

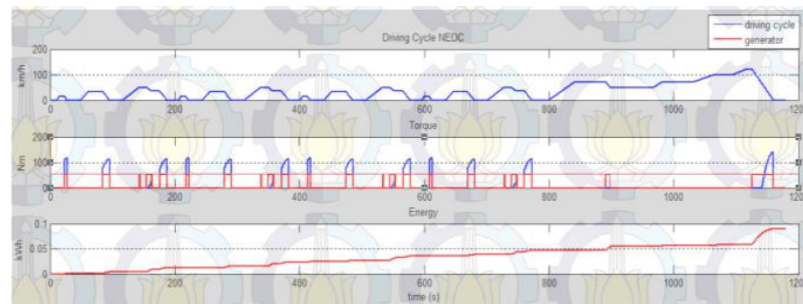
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Penelitian yang dilakukan oleh Gito Wijaya pada tahun 2014 dengan judul tugas akhir "Analisa Gaya Pengereman dan Energi yang Dibangkitkan dengan Porsi Regenerative Braking" memiliki tujuan yang sangat relevan dalam konteks pengembangan kendaraan listrik dan teknologi pengereman regeneratif. Dalam penelitian tersebut, Gito Wijaya mencari porsi optimal untuk pengereman regeneratif pada mobil *GEA passenger*. Penggunaan siklus pengendaraan NEDC sebagai referensi adalah pendekatan yang baik karena mencerminkan kondisi pengendaraan sehari-hari dengan berbagai situasi perjalanan. Simulasi menggunakan perangkat lunak *Matlab-Simulink* adalah metode yang umum digunakan untuk memodelkan dan menganalisis sistem pengereman regeneratif pada kendaraan listrik. Hasil penelitian semacam ini dapat memberikan wawasan yang berharga tentang efisiensi dan potensi penghematan energi yang dapat dicapai dengan pengereman regeneratif dalam kondisi *riil*.

Penelitian semacam ini adalah langkah penting dalam pengembangan teknologi kendaraan listrik yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Ini juga mencerminkan kesadaran akan pentingnya memaksimalkan penggunaan energi yang dihasilkan selama pengereman untuk meningkatkan efisiensi kendaraan dan mengurangi emisi. Selama beberapa tahun terakhir, perkembangan dalam teknologi kendaraan listrik dan pengereman regeneratif telah terus berlanjut, dan penelitian semacam ini berkontribusi pada pemahaman yang lebih baik tentang cara meningkatkan kinerja dan efisiensi kendaraan listrik di masa depan..



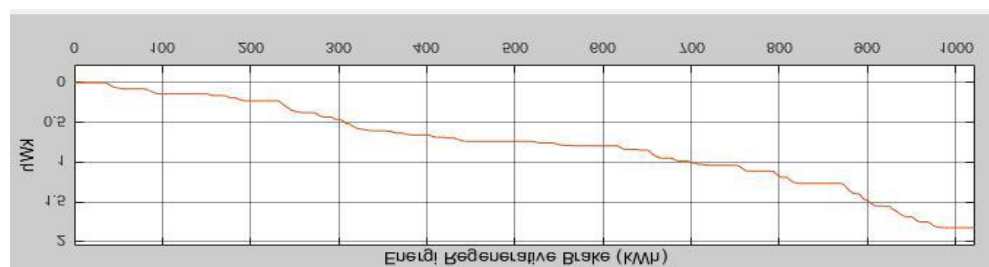
Gambar 2.1 Energi bangkitan pada porsi *regenerative brake* 0,03g

Dalam satu siklus pengendaraan *NEDC*, hasil penelitian menunjukkan bahwa daya yang dapat dihasilkan adalah sekitar 2.666 Watt, dan energi total yang dihasilkan sekitar 0,08924 kWh. Proporsi pengereman regeneratif yang digunakan adalah sekitar 0,03 g, dan desainnya berfokus pada tahap awal dari proses pengereman, terutama di roda depan kendaraan. (Wijaya G, 2014)

Pada penelitian lain yang berjudul “Analisa Pengaplikasian Sistem ‘KERS’ pada Bus Transjakarta dengan Sistem Penyimpanan pada Baterai” penelitian ini dilakukan oleh Christopher Resza Barawadya pada tahun 2016, penelitian tersebut mengkaji bagaimana penggunaan sistem pengereman *regenerative* dengan yang diterapkan pada bus Transjakarta. Penelitian ini juga melibatkan pemodelan pergerakan bus yang mengikuti pola perjalanan dari Pulogadung ke Monas dalam berbagai kondisi.. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa total energi yang dihasilkan oleh pengereman adalah sekitar 3,742 kWh. Dari energi tersebut, sekitar 2,8947 kWh dapat dimanfaatkan, dan sekitar 2,6052 kWh dapat ditangkap untuk digunakan

Dalam penelitian berikutnya yang berjudul “Analisa Penggunaan *Regenerative brake* Pada Mobil Multiguna Pedesaan Bertenaga Listrik” yang disusun oleh Pradipta Bintang Perdana pada tahun 2018, penelitian tersebut

membahas bagaimana penggunaan *regenerative brake* pada mobil multiguna yang beroperasi di pedesaan. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa porsi pengereman *regenerative* pada mobil multiguna pedesaan yang menggunakan tenaga listrik berbeda-beda tergantung pada koefisien gesek jalan. Porsi pengereman ini berkisar antara 0,0776 saat koefisien gesek jalan 0,5 hingga 0,1241 saat koefisien gesek jalan 0,8. Selain itu, proporsi pengereman mekanis pada roda depan juga berbeda-beda tergantung pada tingkat koefisien gesek jalan. Namun, tidak diperlukan pengereman mekanis pada roda belakang dalam penelitian tersebut. Sementara itu, energi yang berhasil dihasilkan oleh sistem *regenerative brake* dan disimpan dalam baterai dalam satu siklus driving cycle WLTP kelas 1 adalah sekitar 1,738 kWh ketika koefisien gesek jalan mencapai 0,8. Selanjutnya, efisiensi sistem *regenerative brake* yang telah dirancang pada mobil multiguna pedesaan bertenaga listrik ini mencapai sekitar 51,74% (Perdana PB, 2018)



Gambar 2.2 Energi bangkitan *regenerative brake*

Hasil dari penelitian yang telah dilakukan di atas menunjukkan bahwa sistem *regenerative brake* memiliki potensi yang lumayan besar untuk menyerap energi yang sebelumnya hanya terbuang melalui pengereman mekanik. Energi ini memiliki nilai yang signifikan dan dapat digunakan untuk berbagai keperluan kendaraan, sehingga dapat membantu meminimalisir penggunaan bahan bakar kendaraan. Oleh karena itu, sistem *regenerative brake* ini memiliki potensi untuk

digunakan pada berbagai jenis kendaraan, terutama mobil listrik. Oleh karena itu kali ini peneliti juga melakukan penelitian sistem *regenerative brake* pada mobil listrik 4 penumpang yang bertipe *city car* hasil rancangan beberapa mahasiswa Universitas Panca Marga Jurusan Teknologi Industri. Penelitian ini akan fokus pada porsi pengereman seberapa besar energi yang dapat dibangkitkan dan berapa besar efisiensinya yang diperoleh dengan menggunakan *driving cycle* yang mendekati kondisi nyata.

