



# TEKNIK PEMBAKARAN

Dr. Eng. Rizqi Fitri Naryanto, S.T., M.Eng

Dr. Eng. Rizqi Fitri Naryanto, S.T., M.Eng

# TEKNIK PEMBAKARAN



## **TEKNIK PEMBAKARAN**

Penulis : Dr. Eng. Rizqi Fitri Naryanto, S.T., M.Eng

**ISBN : 978-623-329-019-7**

**No. HKI : EC00201811711**

*Copyright* © Januari 2021

Ukuran: 15.5 cm X 23 cm; Hal: x + 98

Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang. Dilarang mengutip atau memperbanyak baik sebagian ataupun keseluruhan isi buku dengan cara apa pun tanpa izin tertulis dari penerbit.
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Penata Isi : An Nuha Zarkasyi

Desainer Sampul : M. Rosyiful Aqli

Editor : Mera Kartika Delimayanti, S.Si, M.T., Ph.D

Cetakan I, Januari 2021

Diterbitkan pertama kali oleh **Literasi Nusantara**

Perum Paradiso Kav. A1 Junrejo - Batu

Telp : +6285887254603, +6285841411519

Email: [penerbitlitnus@gmail.com](mailto:penerbitlitnus@gmail.com)

Web: [www.penerbitlitnus.co.id](http://www.penerbitlitnus.co.id)

Anggota IKAPI No. 209/JTI/2018

Didistribusikan oleh CV. Literasi Nusantara Abadi

Jl. Sumedang No. 319, Cepokomulyo, Kepanjen, Malang. 65163

Telp : +6282233992061

Email: [redaksiliterasinusantara@gmail.com](mailto:redaksiliterasinusantara@gmail.com)

## **PRAKATA**

**D**engan segala kerendahan hati, penulis mengucapkan puji syukur kepada Allah SWT atas segala karunia dan berkah yang telah dilimpahkan sehingga penulis dapat menyelesaikan buku ajar ini.

Dalam proses pengerjaan buku ajar, penulis mendapatkan bantuan dari banyak pihak terutama dari Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang. Buku ajar ini dibuat untuk membantu mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang dan khalayak pembaca lainnya untuk mengaplikasikan pengetahuan dan ketrampilan mengenai teknik pembakaran dalam implementasi keilmuan Teknik Mesin.

Penulis menyadari bahwa buku ajar "Teknik Pembakaran" ini masih sangat jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik dari pembaca sekalian.

Semoga buku ajar ini bermanfaat bagi mahasiswa dan khalayak pembaca.

