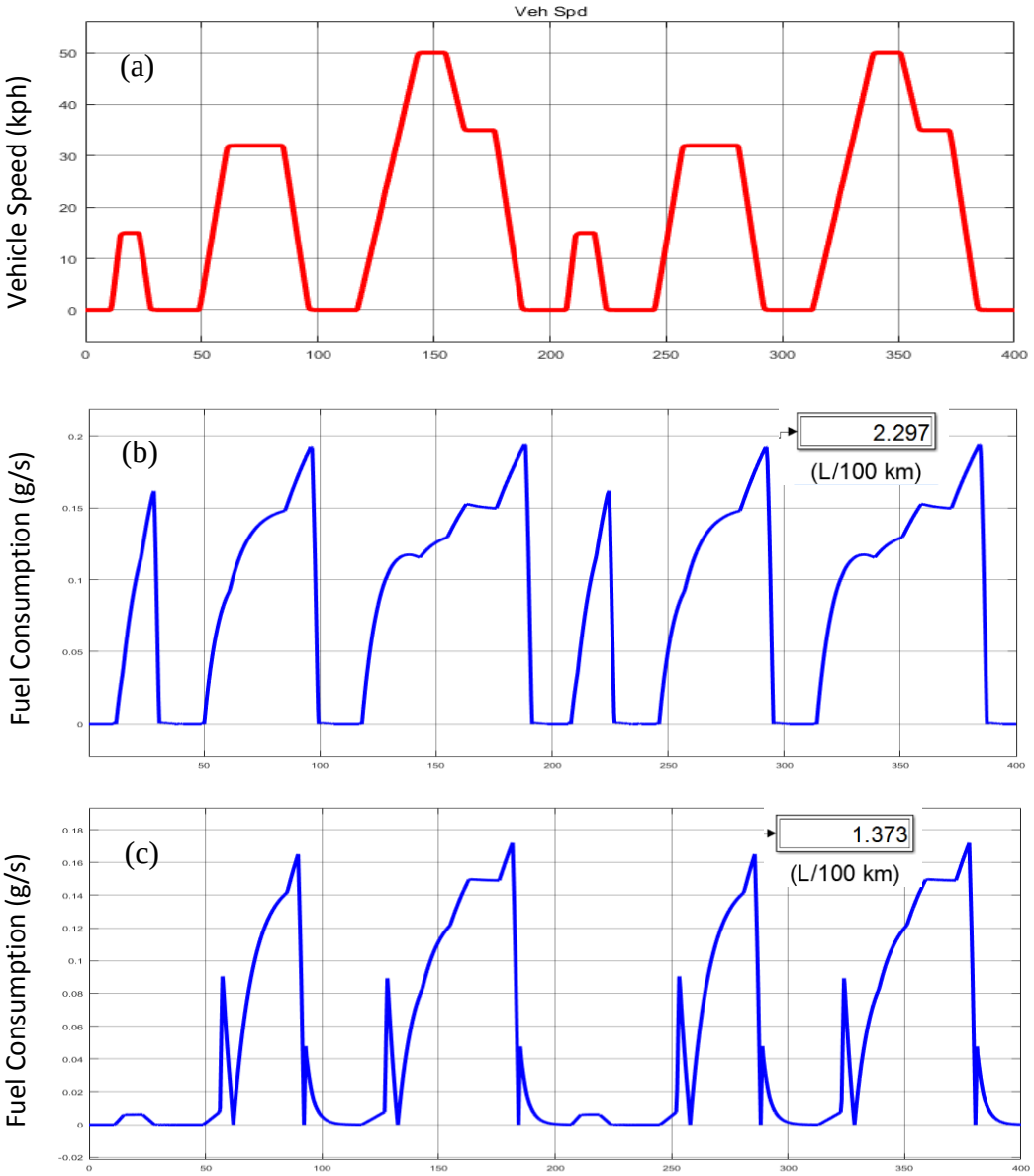
Driving Cycle	*Type*	Data *ICE*	*Fuel Consumption (L/100km)*	Keterangan
ECE 15 (2 cycle)	*Hybrid without PG*	125cc, 6.6kW	2.1	Penelitian Asaei, dkk.
	Hybrid with PG	125cc, 7kW	2.3	*ICE work from 0 rpm*
	Perbedaan		8.7%	

