

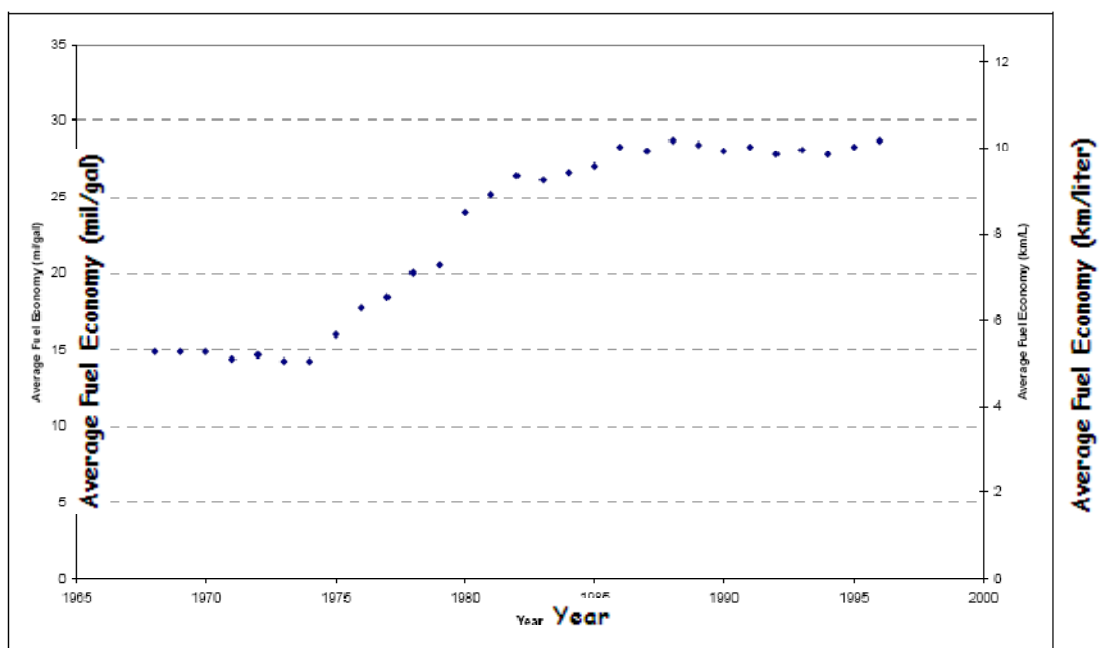
BAB II

TUNJAUAN PUSTAKA

2.1. Parameter Kendaraan terhadap Konsumsi Bahan Bakar

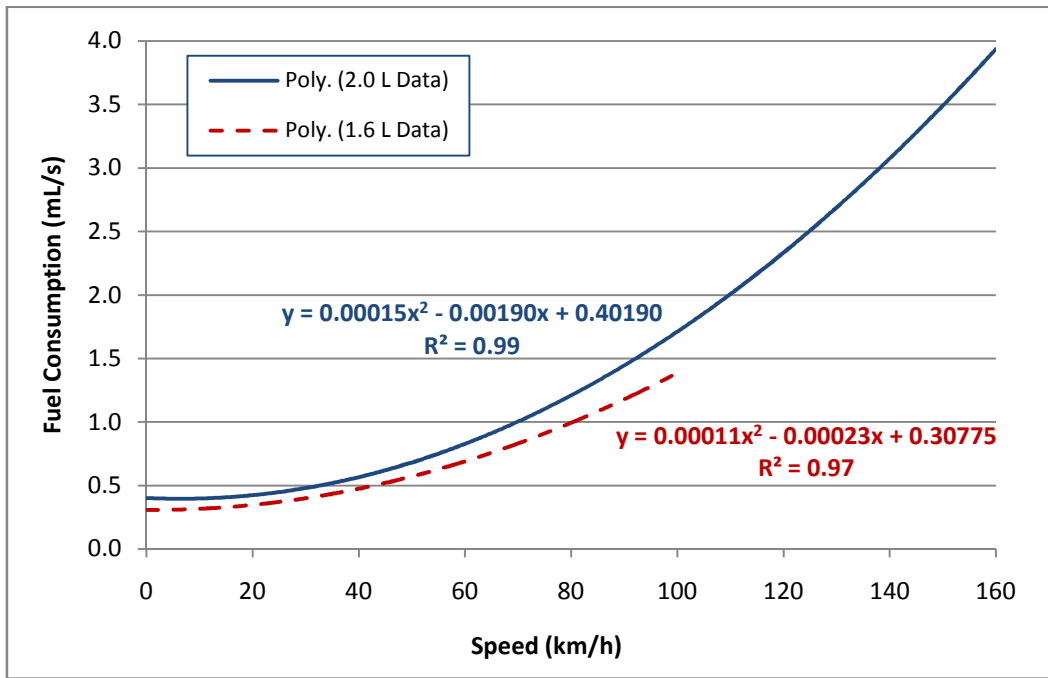
Konsumsi bahan bakar mengalami peningkatan yang tajam dalam periode tahun 1975 sampai dengan tahun 1980 (Bennet, 2001), seperti yang terlihat pada Gambar 2.1. Peningkatan ini terus berlanjut hingga tahun 2000 dan diprediksikan terus meningkat karena bertambahnya jumlah kendaraan bermotor.

Konsumsi bahan bakar pada kendaraan bermotor dipengaruhi oleh beberapa faktor. Salah satu faktor tersebut adalah adalah kecepatan kendaraan.



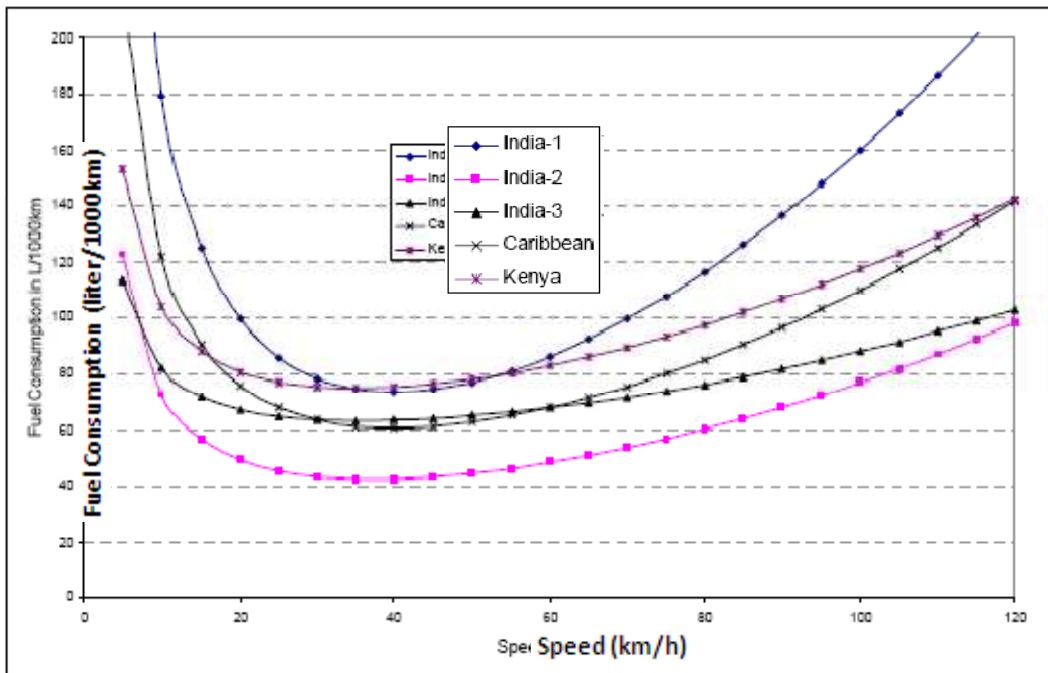
Gambar 2.1 Perubahan konsumsi bahan bakar dari tahun 1968 (Bennet, 2001)

Kecepatan kendaraan sangat berpengaruh terhadap konsumsi bahan bakar. Beberapa percobaan dan penelitian telah dilakukan untuk mengetahui hubungan ini. Pada tahun 1999 Greenwood mengadakan penelitian di Thailand pada mobil penumpang 1,6 dan 2.0 liter. Hubungan ini digambarkan pada Gambar 2.2.



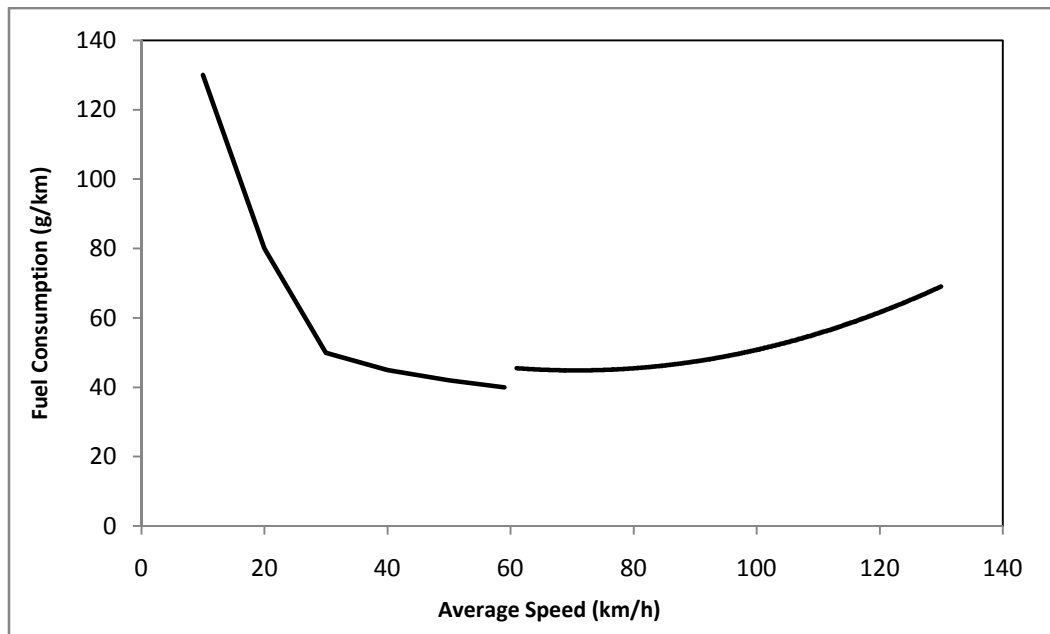
Gambar 2.2 Hubungan Kecepatan dan Konsumsi Bahan Bakar (Bennet, 2001)

Penelitian serupa juga dilakukan di negara-negara lain, diantaranya India, Caribbean dan Kenya. Grafik hubungan kecepatan terhadap konsumsi bahan bakar di negara-negara tersebut diperlihatkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Efek kecepatan terhadap konsumsi bahan bakar (Bennet, 2001)

Universitas Monas, Canberra, melakukan penelitian serupa pada tahun 2001. Hasil yang diperoleh diantaranya adalah hubungan kecepatan terhadap konsumsi bahan bakar, seperti tersaji pada Gambar 2.4.