Tabel 2.1 Posisi Penelitian

Peneliti	Type Kendaraan	Tujuan Penelitian		
		Porsi Pengereman	Energi yang dibangkitkan	Efisiensi Sistem <i>Regenerative Brake</i>
Gito Wijaya	Mobil Nasional <i>Gea Passenger</i> (Bensin)	Ya	Ya	Tidak
Christopher Resza Baradwadya	<i>Bus Transjakarta</i> (Solar)	Ya	Tidak	Tidak
Pradipta Bintang Perdana	Mobil Multiguna Pedesaan (Mobil Listrik)	Ya	Ya	Ya
Asahari Didik Hardianto	Mobil 4 Penumpang City Car (Mobil Listrik)	Ya	Ya	Ya

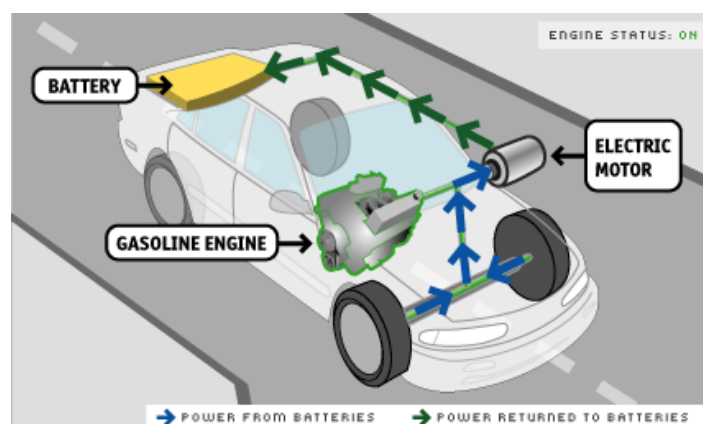
2.2 Dasar Teori

2.2.1 *Regenerative brake*

Regenerative brake ialah suatu sistem pengereman yang memiliki kemampuan untuk menangkap dan memanfaatkan energi yang dihasilkan saat proses pengereman pada kendaraan. Sistem *regenerative brake* umumnya dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu sistem berupa rem mekanik dan sistem rem elektrik. Pada sistem *regenerative brake* yang berupa mekanik, energi yang diambil

selama pengereman disimpan dalam sebuah *flywheel*, kemudian dimanfaatkan kembali untuk membantu mesin mobil pada saat proses akselerasi. Di sisi lain, dalam *regenerative brake* yang berupa elektrik, energi yang terambil selama pengereman diubah menjadi energi listrik melalui penggunaan generator dan disimpan dalam baterai. Energi yang tersimpan dalam sistem regenerative brake yang berupa elektrik ini bisa dimanfaatkan untuk membantu akselerasi kendaraan atau untuk mengoperasikan berbagai sistem listrik pada kendaraan, seperti lampu, pengkondisian udara, dan lain sebagainya.

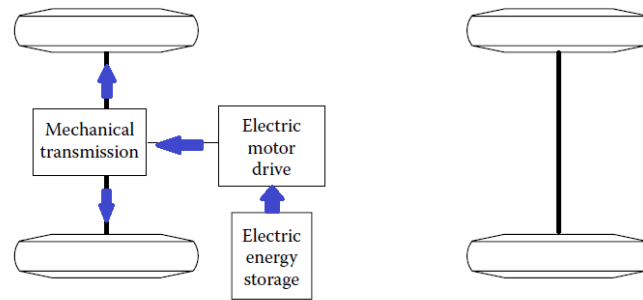
Jumlah energi yang dapat disimpan dalam sistem *regenerative brake* dipengaruhi oleh tingkat perlambatan yang dialami oleh kendaraan. Penggunaan *regenerative brake* pada mobil bahan bakar minyak memiliki manfaat signifikan dalam mengurangi konsumsi bahan bakar. Teknologi terbaru *regenerative brake* yang diperkenalkan oleh Ford pada mobil dengan mesin berbahan bakar bensin dapat meminimalisir pemakaian bahan bakar hingga mencapai 30% (Ingram A, 2013)



Gambar 2.3 Proses *Regenerative braking*

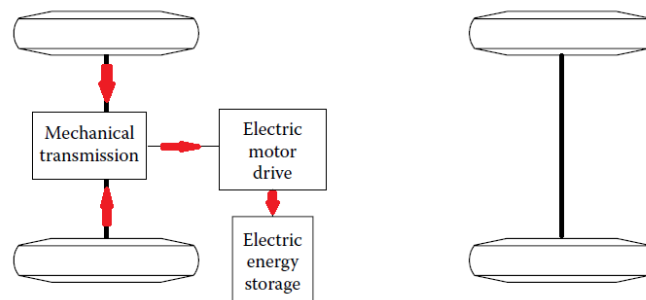
Pada umumnya, mobil listrik yang tersedia di pasar telah dilengkapi dengan sistem pengereman *regenerative*. Ketika kendaraan melambat, sistem *regenerative*

brake berfungsi dengan cara menyerap energi kinetik yang biasanya terbuang, dan kemudian mengarahkannya ke motor-generator. Generator ini akan mengonversi energi kinetik menjadi energi listrik, yang selanjutnya disimpan di dalam baterai mobil.



Gambar 2.4 Mobil Listrik Saat Berakselerasi

Ketika mobil listrik mengalami akselerasi, energi listrik yang ada di dalam baterai dialirkan ke motor. Motor ini mengonversi energi listrik menjadi energi kinetik. Energi kinetik ini kemudian mengalir melalui sistem transmisi kendaraan dan digunakan untuk memutar roda penggerak, sehingga memungkinkan kendaraan untuk bergerak lebih cepat.