Tabel 4.1 merupakan data simulasi yang telah dilakukan dengan output penggunaan bahan bakar. Hasil simulasi hybrid tanpa planetary gear yang dilakukan oleh Asaei, dkk., didapat nilai 2.1 L/100km sedangkan hasil hybrid dengan menggunakan *planetary gear* didapat hasil 2.3 L/100km, sehingga didapat

perbedaan hasil sebesar 0.2 L/100km atau sekitar 8.7%. Seperti yang sudah dijelaskan pada sub bab 3.2.4 (verifikasi pemodelan), maka pemodelan yang dilakukan dalam penelitian ini dianggap valid karena perbedaan hasil dengan penelitian terdahulu dibawah 10%.

4.2 Hasil Simulasi dan Analisa

4.2.1 Simulasi dengan *ECE 15 Driving Cycle (2 Cycle)*



Gambar 4. 5 (a) Kecepatan kendaraan, (b) Grafik Fuel Consumption (FC) pada saat motor bakar berfungsi dari putaran 0 rpm dan (c) Grafik FC pada saat motor bakar berfungsi pada saat kecepatan putaran diatas 800 rpm.

Grafik kecepatan kendaraan pada gambar 4.5 (a) merupakan hasil dari *driving cycle* yang dimasukkan pada pemodelan. *Driving cycle* yang digunakan adalah *ECE 15* dengan 2 *cycle* dengan parameter data seperti yang sudah dijelaskan pada sub bab 4.2. Hasil kecepatan kendaraan sudah sesuai dengan *ECE 15 driving cycle yang* dapat dilihat pada gambar 3.5.

Gambar 4.5 (b) merupakan grafik konsumsi bahan bakar pada saat motor bakar berfungsi pada kecepatan 0 rpm. Atau dengan kata lain motor bakar berfungsi dari kecepatan awal kendaraan. Pada grafik ini, konsumsi bahan bakar pada percepatan pertama (dari 0 ke 15 km/jam) adalah sekitar 0.16 g/s. percepatan kedua dan ketiga (lihat *driving cycle*), konsumsi bahan bakar puncaknya sekitar 0.19 g/s. Tetapi percepatan yang ketiga, konsumsi bahan bakarnya lebih lama (sekitar 70 detik) dari percepatan yang kedua dan pertama masing-masing secara berurutan sekitar 50 dan 20 detik.