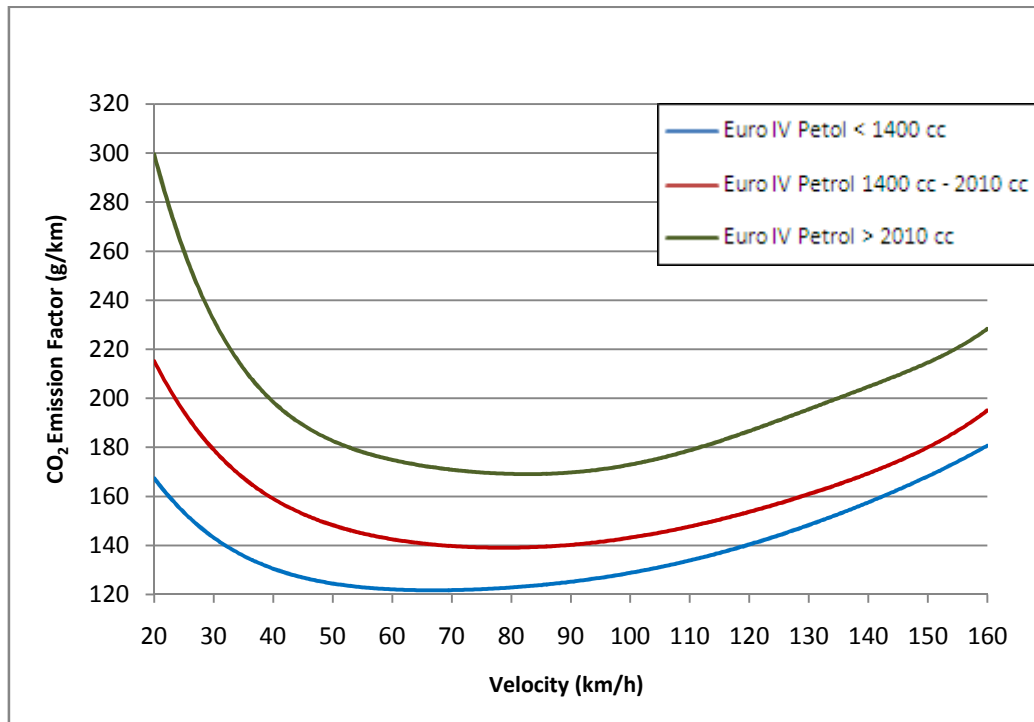


Gambar 2.4 Hubungan Laju Rata-rata dengan Konsumsi Bahan Bakar (Haworth, 2001)

Gambar 2.4 memperlihatkan bahwa konsumsi bahan bakar memiliki titik minimum pada kecepatan 60 km/jam. Artinya, efisiensi meningkat ketika laju kendaraan meningkat hingga 60 km/jam dan kembali lebih boros untuk laju di atas 60 km/jam. Ini menunjukkan bahwa kecepatan dan konsumsi bahan bakar memiliki korelasi yang memiliki titik optimum.

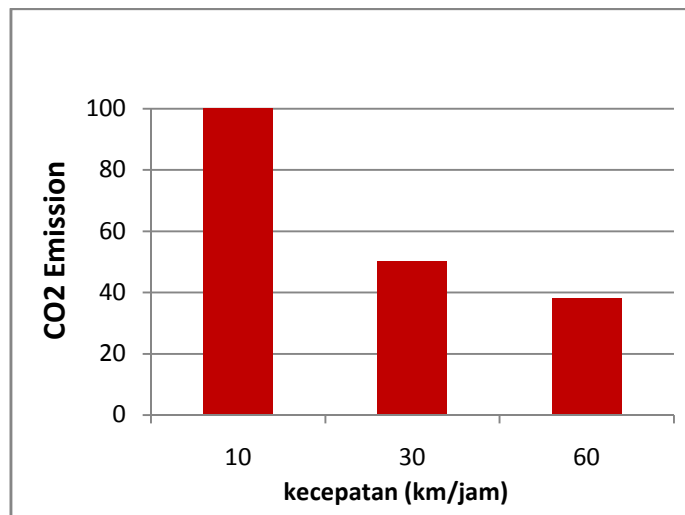
2.2 Parameter Kendaraan terhadap Emisi CO₂

Penelitian mengenai hubungan kecepatan terhadap emisi gas buang CO₂ juga telah beberapa kali dilakukan di beberapa negara. Hubungan Kecepatan Kendaraan dengan Emisi CO₂ ditunjukkan pada Gambar 2.5, yang merupakan hasil dari penelitian pada kendaraan Euro IV (Gilespie, 1992). Gambar tersebut memperlihatkan bahwa bahwa semakin tinggi kecepatan maka tingkat emisi gas buang CO₂ akan semakin rendah.

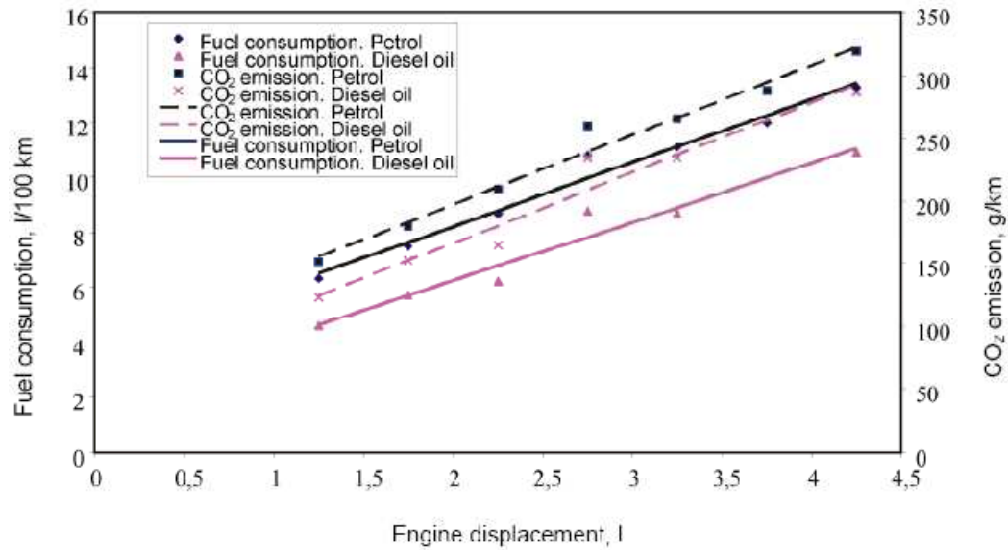


Gambar 2.5 Hubungan Kecepatan Kendaraan dengan Emisi CO₂ (Gillespie, 1992)

Hubungan yang sama juga ditunjukkan pada penelitian kecepatan terhadap emisi gas buang CO₂ seperti grafik pada Gambar 2.6 (Pulkrabek, 1997). Disamping itu, Hubungan volume mesin dengan konsumsi bahan bakar dan emisi CO₂ juga telah dikaji dan disajikan pada Gambar 2.7.

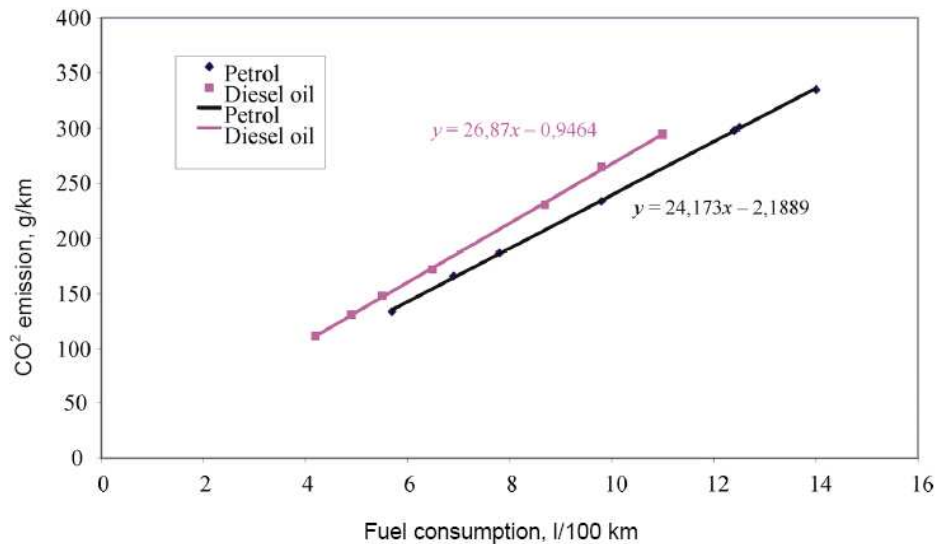


Gambar 2.6 Hubungan Kecepatan dengan Emisi CO₂ (Pulkrabek, 1997)



Gambar 2.7 Hubungan volume mesin dengan konsumsi bahan bakar dan emisi CO₂ (Mackoiti, 2007)

Pemakaian bahan bakar secara langsung mempengaruhi tingkat emisi kendaraan. Semakin tinggi pemakaian bahan bakar maka emisi yang dihasilkan semakin besar (Al Hasan, 2007). Hubungan tersebut digambarkan seperti pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Hubungan Konsumsi Bahan Bakar dengan Emisi CO₂ (Al Hasan, 2007)

2.3 Program Mengemudi Smart Driving

Smart Driving adalah metode berkendara yang hemat energi, ramah lingkungan, selamat dan nyaman. Metode *Smart Driving* menggunakan strategi perilaku pengemudi

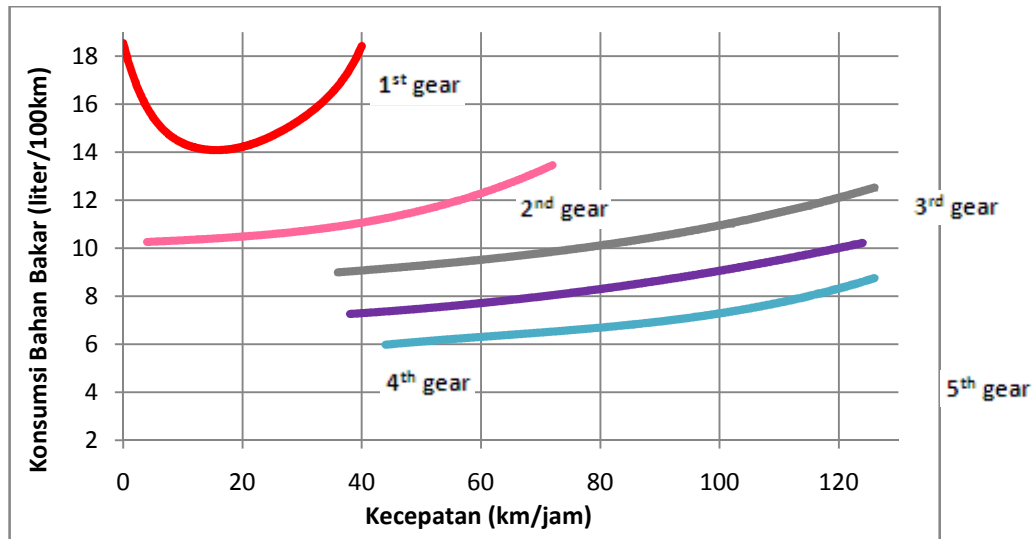
dalam berkendara agar dicapai konsumsi bahan bakar yang paling efisien. Pemakaian bahan bakar yang efisien secara otomatis juga menurunkan tingkat emisi kendaraan. Selain itu, dengan melakukan metode berkendara Smart Driving, keamanan dan kenyamanan akan meningkat, tidak hanya bagi pengemudi, tetapi juga pemakai jalan yang lain. Perilaku berkendara dalam smart driving dapat dibagi menjadi 6 (enam) perilaku yang mempengaruhi efisiensi pemakaian bahan bakar, yaitu *acceleration*, *braking*, *gear*, *idling*, *speeding* dan *start & shutdown*.