Semarang, Januari 2021

Penulis



# DAFTAR ISI

Prakata	iii
Daftar Isi	v
Daftar Gambar	vii
Daftar Tabel	ix

## **BAB I**

### **PEMBAKARAN: DEFINISI DAN PENYEBABNYA** 1

A. Pendahuluan	1
B. Segitiga Pembakaran	2
C. Tipe Pembakaran	3
D. Persamaan Kimia	4

## **BAB II**

### **BAHAN BAKAR DAN KARAKTERISTIKNYA** 5

A. Bahan Bakar Dan Macam Bahan Bakar	5
1. Bahan Bakar Gas	5
2. Bahan Bakar Cair	7
3. Bahan Bakar Padat	15

## **BAB III**

### **PEMBAKARAN DENGAN BAHAN BAKAR GAS** 19

A. Jenis Pembakaran	19
B. Flame Quenching	26
C. Ignition	28
D. Pembakaran Difusi	30

## **BAB IV**

### **PEMBAKARAN DENGAN BAHAN BAKAR PADAT** 35

A. Bahan Bakar Padat	35
B. Furnace Berbahan Bakar Padat	43

<b>BAB V</b>	
<b>PEMBAKARAN DENGAN BAHAN BAKAR CAIR</b>	<b>49</b>
A. Bahan Bakar Cair	49
<b>BAB VI</b>	
<b>PENGUKURAN BILANGAN OKTANA</b>	<b>55</b>
A. Definisi Bilangan Oktana	55
B. Metode Pengukuran Bilangan Oktana	56
C. Pengujian Dan Pengetesan Bilangan Oktan	57
D. Pengaruh Dari Nilai Oktan	58
<b>BAB VII</b>	
<b>PENGUKURAN BILANGAN SETANA</b>	<b>59</b>
A. Definisi Bilangan Setana	59
B. Relevansi Kimia	60
C. Standar Bilangan Setana	62
<b>BAB VIII</b>	
<b>KESETIMBANGAN KIMIA</b>	<b>65</b>
A. Definisi Keseimbangan Kimia (Chemical Equilibrium)	65
<b>BAB IX</b>	
<b>TERMODINAMIKA REAKSI KIMIA PEMBAKARAN</b>	<b>69</b>
A. Energi Dalam Reaksi Kimia	69
<b>BAB X</b>	
<b>REAKSI PEMBAKARAN MOTOR BAKAR</b>	<b>83</b>
A. Definisi Motor Bensin	83
B. Pembakaran Abnormal Dalam Motor Bensin	88
C. Motor Diesel	88
D. Ruang Bakar	93
Daftar Pustaka	95
Biografi Penulis	97

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Pembakaran Sempurna	3
Gambar 2.	Hasil Pengolahan Minyak Mentah	8
Gambar 3.	Grafik Specific Gravity of Fuel Oil	14
Gambar 4.	Jenis- jenis Batubara	16
Gambar 5.	Teknik Pembakaran <i>Premixed</i> - 1	19
Gambar 6.	Teknik Pembakaran <i>Premixed</i> - 2	20
Gambar 7.	Teknik Pembakaran <i>Premixed</i> – 3	20
Gambar 8.	Struktur Aliran Laminer	21
Gambar 9.	Hasil Fotografi Schlieren untuk Methane/ <i>Air mixtures</i> bagian 1	24
Gambar 10.	Hasil Fotografi Schlieren untuk Methane/ <i>Air mixtures</i> bagian 2	25
Gambar 11.	Minimum Ignition Energies For Various Electrode Configuration	28
Gambar 12.	Grafik Equivalence Ratio vs Min Ignition Energy	29
Gambar 13.	Teknik Pembakaran Difusi	30
Gambar 14.	Free Jet Diffusion Flame Transition	32
Gambar 15.	Concentratic Jet Diffusion Flame and Stability Regimes for Free Jet Diffusion Flame	33
Gambar 16.	Effect of Moisture a) Normalized Mass and b) Normalized Burning Rate	37
Gambar 17.	Typical Curves of Transient Mass and Reactivity For Bituminous Coal Particle with 1100-K	39
Gambar 18.	Effect of Particle on Transient Mass for Bituminous Coal Particle with 1200-K	40
Gambar 19.	Boiler/Burner	44
Gambar 20.	Pulverized Coal Nozzel Burner and Burner Configuration	45



Gambar 21.	Schematic Diagram of Top Feed Downdraft Combustor	45
Gambar 22.	Flow Pattern in A Cyclone Combustor	46
Gambar 23.	The Cyclone Furnace	47
Gambar 24.	Proses Pembakaran dengan Bahan Bakar Cair	51
Gambar 25.	Berbagai Tipe Pembakaran dengan Bahan Bakar Cair	52
Gambar 26.	Berbagai Alat yang Menggunakan Bahan Bakar Cair	53
Gambar 27.	Siklus Pembakaran Mesin Bensin	84
Gambar 28.	Fenomena Pembakaran Terhadap Sudut Engkol	85
Gambar 29.	Grafik Crack Angle dan Spark Advance	86
Gambar 30.	Pengaruh Dari Aliran Swirl dan Letak Busi	87
Gambar 31.	Grafik Temperatur Udara Sudut Engkol	89
Gambar 32.	Pembakaran Dalam Motor Diesel	90
Gambar 33.	Combustion Chamber	92

## DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Heating Value Beberapa Bahan Bakar Gas	7
Tabel 2.	Volumetric Analysis Beberapa Bahan Bakar Gas	7
Tabel 3.	Flash Point and Autoignition Temperature	11
Tabel 4.	Properties of Automotive Fuels	11
Tabel 5.	Spesifikasi Bahan Bakar Diesel	12
Tabel 6.	Typical Properties of Fuel Oils	12
Tabel 7.	National Bureau of Standards Specifications for Fuel Oils	13
Tabel 8.	Typical Residual Fuel Oil Analysis	14
Tabel 9.	Representative Proximate Analysis, Ultimate Analysis, and Heating Value of Solid Fuels	17
Tabel 10.	Classification of Coals by Rank	17
Tabel 11.	Composition on Solid Fuels	18
Tabel 12.	Jarak Quench Untuk Berbagai Variasi Stoichlometric	27
Tabel 13.	Jet Diffusion Flame Transition to Turbulent Flow	32
Tabel 14.	Representative Pyrolysis Parameters for Several Solid Fuels	38
Tabel 15.	Typical Ignition Temperature for Selected Solid Fuels	39
Tabel 16.	Representative Global Coal Char Oxidation	42
Tabel 17.	Typical Ignition Delay and Total Burn Times	42
Tabel 18.	Tabel Entalpy of Formation	82

# BAB I

## PEMBAKARAN: DEFINISI DAN PENYEBABNYA

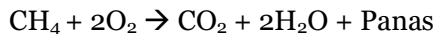
### Kompetensi

Agar mahasiswa dapat menjabarkan definisi dan syarat terjadinya pembakaran dalam suatu proses reaksi kimia.

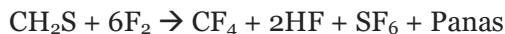
---

### A. Pendahuluan

Pembakaran adalah suatu runutan reaksi kimia antara suatu bahan bakar dan suatu oksidan, disertai dengan produksi panas yang kadang disertai cahaya dalam bentuk pendar atau api. Dalam suatu reaksi pembakaran lengkap, suatu senyawa bereaksi dengan zat pengoksidasi, dan produknya adalah senyawa dari tiap elemen dalam bahan bakar dengan zat pengoksidasi. Contoh:



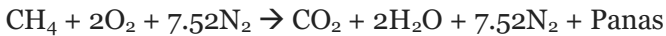
Entalpi standar reaksi untuk pembakaran metana pada 298,15K dan 1 atm adalah -802 kJ/mol. Contoh lainnya:



Contoh yang lebih sederhana dapat diamati pada pembakaran hidrogen dan oksigen, yang merupakan reaksi umum yang digunakan dalam mesin roket, yang hanya menghasilkan uap air, dengan entalpi standar reaksi ada 298,15 K dan 1 atm adalah -242 kJ/mol.



Pada mayoritas penggunaan pembakaran sehari-hari, oksidan oksigen ( $\text{O}_2$ ) diperoleh dari udara ambien dan gas resultan (gas cerobong, *flue gas*) dari pembakaran akan mengandung nitrogen:



Seperti dapat dilihat, jika udara adalah sumber oksigen, nitrogen meliputi bagian yang sangat besar dari gas cerobong yang dihasilkan.

Dalam kenyataannya, proses pembakaran tidak pernah sempurna. Dalam gas cerobong dari pembakaran karbon (seperti dalam pembakaran batubara) atau senyawa karbon (seperti dalam pembakaran hidrokarbon, kayu, dll) akan ditemukan baik karbon yang tak terbakar maupun senyawa karbon ( $\text{CO}$  dan lainnya). Jika pembakaran pada suhu tinggi menggunakan udara (mengandung 78% nitrogen), maka sebagian kecil nitrogen akan bereaksi menjadi berbagai jenis nitrogen oksida ( $\text{NO}_x$ ) yang berbahaya.

## **B. Segitiga Pembakaran**

Segitiga Pembakaran, merupakan syarat minimum terjadinya pembakaran, apabila salah satu dari ketiga hal ini tidak ada, maka pembakaran tidak akan terjadi. Segitiga pembakaran terdiri dari :

1. Fuel ( bahan Bakar), merupakan bahan bakar yang mengandung unsur hidrokarbon  
Misal: bensin, solar, hidrogen, batu bara
2. Heat Source (sumber panas), merupakan sumber panas untuk energi inisiasi terjadinya pembakaran.  
Misal: busi, percikan bunga api, pengaruh temperature (pada mesin diesel).
3. Oxidizer, merupakan zat aditif untuk proses pengoksidasian bahan bakar.  
Misal: oksigen, udara.