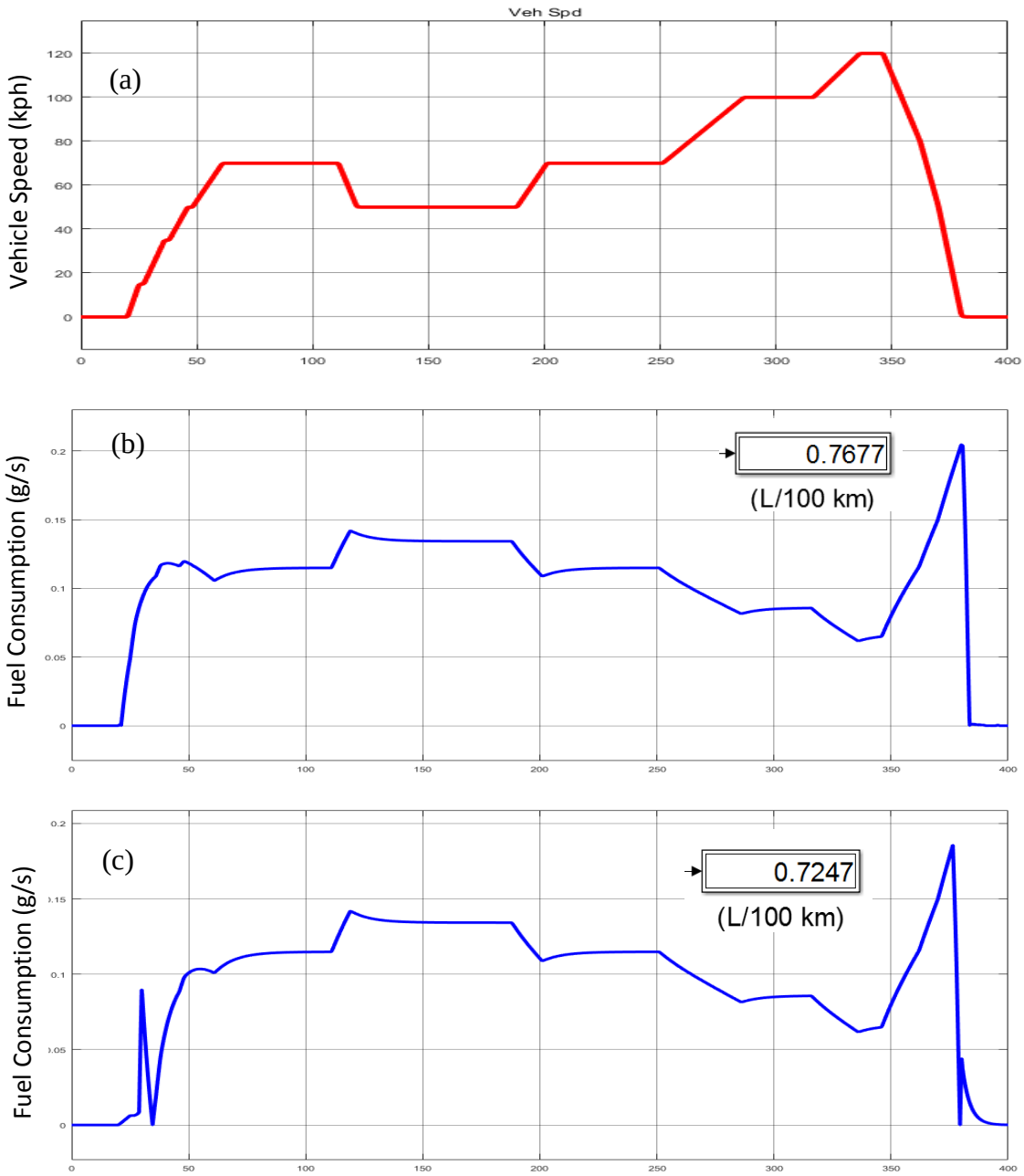
Gambar 4.5 (c), grafik konsumsi bahan bakar pada saat kecepatan putaran motor bakar diatas 800 rpm. Pada percepatan awal kendaraan, konsumsi bahan bakar hanya sekitar 0.008 g/s selama +- 20 detik. Sedangkan pada percepatan kedua dan ketiga konsumsi bahan bakar tertingginya masing-masing secara berurutan sekitar 0.165 dan 0.172 g/s. Percepatan kedua dan ketiga pada saat kecepatan kendaraan diatas 15km/jam terjadi kejutan pada motor bakar sehingga mengakibatkan konsumsi bahan bakar sekitar 0.09 g/s.

Dari kedua grafik konsumsi bahan bakar pada gambar 4.5 menunjukkan bahwa apabila motor bakar bekerja dari kecepatan putaran 0 rpm maka konsumsi bahan bakar lebih besar dibandingkan pada kecepatan putaran motor bakar diatas 800 rpm, yaitu masing 2.297 L/km dan 1.373 L/km. Hal ini diakibatkan karena pada percepatan awal konsumsi bahan bakar pada kecepatan putar kendaraan 0 dan 800 rpm mengalami perbedaan yang signifikan yaitu sekitar 0.152 g/s dalam waktu sekitar 20 detik.

4.2.2 Simulasi dengan *Extra Urban Driving Cycle (EUDC)*

Kecepatan kendaraan pada grafik simulasi gambar 4.6 (a) menggunakan *Extra Urban Driving Cycle (EUDC).* Dimana jarak tempuh kendaraan 6955.07m, waktu tempuh 400 detik, rata-rata kecepatan mengendara 68.6 km/jam, persentase

waktu mengemudi, percepatan dan perlambatan adalah masing-masing secara berurutan 91.25 %, 29.75% dan 12.25%. Hasil kecepatan kendaraan sudah sesuai dengan *Extra Urban driving cycle yang* dapat dilihat pada gambar 3.6.