1. *Acceleration*. Perilaku ini dilakukan oleh pengemudi saat mempercepat kendaraan (*speed-up*) dengan cara menekan pedal gas.
2. *Braking*. Perilaku ini dilakukan oleh pengemudi untuk memperlambat kendaraan (*slow down*) dengan cara melepas pedal gas dan menekan pedal rem.
3. *Gear*. Perilaku ini dikaitkan dengan posisi gigi saat kendaraan bergerak.
4. *Idling*. Perilaku ini dikaitkan dengan kebiasaan pengemudi membiarkan mesin kendaraan tetap hidup meskipun sedang berhenti, seperti saat menunggu.
5. *Speeding*. Perilaku ini diamati ketika kendaraan berjalan pada kecepatan konstan pada jalan yang lurus seperti jalan tol.
6. *Start & shutdown*. Perilaku ini dikaitkan dengan kebiasaan saat menyalakan mesin kendaraan dan mematikannya.

Untuk mendukung program mengemudi ini maka penelitian ini perlu dilakukan untuk mengetahui lebih detail mengenai pengaruh dari kecepatan dan posisi gigi terhadap konsumsi bahan bakar dan emisi CO₂.

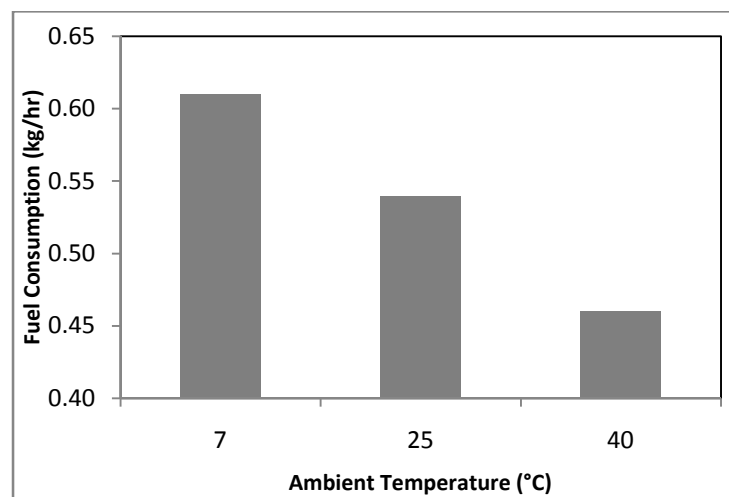
Sebuah program mengemudi di Belanda, *Ecodriving*, yaitu semacam Program *Smart Driving* di Indonesia, telah melakukan penelitian mengenai efek dari pengaruh posisi gigi terhadap konsumsi bahan bakar. Pengaruh posisi gigi juga dapat mempengaruhi konsumsi bahan bakar (Kroon, 2006). Pengaruh dari posisi gigi terhadap konsumsi bahan bakar ditunjukkan pada Gambar 2.9. Gambar tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi posisi gigi maka konsumsi bahan bakar akan semakin rendah. Selain kecepatan dan posisi gigi, penelitian mengenai faktor lain yang mempengaruhi konsumsi bahan bakar juga dilakukan, diantaranya adalah putaran mesin, temperatur lingkungan, equivalent rasio, posisi injakan pedal gas, rasio kompresi, dan sebagainya.

Hubungan temperatur lingkungan dengan konsumsi bahan bakar ditunjukkan pada Gambar 2.10.



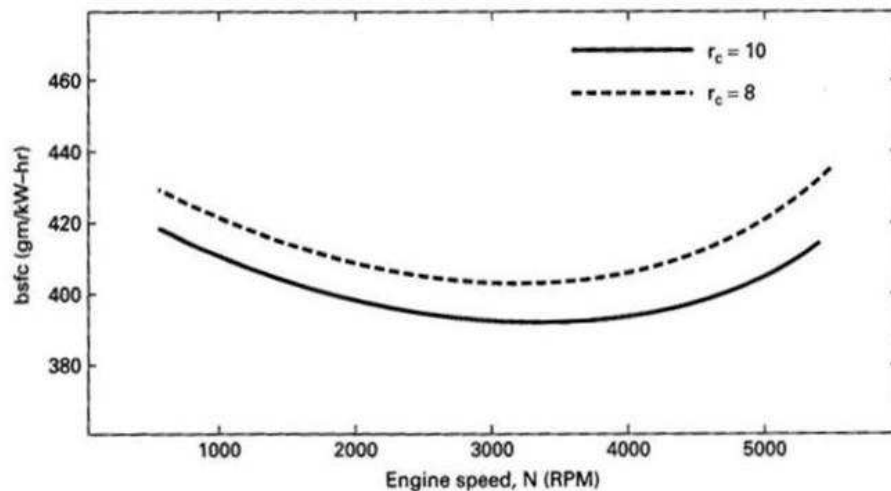
Gambar 2.9 Hubungan Posisi Gigi dan Kecepatan terhadap Konsumsi Bahan Bakar (Kroon, 2006)

Pada suhu rendah, distribusi bahan bakar dan proses penguapan kurang bagus, mengakibatkan waktu untuk mencapai temperature operasi mesin yang tidak sebentar. Hal ini membuat pembakaran tidak sempurna, sehingga membuat konsumsi bahan bakar yang tinggi (Al Hasan, 2007)..



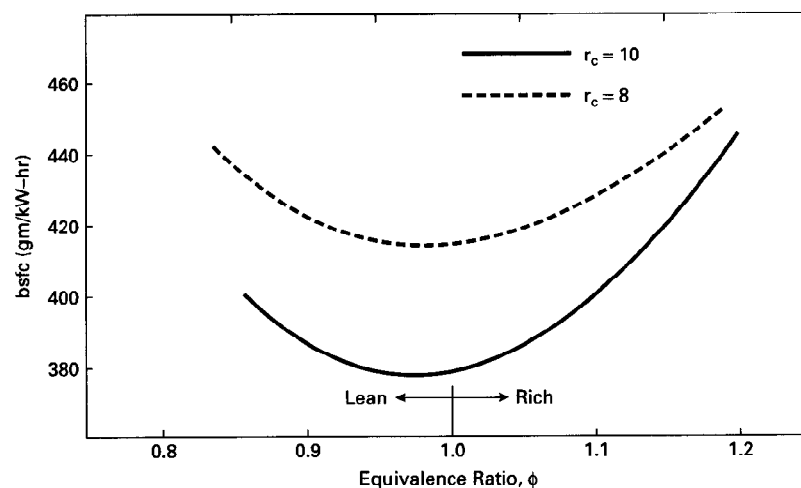
Gambar 2.10 Hubungan temperature lingkungan terhadap konsumsi bahan bakar pada sistem injeksi elektronik (Al Hasan, 2007)

Gambar 2.11 dan 2.12 menunjukkan hubungan konsumsi bahan bakar spesifik dengan kompresi rasio, putaran mesin, rasio equivalen dan volume mesin.



Gambar 2.11 Hubungan rpm dengan konsumsi bahan bakar spesifik (Pulkrabek, 1997).

Brake specific fuel consumption berkurang seiring dengan meningkatnya kecepatan putar mesin sampai pada titik minimum, kemudian meningkat pada kecepatan tinggi seperti terlihat pada gambar di atas. Konsumsi bahan bakar meningkat pada kecepatan tinggi karena kerugian-kerugian akibat gesekan yang lebih besar. Pada kecepatan mesin yang rendah, waktu tiap siklusnya lebih lama sehingga menyebabkan kerugian panas berlebih dan konsumsi bahan bakar meningkat.



Gambar 2.12 Hubungan equivalence ratio dengan konsumsi bahan bakar spesifik (Pulkrabek, 1997)

Grafik pada Gambar 2.12 menunjukkan bahwa konsumsi bahan bakar spesifik mencapai titik minimum pada kondisi lean atau miskin bahan bakar (Pulkrabek, 1997). Pada gambar tersebut, konsumsi bahan bakar spesifik mencapai titik minimum pada kondisi lean atau miskin bahan bakar.

2.4 Teori Pembakaran

2.4.1 Konsep Pembakaran

Pada motor bakar, proses pembakaran merupakan reaksi kimia yang berlangsung sangat cepat antara bahan bakar dengan oksigen yang menimbulkan panas sehingga mengakibatkan tekanan dan temperatur gas yang tinggi. Kebutuhan oksigen untuk pembakaran diperoleh dari udara yang merupakan campuran antara oksigen dan nitrogen, serta beberapa gas lain dengan persentase yang relatif kecil dan dapat diabaikan. Reaksi kimia antara bahan bakar dan oksigen yang diperoleh dari udara akan menghasilkan produk hasil pembakaran yang komposisinya tergantung dari kualitas pembakaran yang terjadi.

Pembakaran di atas dikatakan sempurna bila campuran bahan bakar dan oksigen (dari udara) mempunyai perbandingan yang tepat, hingga tidak diperoleh sisa. Bila oksigen terlalu banyak, dikatakan campuran "lean", pembakaran ini menghasilkan api oksidasi. Sebaliknya, bila bahan bakarnya terlalu banyak (atau tidak cukup oksigen), dikatakan campuran "rich", pembakaran ini menghasilkan api reduksi.

Berat massa bahan yang masuk ruang pembakaran = berat massa bahan yang keluar.

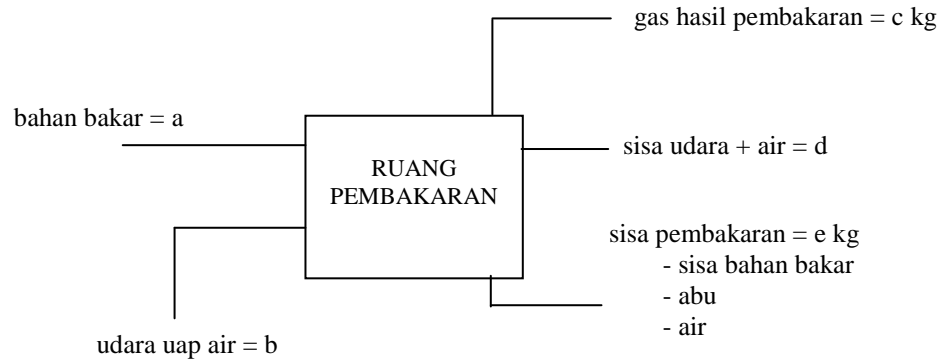
Skema kesetimbangan bahan bakar masuk hingga menjadi gas buang diperlihatkan pada Gambar 2.13. Pada kesetimbangan tersebut berlaku

$$(a + b) = (c + d + e)$$

a = berat bahan bakar kering + air (kelembaban).

b = berat udara + uap air yang terkandung dalam udara.

