

# MESIN KONVERSI ENERGI

Oleh

**ASYARI DARAMI YUNUS**

Teknik Mesin, Fakultas Teknik  
Universitas Darma Persada  
Jakarta



**UNIVERSITAS DARMA PERSADA**

**2010**

**Ir. Asyari Darami Yunus SE. MSc.**  
MESIN KONVERSI ENERGI  
© 2010 A. D. Yunus  
Edisi Pertama

Cover            A.D. Yunus  
Percetakan

*Dibolehkan mengutip sebagian atau seluruh isi buku ini atau memfotokopi.*



إِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا (النشرة: ٦)

Sesungguhnya Sesudah Kesulitan itu Ada Kemudahan

(QS. Al-Insyirah : 6)

مَنْ أَرَادَ الدُّنْيَا فَعَلَيْهِ بِالْعِلْمِ  
وَمَنْ أَرَادَ الْآخِرَةَ فَعَلَيْهِ بِالْعِلْمِ  
وَمَنْ أَرَادَ هُمَا فَعَلَيْهِ بِالْعِلْمِ

(رَوَاهُ ابْنُ أَشَاكِر)

"Barang siapa menginginkan kebahagiaan di dunia maka haruslah dengan ilmu, barang siapa yang menginginkan kebahagiaan di akhirat maka haruslah dengan ilmu, dan barang siapa menginginkan kebahagiaan pada keduanya maka haruslah juga dengan ilmu" (HR. Ibn Asakir)





## KATA PENGANTAR

Assalaamualaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Alhamdulillah, atas rahmat Allah SWT penulis telah dapat menyelesaikan pembuatan buku/ diktat ini. Buku ini dibuat bertujuan untuk menjadi sumber informasi dalam perkuliahan, terutama sumber informasi yang menggunakan bahasa Indonesia dalam bidang teknik, sehingga dapat membantu mahasiswa dalam menuntut ilmu di perguruan tinggi.

Kali ini penulis menyempatkan diri untuk ikut membuat sebuah buku yang bisa digunakan oleh mahasiswa teknik, terutama mahasiswa jurusan teknik mesin, yaitu buku yang ditujukan untuk mata kuliah Mesin Konversi Energi.

Dalam penyusunan buku ini penulis berusaha menyesuaikan materinya dengan kurikulum di jurusan Teknik Mesin, Universitas Darma Persada Indonesia. Buku ini berisikan teori-teori dan soal-soal tentang mesin konversi energi.

Perlu ditekankan bahwa buku ini belum merupakan referensi lengkap dari pelajaran Mesin Konversi Energi, sehingga mahasiswa perlu untuk membaca buku-buku referensi lain untuk melengkapi pengetahuannya tentang materi buku ini.

Akhir kata, mudah-mudahan buku ini bisa menjadi penuntun bagi mahasiswa dan memberikan manfaat sebagaimana yang diharapkan, dan menjadi amal jariah bagi penulis disisi Allah SWT. Tak lupa penulis mengucapkan banyak-banyak terima-kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dalam penyelesaian pembuatan buku ini. Kalau ada hal-hal yang tidak berkenan bagi pembaca buku ini, penulis minta dibukakan pintu maaf yang sebesar-besarnya.

Wabillahi taufiq walhidayah, wassalaamualaikum warahmatullahi  
wabarakatuh.

Jakarta, April 2010

Asyari Darami Yunus

## DAFTAR ISI

BAB 1	KLASIFIKASI, SUMBER-SUMBER DAN PEMAKAIAN ENERGI .....	1
	Klasifikasi dan jenis-jenis Energi .....	1
	Sumber-sumber energi .....	2
	Pemanfaatan Energi .....	3
BAB 2	BAHAN BAKAR UTAMA .....	7
	Bahan Bakar Fosil .....	7
	Bahan Bakar Standar .....	9
	Batubara .....	10
	Analisis Batubara .....	12
	Sifat-sifat Batubara .....	15
	Minyak Bumi .....	17
	Bahan Bakar Gas .....	18
BAB 3	KETEL UAP (STEAM BOILER) .....	27
	Esensi Ketel Uap Yang Baik .....	28
	Pemilihan Ketel Uap .....	28
	Klasifikasi Ketel Uap .....	29
	Ketel Uap Vertikal Sederhana .....	30
	Ketel Uap Cochran atau Ketel Pipa Banayak Vertikal .....	31
	Ketel Scotch Marine .....	32
	Ketel Lanchasire .....	33
	Ketel Cornish .....	35
	Ketel Lokomotif .....	35
	Ketel Babcock dan Wilcox .....	36
	Ketel La-mount .....	37
	Ketel Loeffler .....	38
	Keuntungan dan Kerugian Ketel Pipa Air .....	39
	Superheater .....	40
	Ekonomiser .....	41
	Unjuk Kerja Ketel Uap .....	42
BAB 4	TURBIN UAP .....	51
	Klasifikasi Turbin Uap .....	51
	Turbin Impuls .....	52
	Turin Impuls De-Level .....	52



	Tekanan dan Kecepatan Uap pada Turbin Impuls .....	53
	Segitiga Kecepatan Bagi Sudu Bergerak Pada Turbin Impuls .	54
	Segitiga Kecepatan Gabungan Untuk Sudu Bergerak .....	55
	Daya yang Dihasilkan oleh Turbin Impuls .....	56
	Pengaruh Gesekan Pada Segitiga Kecepatan Gabungan .....	59
	Diagram Kecepatan Gabungan Untuk Aliran Aksial .....	60
	Diagram Kecepatan Untuk Turbin Impuls Dua Tingkat .....	65
	Trubin Reaksi .....	68
	Turbin Reaksi Parson .....	68
	Tekanan dan Kecepatan Uap Pada Turbin Reaksi .....	70
	Perbandingan Antara Turbin Impuls dan Turbin Reaksi .....	70
	Segitiga Kecepatan Untuk Sudu Turbin Reaksi .....	71
	Tinggi Sudu Turbin Reaksi .....	71
BAB 5	TURBIN GAS .....	77
	Perbandingan Turbin Gas Dengan Turbin Uap .....	77
	Klasifikasi Turbin Gas .....	78
	Turbin Gas Siklus tertutup .....	78
	Intercooling .....	81
	Reheating .....	85
	Turbin Gas Siklus Terbuka .....	88
	Perbandingan Antara Turbin Gas Siklus Tertutup Dengan Siklus Terbuka .....	89
	Efisiensi Turbin .....	91
BAB 6.	TURBIN AIR .....	97
	Turbin Impuls .....	97
	Roda Pelton .....	97
	Kerja Pada Turbin Impuls .....	99
	Daya yang Dihasilkan Turbin Impuls .....	102
	Efisiensi Keseluruhan .....	103
	Turbin Reaksi .....	105
	Rumah Turbin Spiral .....	105
	Mekanisme Pengarah .....	106
	Runner Turbin .....	106
	Draft Tube .....	107
	Perbedaan Antara Turbin Impuls Dan Turbin Reaksi .....	107
	Klasifikasi Turbin Reaksi .....	108
	Turbin Aliran Radial .....	108
	Turbin Aliran Aksial .....	108
	Turbin Aliran Campuran .....	108
	Turbin Reaksi Aliran ke Dalam .....	108
	Turbin Reaksi Aliran ke Luar .....	114

	Debit Pada Turbin Reaksi .....	117
	Daya Yang Dihasilkan Turbin Reaksi .....	118
	Efisiensi Turbin Reaksi .....	118
	Turbin Francis .....	121
	Turbin Kaplan .....	122
	Draft Tube .....	122
	Turbin Reaksi Lainnya .....	124
	Karakteristik Turbin .....	125
	Daya Satuan .....	125
	Kecepatan Satuan .....	126
	Debit Satuan .....	126
	Pentingnya Daya Satuan, Kecepatan Satuan dan Debit Satuan.	128
	Kecepatan Spesifik Turbin .....	130
	Kurva Karakteristik Turbin Pelton .....	133
	Kurva Karakteristik Turbin Francis .....	136
BAB 7	MESIN PEMBAKARAN DALAM .....	143
	Klasifikasi Mesin-mesin Pembakaran Dalam .....	143
	Komponen-komponen Utama .....	144
	Urutan Langkah-langkah Siklus .....	146
	Mesin Siklus Dua Langkah dan Empat Langkah .....	146
	Keuntungan dan Kerugian Mesin Dua Langkah dan Empat Langkah .....	147
	Mesin Bensin Siklus Empat Langkah .....	149
	Mesin Diesel Siklus Empat Langkah .....	150
	Perbandingan Mesin Bensin Dengan Mesin Diesel .....	152
	Sistem Pengapian Mesin Bensin .....	153
	Sistem Pendinginan .....	155
	Perbandingan Antara Sistem Pendinginan Udara Dengan Sistem Pendinginan Air .....	157
	Pelumasan Mesin .....	157
	Unjuk Kerja Mesin Pembakaran Dalam .....	159
	Daya Indikated .....	159
	Daya Kuda Brake (daya rem) .....	160
	Efisiensi Mesin Pembakaran Dalam .....	163
	Konsumsi Udara .....	167
	Lembar Kesetimbangan Kalor .....	169
BAB 8	POMPA .....	173
	Pompa Dinamik .....	173
	Pompa Perpindahan .....	173
	Pompa Sentrifugal .....	173
	Sistem Pemipaan Pada Pompa Sentrifugal .....	178