Gambar 2.5 Mobil Listrik Saat Perlambatan

Ketika mobil perlu melakukan pengereman, roda yang berputar akan mengalirkan energi kinetik ke dalam sistem transmisi kendaraan. Energi ini dimanfaatkan untuk menggerakkan motor yang telah berubah menjadi generator, menghasilkan energi listrik. Energi listrik ini kemudian disimpan kembali dalam

baterai. Seiring dengan itu, kendaraan juga mengalami perlambatan karena putaran roda terbebani oleh generator yang berfungsi sebagai sistem pengereman regeneratif. (Ehsani M, 2010)

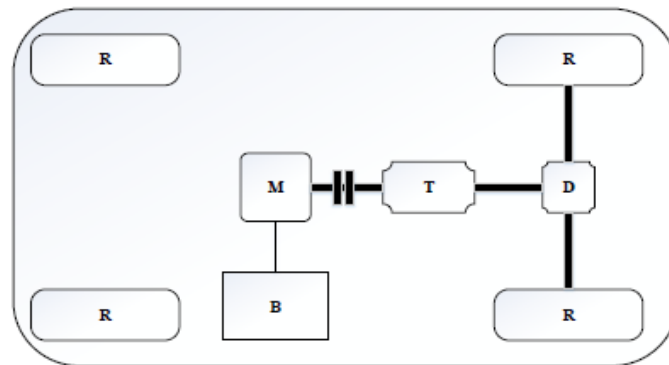
Desain sistem pengereman regeneratif merujuk pada perilaku pengereman kendaraan dan karakteristik kendaraan seperti kecepatan, perlambatan, serta energi pengereman yang tergambar dalam siklus berkendara. Untuk meningkatkan efisiensi pengereman regeneratif, perlu ditambahkan sistem pengereman mekanis. Tujuan dari penambahan ini adalah untuk menjaga keamanan selama proses perlambatan kendaraan. Lebih lanjut, dengan hadirnya sistem pengereman mekanis, kemampuan regenerative brake untuk menyerap energi dapat ditingkatkan. (Ehsani M, 2010)

2.2.2 Kendaraan Listrik (Mobil Listrik)

Kendaraan listrik dianggap sebagai solusi untuk dua masalah utama: dampak pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh Gas Rumah Kaca (GRK) dan krisis energi. Kendaraan listrik dikenal memiliki tingkat efisiensi yang lebih tinggi daripada kendaraan berbahan bakar minyak. Namun, kendaraan listrik masih memiliki keterbatasan dalam hal jarak tempuh karena kapasitas penyimpanan energi listrik pada baterainya masih terbatas jika dibandingkan dengan kapasitas tangki bahan bakar minyak.

Kendaraan listrik dapat dikelompokkan menjadi dua model, yaitu kendaraan listrik dengan motor tak langsung, yang hanya menggunakan satu motor, dan kendaraan listrik dengan motor langsung, yang menggunakan dua atau empat motor listrik yang terhubung langsung dengan roda penggerak. Model kendaraan listrik dengan motor tak langsung memiliki konsep yang mirip dengan kendaraan

konvensional. Mereka menggunakan transmisi serupa dengan kendaraan konvensional. Motor listrik pada kendaraan ini menggantikan peran mesin pada kendaraan konvensional, mengubah energi kinetik dari motor listrik menjadi gaya dorong pada roda penggerak melalui sistem penyalur daya.



Gambar 2.6 Mobil Listrik dengan Motor Tidak Langsung

Desain kendaraan listrik dengan motor tak langsung dapat dilihat dalam Gambar 2.6. Dalam gambar tersebut, R melambangkan roda, M adalah motor listrik, T adalah transmisi, dan B adalah baterai. Kendaraan ini menggunakan satu motor listrik, di mana motor menerima energi listrik dari baterai. Motor listrik menghasilkan energi kinetik yang kemudian dialirkan melalui sistem transmisi hingga mencapai roda belakang.

Karakteristik dari kendaraan listrik dengan motor tak langsung serupa dengan kendaraan konvensional. Tenaga dari baterai dikendalikan oleh pengendali daya ke motor listrik sesuai dengan kebutuhan. Torsi dari motor listrik diubah menjadi gaya dorong kendaraan oleh sistem penyalur daya melalui kopling, transmisi, dan gardan. Karena sistem penyalurnya mirip dengan kendaraan konvensional yang menggunakan mesin, maka proses transmisi dan transformasi daya dan torsi serupa dengan kendaraan bermesin.

2.2.3 Mobil Listrik Model 4 Penumpang

Mobil Listrik 4 Penumpang ini merupakan mobil listrik rancangan beberapa mahasiswa Teknik Industri Universitas Panca Marga yang didesign mirip *City Car*. Harapannya mobil ini bisa di gunakan di jalan raya kota-kota besar. Karena *body* nya yang cukup kecil, Mobil ini bisa bermanuver dengan lincah dan gesit, dan energi yang dibutuhkan akan lebih hemat dalam mengoperasikannya.



Gambar 2.7 Desain Mobil Listrik 4 Penumpang

Mobil listrik 4 Penumpang ini didesain dengan ukuran diameter ban 16 inci dengan panjang kendaraan 2,8 m dan lebar 1,6 m. Untuk berat mobil itu sendiri mencapai 1 ton dalam kondisi kosong dan jika kondisi terisi bisa mencapai 1,5 ton. (Fajar DI, 2015) Mobil ini di gerakkan dengan motor penggerak 25 Kw. Sedangkan tenaga yang dihasilkan mencapai 50 Hp. (Arifin N, 2014)

Tabel 2.2 Data Spesifikasi Mobil Listrik 4 Penumpang

Dimensi	
Wheelbase	2380 mm
Track Width	1520 mm
Ground Clearance	200 mm
Massa	
Berat Kosong Kendaraan	770 kg

Berat Terisi	1470 kg
Jarak CG ke sumbu roda depan (Lf)	1,31 m
Jarak CG ke sumbu roda belakang (Lr)	1,06 m
Tinggi CG ke permukaan tanah (h)	0,66
Ban	
Jenis	Radial
Diameter	406 mm
Lebar	205 mm
Koefisien Adhesi Aspal (η)	0,75
Koefisien Drag Kendaraan (μ)	0,1
Koefisien rolling C_f	0,01
Kinerja	
Motor	25 kw
Torsi Motor	390 Nm
Tenaga yang dihasilkan	50 Hp
Rasio Transmisi (It)	1,3
Rasio Gardan (Ig)	3,9

2.2.4 Distribusi Gaya Pengereman

Untuk menghitung total energi yang dihasilkan selama proses pengereman, diperlukan analisis awal serta perhitungan distribusi gaya pengereman yang terjadi pada roda depan dan belakang kendaraan. Gaya pengereman pada kedua roda kendaraan memiliki suatu rasio yang tetap, yang ditentukan oleh nilai koefisien gesekan antara permukaan jalan yang dilalui dan harus seimbang dengan beban normal pada masing-masing roda kendaraan. Oleh karena itu, roda depan dan roda belakang pada kendaraan tersebut harus menghasilkan gaya pengereman maksimum secara bersamaan. Hasil penjumlahan gaya pengereman pada roda depan dan roda belakang harus sesuai dengan nilai koefisien gesekan (μ) yang telah ditentukan