Pengelompokan Pelepasan energi berdasarkan proses terjadinya pembakaran:

1. Explotion : Rapidly Head Release, with/without combustion  
Misal: ban meletus, gunung meletus,
2. Deflagration : Rapidly Head Release with combustion in sonic / under supersonic combustion ( pelepasan energi secara cepet disertai pembakaran di BAWAH kecepatan suara)

Misal: Pembakaran pada mesin Otto, mesin Diesel

3. Detonation : Rapidly Head Release with combustion above supersonic combustion, (Pelepasan energi secara cepat disertai dengan pembakaran di ATAS kecepatan suara)

Misal : sonic boom, meledaknya reaktor nuklir Fukushima Jepang)

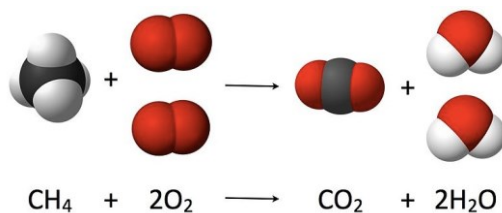
### C. Tipe Pembakaran

Terdapat beberapa tipe pembakaran yakni :

#### 1. Pembakaran Sempurna

Pada pembakaran sempurna, reaktan terbakar dengan oksigen menghasilkan beberapa produk. Ketika hidrokarbon terbakar dengan oksigen, maka reaksi utama akan menghasilkan karbon dioksida dan air. Ketika elemen dibakar, maka produk yang dihasilkan biasanya juga berupa oksida. Karbon dibakar menghasilkan karbon dioksida, sulfur dibakar menghasilkan sulfur dioksida, dan besi dibakar menghasilkan besi oksida. Nitrogen tidak dianggap sebagai komponen yang bisa terbakar jika oksigen dipakai sebagai agen pengoksidasi, namun nitrogen oksida  $\text{NO}_x$  dalam jumlah kecil biasanya akan terbentuk.

Jumlah udara yang diperlukan untuk pembakaran sempurna disebut udara teoretis. Namun, pada praktiknya digunakan jumlah 2-3 kali jumlah udara teoritis. Pembakaran metana adalah contoh reaksi pembakaran sempurna, karena produknya adalah karbondioksida dan air



Gambar 1. Pembakaran Sempurna

#### 2. Pembakaran Tak Sempurna

Pembakaran tak sempurna dihasilkan bila tidak ada oksigen yang cukup untuk membakar bahan bakar sepenuhnya menjadi karbon dioksida dan air. Pada banyak bahan bakar, seperti minyak diesel, batu bara, dan kayu, pirolisis muncul sebelum pembakaran. Pada

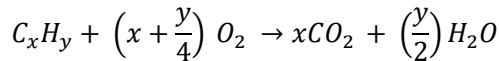
pembakaran tak sempurna, produk pirolisis tidak terbakar dan mengkontaminasi asap dengan partikulat berbahaya, misalnya oksidasi sebagian etanol menghasilkan asetaldehida yang berbahaya, begitu juga dengan oksidasi sebagian karbon yang menghasilkan karbon monoksida yang beracun.

Kualitas pembakaran dapat ditingkatkan dengan desain alat pembakaran, seperti pembakar minyak dan mesin pembakaran dalam. Perbaikan lebih lanjut mencakup alat katalitik pasca pembakaran (seperti konverter katalitik). Beberapa alat-alat ini biasanya dibutuhkan oleh banyak mobil/kendaraan di berbagai negara untuk memenuhi aturan lingkungan negaranya mengenai standar emisi.

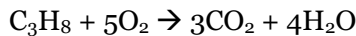
Derajat pembakaran dapat diukur dan dianalisis dengan peralatan uji. Para peneliti menggunakan analiser pembakaran untuk menguji efisiensi pembakar selama proses pembakaran.

#### D. Persamaan Kimia

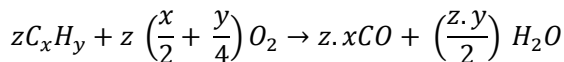
Pada umumnya, persamaan kimia untuk pembakaran hidrokarbon dengan oksigen adalah



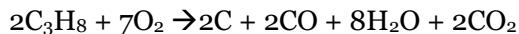
Contoh, persamaan kimia pembakaran propana:



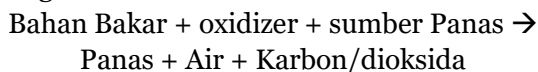
Secara umum, persamaan kimia untuk pembakaran hidrokarbon yang tidak sempurna (kekurangan oksigen) adalah sebagai berikut:



Contohnya, persamaan kimia pembakaran propana yang tidak sempurna:



Secara sederhana, reaksi pembakaran hidrokarbon dapat dinyatakan sebagai:



# BAB II

## BAHAN BAKAR DAN KARAKTERISTIKNYA

### Kompetensi

Agar mahasiswa dapat menjabarkan bahan bakar dan karakteristiknya dalam suatu proses permesinan.