	Kerja Pompa Sentrifugal .....	179
	Tinggi Tekan Manometrik .....	182
	Efisiensi Pompa Sentrifugal .....	182
	Kapasitas Pompa Sentrifugal .....	183
	Daya Penggerak Pompa Sentrifugal .....	185
	Kenaikan Tekanan Air .....	188
	Kecepatan Start Minimum .....	191
	Pompa Sentrifugal Bertingkat Ganda .....	192
	Pompa Torak .....	192
	Jenis-jenis Pompa Torak .....	193
	Kapasitas Pompa Torak .....	193
	Slip Pada Pompa .....	194
	Daya Penggerak Pompa Torak .....	195
	Diagram Indikator Pompa Torak .....	196
	Perubahan Tekanan Akibat Percepatan Torak .....	197
	Pengaruh Percepatan Torak Terhadap Diagram Indikator .....	200
	Kecepatan Maksimum Poros Engkol .....	202
	Pengaruh Gesekan Terhadap Diagram Indikator .....	203
	Bejana Udara .....	207
	Kecepatan Maksimum Poros Engkol Dengan Bejana Udara ...	208
BAB 9	KOMPRESOR UDARA .....	215
	Klasifikasi Kompresor Udara .....	215
	Istilah-istilah .....	215
	Kompresor Torak .....	216
	Single Stage Compressor Tanpa Clearance .....	216
	Single Stage Compressor Dengan Clearance .....	219
	Indicated Horse Power .....	221
	Efisiensi Kompresor .....	221
	Kompresor Bertingkat Banyak .....	223
	Kompresor Rotari .....	227
	Perbandingan Kompresor Torak Dengan Kompresor Rotari ...	227
	Jenis-jenis Kompresor Rotari .....	227
	Root Blower Compressor .....	228
	Kompresor Vane Blower .....	230
	Aliran Balik Pada Kompresor Udara Perpindahan Positif .....	231
	Kompresor Sentrifugal .....	234
	Kerja Pada Kompresor Sentrifugal .....	235
	Segitiga Kecepatan Pada Sudu Bergerak Kompresor Sentrifugal .....	238
	Lebar Sudu .....	241
	Kompresor Aliran Aksial .....	242

Perbedaan Antara Kompresor Udara Sentrifugal Dengan Kompresor Aliran Aksial .....	243
Diagram Kecepatan Untuk Kompresor Udara Aliran Aksial ...	244
Derajat Reaksi .....	245
Unjuk Kerja Kompresor .....	247
Efisiensi Kompresor Torak .....	247
Efisiensi Volumetrik Kompresor Torak Dengan Clearance ....	251
Efisiensi Kompresor Sentrifugal .....	253
Faktor Slip .....	255
Perbandingan Antara Sudu Turbin Dengan Sudu Kompresor Sentrifugal .....	256
DAFTAR PUSTAKA .....	259



## KLASIFIKASI, SUMBER-SUMBER DAN PEMAKAIAN ENERGI

### Klasifikasi Dan Jenis-jenis Energi

Energi dikategorikan atas dua bentuk umum yaitu: *energi transisional* dan *energi tersimpan*. Energi transisional adalah energi yang sedang bergerak dan dapat berpindah melintasi batas sistem. Energi tersimpan adalah energi yang berwujud sebagai massa, posisi dalam medan gaya, dan lain-lain. Energi tersimpan bisa dirubah ke dalam bentuk energi transisional.

Energi bisa dikelompokkan atas 6 yaitu :

1. Energi mekanik
2. Energi listrik
3. Energi elektromagnetik
4. Energi kimia
5. Energi nuklir
6. Energi panas (termal).

*Energi Mekanik* yaitu suatu energi yang dapat digunakan untuk mengangkat suatu benda. Dalam SI satuan energinya adalah joule (watt-detik) dan satuan daya adalah watt. Kerja adalah merupakan bentuk transisional dari energi mekanik. Energi mekanik dapat disimpan dalam bentuk energi potensial maupun energi kinetik.

*Energi listrik* yaitu energi yang berkaitan dengan arus dan akumulasi elektron. Energi jenis ini dinyatakan dalam satuan daya-waktu, misalnya watt-jam atau kilowatt-jam. Bentuk transisional dari energi listrik adalah aliran elektron.

*Energi elektromagnetik* adalah bentuk energi yang berkaitan dengan radiasi elektromagnetik. Energi radiasi biasanya dinyatakan dalam satuan energi yang sangat kecil seperti elektron-volt (eV). Radiasi elektromagnetik adalah bentuk energi murni dimana tidak berkaitan

dengan massa. Energi ini hanya merupakan energi transisional yang bergerak dengan kecepatan cahaya. Energi ini dirumuskan sebagai:

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda}$$

dengan:  $E$  = energi, joule

$h$  = konstanta planck =  $6,626 \times 10^{-34}$  J.s

$\nu$  = frekwensi

$\lambda$  = panjang gelombang

*Energi kimia* adalah energi yang keluar sebagai hasil interaksi elektron dimana dua atau lebih atom dan/atau molekul-molekul membentuk senyawa kimia yang stabil. Energi kimia hanya dapat terjadi dalam bentuk energi tersimpan. Jika energi dilepaskan dalam suatu reaksi kimia, reaksi ini disebut reaksi eksotermis, dan sebaliknya jika energi diserap dalam suatu reaksi kimia maka reaksi disebut reaksi endotermis.

*Energi nuklir* adalah energi yang dilepaskan sebagai hasil usaha partikel-partikel untuk mendapatkan konfigurasi yang lebih stabil. Energi ini hanya ada sebagai energi tersimpan yang terlepas akibat interaksi partikel. Energi nuklir biasanya dinyatakan dalam satuan juta-elektron per reaksi.

*Energi termal* adalah bentuk energi dasar dengan kata lain, semua bentuk energi dapat dikonversi secara penuh ke energi ini. Energi ini berkaitan dengan getaran atom dan molekular.

### Sumber-sumber Energi

Sumber-sumber energi dikelompokkan atas dua kategori umum yaitu:

- *energi celestial* atau energi perolehan yaitu energi yang mencapai bumi dari angkasa luar
- *energi modal* yaitu energi yang telah ada pada atau didalam bumi.

Sumber-sumber energi celestial seperti elektromagnetik, energi partikel dan gravitasional dari bintang-bintang, planet-planet dan bulan, dan juga energi potensial meteor yang sedang memasuki bumi. Sumber energi yang sangat berguna dari energi celestial adalah energi elektromagnetik dari matahari yang disebut energi surya langsung serta energi potensial dari bulan yang menghasilkan aliran pasang.

Energi surya langsung juga menghasilkan sumber-sumber energi tak langsung yang tak terhabiskan. Pemanasan surya bersama dengan rotasi bumi menghasilkan beberapa arus konveksi besar dalam bentuk angin di atmosfer

dan arus laut di samudra. Penyerapan energi surya oleh laut juga menghasilkan energi potensial untuk memproduksi tenaga. Penguapan permukaan air yang akan menimbulkan awan dan pada akhirnya menghasilkan hujan akan menjadi sumber energi hidroelektrik atau tenaga air.

Energi bulan terutama berupa energi gravitasi bulan menghasilkan gelombang air pasang yang mempunyai perbedaan ketinggian hingga 30 feet di tempat-tempat tertentu. Perubahan ketinggian air laut bisa dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik dengan memasang turbin air. Potensi total dari seluruh sistem tenaga air pasang dunia diperkirakan mencapai 64.000 MW.

Sumber utama energi modal yang banyak digunakan adalah energi atom, yaitu energi yang dihasilkan oleh reaksi atom. Energi nuklir dan energi kimia termasuk dalam kategori ini.

Energi modal yang lain yang dimanfaatkan adalah energi termal yaitu berupa uap, air panas yang disemprotkan dari bawah permukaan bumi. Energi geotermal bisa dimanfaatkan untuk pembangkit listrik. Gambar 1 memperlihatkan sistem pembangkit tenaga geotermal.

