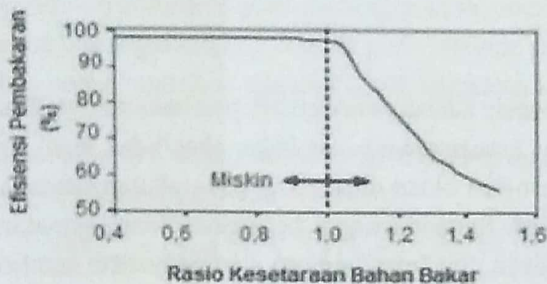


### 3.3 EFISIENSI PEMBAKARAN

Walaupun aliran udara dan bahan bakar ke mesin dikendalikan tepat pada kondisi stoikiometri, pembakaran tidak akan “sempurna”, dan komponen selain dari  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , dan  $\text{N}_2$  dijumpai dalam produk buang. Hal ini terutama disebabkan sangat singkatnya waktu yang tersedia untuk setiap siklus guna pencampuran udara dan bahan bakar secara sempurna. Beberapa molekul bahan bakar tidak bergabung dengan molekul oksigen untuk bereaksi dengannya sehingga sejumlah kecil bahan bakar maupun oksigen berakhir di buangan.

Dalam praktik, gas buang dari motor pembakaran dalam menghasilkan produk pembakaran tidak sempurna (misalnya, karbon monoksida,  $\text{CO}$ ; hidrokarbon tidak terbakar,  $\text{HC}$ ; jelaga) serta produk-produk pembakaran sempurna ( $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$ ). Saat beroperasi dengan campuran miskin, jumlah produk pembakaran yang tidak sempurna kecil. Tetapi, saat beroperasi dengan campuran kaya maka jumlah tersebut menjadi lebih besar karena tidak cukup tersedia oksigen untuk menyelesaikan pembakaran.

Hubungan antara efisiensi pembakaran dengan rasio kesetaraan bahan bakar-udara ditunjukkan dalam Gambar 3-3.



Efisiensi pembakaran untuk motor bensin dengan campuran miskin berada pada kisaran 95% sampai 98%.

**Gambar 3-3** Efisiensi pembakaran sebagai fungsi rasio kesetaraan bahan bakar

Untuk campuran kaya, di mana udara tidak cukup untuk bereaksi dengan semua bahan bakar, efisiensi pembakaran terus menurun ketika campuran semakin kaya. Motor diesel secara keseluruhan selalu beroperasi dengan campuran miskin dan efisiensi pembakaran yang dimiliki biasanya sekitar 98%.

### 3.4 BAHAN BAKAR HIDROKARBON

Hidrokarbon ( $\text{HC}$ ) merupakan senyawa di mana setiap molekulnya hanya mengandung hidrogen dan karbon yang dapat dibakar (dioksidasi), membentuk air ( $\text{H}_2\text{O}$ ) atau karbon-dioksida ( $\text{CO}_2$ ).

Bahan bakar hidrokarbon mempunyai variasi berat karbon dari 83% sampai 87% dan berat hidrogen dari 11% sampai 14%. Pada umumnya bobot molekular komponen yang lebih besar mempunyai temperatur didih lebih tinggi.

#### 3.4.1 BAHAN BAKAR BENJIN

Bahan bakar bensin merupakan campuran senyawa hidrokarbon cair yang sangat *volatile*. Bensin terdiri dari parafin, naftalene, aromatik, dan olefin, bersama-sama dengan beberapa senyawa organik lain dan kontaminan. Struktur molekulnya terdiri dari  $\text{C}_4 - \text{C}_9$  (parafin, olefin, naftalen dan aromatik).

Beberapa karakteristik penting bahan bakar hidrokarbon di antaranya volatilitas, nilai oktan serta kandungan energi. Karakteristik nilai oktan merupakan ukuran seberapa tahan bensin terhadap ledakan prematur (*premature detonation*) atau ketukan (*knocking*).

#### 3.4.1.1 KARAKTERISTIK VOLATILITAS

Kemudahan bensin untuk menguap disebut **volatilitas**. Bensin volatilitas tinggi menguap sangat cepat, bensin volatilitas rendah lambat menguap. Bensin yang baik harus memiliki volatilitas yang tepat untuk iklim di mana bensin tadi digunakan.

Jika bensin terlalu mudah menguap dalam sistem bahan bakar maka akan dihasilkan suatu kondisi yang disebut **sumbatan uap** (*vapor lock*). Sumbatan uap adalah pembentukan uap dalam saluran bahan bakar dalam jumlah yang cukup untuk mencegah aliran bensin melalui sistem. Kondisi ini menyebabkan kendaraan kekurangan suplai bahan bakar. Di musim panas dan di daerah beriklim panas, bahan bakar dengan volatilitas yang rendah mengurangi kecenderungan sumbatan uap.