Gambar 4. 6 (a) Kecepatan kendaraan, (b) Grafik Fuel Consumption (FC) pada saat motor bakar berfungsi dari awal dan (c) Grafik FC pada saat motor bakar berfungsi pada kecepatan putaran diatas 800 rpm.

Grafik konsumsi bahan bakar pada gambar 4.6 (b) konsumsi bahan bakar pada kecepatan putaran motor bakar 0 km/jam dan (c) 800 km/jam secara keseluruhan mempunyai grafik yang hampir sama kecuali pada saat percepatan awal dan perlambatan akhir. Pada saat kecepatan kendaraan diatas 15 km/jam, pada motor bakar terjadi kejutan konsumsi bahan bakar pada saat terjadi traksi dengan nilai sekitar 0.04 g/s, tetapi grafik konsumsi bahan bakar turun lagi pada nilai 0 g/s dan naik lagi pada saat berada pada waktu sekitar 30 detik.

Konsumsi bahan bakar pada saat kecepatan putaran motor bakar 0 rpm adalah 0.7677 L/100km, sedangkan pada saat kecepatan putaran motor bakar 800 rpm konsumsi bahan bakar adalah 0.7247 L/100km. Selisih konsumsi bahan bakar pada kecepatan kendaraan 0 dan 800 rpm hanya 0.043 L/100km. Perbedaan hasil simulasi tidak signifikan karena grafik konsumsi bahan bakar sama dari waktu tempuh 50 detik sampai 380 detik.

4.2.3 Perbandingan hasil simulasi

Tabel 4. 2 perbandingan hasil simulasi

Driving cycle	Jarak / waktu tempuh	Kecepatan putaran motor bakar saat aktif (rpm)	Konsumsi bahan bakar (L/100 km)	Total penggunaan bahan bakar (L)
ECE 15 (2 cycle)	1989.2 m / 390 detik	0	2.297	0.0457
		>800	1.373	0.0273
Perbaikan			40 %	40 %
EUDC	6955.07 m / 400 detik	0	0.768	0.0534
		>800	0.725	0.0504
Perbaikan			5.6 %	5.6 %

Hasil perbandingan antara kecepatan motor bakar saat bekerja pada 0 dan >800 rpm dengan 2 buah *driving cycle* dapat dilihat pada tabel 4.2. Konsumsi bahan bakar sepeda motor hybrid pada saat motor bakar bekerja pada putaran >800 rpm berkurang 40% dan 5.6% masing-masing secara berurutan menggunakan *ECE 15* dan *EUDC driving cycle*. Kecepatan *Extra Urban Driving Cycle* tinggi dan waktu berhenti kurang dibandingkan dengan *ECE 15 driving cycle*. Oleh karena itu, pengurangan konsumsi bahan bakar tidak signifikan pada *EUDC*. Artinya sangat tepat menggunakan sepeda motor *hybrid* dengan mode

awal motor listrik (atau motor bakar bekerja pada putaran menengah) apabila *driving cycle*-nya banyak situasi berhenti dan jalan dengan kecepatan rendah seperti didaerah perkotaan. Konsep sepeda motor *hybrid* memiliki kelebihan karena dapat mengurangi konsumsi bahan bakar dan polusi udara.