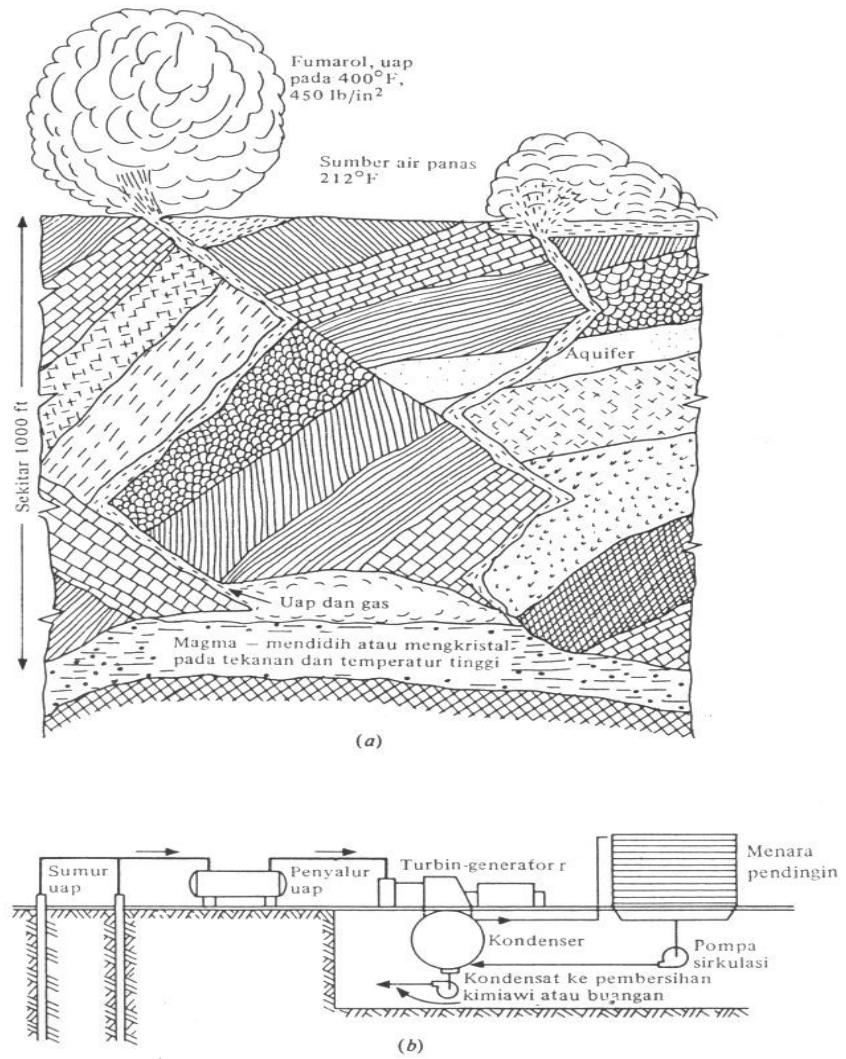
### **Pemanfaatan Energi**

Pada tahap awal peradaban, manusia menghasilkan energi dari pembakaran karbohidrat (tumbuhan dan kayu). Kemudian dalam perkembangannya, manusia banyak memanfaatkan berbagai jenis energi. Energi angin digunakan untuk menggerakkan perahu dan kincir angin, tenaga air dan energi panas digunakan untuk memberikan energi mekanik.

Di sekitar tahun 1900an batubara mulai digunakan sebagai bahan bakar. Pada tahun 1970 di Amerika Serikat, 75% energi bahan bakar menggunakan bahan bakar minyak dan gas alam. Penggunaan energi dalam dasawarsa terakhir menunjukkan peningkatan yang tajam terutama dalam penggunaan bahan bakar minyak dan gas alam cair, energi hidroelektrik dan nuklir.

Penggunaan energi di AS paling banyak dikonsumsi oleh sektor pembangkitan listrik diikuti pemakaian di industri, transportasi, dan rumah tangga & komersil. Sumber daya yang paling dominan digunakan adalah bahan bakar minyak diatas energi nuklir, gas alam dan batubara.





Gambar 1. Diagram skematik sebuah penyimpan geotermal yang khas dari sebuah pembangkit.

**Soal-soal**

1. Coba anda jelaskan jenis-jenis energi.
2. Sebutkan perbedaan antara energi celestial dan energi modal.
3. Sebutkan energi yang dibangkitkan oleh gravitasi bulan.
4. Coba anda sebutkan sumber daya energi yang paling banyak digunakan saat ini di Indonesia, dan bagaimana prospek ketersediaannya di masa yang akan datang.



## BAHAN BAKAR UTAMA

### Bahan Bakar Fosil

Bahan bakar fosil yang umum ada tiga jenis : yaitu batubara, minyak dan gas alam. Bahan bakar fosil dihasilkan dari pemfosilan senyawa karbohidrat. Senyawa karbohidrat dengan rumus kimia  $C_x(H_2O)_y$ , dihasilkan oleh tanaman-tanaman hidup melalui proses fotosintesis ketika ia merubah secara langsung energi surya menjadi energi kimia. Setelah tanaman mati, karbohidrat dirubah menjadi senyawa hidrokarbon dengan rumus kimia  $C_xH_y$  oleh tekanan dan panas dan proses yang lama.

Senyawa hidrokarbon terdiri dari karbon dan hidrogen. Atom hidrogen hanya mempunyai satu elektron sedangkan karbon mempunyai 4 elektron terluar sehingga 1 atom karbon bisa mengikat 4 atom hidrogen.

Ada 3 kelompok utama senyawa hidrokarbon yaitu:

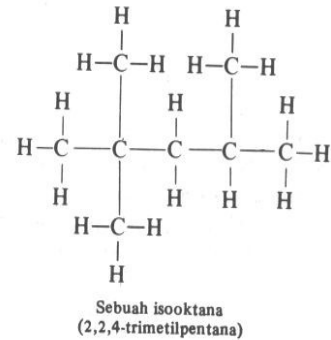
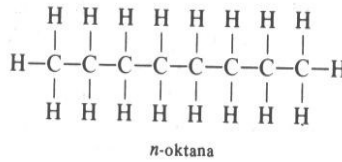
- hidrokarbon alifatik
- hidrokarbon alisiklik dan
- hidrokarbon aromatik.

Hidrokarbon alifatik adalah senyawa rantai dan kebanyakan senyawa bahan bakar fosil termasuk kedalam kelompok ini. Dua kelompok yang lain adalah jenis hidrokarbon cincin. Hidrokarbon alifatik dibagi atas 3 sub kelompok yaitu: hidrokarbon alkana, alkena dan alkuna. Hidrokarbon alkana mempunyai rumus kimia umum  $C_nH_{2n+2}$ . Senyawa yang khas yang termasuk kelompok ini adalah :

Metana, $CH_4$	Pentana, $C_5H_{12}$	Nonana, $C_9H_{20}$
Etana, $C_2H_6$	Heksana, $C_6H_{14}$	Dekana, $C_{10}H_{22}$
Propana, $C_3H_8$	Heptana, $C_7H_{16}$	Butana, $C_4H_{10}$
Oktana, $C_8H_{18}$	Heksadekana, $C_{16}H_{34}$	

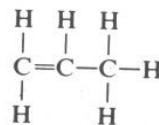
Kebanyakan gas alam terdiri dari gabungan metana dan etana, propana dan butana membentuk gas minyak tanah yang dicairkan, dan oktana adalah senyawa umum gasoline. Bila awalan “n” yang berarti

normal, terdapat didepan nama hidrokarbon, berarti bahwa semua atom karbon terhubung dalam sebuah rantai panjang. Awalan *iso* didepan nama hidrokarbon berarti bahwa nama hidrokarbon tersebut terdapat cabang-cabang atom karbon.

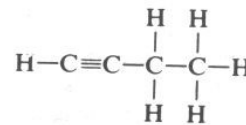


Kedua molekul diatas mempunyai rumus kimia dasar yang sama yaitu  $C_8H_{18}$ , tetapi mempunyai sifat-sifat fisik dan kimia yang sangat berbeda.

Sub kelompok alkena dan alkuna adalah senyawa hidrokarbon tak jenuh yaitu hidrokarbon yang mempunyai paling tidak dua atom karbon yang berbagi ikatan rangkap. Rumus umum alkena adalah  $C_nH_{2n}$  dan disebut rangkaian olefin. Hidrokarbon alkuna mempunyai rumus  $C_nH_{2(n-1)}$  yang juga disebut rangkaian asetilen.