- Gaya rem total :

$$F_b = F_{bf} + F_{br} \dots\dots\dots (2.1)$$

- Gaya rem maksimum:

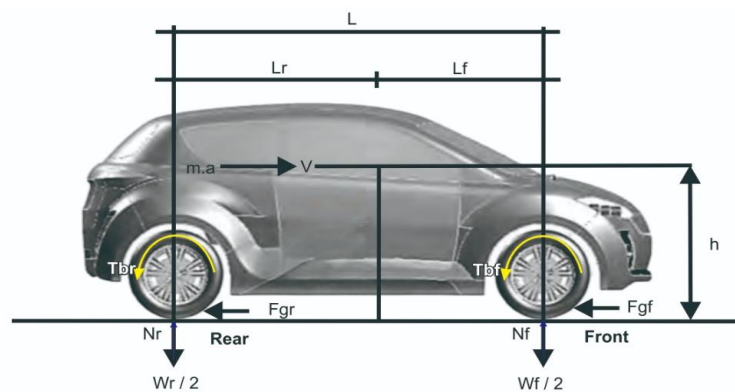
$$\begin{aligned}
 F_{bmax} &= F_{bfmax} + F_{brmax} \\
 &= \mu (W_f + W_r) \\
 &= \mu \cdot W \dots\dots\dots (2.2)
 \end{aligned}$$

Keterangan :

- Fb : Gaya Pengereman Total (N)
- Fbf : Gaya Pengereman pada sisi ban depan (N)
- Fbr : Gaya Pengereman pada sisi ban belakang (N)
- W : Total berat pada kendaraan (N)
- Wf : Berat mobil pada sisi ban bagian depan (N)
- Wr : Berat mobil pada sisi ban bagian belakang (N)
- μ : koefisien gesek

Sehingga

$$\mu = \frac{Fbf}{W} + \frac{Fbr}{W} \dots\dots\dots (2.3)$$



Gambar 2.8 Distribusi gaya pengereman

Saat pengereman berlangsung, terjadi perpindahan beban dari sumbu belakang (roda belakang) ke sumbu depan kendaraan. Dengan mempertimbangkan prinsip keseimbangan momen melalui titik tumpuan depan dan belakang, gaya

normal di roda depan (W_f) dan roda belakang (W_r) dapat dihitung sebagai berikut, dengan asumsi bahwa θ (sudut kemiringan) kecil. Harap diperhatikan bahwa perhitungan ini mungkin melibatkan berbagai parameter, seperti massa kendaraan, percepatan gravitasi, sudut kemiringan jalan, dan distribusi massa pada kendaraan. Semua faktor ini akan mempengaruhi cara perhitungan dilakukan untuk mendapatkan nilai W_f dan W_r yang akurat.

$$W_f = \frac{W}{L} \left(L_r - \frac{a}{g} h \right) \dots\dots\dots (2.4)$$

dan

$$W_r = \frac{W}{L} \left(L_f + \frac{a}{g} h \right) \dots\dots\dots (2.5)$$

Keterangan :

W_f : Berat mobil pada sisi ban bagian depan (N)

W_r : Berat mobil pada sisi ban bagian belakang (N)

L_f : Jarak titik pusat mobil ke ban depan (m)

L_r : Jarak titik pusat mobil ke ban belakang (m)

L : Jarak ban depan dan belakang (m)

a : Perlambatan kendaraan (m/s^2)

g : Gravitasi (m/s^2)

h : Jarak titik pusat mobil ke pusat ban kendaraan (m)

Distribusi sistem pengereman yang direncanakan bertujuan untuk mencapai keseimbangan dalam gaya pengereman pada roda depan (F_{bf}) dan roda belakang (F_{br}) dengan mempertimbangkan beban normal, sehingga kendaraan tetap dalam kondisi stabil saat berkendara. Oleh karena itu, kita dapat menggunakan persamaan berikut ini untuk mencapai tujuan tersebut :

$$\frac{F_{bf}}{F_{br}} = \frac{W_f}{W_r} = \frac{\frac{W}{L} (Lr - \frac{a}{g} h)}{\frac{W}{L} (Lf - \frac{a}{g} h)} \dots\dots\dots (2.6)$$

Keterangan :

W : Total berat pada kendaraan (N)

W_f : Berat mobil pada sisi ban bagian depan (N)

W_r : Berat mobil pada sisi ban bagian belakang (N)

L_f : Jarak titik pusat mobil ke ban depan (m)

L_r : Jarak titik pusat mobil ke ban belakang (m)

L : Jarak ban depan dan belakang (m)

m : Massa Mobil (kg)

a : Perlambatan Mobil (m/s²)

g : Gravitasi (m/s²)

h : Jarak titik pusat mobil ke pusat ban kendaraan (m))

Ketika kendaraan melakukan pengereman, kendaraan tersebut akan mengalami perlambatan:

$$a = \frac{F_{bf} + F_{br}}{m} \dots\dots\dots (2.7)$$

Besaran perlambatan pada sebuah kendaraan dapat dimanfaatkan untuk memperoleh distribusi gaya pengereman pada roda depan dan roda belakang. Untuk ini, kita dapat memanfaatkan nilai maksimum dari koefisien gesek lintasan sebagai jumlah total distribusi gaya pengereman pada roda depan dan roda belakang, yaitu:

$$\frac{F_{br}}{W} = \mu - \frac{F_{bf}}{W} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dengan mengkombinasikan kedua persamaan di atas, kita akan dapat menghasilkan grafik yang menggambarkan distribusi gaya pengereman ideal pada roda depan dan roda belakang kendaraan.

Secara umum, suatu kendaraan juga memiliki gaya pengereman aktual yang telah disesuaikan dengan penggunaannya. Ini berarti bahwa gaya pengereman pada roda bagian depan dan roda bagian belakang telah didesain dengan nilai yang tetap dan telah diatur agar sesuai dengan karakteristik pengereman yang diinginkan oleh produsen kendaraan. Ini adalah bagian integral dari desain sistem pengereman kendaraan dan memastikan bahwa kendaraan dapat berhenti dengan aman dan efisien dalam berbagai kondisi penggunaan.