Air dalam d dan e = (air yang terkandung dalam bahan bakar) + (air dari kelembaban udara) + (air yang terbentuk dari reaksi pembakaran).



Gambar 2.13 Skema Sistem Penyaluran Bahan Bakar Sampai Menjadi Gas Buang
(Ferguson, 1985)

Supaya dihasilkan pembakaran yang baik, maka diperlukan syarat-syarat sebagai berikut:

1. Jumlah udara yang sesuai
2. Temperatur yang sesuai dengan penyalaan bahan bakar
3. Waktu pembakaran yang cukup
4. Kerapatan yang cukup untuk merambatkan api dalam silinder.

2.4.2 Jenis Pembakaran

Produk pembakaran campuran udara-bahan bakar dapat dibedakan menjadi:

1. Pembakaran sempurna (pembakaran ideal)

Setiap pembakaran sempurna menghasilkan karbon dioksida dan air. Peristiwa ini hanya dapat berlangsung dengan perbandingan udara-bahan bakar stoikiometris dan waktu pembakaran yang cukup bagi proses ini.

2. Pembakaran tak sempurna

Peristiwa ini terjadi bila tidak tersedia cukup oksigen. Produk pembakaran ini adalah hidrokarbon tak terbakar dan bila sebagian hidrokarbon terbakar maka aldehide, ketone, asam karbosiklis dan sebagian karbon monoksida menjadi polutan dalam gas buang.

3. Pembakaran dengan udara berlebih

Pada kondisi temperatur tinggi nitrogen dan oksigen dari udara pembakaran akan bereaksi dan akan membentuk oksida nitrogen (NO dan NO₂). Disamping itu produk yang dihasilkan dari proses pembakaran dapat berupa oksida timah, oksida halogenida, oksida sulfur, serta emisi evaporatif seperti hidro karbon ringan yang teremisi dari sistem bahan bakar (Ferguson, 1985).

2.4.3 Persamaan Reaksi Pembakaran

Persamaan reaksi pembakaran teoritis antara hidrokarbon dengan udara adalah sebagai berikut:



Angka 3,76 adalah harga perbandingan nitrogen dan oksigen di udara. Berdasarkan kesetimbangan reaksi, harga x, a dan b dapat dihitung, hasilnya adalah:

$$x = 12,5 \quad a = 8 \quad b = 9$$

sehingga reaksi tersebut di atas secara lengkap adalah:



Persamaan diatas menyatakan perbandingan stokiometris dari udara-bahan bakar yang tersedia cukup oksigen untuk mengubah seluruh bahan bakar menjadi produk yang bereaksi sempurna. AFR stoikometris tergantung komposisi kimia bahan bakar.

Komposisi produk pembakaran berbeda untuk campuran udara-bahan bakar kaya dengan campuran udara-bahan bakar miskin dan nilai AFR stoikometris tergantung komposisi bahan bakar, oleh karena itu parameter yang dipakai untuk menyatakan komposisi campuran yaitu rasio antara AFR aktual atau sebenarnya terhadap AFR stoikometris yang disebut AFR relatif (λ).

$$\gamma = \frac{(AFR)_{\text{aktual}}}{(AFR)_{\text{stoikometri}}} \quad (2.3)$$

Relative Air/Fuel Ratio ini memberikan parameter informasi yang lebih guna menetapkan komposisi campuran udara-bahan bakar yang baik.

Jika: $\gamma > 1$: maka campuran itu miskin akan bahan bakar

$\gamma = 1$: maka campuran itu stokiometris

$\gamma < 1$: maka campuran itu kaya akan bahan bakar

Jika oksigen yang dibutuhkan tercukupi, bahan bakar hidrokarbon dapat dioksidasi secara sempurna. Karbon di dalam bahan bakar kemudian berubah menjadi karbon dioksida CO_2 dan hidrogen menjadi uap air H_2O .

Jika jumlah udara yang diberikan kurang dari yang dibutuhkan secara stoichiometrik maka akan terjadi campuran kaya bahan bakar. Produk dari campuran kaya bahan bakar adalah CO , CO_2 , H_2O , dan HC (hidrokarbon tidak terbakar). Jika jumlah udara yang diberikan lebih besar dari kebutuhan maka akan terjadi campuran miskin bahan bakar.

Dalam motor bakar AFR dapat dihitung dari analisa gas buang. Dari analisa persentase gas yang meliputi CO_2 , O_2 dan N_2 sedangkan H_2O terkondensasi sehingga tidak ada dalam analisa volumetrik. Sedangkan AFR aktual dihitung dengan mengukur kebutuhan udara dan bahan bakar yang dirumuskan :

$$AFR \text{ aktual} = \frac{m_{\text{udara}}}{m_{\text{bahan bakar}}} \quad (2.4)$$

Apabila reaksi pembakaran tersebut berlangsung pada temperatur yang rendah, maka nitrogen dalam udara tidak akan ikut teroksidasi sehingga tidak akan terbentuk produk berupa oksida nitrogen (NO_x).

2.4.4 Bahan Bakar pada Mesin Bensin

Jenis Bahan Bakar Minyak Bensin merupakan nama umum untuk beberapa jenis BBM yang diperuntukkan untuk mesin dengan pembakaran dengan pengapian. Bensin adalah salah satu bahan bakar yang sering dipakai pada mesin pembakaran dalam untuk mendapatkan energy. Bensin dihasilkan oleh penyempurnaan minyak bumi yang diambil dari dalam tanah. Syarat-syarat utama pada bensin sebagai bahan bakar adalah :

1. Daya penguapan baik

Adalah kemampuan untuk bercampur dengan udara secara homogen. Sehingga Gas (campuran udara + bensin) yang masuk ke setiap silinder akan sama.

2. Tidak mengandung unsur –unsur yang dapat merusak.

Bila hasil pembakaran menyebabkan terjadinya carbon deposit pada ruang bakar, adanya sulfur yang melekat pada dinding silinder dan unsur lainnya yang bersifat abrasif (mengamplas), maka akan berkurangnya umur mesin.

3. Sifat anti knock yang baik

Knock atau knocking adalah suara ketukan yang terjadi dalam silinder pada saat akhir pembakaran sehingga pengendalian menjadi abnormal.

4. Mempunyai angka oktan yang sesuai.

Angka oktan adalah angka yang menunjukkan kemampuan bertahan bahan bakar bensin terhadap ketukan. Makin besar angka oktan ini maka akan makin mudah bahan bakar terbakar, sehingga terjadi knock akan lebih sukar, untuk bensin premium angka oktannya 88, sedang pertamax 92, dan pertamax plus 95.

Di Indonesia terdapat beberapa jenis bahan bakar jenis bensin yang memiliki nilai mutu pembakaran berbeda. Nilai mutu jenis BBM bensin ini dihitung berdasarkan nilai RON (Randon Octane Number), yang dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu:

1. Premium (RON 88)

Premium adalah bahan bakar minyak jenis distilat berwarna kekuningan yang jernih. Warna kuning tersebut akibat adanya zat pewarna tambahan (dye). Penggunaan premium pada umumnya adalah untuk bahan bakar kendaraan bermotor bermesin bensin, seperti : mobil, sepeda motor, motor tempel dan lain-lain. Bahan bakar ini sering juga disebut motor gasoline atau petrol.

2. Pertamax (RON 92)

Ditujukan untuk kendaraan yang mempersyaratkan penggunaan bahan bakar beroktan tinggi dan tanpa timbal (unleaded). Pertamax juga direkomendasikan untuk kendaraan yang diproduksi diatas tahun 1990 terutama yang telah menggunakan teknologi setara dengan electronic fuel injection dan catalytic converters.

3. *Pertamax Plus (RON 95)*

Jenis BBM ini telah memenuhi standar performance *International World Wide Fuel Charter* (WWFC). Ditujukan untuk kendaraan yang berteknologi mutakhir yang mempersyaratkan penggunaan bahan bakar beroktan tinggi dan ramah lingkungan. *Pertamax Plus* sangat direkomendasikan untuk kendaraan yang memiliki kompresi ratio $> 10,5$ dan juga yang menggunakan teknologi *Electronic Fuel Injection* (EFI), *Variable Valve Timing Intelligent* (VVTI), (VTI), *Turbochargers* dan *catalytic converters*.

2.5 Parameter Prestasi Mesin

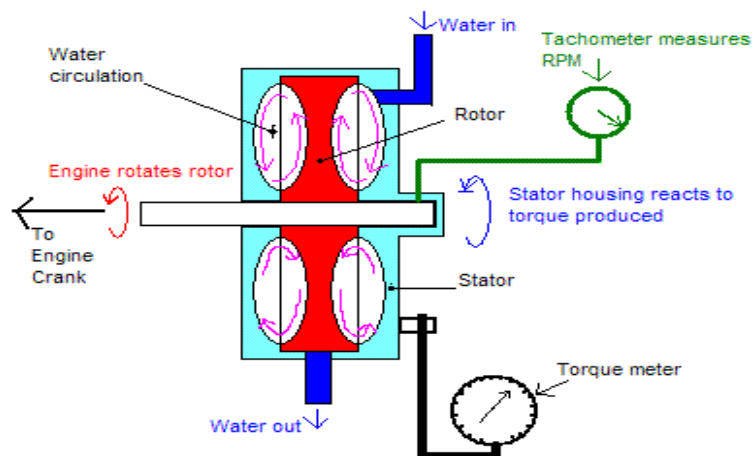
2.5.1 Torsi dan Daya Pengereman

Dinamometer digunakan untuk mengukur torsi sebuah mesin. Pada dasarnya ada tiga jenis alat pengukur daya atau torsi, yaitu dinamometer penggerak, dinamometer transmisi dan dinamometer absorpsi. Dinamometer penggerak digunakan untuk mengukur beberapa peralatan seperti turbin dan pompa serta mensuplai energi untuk menggerakkan peralatan yang akan diukur. Dinamometer transmisi adalah peralatan pasif yang ditempatkan dilokasi tertentu pada suatu mesin dengan tujuan untuk mengukur torsi pada lokasi tertentu. Dinamometer absorpsi mengubah energi mekanik sebagai torsi yang diukur, sehingga sangat berguna untuk mengukur daya atau torsi yang dihasilkan sumber daya seperti motor bakar atau motor listrik.