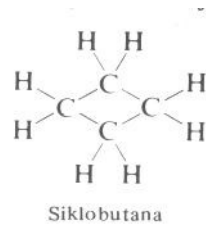


Propilena

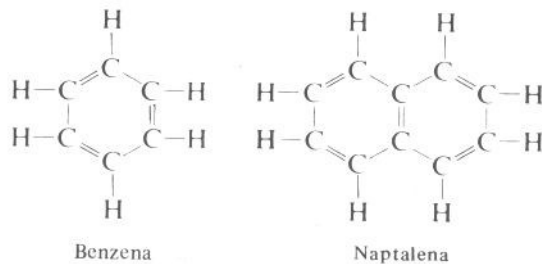


Etilasetilen

Dua kelompok hidrokarbon lainnya yaitu senyawa alisiklik dan aromatik disebut hidrokarbon cincin karena molekulnya tersusun seperti cincin. Hidrokarbon alisiklik mempunyai rumus umum  $C_nH_{2n}$  dan namanya biasanya berawalan *siklo* seperti siklobutana.



Hidrokarbon aromatik mempunyai rumus umum  $C_nH_{2n-12}$ . Contoh senyawanya bisa dilihat pada gambar berikut.



### Bahan Bakar Standar

Ada sejumlah senyawa hidrokarbon yang digunakan sebagai standar bahan bakar bagi motor bakar. Bahan bakar bensin digolongkan berdasarkan bilangan oktannya, sedangkan bahan bakar solar (diesel) digolongkan berdasarkan bilangan cetananya.

Bahan bakar beroktan 100 adalah 2.2.4.-trimetilpentana (isooktana), sementara bahan bakar standar oktana 0 adalah *n*-heptana. Bilangan oktana suatu bahan bakar yang tidak diketahui diukur dengan mesin CFR (Cooperative Fuels Research Engine). Mesin ini adalah sebuah mesin silinder tunggal dengan perbandingan kompresi yang bisa diatur dari 4:1 hingga 14:1. Bahan bakar yang mau diuji, dibakar didalam mesin dan perbandingan kompresinya dinaikkan perlahan-lahan sampai diperoleh ketukan (knock) atau pembacaan detonasi dari sebuah detektro vibrasi. Campuran bahan standar kemudian dibakar dengan angka kompresi yang sama hingga kira-kira diperoleh pembacaan ketukan yang sama. Prosentase volume bahan bakar oktana 100 dalam campuran tersebut adalah bilangan oktana dari bahan bakar yang dites tersebut. Besar bahan bakar bensin (gasolin) yang paling banyak dipakai berkisar antara 85 hingga 95.

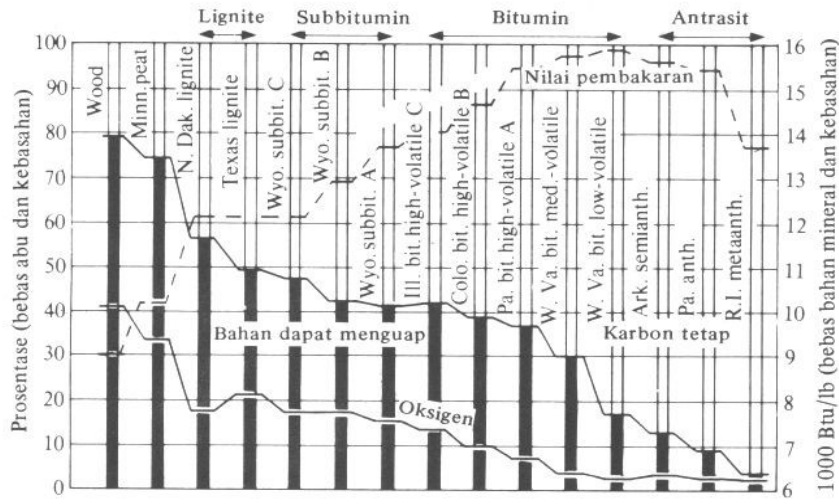
Beberapa jenis bensin premium mempunyai bilangan oktana yang lebih besar dari 100. Bilangan oktana yang lebih besar dari 100 diperoleh dengan menggunakan hidrokarbon yang lebih ringan dan/atau menambahkan bahan tambahan (additif) seperti tetra etil lead (TEL) kedalam bahan bakar dasar.

Cetana 100 untuk bahan bakar diesel standar adalah *n*-heksadekana ( $C_{16}H_{34}$ ), yang kadang-kadang disebut *n*-cetana. Standar cetana 0 adalah alfa-metilnaftalena ( $C_{11}H_{10}$ ). Angka cetana suatu bahan bakar diesel tertentu adalah sama dengan prosentase volume *n*-heksadekana dalam suatu campuran bahan bakar standar yang mempunyai karakteristik pembakaran yang sama di dalam mesin diesel CFR. Umumnya bahan bakar diesel mempunyai bilangan cetana antara 30 sampai 60.

### **Batubara**

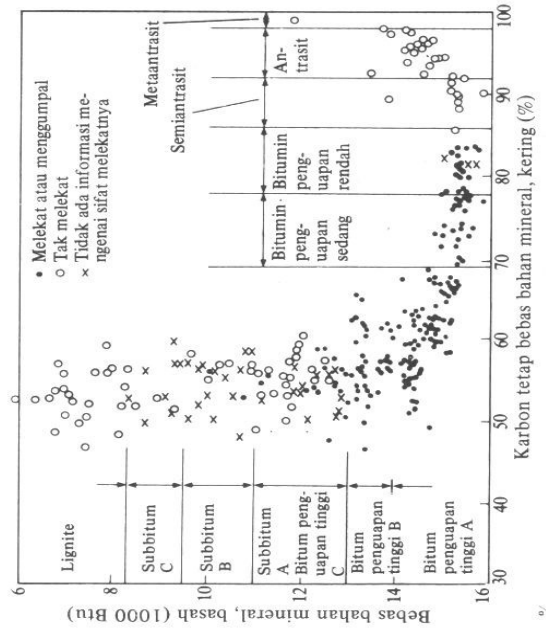
Batubara adalah bahan bakar fosil yang terbanyak, diperkirakan berasal dari tumbuh-tumbuhan yang memfosil. Ditaksir bahwa paling tidak diperlukan 20 cm tumbuh-tumbuhan yang dipadatkan untuk memperoleh lapisan batubara sebesar 1 cm. Tumbuhan yang padat ini tanpa adanya udara, dengan dipengaruhi oleh tekanan dan suhu tinggi selanjutnya akan berubah menjadi turf (tumbuhan lapuk), kemudian menjadi batubara coklat, lalu menjadi lignite, kemudian menjadi batubara subbitumin, lalu menjadi bitumin, dan akhirnya menjadi batubara antrasitik. Dengan berlangsungnya proses *aging* (penuaan), batubara akan menjadi keras, kandungan hidrogen dan oksigennya berkurang dan kandungan karbon meningkat. Gambar 1 memperlihatkan klasifikasi batubara berdasarkan umur.

Batubara ditemukan dalam bentuk lapisan-lapisan di dalam kulit bumi. Menurut ASTM, batubara diklasifikasikan atas empat kategori utama dengan sub-sub divisi dalam setiap kelas. Berdasarkan sistem ini keempat kelas utama adalah batubara antrasitik (tertua), batubara bitumin, batubara subbitumin dan batubara lignitik. Klasifikasi menurut ASTM ini bisa dilihat pada tabel 1.



Gambar 1. Variasi sifat-sifat dan komposisi batubara berdasarkan umur.





$$FC \text{ bebas-Mm, kering} = \frac{FC - 0.15S}{100 - (M + 1.08A + 0.53S)} \times 100 \%$$

$$VM \text{ bebas-Mm, basah} = 100 - FC \text{ bebas-Mm, kering} \%$$

$$Btu \text{ bebas-Mm, basah} = \frac{Btu - 50S}{100 - (1.08A + 0.53S)} \times 100 \text{ per lb}$$

- di mana Mm = bebas mineral
- Btu = nilai pembakaran per lb
- FC = karbon tetap, %
- VM = bahan menguap, %
- M = kebasahan alas, %
- A = abu, %
- S = sulfur, %

Semua untuk batubara dengan basis basah.

### Analisis Batubara

Ada dua basis analisis batubara, yaitu analisis proksimasi dan analisis ultimasi. Kedua cara analisis ini memberikan fraksi-fraksi masa atau gravimetrik dari komponen-komponen didalam batubara.