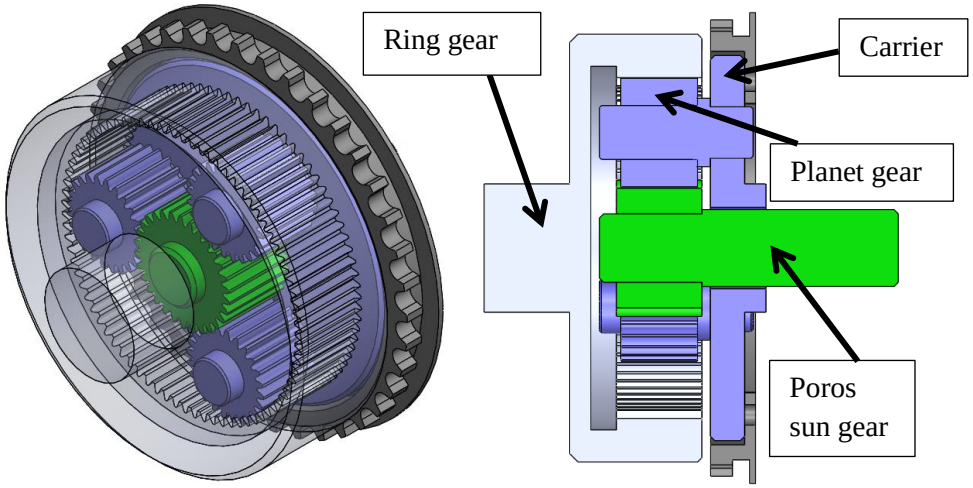
4.3 Perancangan *Planetary Gear*

Planetary gear yang akan digunakan akan mempunyai perbandingan roda gigi antara *ring gear* dengan *sun gear* adalah 2.6. Rasio tersebut berdasarkan perhitungan awal yang didapat pada sub-bab 3.2.3 dan rasio yang digunakan untuk simulasi. Untuk menentukan dimensi roda gigi maka dapat dilakukan assumsi yang paling memungkinkan untuk diproses seperti yang ditampilkan pada tabel 4.3. Dari tabel tersebut maka diamater *pitch* yang akan digunakan pada *sun, ring* dan *planet gear* secara berurutan adalah 45, 117 dan 43.5 mm, dengan modul dan jumlah gigi pada *sun gear* adalah 1.5 dan 30 buah.

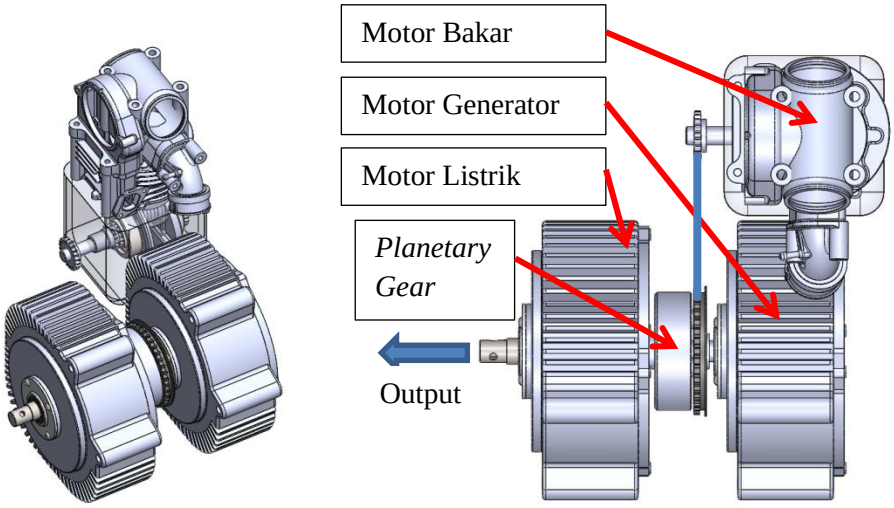
Tabel 4. 3 Penentuan dimensi diameter *pitch*

No	Ratio	Jumlah Gigi Sun Gear (asumsi)	Modul	Diameter Pitch Sun gear	Diameter PitchRing Gear	Diameter PitchPlanet Gear
1	2.6	30	1	30	78.00	24.00
2	2.6	34	1	34	88.40	27.20
3	2.6	40	1	40	104.00	32.00
4	2.6	30	1.5	45	117.00	43.50
5	2.6	34	1.5	51	132.60	49.30
6	2.6	40	1.5	60	156.00	58.00

Adapun gambar *planetary gear* dapat dilihat pada gambar 4.7. Sumber input terdapat 3 buah yaitu motor bakar tersambung pada *carrier/planet gear*, motor listrik tersambung pada ring gear dan motor generator tersanbung pada sun gear. Sedangkan output akan tersambung pada motor listrik dan *ring gear* (lihat gambar 4.8).