Penting untuk mencatat bahwa perancangan pengereman yang baik mempertimbangkan berbagai faktor, seperti massa kendaraan, kecepatan, tipe permukaan jalan, serta faktor-faktor keselamatan. Selain itu, sistem pengereman modern sering menggunakan teknologi yang memungkinkan penggunaan pengereman regeneratif, di mana sebagian dari energi kinetik yang dihasilkan selama pengereman dapat dikonversi kembali menjadi energi listrik dan disimpan dalam baterai kendaraan, meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan.

$$\beta = \frac{F_{bf}}{F_b} \quad (2.9)$$

Apabila proses pengereman terjadi di area di mana distribusi gaya pengereman aktual berada di bawah distribusi pengereman ideal, maka roda depan akan mengalami penguncian yang lebih awal. Sebaliknya, jika pengereman terjadi di area di mana distribusi gaya pengereman aktual melebihi distribusi pengereman ideal, maka roda belakang akan mengalami penguncian lebih awal. Ketika roda belakang mengunci lebih dulu, kendaraan akan mengalami hilangnya stabilitas

karena roda belakang kehilangan kemampuan untuk menangani gaya dorong lateral.

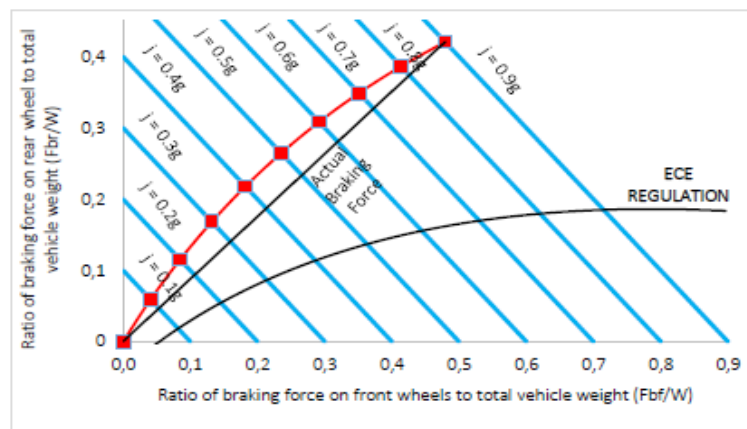
2.2.5 Regulasi Pengereman

2.2.5.1 Regulasi UN/ECE

Jika distribusi aktual gaya pengereman berada di bawah kurva ideal, maka ban depan akan mengunci lebih awal dibandingkan dengan ban belakang. Ketika ban depan mengunci, ban belakang hanya menerima gaya pengereman minimum. Dengan pertimbangan keamanan, regulasi pengereman terus diperbaiki. Dalam konteks ini, ECE mengatur persyaratan seperti yang dijelaskan dalam persamaan 2.10..

$$\frac{F_{bf}}{W_f} \geq \frac{F_{br}}{W_r} \dots\dots\dots(2.10)$$

Berdasarkan persamaan 2.10 yang disebutkan sebelumnya, roda belakang selalu mengunci setelah roda depan mengunci. Artinya, proses pengereman selalu berlangsung di bawah kurva ideal seperti yang digambarkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Grafik Distribusi Regulasi ECE

Dengan demikian, distribusi gaya pengereman aktual selalu berada di bawah distribusi gaya pengereman ideal. Saat roda depan terkunci, sesuai dengan regulasi pengereman ECE, gaya pengereman pada roda bagian belakang harus memiliki

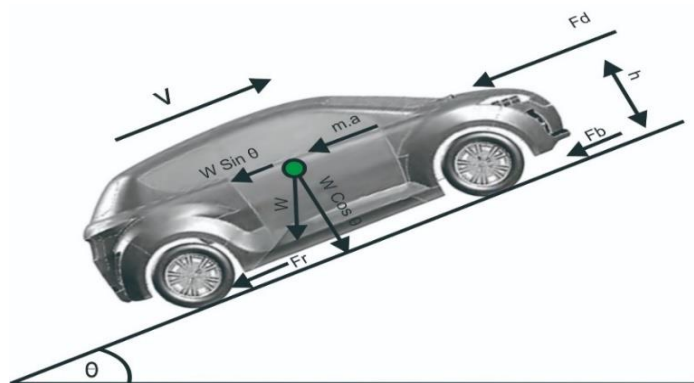
kapabilitas untuk menghasilkan tingkat perlambatan yang lebih tinggi daripada nilai perlambatan yang tercantum dalam persamaan.:

$$\frac{a}{g} \geq 0,1 + 0,85 (\mu - 0,2) \dots\dots\dots(2.11)$$

Persamaan diatas yang kemudian digunakan untuk menentukan nilai minimal dari gaya pengereman kendaraan serta membentuk kurva *ECE*, maka penempatan distribusi pengereman yang baik dan disarankan oleh *ECE brake regulation* adalah distribusi gaya pengereman yang terletak diantara distribusi gaya pengereman ideal dan distribusi pengereman *ECE*.

2.2.6 Gaya-Gaya yang mempengaruhi Pengereman Kendaraan

Beberapa gaya yang mempengaruhi kendaraan adalah gaya hambat aerodinamis, gaya hambat rolling, dan gaya hambat gradien. Selain itu, ada gaya inersia yang muncul akibat akselerasi atau perlambatan kendaraan. Semua gaya-gaya ini akan memiliki dampak pada gaya traksi dan gaya pengereman kendaraan, sebagaimana tergambar pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Gaya-gaya yang mempengaruhi pengereman Kendaraan

2.2.6.1 Gaya Hambat Drag (FD)

Gaya hambat ini muncul akibat adanya aliran udara di sekitar kendaraan yang memperlambat pergerakannya. Ketika kita mengasumsikan bahwa udara

diam, maka kecepatan relatif antara udara dan kendaraan adalah sama dengan kecepatan kendaraan itu sendiri. Persamaan yang menggambarkan gaya hambatan udara dapat ditemukan dalam persamaan yang tertera di bawah ini.:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho v^2 A \dots\dots\dots (2.12)$$

Keterangan :

F_d : *Drag Force* (N)

C_d : Koefisien drag

ρ : Massa jenis udara (kg/m³)

v : Kecepatan *relative* kendaraan (m/s)

A : Luas *frontal* kendaraan (m²)

2.2.6.2 Gaya Hambat Rolling (F_r)

Gaya hambat rolling timbul karena adanya gesekan antara roda dan permukaan jalan. Persamaan untuk gaya hambat rolling tersebut dapat ditemukan dalam persamaan 2.13

$$F_r = m g C_f \dots\dots\dots (2.13)$$

Keterangan :

F_r : Gaya Hambat Rolling (N)

C_f : *Rolling Coefficient*

m : Massa kendaraan (kg)

g : Gravitasi (m/s)

2.2.6.3 Gaya Hambat Gradien (F_g)

Gaya hambat *gradien* terjadi ketika kendaraan bergerak naik atau turun pada medan yang memiliki kemiringan tertentu, dan besarnya gaya ini dipengaruhi oleh

berat kendaraan dan kemiringan jalan. Persamaan untuk gaya hambat gradien dapat ditemukan dalam persamaan 2.14.