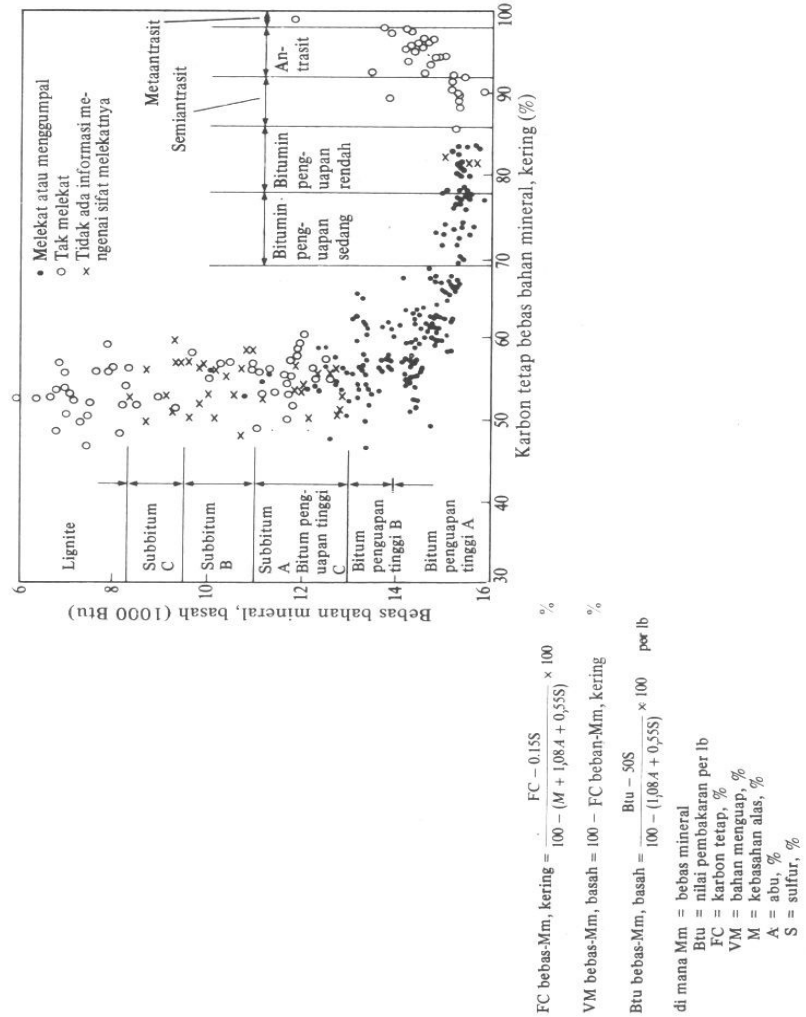
Tabel 1. Klasifikasi batubara berdasarkan tingkatan<sup>a</sup> (ASTM D 388)

Kelas	Kelompok	Batas karbon tetap, % (basis bebas bahan mineral, kering)		Batas bahan dapat menguap (basis bebas bahan mineral, kering)		Batas nilai kalori, Btu/lb (basis bebas bahan mineral, basah) <sup>b</sup>		Karakter pengumpulan
		Lebih besar atau sama dengan	Lebih kecil dari	Lebih besar atau sama dengan	Lebih kecil dari	Lebih besar atau sama dengan	Lebih kecil dari	
I. Antrasitik	1. Metaantrasit	98	...	...	2	...	...	Tak menggumpal
	2. Antrasit	92	98	2	8	...	...	
	3. Semiantrasit <sup>c</sup>	86	92	8	14	...	...	
II. Bitumin	1. Batubara bitumin penguapan rendah	78	86	14	22	...	...	Biasanya menggumpal <sup>c</sup> Menggumpal
	2. Batubara bitumin penguapan sedang	69	78	22	31	...	...	
	3. Batubara bitumin penguapan tinggi A	...	69	31	...	14,000 <sup>d</sup>	...	
	4. Batubara bitumin penguapan tinggi B	...	...	...	...	13,000 <sup>d</sup>	14,000	
	5. Batubara bitumin penguapan tinggi C	...	...	...	...	11,500	13,000	
III. Subbitumin	1. Batubara subbitumin A	...	...	...	...	10,500	11,500	Tak menggumpal
	2. Batubara subbitumin B	...	...	...	...	9,500	10,500	
	3. Batubara subbitumin C	...	...	...	...	8,300	9,500	
IV. Lignitik	1. Lignite A	...	...	...	...	6,300	8,300	Tak menggumpal
	2. Lignite B	...	...	...	...	...	6,300	

<sup>a</sup> Klasifikasi ini tidak termasuk beberapa batubara, terutama varietas "nonbonded", yang mempunyai sifat-sifat fisik dan kimia yang tak biasa dan berada dalam batas karbon tetap atau nilai kalori dari kelas bitumin penguapan tinggi dan subbitumin. Semua batubara ini mengandung kurang dari 48% karbon tetap bebas bahan mineral, kering atau lebih dari 15.500 Btu/lb pada basis bebas bahan mineral, basah.  
<sup>b</sup> Basah dalam arti batubara mengandung kebasahan inheren alamiahnya tetapi tidak termasuk air yang terlihat pada permukaan batubara.  
<sup>c</sup> Jika menggumpal termasuk kelompok penguapan rendah dari kelas bitumin.  
<sup>d</sup> Batubara yang mempunyai 69% atau lebih karbon tetap dengan basis bebas bahan mineral, kering, harus diklasifikasi tergantung pada karbon tetap, dengan mengabaikan nilai kalori.  
<sup>e</sup> Diakui bahwa mungkin terdapat varietas tak menggumpal dalam kelompok ini dari kelas bitumin, dan ada pengecualian yang nyata dalam kelompok bitumin C penguapan tinggi.

Pada setiap lapisan batubara, terdapat dua komponen yang dapat menunjukkan variasi penting dari keseluruhan lapisan tersebut. Komponen tersebut adalah kebasahan dan abu. Fraksi abu bervariasi karena abunya padasarnya adalah bahan anorganik yang mengendap bersama bahan organik pada waktu proses pemadatan. Kadar kebasahan batubara sangat

bervariasi, tergantung keterbukaan ke air tanah sebelum penambangan dan karena keterbukaan keudara bebas sewaktu pengangkutan danpenyimpanan ke tempat akhir. Karena itu biasanya laporan analisis batubara dibuat dengan basis bebas abu, bebas kebasahan baik secara ultimasi ataupun secara proksimasi.



Analisis proksimasi akan menghasilkan fraksi massa dari karbon tetap (FC), bahan dapat menguap (VM), kebasahan (M), dan abu (A) dalam

batubara. Analisis dilakukan dengan mengambil sejumlah kecil sampel. Sampel kemudian dipanaskan ke temperatur 110 °C selama 20 menit. Sampel kemudian ditimbang kembali dan kehilangan massa dibagi dengan massa mula-mula akan menghasilkan fraksi massa kebasahan sampel. Sampel kemudian dipanaskan ke temperatur 954 °C dalam sebuah tabung tertutup selama 7 menit, dan sesudah itu kembali ditimbang. Massa yang hilang dibagi dengan massa semula merupakan fraksi massa bahan yang dapat menguap. Sampel kemudian dipanaskan ke temperatur 732 °C dalam sebuah cawan peleburan hingga ia terbakar sempurna. Sisanya kemudian ditimbang dan berat terakhir ini dibagi dengan berat semula menghasilkan fraksi abu. Fraksi massa dari karbon tetap diperoleh dengan cara mengurangi fraksi kebasahan, bahan dapat menguap, dan abu dari kesatuan. Sebagai tambahan terhadap FC, VM, M dan A, kebanyakan analisis proksimasi juga memuat massa sulfur (S) dan nilai pembakaran tinggi (HHV) batubara.

Analisis ultimasi batubara adalah analisis laboratorium yang mencari fraksi massa karbon (C), hidrogen (H<sub>2</sub>), oksigen (O<sub>2</sub>), sulfur (S), dan nitrogen (N<sub>2</sub>) di dalam batubara sekaligus dengan nilai pembakaran tinggi (HHV)nya. Analisis ultimasi diperlukan untuk menentukan kebutuhan udara pembakaran untuk suatu sistem tertentu, misalnya menentukan aliran udara pada dapur pembakaran.

Jika kadar abu dan kebasahan dapat dihitung, fraksi massa yang lain dan nilai pembakaran tinggi batubara dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$\text{Fraksi massa begitu terbakar} = (\text{fraksi massa bebas abu, kering})(1 - M - A)$$

$$\text{Nilai pembakaran tinggi begitu terbakar} = (\text{HHV bebas abu, kering})(1 - M - A)$$

### Sifat-Sifat Batubara

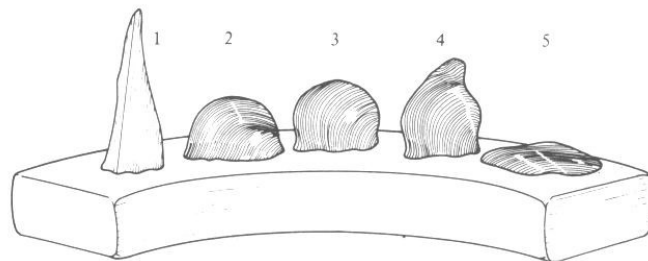
Sifat-sifat batubara yang harus diperhatikan dalam memilih batubara untuk kegunaan tertentu adalah : kadar sulfur, karakteristik pembakaran, daya tahan terhadap cuaca, temperatur pelunakan abu, kemampuan untuk digerinda serta kandungan energi batubara tersebut.