Pada pengujian digunakan dinamometer jenis hidraulik yang termasuk dinamometer jenis absorpsi. Dinamometer hidraulik adalah dinamometer yang menggunakan sistem hidrolis atau fluida untuk menyerap mesin. Fluida yang digunakan biasanya air, dimana air berfungsi sebagai media pendingin dan media gesek perantara. Dinamometer hidraulik ini memiliki dua komponen penting yaitu sudu gerak (rotor) dan sudu tetap (stator). Rotor terhubung dengan poros dari mesin yang akan diukur, dimana putaran dari mesin tersebut memutar rotor dinamometer. Rotor akan mendorong air didalam dinamometer, sehingga air akan terlempar menghasilkan tahanan terhadap putaran mesin dan menghasilkan panas. Aliran air secara kontinu melalui rumah (casing) sangat penting untuk menurunkan temperatur dan juga untuk melumasi seal pada poros. Sedangkan stator terletak berhadapan dengan rotor dan terhubung tetap pada casing.

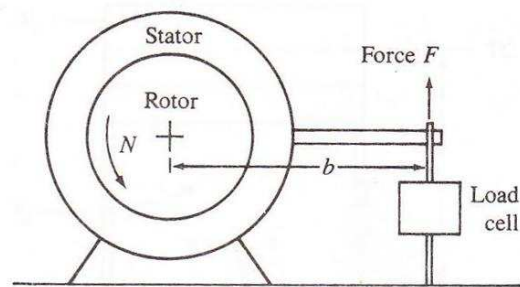
Pada casing dipasang lengan, dimana pada ujung lengan terdapat alat ukur pembebanan sehingga torsi yang terjadi dapat diukur.

Pada saat dinamometer ini dijalankan, mesin dihidupkan dan putaran mesin diatur pada putaran tertentu. Air masuk kedalam casing melalui selang dari penampungan air sehingga rongga antara rotor dan stator selalu terisi air. Air berfungsi sebagai media gesek perantara dan sebagai pendingin karena proses yang terjadi menimbulkan panas. Air yang keluar dari dinamometer tidak diperbolehkan melebihi 80°C, jika sudah mendekati temperatur tersebut dibuka katup keluar yang lebih besar. Suplai air harus bersih, dingin, dan konstan yang dapat diperoleh dari pompa.



Gambar 2.14 Dinamometer Hidraulik (Turns, 2000)

Kedudukan alat ukur harus menunjukkan angka nol (dinamometer dalam keadaan seimbang) pada waktu berhenti dan pada waktu air mengalir masuk stator tetapi mesin belum bekerja. Pengukuran kecepatan putar poros perlu dilakukan untuk mendapatkan perhitungan daya dan juga untuk menghindari kelebihan kecepatan putar yang dapat mengakibatkan kerusakan pada dinamometer.



Gambar 2.15 Skema dari prinsip operasi dinamometer (Heywood, 1988)

Torsi yang dihasilkan mesin adalah:

$$T = Fb \quad (2.5)$$

dimana F adalah gaya penyeimbangan yang diberikan dan b adalah jarak lengan torsi. Adapun daya yang dihasilkan mesin atau diserap oleh dinamometer adalah hasil perkalian dari torsi dan kecepatan sudut:

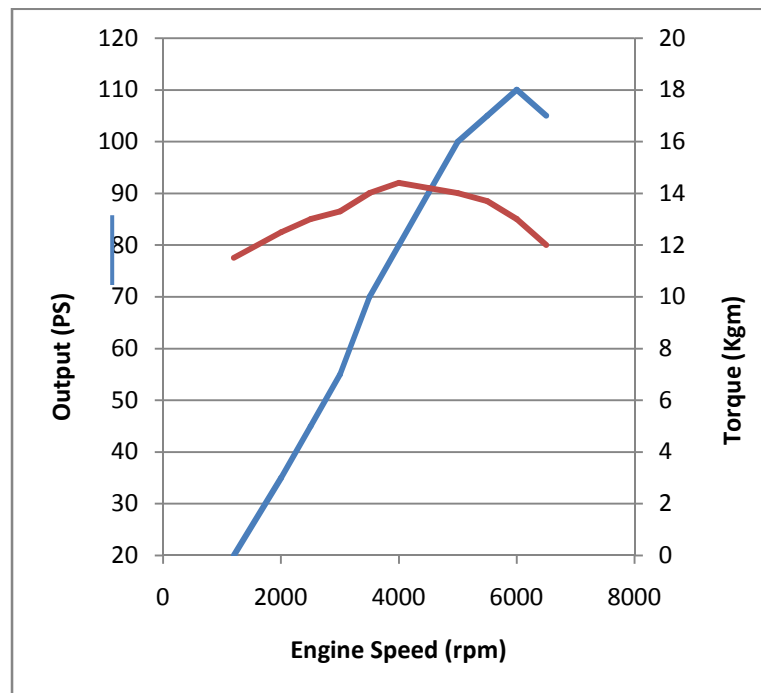
$$P = 2\pi NT \quad (2.6)$$

Dimana :

- T = torsi (Nm)
- P = daya (kW)
- F = gaya penyeimbang (N)
- b = jarak lengan torsi (m)
- N = putaran kerja (rev/s)

Sebagai catatan, torsi adalah ukuran dari kemampuan sebuah mesin melakukan kerja sedangkan daya adalah angka dari kerja yang telah dilakukan.

Besarnya daya mesin yang diukur seperti dengan yang didiskripsikan di atas dinamakan dengan *brake power*. Daya disini adalah daya yang dihasilkan oleh mesin untuk mengatasi beban, dalam kasus ini adalah sebuah rem.



Gambar 2.16 Kurva performa mesin Toyota Vios

2.5.2 Tekanan Efektif Rata-rata

Unjuk kerja mesin relatif yang terukur, dapat diperoleh dari pembagian kerja per siklus dengan perpindahan volume silinder per siklus. Parameter Ini merupakan gaya per satuan luas dan dinamakan dengan *mean effective pressure (mep)*.

$$\text{Kerja per siklus} = P n_R / N \quad (2.7)$$

dimana :

n_R = jumlah putaran engkol untuk setiap langkah kerja (2 untuk siklus 4 langkah;
1 untuk siklus 2 langkah)

dalam satuan SI:

mep = tekanan efektif rata-rata (kPa)

V_d = Volume ruang bakar (dm^3)

Tekanan efektif rata-rata juga dapat dinyatakan dengan torsi.

$$mep = \frac{6,28 n_R T}{V_d} \quad (2.8)$$

Brake mean effective pressure (bmep) didefinisikan sebagai tekanan konstan teoritik yang dapat dibayangkan terjadi pada setiap langkah kerja dari mesin untuk menghasilkan output daya yang sama dengan *brake horsepower*-BHP (*effective horsepower*). BHP itu sendiri didefinisikan sebagai jumlah daya yang terdapat pada poros, sedangkan *indicated horsepower* (IHP) didefinisikan sebagai daya yang dikonsumsi oleh motor (Heywood, 1988)

2.5.3 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik

Dalam pengujian mesin konsumsi bahan bakar diukur sebagai laju aliran massa bahan bakar per unit waktu (m_f). Konsumsi bahan bakar spesifik/*specific fuel consumption* (*sfc*) adalah laju aliran bahan bakar per satuan daya. Pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana efisiensi mesin dalam menggunakan bahan bakar untuk menghasilkan daya.

$$sfc = m_f / P \quad (2.9)$$

dimana:

sfc = konsumsi bahan bakar spesifik (kg/kW jam)

m_f = massa bahan bakar (kg/jam)

P = daya (kW)

Brake power (daya pengereman) menghasilkan *brake specific fuel consumption* (konsumsi bahan bakar spesifik pengereman) :

$$bsfc = m_f / P_b \quad (2.10)$$

dimana:

P_b = daya pengereman (kW)

2.5.4 Efisiensi

Efisiensi adalah perbandingan antara daya yang dihasilkan per siklus terhadap jumlah energi yang disuplai per siklus yang dapat dilepaskan selama pembakaran. Suplai energi yang dapat dilepas selama pembakaran adalah massa bahan bakar yang disuplai per siklus dikalikan dengan harga panas dari bahan bakar (Q_{HV}). Harga panas bahan bakar ditentukan dalam sebuah prosedur tes standar dimana diketahui massa bahan bakar yang

terbakar sempurna dengan udara dan energi dilepas oleh proses pembakaran yang kemudian diserap dengan kalorimeter. Pengukuran efisiensi ini dinamakan dengan *fuel conversion efficiency* (η_f) dan didefinisikan sebagai:

$$\eta_f = \frac{W_c}{m_f \cdot Q_{HV}} = \frac{(P n_R / N)}{(m_f \cdot n_R / N) Q_{HV}} = \frac{P}{m_f \cdot Q_{HV}} \quad (2.11)$$

dimana m_f adalah massa bahan bakar yang dimasukkan per siklus. Substitusi untuk P/m_f = berdasarkan persamaan (2.14) didapatkan:

$$\eta_f = \frac{3600}{sfc \cdot Q_{HV}} \quad (2.12)$$

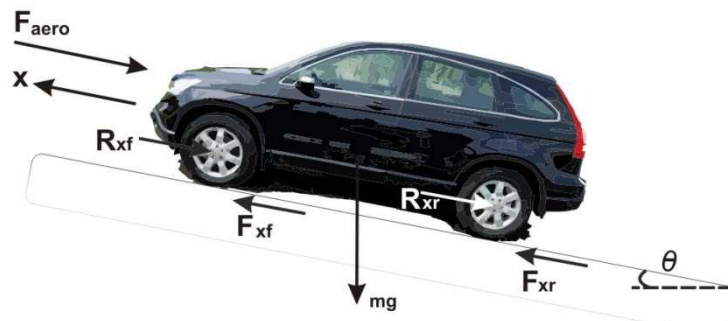
Dalam efisiensi ini besarnya Q_{HV} merupakan harga panas rendah (Q_{LHV}) dari bahan bakar yang digunakan, yaitu 42 - 44 MJ/kg (18.000 - 19.000 Btu/lbm).

2.6 Dinamika Kendaraan

Dalam sub bab ini akan ditunjukkan persamaan dinamika dari pergerakan kendaraan. Dua faktor penting dari model dinamikanya adalah *vehicle dynamics* dan *driveline dynamics*.

2.6.1 Vehicle Dynamics

Pergerakan kendaraan di jalan miring digambarkan seperti pada gambar di bawah. Gaya-gaya yang bekerja antara lain gaya di roda, gaya drag aerodinamik, gaya hambat rolling, dan gaya gravitasi.