---

### A. Bahan Bakar Dan Macam Bahan Bakar

Bahan Bakar adalah Suatu zat yang jika dipanaskan akan mengalami reaksi kimia dengan oksidator (biasanya oksigen dalam udara) untuk melepaskan panas. Bahan bakar komersial mengandung karbon, hidrogen dan senyawa-senyawanya (sehingga sering disebut bahan bakar **hidrokarbon**) yang akan menghasilkan suatu **nilai kalor** (*heating value*).

### Syarat Umum Bahan Bakar:

1. Tersedia dalam jumlah yang banyak.
2. Relatif murah
3. Punya nilai kalor yang tinggi
4. Emisi rendah

### 1. Bahan Bakar Gas

#### a. Gas alam (*natural gas*)

Ditemukan di bebatuan berporos dalam kondisi terkompresi secara sendirian atau bersama-sama dengan minyak mentah dalam kondisi terlarut. Terdiri dari campuran **hidrokarbon**

dengan gas **metana** ( $\text{CH}_4$ ) sebagai unsur utama dan **etana** ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), **propana** ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), **butana** ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) dalam jumlah lebih kecil. Kandungan **sulfur** dan senyawa **nitrogen** organik bisa diabaikan. Untuk memudahkan transportasi gas alam sering dicairkan sampai  $-127^\circ\text{C}$  sehingga sering disebut sebagai **LNG** (*liquefied natural gas*).

## 2. **LPG** (*liquefied petroleum gas*)

Diproduksi dari suatu sumur minyak dengan dengan kandungan utama **propana** dan **butana**. LPG diangkut dan disimpan pada suatu tekanan tertentu (4~20bar) dan pada kondisi atmosfer berwujud gas.

## 3. **Producer gas**

Diproduksi dengan cara mengalirkan udara dalam jumlah yang kurang dari **stoikiometris** ke dalam lapisan batubara atau kayu yang dalam kondisi panas. Unsur yang bisa terbakar adalah hidrogen dan karbon monoksida (CO) dengan kandungan nitrogen sampai 55%. Karena kandungan nitrogen yang cukup tinggi maka nilai kalornya rendah, sehingga untuk meningkatkannya dialirkan oksigen atau memanaskan secara tidak langsung.

### **Karakteristik bahan bakar gas:**

1. Karena berfasa gas maka bahan bakar gas mudah bercampur dengan udara.
2. Sifat volumetris dan nilai kalor beberapa bahan bakar gas bisa dilihat dari tabel berikut :



Tabel 1. Heating Value Beberapa Bahan Bakar Gas  
 Heating value of some gaseous fuels [Perry and Green, *Handbook of Chemical Engineering*, © 1984, by permission of The McGraw-Hill Companies]

Fuel	HHV		LHV	
	(Btu/ft <sup>3</sup> )*	(Btu/lb <sub>m</sub> )	(Btu/ft <sup>3</sup> )*	(Btu/lb <sub>m</sub> )
Hydrogen (H <sub>2</sub> )	319.4	61,030	270.0	51,593
Carbon monoxide (CO)	316.0	4,346	316.0	4,346
Methane (CH <sub>4</sub> )	994.7	23,880	896.0	21,518
Ethane (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	1743	22,329	1594	20,431
Propane (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	2480	21,670	2283	19,944
Butane (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	3216	21,316	2969	19,679
Ethylene (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	1576	21,646	1477	20,276
Acetylene (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	1451	21,477	1402	20,734
Natural gas (typical)	1030	23,300	935	21,150
Producer gas (typical)	170	2,500	155	2,280

\*At 1 atm, 68°F.