Hal yang paling penting diperhatikan adalah kadar sulfur. Apabila sulfur didalam batubara terbakar akan menghasilkan sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>) yang merupakan polusi bagi udara. Konsekuensinya, penting sekali diusahakan agar batubara mempunyai kadar sulfur yang rendah, paling tidak satu persen atau kurang.

Pada waktu memilih batubara untuk suatu sistem pembakaran tertentu, seseorang haruslah memperhatikan bagaimana batubara itu akan dibakar. Bila batubara dibakar di tempat yang stasioner dengan pergerakan kecil, batubara haruslah dapat terbakar bebas, bukan batubara gemuk. Batubara yang dapat terbakar bebas cenderung untuk pecah berserak pada saat terbakar sehingga mengakibatkan batubara yang belum terbakar terbuka ke udara pembakaran. Ini bisa membantu mencapai pembakaran sempurna. Batubara gemuk menghasilkan massa batubara yang memfusi ketika terbakar sehingga banyak karbon tetap yang tak terbakar. Jenis ini umumnya digunakan untuk memproduksi kokas (coke) dan untuk membakarnya secara efektif, bed batubara haruslah digoyang agar batubara bisa pecah.

Sifat penting lain yang harus diperhatikan adalah indeks dapat digerindanya. Hal ini khususnya untuk sistem-sistem pembangkit tenaga yang menggunakan serbuk batubara dimana batubara digerinda menjadi serbuk halus. Makin tinggi indeks gerinda berarti makin mudah digerinda.

Temperatur pelunakan abu adalah temperatur dimana abu menjadi sangat plastis, beberapa derajat dibawah titik lebur abu. Temperatur ini ditentukan dengan cara memanaskan kerucut-kerucut abu seperti yang terlihat gambar 3.



Kerucut 1, temperatur deformasi awal  
 Kerucut 2 dan 3, temperatur pelunakan  
 Kerucut 4, hampir mencapai temperatur pelunakan  
 Kerucut 5, temperatur cair

Gambar 3. Fusibilitas dari kerucut batubara dalam menentukan temperatur abu.

Beberapa dapur pembakaran mengeluarkan abu dari kotak api dalam bentuk terak cair. Batubara dengan temperatur pelunakan abu yang rendah diperlukan untuk sistem-sistem ini. Batubara dengan temperatur pelunakan abu yang tinggi diperlukan untuk sistem yang menangani abu dalam bentuk padat.

Kadar energi atau nilai pembakaran batubara adalah jumlah energi kimia yang terdapat dalam suatu massa atau volume bahan bakar batubara.

Ada dua macam nilai pembakaran yaitu nilai pembakaran tinggi atau bruto dan nilai pembakaran rendah atau netto. Perbedaan antara kedua nilai tersebut pada dasarnya adalah sama dengan panas laten penguapan dari uap air yang terdapat dalam hasil gas buang ketika bahan bakar dibakar dengan udara kering. Perbedaan antara nilai pembakaran tinggi dan rendah dihitung dengan cara pendekatan berdasarkan rumus berikut :

$$\text{HHV} - \text{LHV} = 2400(\text{M} + 9\text{H}_2) \quad \text{kJ/kg}$$

dengan : M dan H<sub>2</sub> adalah kebasahan dan fraksi massa hidrogen bahan bakar.

Untuk batubara dengan grade yang lebih baik, nilai pembakaran tingginya dapat ditaksir dengan menggunakan analisis ultimasi dan memakai rumus Dulong:

$$\text{HHV} = 33.950\text{C} + 144.200(\text{H}_2 - (\text{O}_2/8)) + 9400\text{S} \quad \text{kJ/kg}$$

Semua harga pada persamaan diatas adalah fraksi massa dan nilai pembakaran tinggi yang dihasilkan adalah untuk basis yang sama.

### Minyak Bumi

Minyak bumi (petroleum) dianggap berasal dari kehidupan laut yang membusuk sebagian. Minyak bumi atau minyak mentah adalah komposisi dari berbagai senyawa organik. Analisis ultimasi semua minyak mentah adalah agak konstan. Fraksi massa karbon berkisar antara 84 hingga 87%, fraksi massa hidrogen berkisar antara 11 hingga 16%, jumlah fraksi oksigen dan nitrogen berkisar antara 0 hingga 7%, dan fraksi massa sulfur berkisar antara 0 hingga 4%.

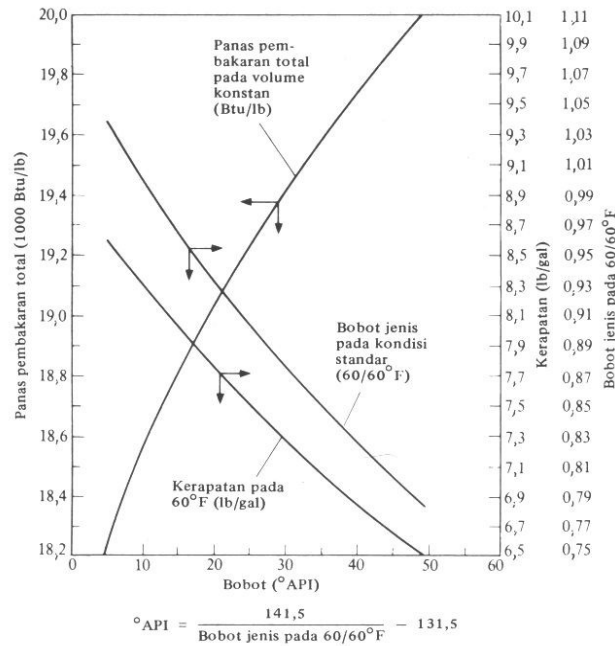
Sifat-sifat yang penting dari minyak bumi serta turunannya adalah nilai pembakaran, berat atau bobot jenis, titik nyala dan titik lumernya. Nilai pembakaran, biasanya nilai pembakaran tinggi, diperlihatkan pada gambar 4.

Bobot jenis suatu cairan adalah kerapatan cairan tersebut dibagi dengan kerapatan air pada 60 °F. Bobot minyak bumi dinyatakan dalam satuan °Be atau °API. Hubungan antara bobot jenis *s* dan satuan ini adalah:

$$\text{Bobot jenis} = s = \frac{140}{130 + \text{°Be}}$$

$$\text{Bobot jenis} = s = \frac{140}{130 + \text{°API}}$$

Titik nyala dari bahan bakar adalah temperatur minimum cairan pada waktu uap yang keluar dari permukaan cairan langsung akan menyala. Dan titik lumer adalah temperatur terendah dimana minyak akan mengalir dibawah kondisi standar.



Gambar 4. Sifat-sifat turunan minyak bumi.

Minyak mempunyai banyak kelebihan bila dibandingkan dengan batubara bila ia dibakar. Minyak lebih bersih dan mudah untuk ditangani, disimpan dan diangkut. Minyak lebih mudah dibakar dan mempunyai sedikit abu. Unsur yang menimbulkan persoalan pada minyak adalah *vanadium*. Vanadium beroksidasi pada waktu pembakaran menjadi vanadium pentaoksida ( $\text{VO}_5$ ) dan senyawa ini akan mengakibatkan korosi yang cepat pada bahan besi.

### Bahan Bakar Gas

Hampir semua bahan bakar gas adalah bahan bakar fosil ataupun hasil sampingan dari bahan bakar fosil. Bahan bakar ini dapat dibagi atas 3 kelompok besar yaitu gas alam, gas pabrik dan gas hasil sampingan.

Komposisi bahan bakar gas umumnya dinyatakan dalam bentuk fraksi mol atau volume dari komponen gas itu sendiri. Analisis juga dapat dilakukan dalam bentuk fraksi massa elemental.