Karakteristik volatilitas dibutuhkan pada saat start-dingin, pemanasan mesin dan pendistribusian campuran udara/bahan bakar di dalam silinder. Karakteristik volatilitas ditentukan melalui uji destilasi berdasarkan standar ASTM D-86.

#### 3.4.1.2 KARAKTERISTIK PEMBAKARAN

Karakteristik yang paling dibutuhkan pada bensin adalah karakteristik pembakarannya. Karakteristik bahan bakar yang menggambarkan kemampuan bahan bakar akan/tidak menyala sendiri disebut **angka oktan** atau **oktan**. Peringkat oktan didasarkan pada ukuran kemampuan bahan bakar (bensin) menahan detonasi. Semakin tinggi peringkat oktan, semakin kecil kemungkinan untuk menghasilkan ledakan dini (*pre-ignition*) atau penyalaan sendiri (*self-ignition*). Kecenderungan penyalaan sendiri menimbulkan gejala ketukan (*knocking*). Kecenderungan ketukan ini berhubungan dengan rasio kompresi motor.

Motor dengan rasio kompresi rendah dapat menggunakan bahan bakar dengan angka oktan lebih rendah, tetapi motor berkompresi tinggi harus menggunakan bahan bakar berkadar oktan tinggi untuk menghindari pengapian sendiri dan ketukan.

Dua metode yang digunakan untuk mengukur nilai oktan bahan bakar bensin, yaitu **metode motor** (*motor method*) berdasar acuan ASTM D-2700 dan **metode riset** (*research method*), berdasar acuan ASTM D-2699, yang dinyatakan dengan **Angka Oktan Motor** (*Motor Octane Number, MON*) dan **Angka Oktan Riset** (*Research Octane Number, RON*).

Nilai MON dan RON diukur dengan motor *Cooperative Fuel Research* (CFR), dengan bahan bakar acuan utama **normal heptana** (*n-heptana*) dan **isooktana**.

Persentase *isooktan* di dalam campuran bahan bakar menyatakan angka oktan yang diberikan ke bahan bakar uji. Misalnya, bahan bakar yang mempunyai karakteristik ketukan yang sama sebagai campuran 87% *isooktan* dan 13% *n-heptane* mempunyai angka oktan 87.

**Indeks antiketukan** (*Anti-Knock Index, AKI*) bahan bakar dinyatakan dengan:

$$AKI = \frac{(MON + RON)}{2} \quad (3-8)$$

yang sering dikenal sebagai angka oktan bahan bakar.

Kondisi operasi yang digunakan mengukur MON lebih ketat dibanding yang untuk mengukur RON. Beberapa bahan bakar, oleh karena itu, akan mempunyai RON lebih besar dari MON. Perbedaan ini disebut **Sensitifitas Bahan Bakar** (*Fuel Sensitivity, FS*).

$$FS = RON - MON \quad (3-9)$$

Sensitivitas bahan bakar menyatakan sensitivitas karakteristik ketukan suatu bahan bakar terhadap geometri motor. Angka FS yang rendah diartikan bahwa karakteristik ketukan bahan bakar tidak sensitif terhadap geometri motor. Angka FS pada umumnya dalam kisaran antara 0 sampai 10.

Pembakaran bensin harus dikendalikan. Jika pembakaran terlalu cepat maka dapat menyebabkan detonasi, kadang-kadang disebut ketukan. Tekanan operasi yang lebih tinggi di ruang bakar juga dapat menyebabkan pembakaran abnormal. Jadi perlu digunakan aditif khusus untuk memperlambat laju pembakaran.

### 3.4.1.3 ADITIF BAHAN BAKAR

Aditif (atau yang dikenal dengan **Agen Antiketukan**) digunakan untuk menaikkan angka oktan bahan bakar, mengendalikan pengapian permukaan, mengurangi pengotoran busi, menahan terbentuknya gum, mencegah karat, mengurangi pembekuan karburator (*carburetor icing*), menghilangkan deposit pada injektor atau karburator, meminimalisir deposit di dalam sistem masukan dan mencegah pelekatan katup.