$$F_g = m \cdot g \cdot \sin\theta \dots\dots\dots (2.14)$$

Keterangan :

F_g : Gaya Hambat Gradien (N)

θ : Sudut tanjakan

m : Massa kendaraan (kg)

g : Gravitasi (m/s)

2.2.6.4 Gaya Hambat *Inersia* Kendaraan (F_a)

Gaya hambat *inersia* adalah gaya hambat yang timbul saat kendaraan mengalami percepatan dari kecepatan rendah ke tinggi atau sebaliknya, dan arahnya berlawanan dengan arah pergerakan kendaraan. Persamaan untuk gaya hambat inersia dapat ditemukan dalam persamaan yang sesuai:

$$F_a = m \cdot a \dots\dots\dots (2.15)$$

Keterangan :

F_a : Gaya Hambat *Inersia* Kendaraan (N)

m : Massa kendaraan (kg)

a : Perlambatan kendaraan (m/s^2)

2.2.6.5 Gaya Pengereman kendaraan

Gaya pengereman kendaraan adalah hasil dari penjumlahan gaya-gaya hambat yang beroperasi pada kendaraan ketika kendaraan sedang mengalami perlambatan. Gaya ini timbul akibat pengereman dan dapat dihitung menggunakan persamaan 2.16..

$$F_b = F_a - F_d - F_r - F_g \dots\dots\dots (2.16)$$

Dalam konteks analisis dinamika kendaraan ketika mengalami perlambatan pada permukaan yang rata, gaya-gaya yang berpengaruh sesuai dengan persamaan dibawah ini.:

$$F_b + F_d + F_r = m \cdot a$$

$$F_b = (m \cdot a) - (F_d + F_r) \dots\dots\dots (2.17)$$

Keterangan :

F_b : Gaya Rem Total (N)

F_a : Gaya Hambat *Inersia* Kendaraan (N)

: Drag *Force* (N)

F_r : Gaya Hambat *Rolling* (N)

F_g : Gaya Hambat *Gradien* (N)

m : Massa kendaraan (kg)

a : Perlambatan kendaraan (m/s^2)

2.2.6.6 Torsi Pengereman kendaraan

Torsi pengereman pada roda kendaraan dihitung dengan mengalikan gaya pengereman dengan jari-jari roda. Persamaan yang menggambarkan perhitungan torsi pengereman ini dapat ditemukan dalam persamaan 2.17..

$$T_b = F_b \times r_{dyn} \dots\dots\dots (2.18)$$

Sementara itu, torsi motor yang diterapkan dalam pelaksanaan pengereman regeneratif disesuaikan dengan persamaan 2.18.

$$T_b = \frac{F_b \times r}{I_t \times I_g \times \eta} \dots\dots\dots (2.19)$$

2.2.6.7 Daya Pengereman kendaraan

Daya pengereman yang terjadi pada kendaraan dihitung dengan mengalikan torsi pengereman dengan kecepatan sudut pada motor, yang disesuaikan dengan

driving cycle yang sedang berlangsung. Persamaan yang menggambarkan hubungan ini dapat ditemukan dalam persamaan yang relevan:

$$P_b = T_b \cdot \omega_{roda} \dots\dots\dots (2.20)$$

$$\omega_{roda} = \frac{v}{R_{dyn}} \dots\dots\dots (2.21)$$

$$\omega_{roda} = \frac{v \times I_t \times I_g}{\pi \times r} \dots\dots\dots (2.22)$$

Keterangan :

T_b : Torsi Pengereman (Nm)

F_b : Gaya Rem Total (N)

P_b : Daya Pengereman (Kw)

ω_{roda} : Kecepatan putaran Roda (Rpm)

ω_{motor} : Kecepatan putaran motor (Rpm)

v : kecepatan linier (m/s)

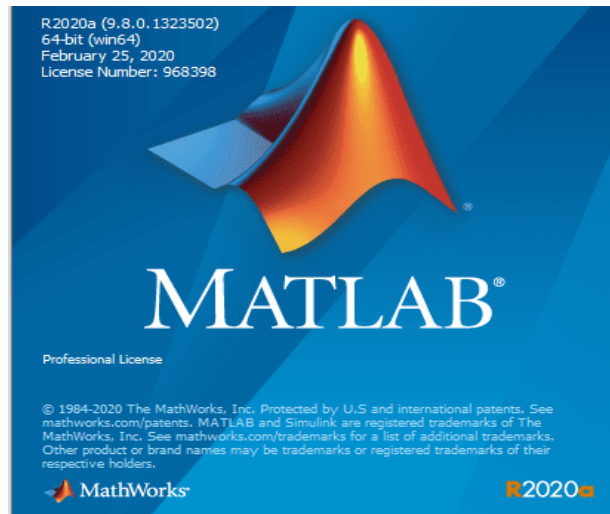
I_t : Rasio Transmisi

I_g : Rasio Gardan

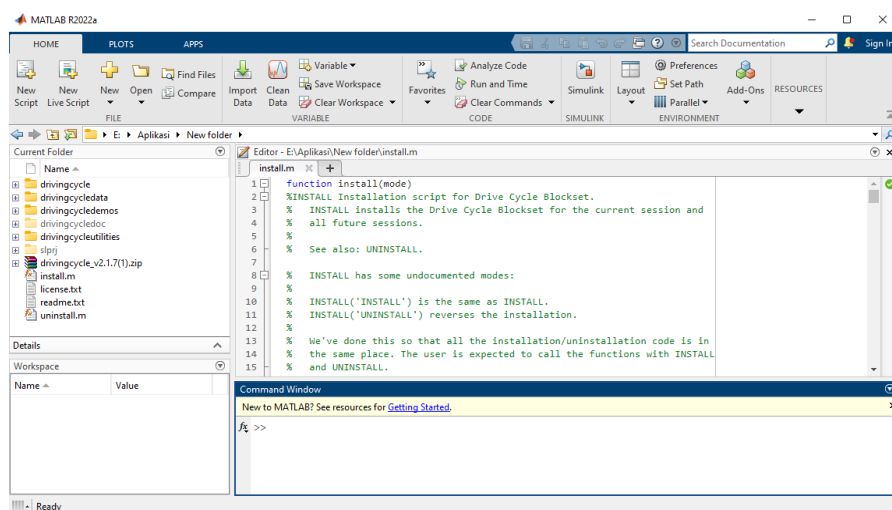
2.2.7 Matlab-Simulik

2.2.7.1 Matlab

Matlab (singkatan dari *Matrix Laboratory*) adalah sebuah bahasa pemrograman khusus untuk perhitungan teknik dan sains. Pada awalnya, program tersebut dirancang untuk melakukan operasi matematika terhadap matriks tetapi kemudian berkembang menjadi suatu bahasa pemrograman yang dapat menyelesaikan hampir semua masalah teknik dan sains. *Matlab* menerapkan bahasa pemrograman *Matlab* dan menyediakan berbagai macam tools (dinamakan *toolbox*) dan *library* dari fungsi-fungsi yang sering diperlukan untuk menyelesaikan masalah teknik dan sains dengan lebih mudah dan lebih efisien