Gambar 4. 7 *Planetary gear*



Gambar 4. 8 Posisi *Input* dan *output* tenaga

4.4 Pembuatan Sepeda Motor *hybrid*

Purwarupa sepeda motor *hybrid* masih dalam proses pembuatan. Jarak sumbu roda sepeda motor ini sekitar 2 m. Adapun progres pembuatan sepeda motor *hybrid* dapat dilihat pada gambar 4.9, 4.10 dan 4.11.

Gambar 4. 9 Rangka sepeda motor *hybrid*

Gambar 4. 10 Rangka sepeda motor *hybrid*

Gambar 4. 11 Rangka sepeda motor *hybrid*

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Dengan menggunakan *ECE 15 driving cycle*, konsumsi bahan bakar pada saat motor bakar bekerja pada putaran 0 rpm lebih besar daripada saat putaran >800 rpm, yaitu masing-masing 2.297 L/km dan 1.373 L/km. Sehingga terjadi pengurangan konsumsi bahan bakar sebesar 40 %.
2. Dengan menggunakan siklus mengemudi *EUDC*, konsumsi bahan bakar pada saat motor bakar bekerja pada putaran 0 rpm lebih besar daripada saat putaran >800 rpm, tetapi tidak signifikan yaitu masing-masing 0.7677 L/km dan 0.7247 L/km. Sehingga terjadi pengurangan konsumsi bahan bakar sebesar 5.6 %.
3. Sepeda motor *hybrid* dengan mode awal motor listrik (atau motor bakar bekerja pada putaran menengah) sangat tepat digunakan pada *driving cycle* dengan banyak situasi berhenti dan jalan dengan kecepatan rendah seperti didaerah perkotaan. Konsep sepeda motor *hybrid* memiliki kelebihan karena dapat mengurangi konsumsi bahan bakar dan polusi udara sehingga lebih ramah lingkungan.
4. Dari hasil rancangan *multi-mode hybrid*, moda motor listrik dan moda *hybrid parallel* dapat bekerja dengan baik, tetapi pada moda *hybrid series-parallel*, moda *compound split* dan moda *charge* perlu perbaikan pada pemodelan simulasi karena belum bekerja maksimal.

5.2 Saran

Setelah melakukan penelitian tentang kendaraan *hybrid* khususnya pada kendaraan roda dua atau sepeda motor, penulis memberikan saran sebagai berikut:

1. Memodelkan *driving cycle* pada kota-kota besar diindonesia agar dapat diketahui konsumsi bahan bakar apabila kendaraan berada pada kondisi lalu lintas yang macet.

2. Memodelkan sepeda motor *hybrid* dengan menggunakan dua buah *planetary gear set* agar dapat dilihat performanya dan dibandingkan dengan satu buah *planetary gear set*.
3. Melakukan analisa kekuatan agar didapat material dan ukuran geometri *planetary gear* yang optimal.

DAFTAR PUSTAKA

Asaei B., Habibidoost M. (2013), *Design, simulation, and prototype production of a through the road parallel hybrid electric motocyvle*, Energy Conversion and Management, Vol. 71, Hal. 12-20.

Barlow T. J., Latham S., McCrae I. S., Boulter P. G. (2009), *A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions*, TRL Limited, Volume 3.

BNEF (2016), New Energy Outlook.

Cao J., Peng J., He H. (2016), *Modeling and Simulation Research on Power-split Hybrid Electric Vehicle*, Energy Procedia 104, Hal. 354-359.

Close C.M., Frederick D.H., Newell J.C. (2002), *Modeling and Analysis of Dynamic Systems*, Third Edition, John Wiley & Sons, USA.

Montazeri-GH. M., Mahmoodi-k. M. (2015), *Development a new power management strategy for power split hybrid electric vehicles*, Transportation Research Part D 37, Hal. 79-96.