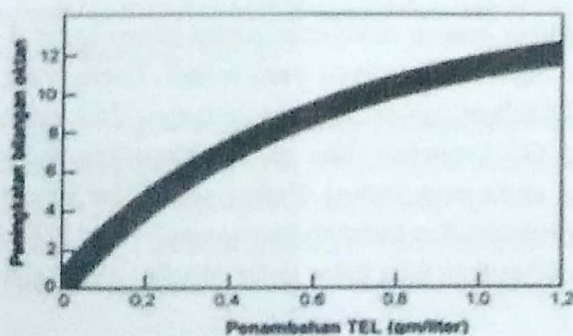
Jika beberapa bahan bakar yang diketahui angka oktannya dicampur, nilai taksiran untuk angka oktan campurannya adalah

$$ON_{camp} = (\%A)(ON_A) + (\%B)(ON_B) + (\%C)(ON_C) \quad (3-10)$$

di mana % = persentase massa

Komponen bahan bakar dengan rantai molekul panjang pada umumnya mempunyai angka oktan lebih rendah. Semakin panjang rantai, semakin rendah angka oktannya.

Aditif atau agen antiketukan berbasis timbal yang paling efektif dan telah digunakan selama bertahun-tahun untuk menaikkan angka oktan bahan bakar adalah *Tetraetil-lead (TEL)*,  $(C_2H_5)_4Pb$  yang diperkenalkan pertama kali pada tahun 1923. Beberapa mililiter TEL yang ditambahkan dalam beberapa liter bensin dapat menaikkan ON beberapa poin (Gambar 3-4).



Gambar 3-4 Peningkatan nilai oktan dengan penambahan TEL pada bahan bakar bensin

Aditif timbal juga memiliki kemampuan melumasi. Dalam mesin kompresi tinggi, senyawa timbal melapisi muka dan dudukan katup dan membantu mencegah keausan.

Masalah utama dengan TEL adalah adanya timbal (*lead*) pada gas buang motor. Timbal merupakan emisi gas buang yang sangat beracun. Di Eropa, oleh karena kebutuhan mengurangi kandungan timbal pada bensin, pada tahun 1980-an diperkenalkan bahan bakar tanpa timbal dengan menggunakan aditif campuran antiketukan manganese (*Methylcyclopentadienyl Manganese Tricarbonyl*), yang sekarang dikenal dengan MMT.

Kebutuhan oktan motor yang sudah berumur pada umumnya meningkat selama penggunaan, terutama berkaitan dengan terbentuknya deposit di ruang bakar. Deposit yang terbentuk di ruang bakar meningkatkan rasio kompresi motor karena volume sisa (*clearance volume*) menjadi lebih kecil. Pengaruh yang paling besar adalah meningkatnya temperatur permukaan terluar ruang bakar selama siklus motor, termasuk temperatur puncak. Ini meningkatkan proses perpindahan kalor ke campuran segar selama langkah hisap dan mengurangi perpindahan kalor dari campuran yang tak dibakar selama kompresi. Temperatur gas akhir menjadi lebih tinggi, yang dengan demikian meningkatkan kemungkinan terjadinya masalah ketukan.

Penggunaan oksigenat (oksigen yang mengandung campuran organik) eter dan alkohol sebagai pengganti aditif bensin sedang ditingkatkan. Oksigenat dapat diproduksi dari sumber bukan minyak bumi (*non-petroleum*), misalnya biomass atau batubara. Beberapa oksigenat yang telah digunakan sebagai bahan bakar otomotif adalah *metanol* ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), *etanol* ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ), *Tertiary Butil Alkohol* - TBA ( $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$ ) dan *Methyl Tertiary Butyl Eter* (MTBE). Tabel 3-1 memberikan daftar karakteristik antiketukan dari campuran ini beserta karakteristik fisik dan kimianya relatif terhadap bensin.

Tabel 3-1 Karakteristik antiketukan dari aditif bensin

	Metanol	Etanol	TBA	MTBE	Bensin
Nilai campuran (R + M)/2	112	110	98	105	87-93
% berat oksigen	50	35	22	18	0
Stoikiometri (A/F)	6.5	9.0	11.2	11.7	14.5
Specific gravity	0.796	0.794	0.791	0.746	0.74
Nilai kalor bawah, MJ/kg	20.0	26.8	32.5	35.2	44.0
Kalor laten penguapan, MJ/kg	1.16	0.84	0.57	0.34	0.35
Temperatur didih, °C	65	78	83	55	27-227

Sumber: Pulkrabek, W.W, *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engines*, Second edition. Pearson Prentice-Hall, 2004.

#### 3.4.1.4 NILAI KALOR

Kandungan energi di dalam bahan bakar diukur dengan membakar semua bahan bakar di dalam kalorimeter bom serta mengukur peningkatan temperatur yang terjadi. Energi yang tersedia tergantung pada wujud air yang dihasilkan dari pembakaran hidrogen. Jika air di dalam produk buangan berwujud gas (uap air), kemudian tidak dapat melepaskan panas penguapannya, maka dihasilkan nilai kalor netto yang kadang disebut nilai kalor bawah (*Lower Heating Value*, LHV). Jika air dikondensasikan kembali ke temperatur asal bahan bakar hingga berwujud cair maka akan menghasilkan nilai kalor kotor, disebut nilai kalor atas (*Higher Heating Value*, HHV).