Nilai pembakaran volumetrik suatu campuran bahan bakar gas adalah sama dengan jumlah dari perkalian volume atau fraksi mol komponen individual dengan nilai pembakaran volumetrik komponen yang bersangkutan. Bila nilai pembakaran volumetrik dari suatu kompenen gas pada suatu temperatur referensi,  $T_r$ , dan tekanan referensi,  $P_r$ , diketahui, nilai pembakaran volumetrik dari campuran gas,  $HHV_v$ , diperoleh dari persamaan :

$$(HHV_v \text{ campuran})_{P_r, T_r} = \sum_i (HHV_{v,i})_{P_r, T_r} (V_i)$$

dimana  $HHV_{v,i}$  dan  $V_i$  adalah nilai pembakaran tinggi volumetrik dari fraksi volumetrik gas yang ke- $i$ . Persamaan berikut dapat dipakai untuk mengkonversi nilai pembakaran tinggi volumetrik pada tekanan dan temperatur referensi tertentu ke tekanan dan temperatur lain :

$$(HHV_v)_{P,T} = (HHV_v)_{P_r, T_r} \frac{P_r T}{P T_r}$$

Tekanan dan temperatur dalam persamaan diatas harus dalam nilai absolut.

Nilai pembakaran volumetrik  $HHV_v$  pada suatu tekanan  $P$  dan temperatur  $T$  dapat dikonversi menjadi nilai pembakaran gravimetrik  $HHV_m$  dengan mengalikan nilai volumetrik tersebut dengan volume jenis  $v$  dari gas pada tekanan dan temperatur yang sama:

$$HHV_m = (HHV_v)_{P,T} (v)_{P,T}$$

Volume jenis suatu campuran gas dapat dihitung dari berat molekular gas tersebut ( $MW$ ) dan persamaan keadaan gas ideal, seperti berikut:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{RT}{P} = \frac{R_u T}{P(MW)}$$

dimana  $R_u$  = konstanta gas universal.

Gas alam adalah adalah satu-satunya bahan bakar fosil gas yang sebenarnya dan biasanya terperangkap dalam lapisan batu kapur (limestone) diatas reservoir minyak bumi. Tekanan reservoir berkisar antara 350 - 700 bar. Gas alam terutama dari metana dengan sedikit fraksi gas-gas lain.

Gas alam mempunyai nilai pembakaran gravimetrik yang tinggi sekitar 55.800 kJ/kg. Nilai pembakaran volumetrik gas alam adalah sekitar 37.000



$\text{kJ/m}^3$  pada 1 atm dan  $20\text{ }^\circ\text{C}$ . Diantara ketiga kelas utama bahan bakar fosil, gas alam mempunyai cadangan dalam bumi yang paling sedikit.

Gas alam mempunyai beberapa kelebihan terhadap bahan bakar lainnya dimana lebih mudah terbakar dan bercampur dengan udara dengan baik, pembakaran bersih dengan sedikit abu. Gas alam dapat diangkut dengan mudah dan murah melalui saluran pipa dan gas bisa dikonversi menjadi gas alam cair. (liquified natural gas, LNG) pada  $-127\text{ }^\circ\text{C}$ .

*Gas pabrik* ada beberapa jenis, diantaranya adalah *liquified petroleum gas* (LPG), gas air, gas air karburasi, gas alam pengganti atau sintetis dan gas produser.

Gas LPG terdiri dari distilasi ringan dari minyak bumi, terutama propana dan butana. Oleh karena berat molekular serta kerapatan lebih tinggi pada gas ini, ia mempunyai nilai pembakaran volumetrik yang lebih tinggi dari gas alam lain. Bahan bakar gas ini diangkut dan disimpan dengan tekanan yang berkisar antara 4 hingga 20 bar, tergantung tekanan atmosfer.

Gas air adalah suatu bahan bakar gas pabrik yang diproduksi dengan cara mengalirkan uap dan udara bergantian melalui suatu lapisan kokas pijar. Uap bereaksi dengan kokas panas dan menghasilkan hidrogen dan karbon monoksida. Jika ditambahkan minyak keatas gas air tersebut maka nilai perbakarannya naik dan gas yang dihasilkan disebut gas air karburasi.

Gas alam sintesis atau gas alam substitusi atau disingkat SNG (synthetic natural gas), adalah gas dari proses konversi dari batubara. Konversi ini memerlukan tambahan hidrogen ke batubara. Dalam proses hidrogenisasi, hidrogen yang dimampatkan pada  $900\text{ }^\circ\text{C}$  direaksikan dengan batubara untuk memperoleh sejumlah senyawa hidrokarbon ringan khususnya metana. Pada tabel 2 terlihat beberapa proses konversi batubara menjadi SNG.

Tabel 2. Karakteristik proses-proses batubara menjadi SNG.

Proses	Jenis proses †	Parameter reaktor kimia		Status
		Temp. °C	Tekanan, bars abs	
Koppers-Totzek	G	1480-1820	1+	Komersial
Wellman-Galusha	G	540-650	1+	Komersial
Winkler	G	820-1010	1+	Komersial
Texaco	G	1480-1820	70	Pabrik perintis
Penggumpalan abu	G	870-980	16	Pabrik perintis
COGAS	G	870-930	1+	Pabrik perintis
Lurgi	G/HD	620-870	30	Komersial
Hygas	G/H	650-980	75	Pabrik perintis
Akseptor CO <sub>2</sub>	G/HD	860-1040	10	Pabrik perintis
BI-GAS	G/HD	1650-930	70	Pabrik perintis
Synthane	G/H	980	70	Pabrik perintis

† G—proses gasifikasi; H—proses hidrogasifikasi; HD—proses hidrodevolatilisasi.

Pada proses gasifikasi, batubara direaksikan dengan uap untuk memperoleh suatu gas yang berikutnya dapat dikonversi menjadi metana. Pada proses hidrogasifikasi, hidrogen bertekanan tinggi ditambahkan ke batubara untuk mendapatkan gas metana secara langsung.

*Gas produser* adalah bahan bakar gas yang terbentuk dengan cara membakar lapisan batubara grade rendah didalam tanah atau "in-situ" dengan udara yang cukup agar terjadi pembakaran sempurna. Lapisan akan bersuhu tinggi sehingga hidrogen dilepaskan dan sebagian karbon beroksidasi membentuk karbon monoksida.

*Gas dapur tinggi* adalah bahan bakar kualitas rendah yang merupakan produk samping dari industri baja. Ia dihasilkan dengan membakar batubara dengan udara yang cukup. Gas buang yang diperoleh dipakai untuk memberikan pengurangan atmosfer pada logam yang lumer untuk mencegah terjadinya oksidasi. Komposisi gas dapur tinggi terutama adalah nitrogen, karbon monoksida, dan karbon dioksida. Komponen yang dapat terbakar dari gas ini hanyalah karbon monoksida.

**Contoh Soal**

1. Hitunglah analisis ultisasi dan proksimasi dengan basis begitu diterima, taksiran nilai pembakaran rendah dari nilai pembakaran tinggi yang tercantum didaftar, nilai pembakaran tinggi yang dihitung dengan rumus Dulong, dan tentukan klasifikasi ASTM (kelas dan kelompok) dari batubara Stark County, North Dakota, dengan  $A = 9$  dan  $M = 39$ .

Data-data

Analisis batubara proksimasi bebas abu, kering :

$$VM = 54,0 \%$$

$$FC = 46,0 \%$$

$$HHV = 28.922 \text{ kJ/kg} = 12.435 \text{ Btu/lbm}$$

$$C = 72,4 \%; H_2 = 4,7 \%; O_2 = 18,6 \%; N_2 = 1,5 \%; S = 2,8 \%$$

Jawab

Ditentukan : batubara Stark County dengan  $M = 39$  persen dan  $A = 8$  persen.

Untuk mengkonversi ke suatu basis batubara begitu diterima, faktor koreksi atau pelipatan  $(1 - M - A) = (1,00 - 0,39 - 0,08) = 0,53$ .