Morandin M., Marco Ferrari., Silverio Bolognani (2014), *Power-Train Design and Performance of a Hybrid Motorcycle Prototype*, IEEE Transactions on Industry Applications Volume: 51, Issue: 3

Simsir N.B., Ertan H.B. (1999), *A Comparison of Torque Capabilities of Axial Flux and Radial Flux Type of Brushless DC (BLDC) Drives for Wide Speed Range Applications*, IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Hong Kong.

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

Sutantra I.N. (2015), *Teknologi Otomotif Hybrid*, Edisi Pertama, Guna Widya, Surabaya.

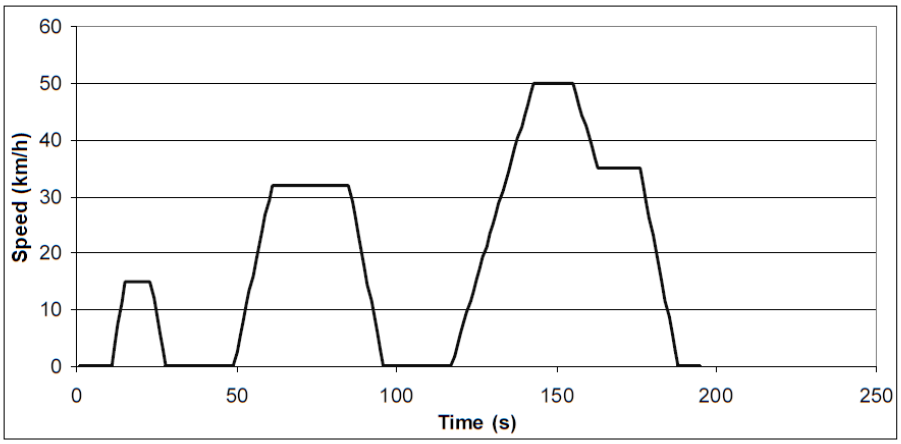
www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/33310-hybrid-electric-vehicle--hev--power-train-using-battery-model

Zhuang W., Zhang X., Ding Y., Wang L., Hu X. (2016), *Comparison of multi-mode hybrid powertrains with multiple planetary gears*, Applied Energy, Vol. 178, hal. 624-632.

LAMPIRAN A

Cycle No: 1

Cycle name: **ECE 15**
Alternative name:
Test programme: **EU legislative cycles**
Additional info: **Elementary ECE 15 cycle**
Vehicle category: **Cars**