Selisih antara nilai kalor atas dan nilai kalor bawah ini disebut **kalor penguapan air**.

$$\overline{Q_{HHV}} = \overline{Q_{LHV}} + \Delta h_{vap} \quad (3-11)$$

Kalor yang masuk untuk diubah menjadi kerja keluaran dapat dinyatakan dengan

$$\overline{Q_{in}} = m_{bb} \overline{Q_{LHV}} \eta_c \quad (3-12)$$

di mana

$\eta_c$  = efisiensi pembakaran

$m_{bb}$  = massa bahan bakar

### 3.4.1.5 KARAKTERISTIK PENYALAN SENDIRI

Jika temperatur campuran udara-bahan bakar terlalu tinggi, campuran akan menyala sendiri tanpa membutuhkan busi atau pemantik eksternal lain. Temperatur tinggi, di mana hal ini terjadi, disebut **temperatur penyalan sendiri – TPS** (*Self-Ignition Temperature, SIT*). Rasio kompresi pada motor diesel cukup tinggi sehingga temperatur naik di atas TPS sepanjang langkah kompresi. Penyalan sendiri selanjutnya terjadi ketika bahan bakar diinjeksikan ke dalam ruang bakar.

**Penyalan sendiri** (*self ignition*) atau **pra-penyalaan** (*pre-ignition*) atau *autoignition* terjadi ketika suhu di dalam ruang bakar cukup tinggi untuk menyalakan campuran sebelum busi menyala. Kondisi ini tidak dikehendaki pada motor bensin. Campuran udara-bahan bakar harus dinyalakan oleh busi pada saat yang tepat dalam siklusnya. Rasio kompresi motor bensin dibatasi sekitar 11:1, untuk menghindari penyalan sendiri. Jika penyalan sendiri terjadi pada motor bensin, maka akan dihasilkan pulsa tekanan yang lebih tinggi dibanding yang dikehendaki. Pulsa tekanan yang tinggi ini dapat menyebabkan kerusakan pada motor. Peristiwa ini sering disebut **ketukan** (*knock*) atau **desingan** (*ping*). Sistem manajemen mesin menggunakan sensor ketukan untuk mendeteksi detonasi dan memperlambat pengapian untuk menghentikannya.

Jika campuran dipanaskan ke temperatur di atas TPS, penyalan sendiri yang terjadi setelah waktu tunda (*delay time*) yang pendek, disebut **penundaan penyalan** (*Ignition Delay, ID*). Semakin tinggi temperatur awal naik di atas TPS, semakin singkat penundaan penyalan.

Nilai TPS penundaan penyalan (*Ignition Delay, ID*) untuk campuran udara-bahan bakar tertentu, bergantung pada beberapa variabel, di antaranya temperatur, tekanan, kepadatan, turbulensi, pusaran, rasio udara-bahan bakar, kehadiran gas mulia, dan lain-lain. Penundaan pengapian biasanya berlangsung dalam waktu yang sangat pendek. Selama periode ini, reaksi penyalan dini terjadi.

Kecenderungan untuk terjadinya ketukan akan meningkat ketika *spark advance* ditingkatkan. Untuk motor dengan rekomendasi timing pengapian 6 derajat sebelum titik mati atas menggunakan angka oktan bahan bakar 93. Jika pengapian diperlambat 4 derajat, kebutuhan angka oktan turun menjadi 91. Jika pengapian dimajukan menjadi 8 derajat, dibutuhkan angka oktan 96.

Untuk menghindari ketukan, maka perlu dilakukan kombinasi pengendalian sifat bahan bakar dan perancangan geometri ruang bakar. Dengan membatasi rasio kompresi motor bensin, temperatur pada akhir langkah kompresi di mana pembakaran dimulai akan dibatasi.

Dengan mengurangi temperatur awal pembakaran, yang diiringi temperatur keseluruhan proses pembakaran, ketukan dapat dihindari. Pada sisi lain, rasio kompresi tinggi mengakibatkan temperatur pada awal pembakaran lebih tinggi. Ini menyebabkan semua temperatur pada sisa siklus menjadi lebih tinggi. Semakin tinggi temperatur gas akhir, maka akan menciptakan waktu **penundaan penyalaan** (*Ignition Delay, ID*) yang singkat, dan ketukan akan terjadi.