Analisis proksimasi begitu diterima menjadi :

$$VM = 0,53 \times 54,0 = 28,62\%$$

$$S = 0,53 \times 2,8 = 1,48\%$$

$$FC = 0,53 \times 46,0 = 24,38\%$$

$$M = 39,00\% \quad HHV = 0,53 \times 28.922 = 15.329 \text{ kJ/kg}$$

$$A = 8,00\% = 0,53 \times 12.435 = 6.591 \text{ Btu/lbm}$$

-----  
100,00%

Analisis begitu diterima menjadi

$$C = 0,53 \times 72,4 = 38,37\%$$

$$H_2 = 0,53 \times 4,7 = 2,49\% \quad HHV = 15.329 \text{ kJ/kg}$$

$$O_2 = 0,53 \times 18,6 = 9,86\% \quad = 6.591 \text{ Btu/lbm}$$

$$\begin{array}{rcl}
 N_2 & = 0,53 \times 1,5 & = 0,80\% \\
 S & = 0,53 \times 2,8 & = 1,48\% \\
 M & & = 39,00\% \\
 A & & = 8,00\% \\
 \hline
 & & 100,00\%
 \end{array}$$

Nilai pembakaran rendah :

$$\begin{aligned}
 \text{LHV} &= \text{HHV} - 2400(M + 9H_2) = 15.329 - 2400 (0,39 + 9 \times 0,0249) \\
 &= 13.855 \text{ kJ/kg} = 5957 \text{ Btu/lbm}
 \end{aligned}$$

Harga taksiran dari nilai pembakaran tinggi yang dicari berdasarkan rumus Dulong :

$$\begin{aligned}
 \text{HHV} &= 33.950C + 144.200 (H_2 - O_2/8) + 9400S \\
 &= 33.950 (0,3837) + 144.200 (0,0249 - 0,0986/8) + 9400 \\
 &\quad (0,0148) \\
 &= 14.979 \text{ kJ/kg} = 6440 \text{ Btu/lbm}
 \end{aligned}$$

Klasifikasi batubara berdasarkan metode ASTM:

$$\begin{aligned}
 \text{FC, bebas-Mm, kering} &= \frac{100 ( \text{FC} - 0,15S )}{100 - M - 1,08A - 0,55S} \\
 &= \frac{100 ( 24,38 - 0,15 \times 1,48 )}{100 - 39,0 - 1,08 \times 8,0 - 0,55 \times 1,48} \\
 &= 46,87\%
 \end{aligned}$$

Oleh karena harga ini lebih kecil dari 69 persen, batubara tidak dapat dimasukkan ke dalam kelas karbon tetap yang bebas bahan mineral, kering.

$$\text{Btu, bebas-Mm, basah} = \frac{100 ( \text{Btu} - 50S )}{100 - 1,08A - 0,55S}$$

$$= \frac{100 ( 6591 - 50 \times 1,48 )}{100 - 1,08 \times 8,0 - 0,55 \times 1,48}$$

$$= 7197 \text{ Btu/lbm}$$

Oleh karena harga nilai pembakaran tinggi bebas bahan mineral adalah antara 6300 dan 8300 Btu/lbm, maka batubara ini digolongkan ke dalam kelas IV, kelompok 1 batubara-lignite A.

2. Hitunglah nilai pembakaran tinggi (kilojoule per meter kubik dan kilojoule per kilogram) pada 10 °C dan 3 atm untuk suatu campuran gas dengan komposisi sebagai berikut : 94,3% CH<sub>4</sub>, 4,2% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> dan 1,5% CO<sub>2</sub>. Diketahui fraksi mol dari komponen gas pada 20 °C dan 1 atm :

$$(\text{HHV}_v)_{\text{CH}_4} = 37.204 \text{ kJ/m}^3 \quad (\text{HHV}_v)_{\text{C}_2\text{H}_6} = 65.782 \text{ kJ/m}^3$$

$$(\text{HHV}_v)_{\text{CO}_2} = 0$$

Jawab

- Berat molekul campuran gas = 0,943(16) + 0,042(30) + 0,015(44)  
= 17,01 kg/kg.mol

- Pada 20 °C dan 1 atm:

$$(\text{HHV}_v)_{\text{campuran}} = 0,943(\text{HHV}_v)_{\text{CH}_4} + 0,042(\text{HHV}_v)_{\text{C}_2\text{H}_6} + 0,015(\text{HHV}_v)_{\text{CO}_2}$$

$$= 0,943(37.204) + 0,042(65.782) = 37.846 \text{ kJ/m}^3 \text{ mol}$$

- Pada 10 °C dan 3 atm:

$$(\text{HHV}_v)_{10\text{C},3\text{atm}} = 37.846 \frac{P}{P_r} \times \frac{T_r}{T} = 37.846 (3/1) (293/283)$$

$$= 117.550 \text{ kJ/m}^3$$

- Volume jenis campuran gas =  $v = R_u T / (P(MW))$

$$\text{dimana: } P = 3 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar/atm (3 atm)} = 3,039 \text{ bar}$$

$$T = 10 + 273 = 283 \text{ K}$$

$$R_u = 0,08314 \text{ bar} \cdot \text{m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{mol})(\text{K})$$

$$v = (0,08314) \times 283 / (3,039 \times 17,01)$$

$$= 0,4552 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{HHV}_m = v(\text{HHV}_v) = 0,4552 \times 117,544$$

$$= 53.506 \text{ kJ/kg}$$

$$= 23.008 \text{ Btu/lbm}$$

**Soal-soal**

1. Sebuah pembangkit daya berkapasitas 2400 MW<sub>e</sub> mempunyai kebutuhan daya untuk suatu hari tertentu sebagai berikut:

00.00 - 05.00 : 850 MW <sub>e</sub>	09.00 - 12.00 : 2150 MW <sub>e</sub>
05.00 - 07.00 : 1250 MW <sub>e</sub>	12.00 - 13.00 : 2040 MW <sub>e</sub>
07.00 - 08.00 : 1840 MW <sub>e</sub>	13.00 - 16.00 : 2350 MW <sub>e</sub>
08.00 - 09.00 : 1960 MW <sub>e</sub>	16.00 - 17.00 : 2400 MW <sub>e</sub>
17.00 - 18.00 : 2250 MW <sub>e</sub>	
18.00 - 20.00 : 1850 MW <sub>e</sub>	
20.00 - 22.00 : 1500 MW <sub>e</sub>	
22.00 - 24.00 : 1150 MW <sub>e</sub>	

Hitunglah keluaran energi total, dalam MW<sub>e</sub>\*hari, kW<sub>e</sub>\*jam, MeV, J dan Btu<sub>e</sub>. Anggaplah pembangkit tersebut membakar batubara dengan nilai pembakaran (kandungan energi) 29.310 kJ/kg (12.600 Btu/lbm) dengan efisiensi termis keseluruhan adalah 37 persen, dan hitunglah massa total batubara, dalam ton, yang dikonsumsi selama hari operasi tersebut dan laju pemakaian batubara maksimum, dalam ton per jam, yang diperlukan agar pembangkit beroperasi secara sempurna. Hitung laju panas unit tersebut, dalam Btu per kilowatt jam (Btu<sub>th</sub>/kW<sub>e</sub>\*jam), dan carilah faktor beban sistem selama masa operasi tersebut. Faktor beban didefinisikan sebagai perbandingan antara keluaran energi rata-rata dan maksimum.

2. Suatu sampel batubara 14 kg, begitu diterima, beratnya 13,4 kg setelah pengeringan udara. Ketika pengeringan dengan oven, sebuah sampel 24 g batubara dengan pengeringan udara itu menyusut beratnya menjadi 2,34 g. Hitunglah persentase kebasahan total dalam batubara pada saat begitu diterima.
3. Sebuah sampel 1,2 g batubara pengeringan udara dari soal 2 dibakar dalam sebuah bom kalorimeter oksigen. Kenaikan temperatur dari 2000 g air serta logam kalorimeter adalah 3,62 °C, diantaranya 0,20 °C adalah akibat kawat sekering (fuse wire) dan pembentukan asam. Setara air dari bagian logam kalorimeter tersebut adalah 450 g. Tentukanlah nilai pembakaran tinggi batubara begitu diterima, dalam kJ/kg dan dalam Btu/lbm.

4. Suatu bahan bakar minyak mempunyai gravitasi jenis API sebesar 32 derajat pada 20 °C. Hitunglah energi minyak tersebut dalam British thermal unit per gallon, serta nilai pembakaran tingginya dalam kilojoule per kilogram. Hitunglah besaran-besaran yang sama pada 60 °C, jika  $\rho_T = \rho_{20} [1 - 0,000733(T - 20)]$ , dimana  $T$  dalam derajat Celsius.
5. Suatu tangki penyimpanan gas yang mempunyai volume 25.000 ft<sup>3</sup> berisi gas dengan tekanan 2 bar dan temperatur 10 °C. Nilai pembakaran tinggi gas itu adalah 22.100 kJ/m<sup>3</sup> pada 20 °C dan 1 bar. Hitunglah jumlah “therms” dalam tangki penyimpanan gas tersebut.
6. Hitunglah nilai pembakaran tinggi gas alam Missouri dalam satuan kilojoule per kilogram dan dalam British thermal unit per kaki kubik, jika gas tersebut disuplai dengan tekanan 2,5 bar dan temperatur 15 °C. Hitunglah volume gas dalam kaki kubik yang dibutuhkan untuk menghasilkan 1.000 therm energi. Hitung juga fraksi massa dari setiap elemen dalam gas itu.

Data-data gas Missouri :

- Nilai pembakaran : 35,31 kJ/l
- CH<sub>4</sub> : 84,1 % vol.
- C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> : 6,7 % vol.
- N<sub>2</sub> : 8,4 % vol.
- CO<sub>2</sub> : 0,8 % vol.