Tabel 2. Volumetric Analysis Beberapa Bahan Bakar Gas

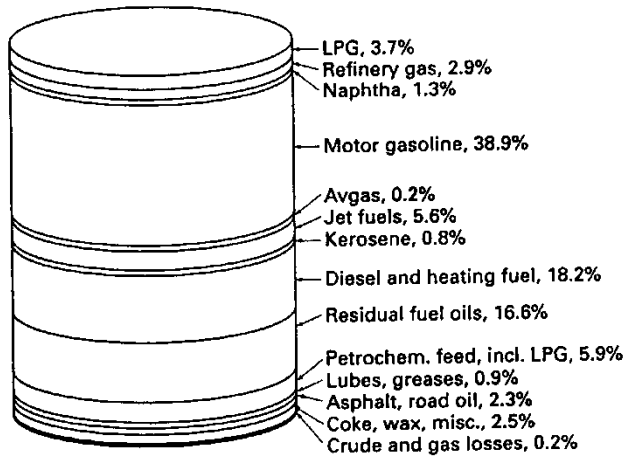
Volumetric analysis of some gaseous fuels [Perry and Green, *Handbook of Chemical Engineering*, © 1984, by permission of The McGraw-Hill Companies]

Species	Natural gas	LPG	Coal producer gas	Wood producer gas
CO	—	—	20–30%	18–25%
H <sub>2</sub>	—	—	8–20%	13–15%
CH <sub>4</sub>	80–95%	—	0.5–3%	1–5%
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	< 6	—	Trace	Trace
> C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> *	< 4	100%	Trace	Trace
CO <sub>2</sub>	< 5	—	3–9%	5–10%
N <sub>2</sub>	< 5	—	50–56%	45–54%
H <sub>2</sub> O	—	—	—	5–15%

\* Contains hydrocarbons heavier than C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>.

## 2. Bahan Bakar Cair

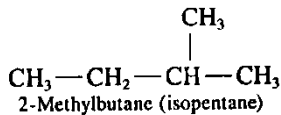
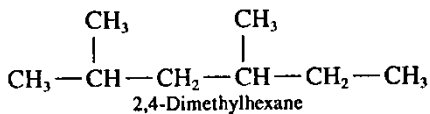
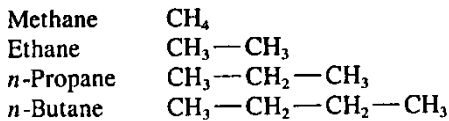
Sebagian besar didapatkan dari turunan **minyak mentah**. Untuk masa yang akan datang dimungkinkan didapatkan dari batubara atau biomass. Minyak mentah merupakan campuran hidrokarbon cair (~84%) dengan sejumlah sulfur (~3%), nitrogen (~0,5%), oksigen (~0,5%), metal dan mineral. Untuk mendapatkan bahan bakar cair yang ada di pasaran, maka minyak mentah perlu **refining** yang meliputi **distillation, cracking, reforming, dan impurity removal**.



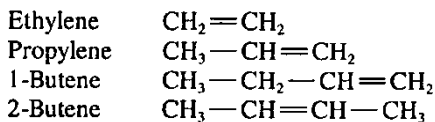
Gambar 2. Hasil Pengolahan Minyak Mentah

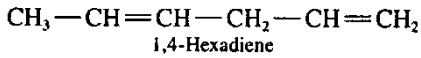
Minyak mentah dilihat struktur kimiawi mengandung gugus-

➤ **alkana  $C_nH_{2n+2}$  (*paraffins*)**

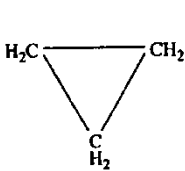


➤ **alkena  $C_nH_{2n}$  (*oleffins*)**

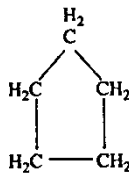




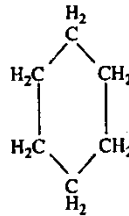
➤ **sikloalkana  $C_nH_{2n}$  (*naphthene*)**



Cyclopropane

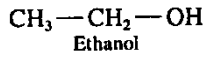
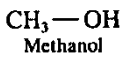


Cyclopentane

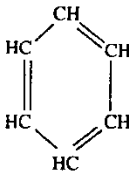


Cyclohexane

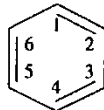
➤ **alkohol**



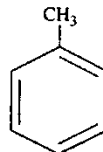
➤ **aromatik  $C_nH_n$ .**



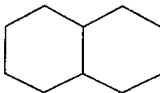
Benzene



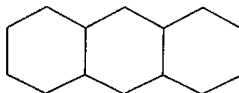
Benzene



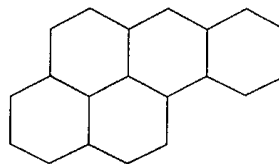
Toluene



Naphthalene



Anthracene



Benzo[a]pyrene

Gugus kimiawi ini menentukan mudah tidaknya pembentukan **jelaga (*soot*)**.