Gambar 2.17 Gaya yang bekerja pada mobil yang bergerak pada jalan miring

Persamaan dasar untuk mendeskripsikan gerak kendaraan adalah:

$$m\ddot{x} = F_{xf} + F_{xr} - F_{aero} - R_{xf} - R_{xr} - mg \sin \theta \quad (2.13)$$

Di mana:

F_{xf}	=	Gaya roda pada roda depan
F_{xr}	=	Gaya roda pada roda belakang
F_{aero}	=	Gaya drag aerodinamik
R_{xf}	=	Gaya hambat rolling pada roda depan
R_{xr}	=	Gaya hambat rolling pada roda belakang
m	=	Massa kendaraan
g	=	Percepatan gravitasi
θ	=	Sudut kemiringan jalan

2.6.1.1 Gaya Aerodinamik

Tahanan aerodinamik bergantung pada koefisien drag yang dipengaruhi oleh bentuk mobil dan kecepatan relative mobil terhadap udara, yaitu:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho C_d A_f (v_x + v_{wind}) \quad (2.14)$$

Di mana:

ρ	=	densitas udara
C_d	=	koefisien drag aerodinamik
A_f	=	Luas frontal kendaraan
v_x	=	\dot{x} = Kecepatan kendaraan
v_{wind}	=	Kecepatan angin

Kondisi atmosfer sangat berpengaruh pada densitas udara, yang secara langsung berpengaruh pada tahanan/gaya drag aerodinamik. Densitas udara bergantung pada temperature, tekanan, dan kondisi kelembaban lingkungan. Dalam SI persamaan untuk densitas udara dalam kg/m^3 adalah:

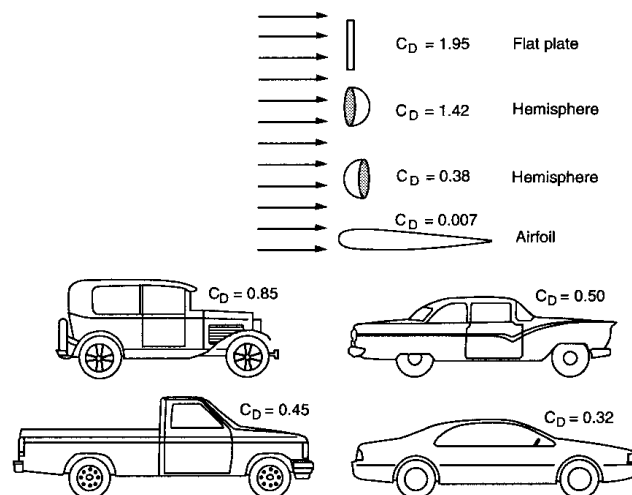
$$\rho = 1.225 \left(\frac{P_r}{101.325} \right) \left(\frac{288.16}{273.16 + T_r} \right) \quad (2.15)$$

Di mana:

P_r = Tekanan atmosfer (kPa)

T_r = Temperature udara ($^{\circ}\text{C}$)

Koefisien drag aerodinamik dapat ditentukan dari coast-down test. Pada coast-down test, sudut throttle dijaga nol, dan kendaraan mengikuti pelan-pelan di bawah pengaruh tahanan drag aerodinamik dan tahanan rollingnya. C_d tidak konstan, tetapi bervariasi sebagai fungsi dari kecepatan, arah arus, objek bentuk, ukuran benda, kerapatan fluida dan cairan viskositas.



Gambar 2.18 Koefisien drag dari berbagai bentuk (Rajamani, 2005)

Frontal area A_f adalah luas penampang kendaraan yang menabrak udara. Besarnya antara 79-84 % dari ukuran perhitungan panjang dan lebar kendaraan. Menurut Wang, 2001, hubungan antara massa kendaraan dan frontal area dapat dituliskan sebagai berikut:

$$A_f = 1.6 + 0.00056(m - 765) \quad (2.16)$$

2.6.1.2 Gaya Rolling

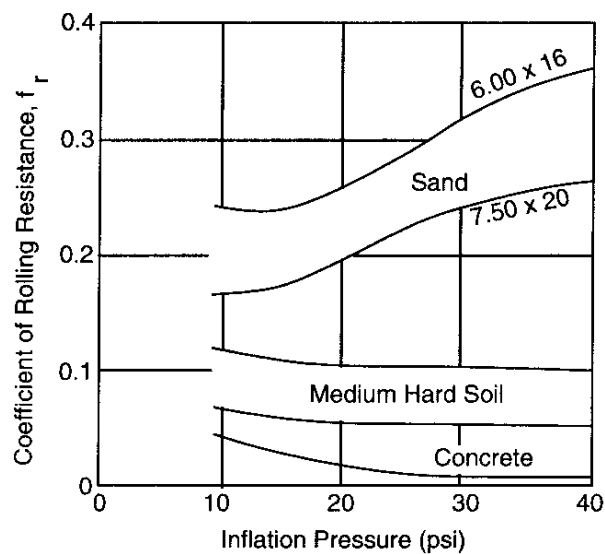
Tahanan rolling adalah tahanan yang dialami roda saat bergerak di permukaan jalan dan dihitung dengan persamaan:

$$R_x = R_{xf} + R_{xr} = f_r W \quad (2.17)$$

Di mana:

- R_{xf} = Hambatan rolling di ban depan
 R_{xr} = Hambatan rolling di ban belakang
 f_r = Koefisien gesek rolling
 W = Berat kendaraan

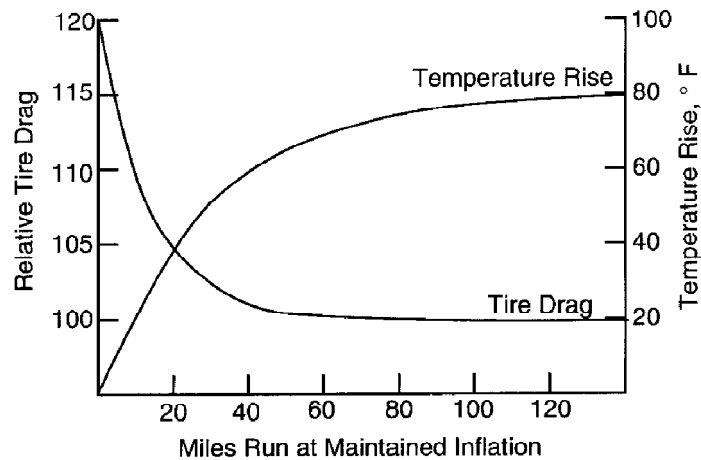
Koefisien gesek rolling bergantung pada beberapa variable seperti material dan design ban, tekanan dan temperature ban serta kecepatan kendaraan.



Gambar 2.19 Hubungan tekanan inflasi ban dengan koefisien gesek rolling (Gillespie, 1992)

Tekanan inflasi ban menentukan elastisitas ban, digabungkan dengan beban akan menentukan defleksi daerah kontak. Secara keseluruhan efek dari tahanan rolling tergantung dari elastisitas ground. Gambar 2.19 menunjukkan perubahan koefisien dengan tekanan inflasi pada tipe permukaan yang berbeda.

Temperatur ban memiliki efek yang signifikan terhadap tahanan rolling (Gillespie, 1992), seperti digambarkan pada Gambar 2.20. Gambar tersebut menunjukkan bahwa semakin lama temperatur ban akan semakin tinggi, dan sebaliknya koefisien rolling akan semakin turun.

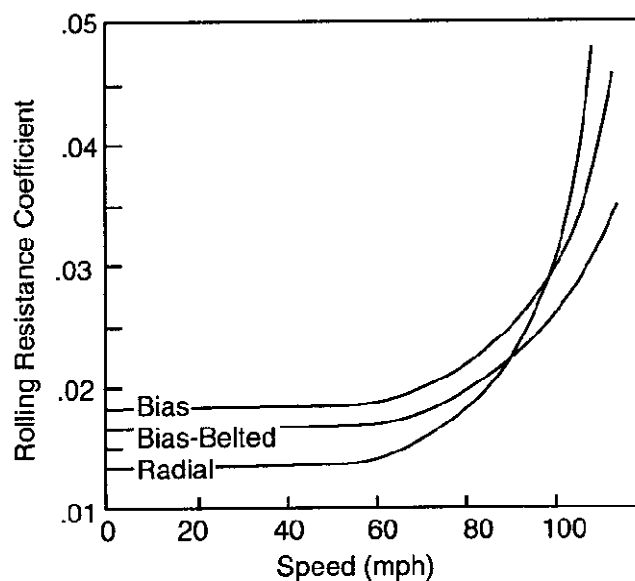


Gambar 2.20 Hubungan temperatur relatif ban dengan tahanan rolling (Gillespie, 1992)

Hubungan antara koefisien gesek dengan kecepatan untuk ban radial, bias-belted, dan bias diperlihatkan oleh grafik seperti pada Gambar 2.21. Grafik tersebut menunjukkan bahwa pada kecepatan rendah koefisien gesek rolling meningkat secara linier dengan kecepatan. Persamaan hubungan antara koefisien gesek dan kecepatan adalah sebagai berikut:

$$f_r = 0.01(1 + v/100) \quad (2.18)$$

Di mana: v = kecepatan (mph)



Gambar 2.21 Hubungan kecepatan dengan koefisien gesek rolling (Gillespie, 1992)

Pada kecepatan yang tinggi, kenaikan koefisien rolling lebih dekat ke persamaan kuadrat. Institute Teknologi Stuttgart memberikan persamaan rolling berikut:

$$f_r = f_0 + 3.24f_s(v/100)^{2.5} \quad (2.19)$$

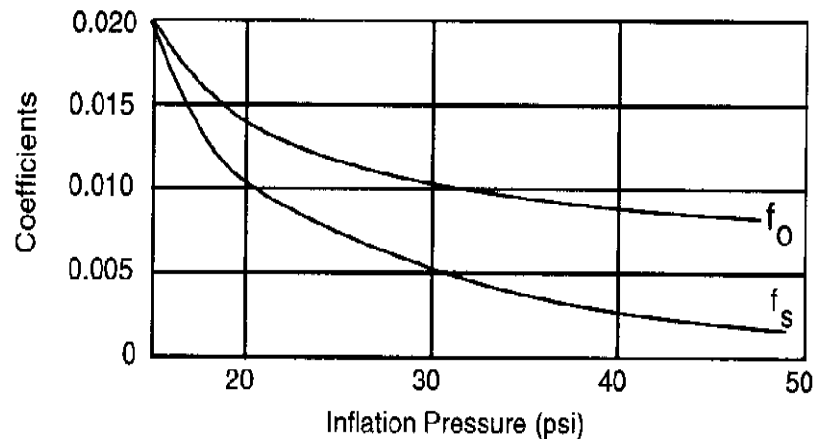
Di mana:

v = kecepatan (mph)

f_0 = koefisien dasar

f_s = koefisien efek kecepatan

Dua koefisien di atas tergantung dari tekanan inflasi ban, yaitu seperti ditunjukkan pada Gambar 2.22 berikut ini.