Gambar 2.11 Logo *Matlab*



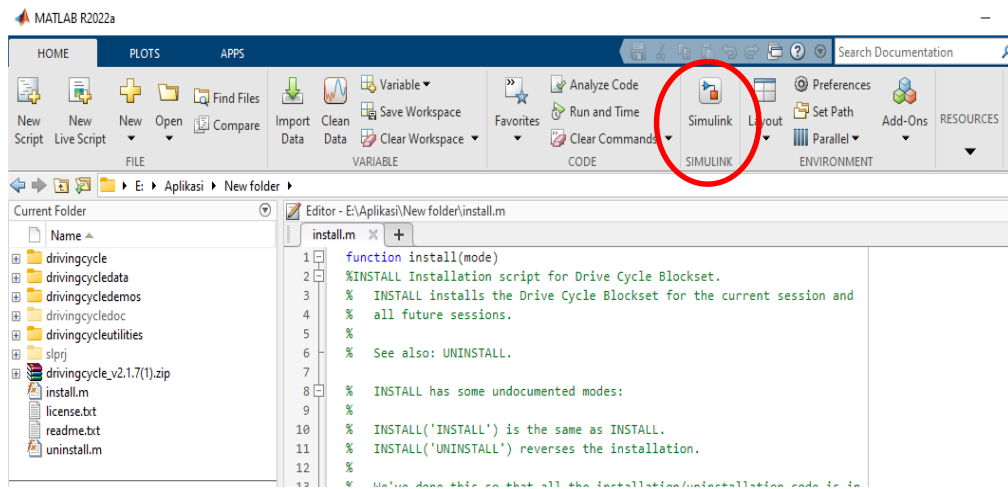
Gambar 2.12 Tampilan *Matlab*

2.2.7.2 *Simulink*

Simulink adalah suatu paket perangkat lunak yang terintegrasi dengan *Matlab* untuk melakukan simulasi sistem dinamik dengan metode grafis. Dengan *Simulink*, suatu masalah teknikal atau sains dapat dibuat dalam bentuk diagram blok dan panah-panah yang menggambarkan aliran sinyal dan fungsi-fungsi yang terlibat dalam suatu sistem dinamik. Dalam modul ini akan diperkenalkan juga cara membuat model sistem dinamik, pemodelan sistem *control* dan penerapannya

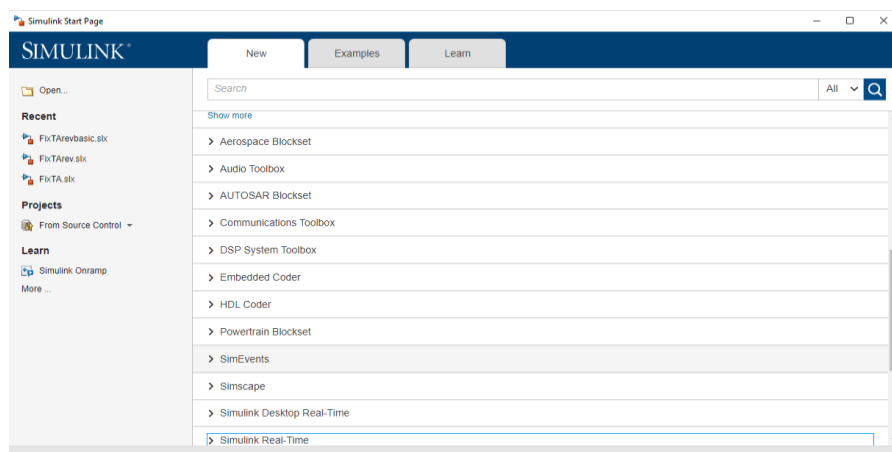
dalam bidang teknik dan sains. Sistem dinamik dapat dimodelkan dengan diagram blok, panah sinyal, *summing junction*, *blok gain*, *source* dan *sink*.

Modul *simulink* dapat dijalankan dengan mengklik icon Simulink seperti pada Gambar 2.13 dibawah ini :



Gambar 2.13 Icon Simulink

Tampilan utama dari Simulink terdiri dari kumpulan list blok-blok yang berada dalam library. Blok-blok ini dikelompokkan berdasarkan kegunaannya. Contohnya adalah yang sering digunakan dalam sistem dinamik adalah dari library : Continuous, Sink dan Sources.



Gambar 2.14 Tampilan Awal dari Simulink

2.2.8 Komponen *Regenerative brake*

2.2.8.1 *Hybrid Motor-Generator*

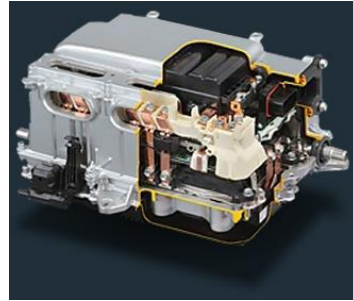
Hybrid Motor-Generator merupakan salah satu bagian dari sistem *regenerative brake* yang memiliki peran penting dalam mengubah energi dari pengereman roda menjadi energi listrik yang kemudian dapat disimpan di baterai, serta sebaliknya. Ketika pengereman terjadi, *Hybrid Motor-Generator* berfungsi sebagai generator yang mengubah putaran roda menjadi energi listrik yang selanjutnya disimpan di baterai. Pada saat kendaraan perlu berakselerasi, *Hybrid Motor-Generator* berperan sebagai motor yang mengubah energi listrik yang sebelumnya tersimpan di baterai menjadi energi mekanik untuk menggerakkan roda melalui mesin. Perubahan fungsi dari generator menjadi motor atau sebaliknya dikendalikan oleh *Engine Control Unit (ECU)*.



Gambar 2.15 Contoh *Hybrid Motor-Generator*

2.2.8.2 *Engine Control Unit (ECU)*

ECU (Electronic Control Unit), merupakan komponen kunci dalam kendaraan modern yang bertanggung jawab atas berbagai fungsi dan pengaturan dalam kendaraan. *ECU* dapat bekerja secara mandiri atau berkolaborasi dengan unit lain untuk mengelola, mengontrol, dan memantau berbagai aspek kinerja kendaraan. Tidak terbatas pada hal-hal seperti pengaturan campuran udara dan bahan bakar, kecepatan idle, waktu pengapian, batas putaran mesin (*rev limiter*), suhu pendingin mesin, *Variabel Valve Timing (VVT)*, dan banyak lagi. Pada kendaraan yang dilengkapi dengan sistem *regenerative brake*, *ECU* juga memiliki peran penting dalam mengatur fungsi dari *motor-generator hybrid*.