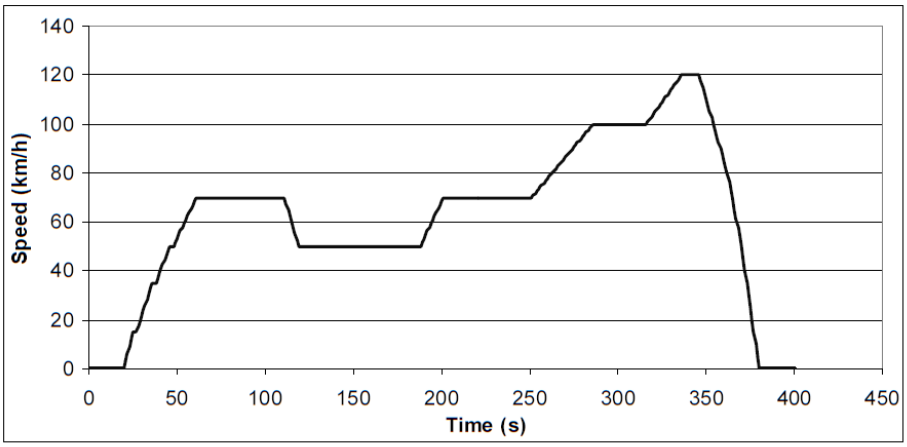
ART.KINEMA parameters

Total distance	994.6 m	Average negative acceleration	-0.393 m/s^2
Total time	195 s	Standard deviation of accel.	0.473 m/s^2
Driving time	150 s	Standard dev. of positive accel.	0.285 m/s^2
Drive time	49 s	Accel: 75th - 25th percentile	0.254 m/s^2
Drive time spent accelerating	53 s	Number of accelerations	3
Drive time spent decelerating	48 s	Accelerations per km	3.016 /km
Time spent braking	40 s	Number of stops	4
Standing time	45 s	Stops per km	4.02 /km
% of time driving	76.92 %	Average stop duration	11.25 s
% of cruising	25.13 %	Average distance between stops	248.65 m
% of time accelerating	27.18 %	Relative positive acceleration	0.147 m/s^2
% of time decelerating	24.62 %	Positive kinetic energy	3.812 m/s^2
% of time braking	20.51 %	Relative positive speed	0.521
% of time standing	23.08 %	Relative real speed	0.763
Average speed (trip)	18.4 km/h	Relative square speed	9.436 m/s
Average driving speed	23.87 km/h	Relative positive square speed	4.925 m/s
Standard deviation of speed	15.58 km/h	Relative real square speed	7.378 m/s
Speed: 75th - 25th percentile	32.01 km/h	Relative cubic speed	99.60 m^2/s^2
Maximum speed	50.07 km/h	Relative positive cubic speed	52.09 m^2/s^2
Average acceleration	0.000 m/s^2	Relative real cubic speed	78.72 m^2/s^2
Average positive acceleration	0.348 m/s^2	Root mean square of acceleration	0.183 m/s^2

LAMPIRAN B

Cycle No: 2

Cycle name: **Extra Urban Driving Cycle (EUDC)**
Alternative name:
Test programme: **EU legislative cycles**
Additional info:
Vehicle category: **Cars**



ART.KINEMA parameters

Total distance	6955.07 m	Average negative acceleration	-0.420 m/s^2
Total time	400 s	Standard deviation of accel.	0.378 m/s^2
Driving time	365 s	Standard dev. of positive accel.	0.177 m/s^2
Drive time	197 s	Accel: 75th - 25th percentile	0.221 m/s^2
Drive time spent accelerating	119 s	Number of accelerations	4
Drive time spent decelerating	49 s	Accelerations per km	0.575 /km
Time spent braking	45 s	Number of stops	2
Standing time	35 s	Stops per km	0.29 /km
% of time driving	91.25 %	Average stop duration	17.5 s
% of cruising	49.25 %	Average distance between stops	3477.54 m
% of time accelerating	29.75 %	Relative positive acceleration	0.0936 m/s^2
% of time decelerating	12.25 %	Positive kinetic energy	2.427 m/s^2
% of time braking	11.25 %	Relative positive speed	0.410
% of time standing	8.75 %	Relative real speed	0.881
Average speed (trip)	62.6 km/h	Relative square speed	21.760 m/s
Average driving speed	68.6 km/h	Relative positive square speed	9.432 m/s
Standard deviation of speed	25.88 km/h	Relative real square speed	19.047 m/s
Speed: 75th - 25th percentile	29.43 km/h	Relative cubic speed	514.92 m^2/s^2
Maximum speed	120.09 km/h	Relative positive cubic speed	237.01 m^2/s^2
Average acceleration	0.000 m/s^2	Relative real cubic speed	446.86 m^2/s^2
Average positive acceleration	0.266 m/s^2	Root mean square of acceleration	0.087 m/s^2

BIOGRAFI PENULIS

Penulis memiliki nama lengkap Muhammad Yunus, lahir pada tanggal 20 Januari 1985 di Simbur Naik (Prop. Jambi). Anak kedua dari enam bersaudara dari pasangan Bapak Abu Bakar bin Pannu dan Ibu Marwah. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN 191 Kurau, SMPN 2 Pangkalan Baru, SMKN 2 Pangkalpinang, D3 Politeknik Manufaktur Bangka Belitung (dh. Politeknik Manufaktur Timah), D4 Politeknik Manufaktur Bandung dan melanjutkan jenjang Magister di Institut Teknologi Sepuluh November Jurusan Teknik Mesin Bidang Studi Desain Sistem Mekanikal (DSM).

Selain tertarik melakukan penelitian pada dunia otomotif, penulis juga mempunyai kemampuan merancang Injection Plastic Molding dan tertarik melakukan penelitian di bidang Tool Design seperti Jig & Fixture dan Press Tool. Penulis juga beberpa kali ikut dalam penelitian Teknologi Tepat Guna (TTG).