Gambar 2.22 Hubungan tekanan inflasi ban terhadap koefisien pers. 2.19 (Gillespie, 1992)

2.6.2 Drivelines Dynamics

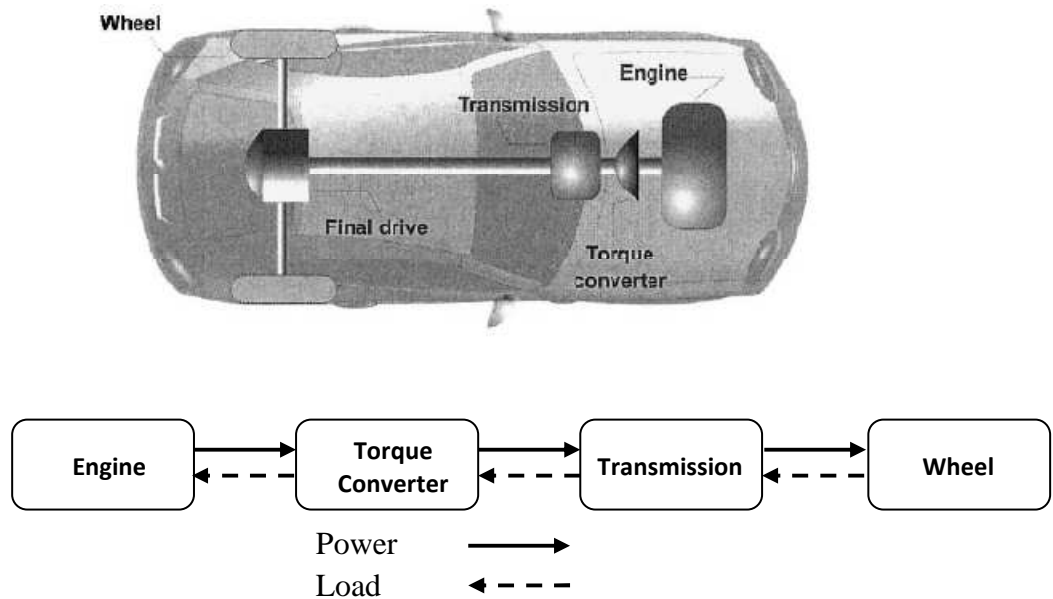
Sistem *driveline* kendaraan terdiri dari mesin pembakaran dalam, converter torsi, transmisi, dan roda. Ilustrasi *system driveline* kendaraan tersebut dan aliran daya dan beban pada *drivetrain* kendaraan dapat dilihat pada Gambar 2.23.

Persamaan untuk kendaraan yang bergerak adalah

$$m\ddot{x} = F_{xf} + F_{xr} - F_{aero} - R_{xf} - R_{xr} - mg \sin \theta$$

di mana F_{xf} dan F_{xr} adalah gaya longitudinal ban. Gaya longitudinal ban pada roda yang bergerak adalah gaya utama yang membuat kendaraan bergerak. Gaya ini

tergantung dari perbedaan antara kecepatan rotasional roda $r_{eff}\omega_w$ dan kecepatan longitudinal kendaraan \dot{x} . Kecepatan rotasional ω_w sangat dipengaruhi oleh *driveline dynamics* dari kendaraan. Komponen utama dari *driveline* ditunjukkan pada gambar di atas. Aliran daya dan beban digambarkan seperti gambar di bawah.



Gambar 2.23 Komponen dari powertrain kendaraan (Rajamani, 2005)

2.7 Mesin Electric Fuel Injection

Injeksi bahan bakar adalah suatu sistem pencampuran bahan bakar dengan udara dalam sebuah mesin pembakaran internal. Sebuah sistem injeksi bahan bakar dirancang dan dikalibrasi khusus untuk tipe bahan bakar yang akan dipakainya. Aplikasi sistem injeksi bahan bakar paling banyak digunakan pada bensin dan solar. Dengan munculnya system injeksi bahan bakar elektronik (EFI), hardware diesel dan bensin menjadi serupa.

Perbedaan utama antara karburator dan sistem injeksi bahan bakar adalah dalam pengisian bahan bakar dengan dipompa melalui nozzle kecil di bawah tekanan tinggi, sementara karburator bergantung pada tekanan rendah yang diciptakan oleh asupan udara.

2.7.1 Perkembangan Sistem Bahan Bakar Injeksi

Sistem bahan bakar injeksi dimulai dari sistem injeksi mekanis kemudian berkembang menjadi sistem injeksi elektronis. Sistem injeksi mekanis disebut juga sistem injeksi kontinyu (K-Jetronic) karena injektor menyemprotkan secara terus menerus ke setiap saluran masuk (*intake manifold*). Sedangkan sistem injeksi elektronis atau yang lebih dikenal dengan *Electronic Fuel Injection* (EFI), volume dan waktu penyemprotannya dilakukan secara elektronik. Sistem EFI kadang disebut juga dengan EGI (Electronic Gasoline Injection), EPI (Electronic Petrol Injection), PGM-FI (Programmed Fuel Injection) dan Engine Management.

Sistem injeksi bahan bakar elektronik (EFI) komersial yang pertama adalah sistem Electrojectus, dikembangkan oleh Bendix corporation dan ditawarkan oleh American Motor (AMC) pada tahun 1957.

Bosch mengembangkan sistem injeksi bahan bakar elektronik, yang disebut *D-Jetronic* (*D* untuk *Druck*, Jerman untuk "tekanan"), yang pertama kali digunakan pada VW 1600TL pada tahun 1967. Bosch-Jetronic menggantikan semua sistem D dengan sistem *K-Jetronic* dan *L-Jetronic* pada tahun 1974. L-Jetronic pertama kali muncul menggunakan aliran udara mekanis (*L* untuk *Luft*, Jerman berarti "udara") yang menghasilkan sinyal yang sebanding dengan "volume udara". Pendekatan ini memerlukan sensor tambahan untuk mengukur tekanan atmosfer dan suhu, untuk akhirnya menghitung "massa udara". L-Jetronic secara luas diadopsi pada mobil-mobil Eropa masa itu, dan model Jepang beberapa waktu kemudian.

Pada tahun 1982, Bosch memperkenalkan sebuah sensor yang secara langsung mengukur massa aliran udara ke dalam mesin, pada sistem L-Jetronic mereka. Bosch menyebut ini *LH-Jetronic* (*L* untuk *Luftmasse* dan *H* untuk *Hitzdraht*, Jerman untuk "massa udara" dan "kawat panas"). Sensor massa udara menggunakan kawat platinum dipanaskan ditempatkan dalam aliran udara masuk. Laju pendinginan kawat adalah sebanding dengan massa udara mengalir melalui kawat. Karena sensor kawat panas langsung mengukur massa udara, kebutuhan tambahan dan sensor suhu tekanan

dihilangkan. Sistem LH-Jetronic juga sistem EFI pertama yang sepenuhnya digital, pendekatan standar sekarang .

2.7.2. Prinsip Kerja Sistem EFI

Istilah sistem injeksi bahan bakar (EFI) dapat digambarkan sebagai suatu sistem yang menyalurkan bahan bakarnya dengan menggunakan pompa pada tekanan tertentu untuk mencampurnya dengan udara yang masuk ke ruang bakar. Pada sistem EFI dengan mesin berbahan bakar bensin, pada umumnya proses penginjeksian bahan bakar terjadi di bagian ujung intake manifold/manifold masuk sebelum *inlet valve* (katup/klep masuk). Pada saat *inlet valve* terbuka, yaitu pada langkah hisap, udara yang masuk ke ruang bakar sudah bercampur dengan bahan bakar.

Secara ideal, sistem EFI harus dapat mensuplai sejumlah bahan bakar yang disemprotkan agar dapat bercampur dengan udara dalam perbandingan campuran yang tepat sesuai kondisi putaran dan beban mesin, kondisi suhu kerja mesin dan suhu atmosfer saat itu. Sistem harus dapat mensuplai jumlah bahan bakar yang bervariasi, agar perubahan kondisi operasi kerja mesin tersebut dapat dicapai dengan unjuk kerja mesin yang tetap optimal.

2.7.3. Komponen dan Konstruksi Dasar Sistem EFI

Untuk menentukan jumlah bahan bakar yang diperlukan, dan yang dikirim ke dalam mesin, dikenal sebagai fuel metering atau pengukuran bahan bakar. Awal sistem injeksi menggunakan metode mekanis untuk mengukur bahan bakar (non elektronik, atau injeksi bahan bakar mekanis). Hampir semua sistem elektronik menggunakan solenoida elektronik (injector) untuk mengabutkan bahan bakar.

Skema bahan bakar injeksi memiliki pengaturan yang sama. Ada sebuah sensor massa udara atau sensor tekanan pada intake manifold, biasanya dipasang di tabung udara dari kotak filter udara ke throttle body, atau dipasang langsung ke throttle body itu sendiri. *The throttle body* memiliki sensor posisi throttle yang dipasang padanya, biasanya di katup kupu-kupu dari *throttle body*. Sensor posisi throttle (TPS) melaporkan ke komputer posisi katup throttle kupu-kupu, yang menggunakan ECM untuk menghitung

beban pada mesin. Sistem bahan bakar terdiri dari sebuah pompa bahan bakar (biasanya dipasang pada-tangki), tekanan bahan bakar regulator, line bahan bakar (terdiri dari baik plastik kekuatan tinggi, logam, atau karet kuat) dan sebuah rel injector bahan bakar yang terhubung ke injector bahan bakar. Ada sebuah sensor pendingin suhu yang melaporkan suhu mesin ke ECM, yang digunakan untuk menghitung rasio bahan bakar. Dalam sistem pengisian bahan bakar sekuensial ada sensor posisi camshaft, yang menggunakan ECM untuk menentukan injektor bahan bakar untuk pembakaran. Komponen terakhir adalah sensor oksigen. Setelah kendaraan temperaturnya naik, sinyal dari oksigen sensor akan melakukan pengapian bahan bakar.

Injektor bahan bakar itu berfungsi sebagai nosel yang berguna untuk mengeluarkan bahan bakar.

Sistem EFI memerlukan beberapa komponen perangkat, dalam rangka untuk menduplikasi semua fungsi karburator. Poin yang patut dicatat pada saat pengukuran bahan bakar adalah awal sistem EFI yang cenderung ambiguitas diagnostik. Sistem EFI baru muncul sejak adanya OBD II dengan sistem diagnostik, ini dapat memudahkan untuk mendiagnosa karena peningkatan kemampuan untuk memonitor data realtime stream dari sensor individu. Hal ini memberikan umpan balik realtime teknisi untuk mendiagnosis penyebab drivability, dan secara dramatis dapat mempersingkat jumlah langkah-langkah diagnostik yang diperlukan untuk memastikan penyebab kegagalan yang terjadi, serta ada hubungannya dengan karburator.