Gambar 2.16 ECU (*Electronic Control Unit*)

2.2.8.3 Inverter Mobil Listrik

Inverter adalah bagian dari kendaraan *hybrid* yang berfungsi sebagai perantara antara baterai dan *Hybrid Motor-Generator*. Inverter bertugas mengubah arus listrik searah (*DC*) dari baterai untuk menggerakkan motor listrik, dan sebaliknya, mengubah arus bolak-balik (*AC*) yang dihasilkan oleh *generator* menjadi arus searah (*DC*) yang digunakan untuk mengisi ulang baterai.



Gambar 2.17 Inverter Mobil Listrik

2.2.8.4 Baterai Mobil Listrik

Baterai adalah sebuah perangkat yang memiliki kemampuan untuk mengubah energi kimia yang tersimpan di dalamnya menjadi energi listrik yang dapat digunakan oleh peralatan elektronik.



Gambar 2.18 Baterai Mobil Listrik

2.2.9 *Driving Cycle*

Driving Cycle merupakan kumpulan data yang menggambarkan pola perubahan kecepatan kendaraan selama waktu tertentu. *Driving Cycle* umumnya digunakan untuk memproyeksikan performa kendaraan dan konsumsi bahan bakar. Terdapat berbagai jenis *driving cycle* yang sering digunakan dalam penelitian, termasuk *NEDC* yang dikembangkan di Eropa, *JC-08* yang berasal dari Jepang, *FTP 72/75* yang berasal dari Amerika, dan juga yang terbaru adalah *WLTP* yang diciptakan oleh para pakar dari Uni Eropa, Jepang, dan India berdasarkan acuan dari *UNECE World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations*.

Worldwide harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP) adalah sebuah *driving cycle* terbaru yang diperkenalkan pada bulan Oktober 2015. *WLTP* menggantikan peran *NEDC* yang sebelumnya umum digunakan. *WLTP* memiliki beberapa keunggulan, termasuk kesesuaian yang lebih baik dengan kondisi berkendara sehari-hari, representasi yang lebih baik dari berbagai situasi dalam berkendara, jarak tempuh yang lebih panjang, rata-rata kecepatan dan kecepatan maksimum yang lebih tinggi, serta tingkat tenaga rata-rata dan tenaga maksimum yang lebih tinggi. Selain itu, *WLTP* juga mencakup akselerasi dan deselerasi yang lebih dinamis, menjadikannya lebih representatif dalam menggambarkan pengujian kendaraan.

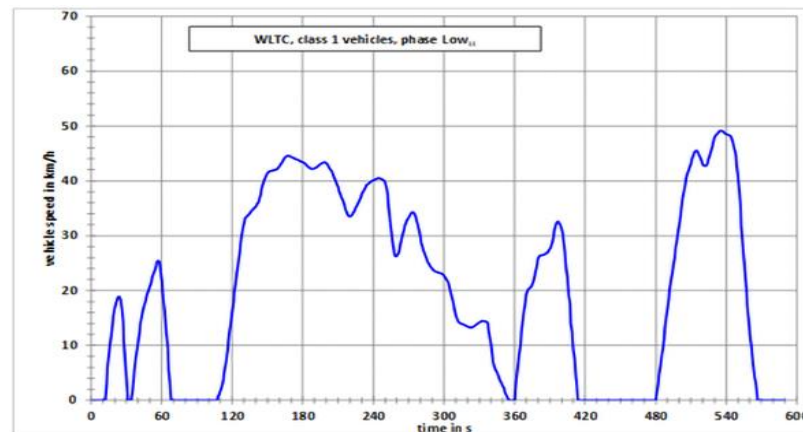
Prosedur uji ini memiliki panduan yang ketat terkait dengan beberapa aspek, termasuk kondisi dinamometer dan hambatan pergerakan kendaraan, penggunaan perpindahan gigi, perhitungan total berat kendaraan (termasuk peralatan opsional, muatan, dan penumpang), jenis bahan bakar yang digunakan, suhu lingkungan, serta pemilihan dan tekanan ban.

Terdapat tiga siklus uji *WLTC* yang berbeda yang digunakan, dan pilihan siklus ini bergantung pada kelas kendaraan yang ditentukan berdasarkan rasio daya terhadap berat kendaraan (PW_r) dalam kw per ton (daya mesin dibagi berat kendaraan):

Tabel 2.3 Klasifikasi *driving cycle WLTP Class*

<i>Class</i>	Keterangan	PW_r
<i>Class 1</i>	Kendaraan Berdaya Rendah	≤ 22
<i>Class 2</i>	Kendaraan Berdaya sedang	$22 < PW_r \leq 34$
<i>Class 3</i>	Kendaraan Berdaya Tinggi	> 34

Dalam setiap kelas, terdapat berbagai uji mengemudi yang dirancang untuk mencerminkan kondisi pengoperasian kendaraan di dunia nyata, termasuk situasi di dalam kota dan di luar kota, perjalanan di jalan raya, dan perjalanan di jalan bebas hambatan. Walaupun durasi setiap segmen uji tetap sama di seluruh kelas, namun kurva akselerasi dan kecepatan dibuat dengan variasi yang berbeda. Urutan uji berikutnya diatur berdasarkan batasan kecepatan maksimum kendaraan (v_{max}).



Gambar 2.19 *Driving cycle WLTC Class 1*

Tabel 2.4 *Data Driving Cycle WLTP Class 1*

	Low	Medium	Total
Duration, s	589	433	1022
Stop duration, s	155	48	203
Distance, m	3324	4767	8091
% of stops	26.3%	11.1%	19.9%
Maximum speed, km/h	49.1	64.4	
Average speed without stops, km/h	27.6	44.6	35.6
Average speed with stops, km/h	20.3	39.6	28.5
Minimum acceleration, m/s ²	-1.0	-0.6	
Maximum acceleration, m/s ²	0.8	0.6	

Driving Cycle class 1 ini mencakup serangkaian situasi perlambatan dan percepatan dengan batas percepatan maksimal mencapai 0,8 m/s² dan perlambatan maksimal mencapai 1 m/s². Dalam satu siklus dari *driving cycle* ini, terdapat total 16 kali proses percepatan dan 12 kali proses perlambatan, di mana pengereman penuh terjadi sebanyak 6 kali.