2.7.4. Kelemahan dan Kelebihan Sistem EFI

Sistem Electronic Fuel injection (EFI) memiliki kelemahan dibanding sistem bahan bakar konvensional, diantaranya adalah:

1. Harga lebih mahal
2. Perbaikan lebih sulit
3. Kerusakan kecil pada komponen dapat mengakibatkan mesin mati

4. Memerlukan alternator yang lebih besar kemampuannya
5. Peka terhadap kotoran dan air dalam sistem
6. Suku cadang terbatas

Di lain pihak, sistem elektronik fuel injection ini juga memiliki kelebihan, yaitu:

1. Pemasukan udara lebih baik
2. Daya mesin lebih besar
3. Polusi gas buang lebih sedikit
4. Pemakaian bensin lebih hemat
5. Bunyi mesin lebih halus

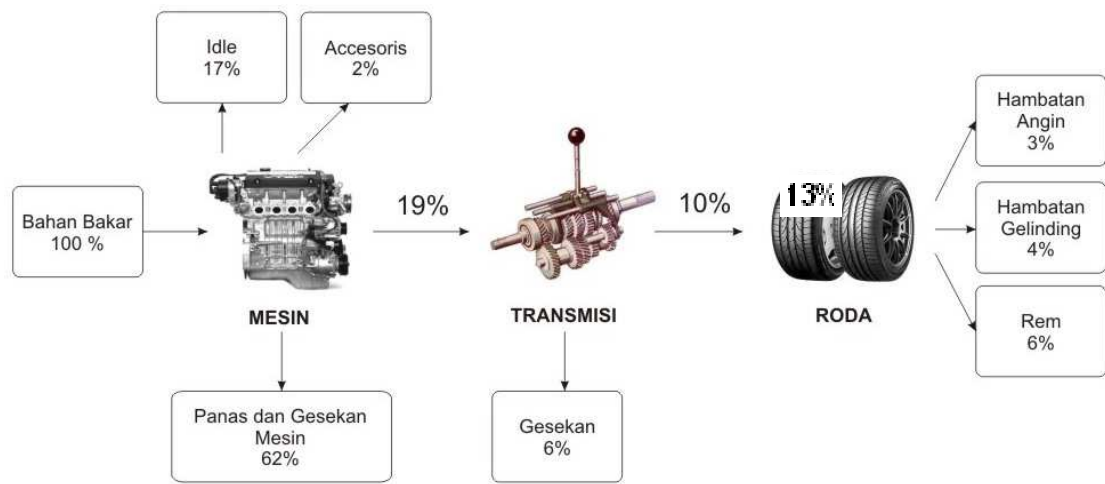
2.8 Konsumsi Bahan Bakar

Menurut Heywood (1988), salah satu faktor penting bagi pengguna mesin adalah konsumsi bahan bakar. Banyak faktor yang mempengaruhi konsumsi bahan bakar. Faktor-faktor yang mempengaruhi laju konsumsi bahan bakar ini secara garis besar dibagi dalam empat kelompok yaitu kendaraan, lingkungan, pengemudi, dan kondisi lalu lintas. Variabel utama dalam lalu lintas meliputi kecepatan, jumlah berhenti, dan percepatan. Tingkat agresifitas pengemudi terlihat dari tingkat kecepatan dan percepatan yang akan mempengaruhi laju konsumsi bahan bakar.

Faktor-faktor yang berhubungan dengan lingkungan pengendalian yang dapat mempengaruhi konsumsi bahan bakar adalah kemiringan jalan, kondisi angin, temperatur lingkungan, ketinggian, jenis permukaan jalan (misalnya aspal, tanah, paving block), dan kondisi permukaan jalan (kekasaran, basah, kering)

Karakteristik kendaraan yang mempengaruhi pemakaian bahan bakar meliputi massa total kendaraan, ukuran mesin, jenis mesin (misalnya bensin, diesel, listrik, hibrid), jenis transmisi, jenis dan ukuran ban, tekanan ban, kelurusan roda, kondisi sistem rem dan pembakaran, temperatur mesin, viskositas oli, spesifikasi bahan bakar, bentuk kendaraan, dan tingkat penggunaan peralatan tambahan seperti pengkondisi udara dan wiper.

Pemakaian bahan bakar sangat bergantung pada jumlah energi yang diperlukan, tidak hanya untuk bergerak, tetapi juga untuk mengkompensasi energi yang hilang akibat kerugian-kerugian di dalam engine, gearbox, komponen bergerak lain, dan pemakaian energi untuk auxiliary, serta resistansi yang terjadi akibat gerakan kendaraan. Pembagian aliran energi dari bahan bakar di jalan perkotaan digambarkan seperti gambar 2.24 berikut ini.



Gambar 2.24 Persentase aliran energi dari bahan bakar di jalan perkotaan

Persamaan konsumsi bahan bakar menurut PERE (2004) adalah sebagai berikut:

$$FR = \frac{\varphi \left[kNV + \frac{(P_b/\eta_t + P_{acc})}{\eta} \right]}{LHV} \quad (2.20)$$

di mana:

FR = Fuel rate, laju konsumsi bahan bakar (g/s)

φ = Rasio ekuivalen bahan bakar udara (≈ 1)

k = Gesekan mesin

$k = 3.283 \text{ bar} + (0.000515 \text{ bar/rps})N$

$N = (N/v)_{top} * (60 \text{ rps/rpm}) * (g/g_{top})v$

$(N/v)_{top}$ = Rasio rpm terhadap kecepatan pada gigi tertinggi (≈ 35.6)

(g/g_{top}) = Rasio gigi pada berbagai posisi gigi

N = Putaran mesin (rpm)
 V = Volume mesin (liter)
 P_b = Daya pengereman (meliputi tahanan aerodinamik & tahanan rolling, seperti telah dibahas pada sub bab vehicle dynamic)

$$P_b = mv [a(1+\epsilon) + g*\text{grade} + g*C_R] + 0.5*\rho*C_D*A_r*v^3$$

m = massa mobil

v = kecepatan mobil

ϵ = faktor massa untuk massa yang berputar (≈ 0.1)

grade = kemiringan jalan

C_R = tahanan rolling

ρ = kerapatan udara ($\approx 1.2 \text{ kg/m}^3$)

C_D = koef. seret aerodinamik

A_r = luas area, dapat dihitung dengan cara:

$$A_r = (H-GC)*W*0.93$$

g = percepatan gravitasi

η_t = efisiensi transmisi dan final drive (≈ 0.88)

P_{acc} = daya aksesoris ($\approx 0.75 \text{ kW}$)

η = efisiensi mesin (≈ 0.4)

LHV = nilai kalor rendah bahan bakar ($\approx 43.35 \text{ MJ/kg}$)

Hasil-hasil penelitian yang pernah dilakukan menunjukkan hubungan konsumsi bahan bakar dengan perilaku berkendara. Hubungan antara konsumsi bahan bakar dan kecepatan memiliki bentuk U. Konsumsi bahan bakar yang tinggi tidak selalu berhubungan dengan kecepatan yang tinggi. Konsumsi bahan bakar yang tinggi juga terjadi pada kecepatan yang relatif rendah dan menjadi optimum pada kecepatan sekitar 60 km/jam.

Cara umum untuk mengukur penggunaan bahan bakar mobil adalah:

1. *Fuel consumption* : jumlah bahan bakar yang digunakan per satuan jarak atau liter per 100 kilometer (L/100 km). Langkah ini biasa digunakan di Eropa, Cina,

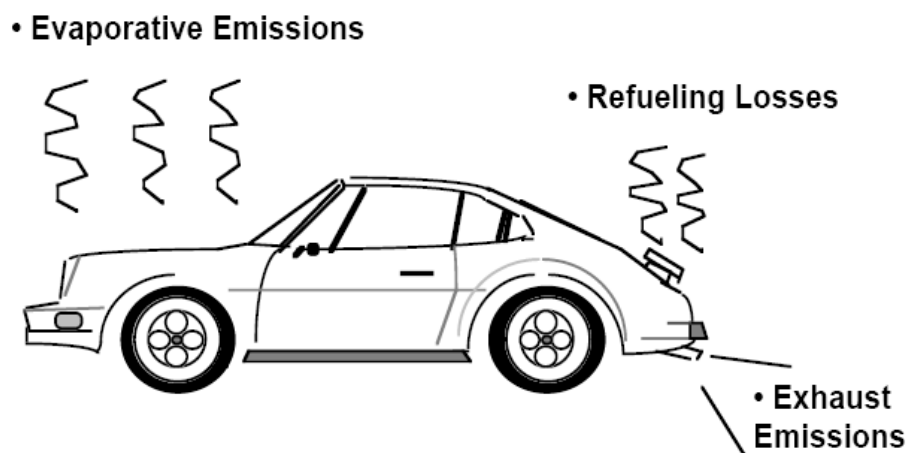
Australia dan Selandia Baru. Jika nilai yang lebih rendah berarti konsumsi bahan bakar yang lebih baik.

2. *Fuel economy* : jarak yang ditempuh per satuan bahan bakar yang digunakan biasanya dalam satuan mil per gallon (mpg) atau kilometer per liter (km/L). Langkah ini biasanya digunakan di Inggris dan Amerika Serikat. Jika mpg digunakan, penting untuk mengetahui gallon mana yang dimaksud, US gallon atau imperial gallon. Imperial gallon sekitar 20% lebih besar dari US gallon. Nilai-nilai yang lebih tinggi berarti lebih baik dari mpg *fuel economy*.

Untuk mengkonversi antara L/100 km dan mil per US gallon, bagilah 235,2 dengan jumlah tersebut. Untuk mil per imperial gallon, gunakan 282 bukan 235. Misalnya, untuk mengkonversi dari 30 mpg (US) ke L/100 km, membagi 235 dengan 30, memberikan 7,83 L/100 km; atau dari 10 L/100 km ke mpg US, bagilah 235 oleh 10 (23,5 mpg). Untuk mengkonversi dari L/100 km ke km / L, membagi antara 100 dan menghitung timbal balik hasil.

2.9 Emisi Gas Buang

Kekuatan untuk menggerakkan sebuah mobil berasal dari pembakaran bahan bakar di mesin. Polusi dari mobil berasal dari produk hasil proses pembakaran ini (knalpot) dan dari penguapan dari bahan bakar itu sendiri.



Gambar 2.25 Emisi pada Mobil

Polutan yang ditemukan dari polusi kendaraan adalah:

1. Hidrokarbon

Emisi hidrokarbon merupakan hasil ketika molekul-molekul bahan bakar dalam mesin tidak membakar atau membakar hanya sebagian. Hidrokarbon bereaksi dengan nitrogen oksida dan sinar matahari untuk membentuk tingkat dasar ozon, komponen utama kabut asap. Hydrocarbons (HC) adalah kelompok polutan yang bereaksi membentuk ozon. Ozon adalah kabut putih yang dapat mengiritasi sistem pernapasan, penurunan fungsi paru, dan memperburuk penyakit paru-paru kronis (seperti asma) juga berpotensi menyebabkan kanker.

2. Nitrogen Oksida (NO_x)

Di bawah tekanan tinggi dan kondisi suhu mesin, nitrogen dan atom oksigen di udara bereaksi membentuk berbagai nitrogen oksida, kolektif dikenal sebagai NO_x. Nitrogen oksida, seperti hidrokarbon, adalah prekursor ke pembentukan ozon. Mereka juga berperan dalam pembentukan hujan asam.

3. Karbon Monoksida

Karbon monoksida (CO) adalah produk dari pembakaran tidak lengkap dan terjadi ketika karbon dalam bahan bakar dioksidasi sebagian kemudian teroksidasi penuh menjadi karbon dioksida (CO₂).

4. Karbon Dioksida

Dalam beberapa tahun terakhir, US Environmental Protection Agency (EPA) telah mulai memperhatikan karbon dioksida, sebuah produk dari pembakaran "sempurna", sebagai keprihatinan polusi. Karbon dioksida tidak secara langsung mengganggu kesehatan manusia, tetapi itu adalah sebuah "gas rumah kaca" yang memerangkap panas bumi dan memberikan kontribusi kepada potensi pemanasan global.