Untuk pembakaran ***premixed***:

aromatik > alkohol > parafin > olefin > *acetylene*

Untuk pembakaran difusi:

aromatik > *acetylene* > olefin > parafin > alkohol

### **Karakteristik bahan bakar cair:**

1. **Heating value** (nilai kalor). *See Table.*
2. **Specific gravity** (sg) yang merupakan perbandingan antara densitas bahan bakar dan air pada temperatur yang sama ( $\equiv \rho_{bb}/\rho_{air}$  at 16°C). Sering juga digunakan API (*American Petroleum Industry*) **specific gravity** (G) yang besarnya:  
$$G = 141,5/sg - 131,5.$$
3. **Viscosity** (kekentalan) menunjukkan mudah tidaknya bahan bakar cair dipompa dan dikabutkan. Semakin tinggi temperatur maka viskositas semakin turun, yang artinya semakin mudah mengalir dan mengalami atomisasi.
4. **Flash point** merupakan temperatur maksimal dimana bahan bakar dapat ditangani tanpa adanya resiko apapun.
5. **Autoignition temperature** merupakan temperatur dimana bahan bakar bisa menyala dengan sendirinya dengan tanpa penyalaan.
6. **Octane number ON** (bilangan oktan) menunjukkan ketahanan bahan bakar dalam motor bensin untuk tidak mengalami *knocking* (terjadi karena pembakaran terlalu dini). Semakin tinggi ON semakin susah terjadi ketukan.
7. **Cetane number CN** (bilangan cetan) menunjukkan tendensi keterlambatan penyalaan bahan bakar (*delay Ignition*) dalam motor diesel. Semakin tinggi CN semakin mudah terjadi penyalaan.
8. **Smoke point** menunjukkan tendensi pembentukan jelaga terutama dalam turbin gas. Semakin tinggi *smoke point* semakin susah membentuk jelaga.

Tabel 3. Flash Point and Autoignition Temperature

**Flash point and autoignition temperature of pure fuels in air at 1 atm**

Substance	Flash point (°C)	Autoignition (°C)
Methane	-188	537
Ethane	-135	472
Propane	-104	470
<i>n</i> -Butane	-60	365
<i>n</i> -Octane	10	206
Isooctane	-12	418
<i>n</i> -Cetane	135	205
Methanol	11	385
Ethanol	12	365
Acetylene	Gas	305
Carbon monoxide	Gas	609
Hydrogen	Gas	400

Source: Bartok and Sarofim, *Fossil Fuel Combustion: A Source Book*, ©1991, Wiley, by permission of John Wiley and Sons, Inc.

Tabel 4. Properties of Automotive Fuels

**Properties of automotive fuels**

Fuel type	Automotive gasoline	No. 2 diesel fuel	Methanol	Ethanol
Specific gravity at 16°C	0.72-0.78	0.85	0.796	0.794
Kinematic viscosity at 20°C (m <sup>2</sup> /s)	$0.8 \times 10^{-6}$	$2.5 \times 10^{-6}$	$0.75 \times 10^{-6}$	$151 \times 10^{-6}$
Boiling point range (°C)	30-225	210-235	65	78
Flash point (°C)	-43	52	11	13
Autoignition temperature (°C)	370	254	464	423
Octane no. (research)	91-100	—	109	109
Octane no. (motor)	82-92	—	89	90
Cetane no.	< 15	37-56	< 15	< 15
Stoichiometric air/fuel by weight	14.7	14.7	6.45	9.0
Heat of vaporization (kJ/kg)	380	375	1185	920
Lower heating value (MJ/kg)	43.5	45	20.1	27

Tabel 5. Spesifikasi Bahan Bakar Diesel

ASTM D975 diesel fuel specifications [by permission of ASTM © 1996]

	No. 1D	No. 2D	No. 4D
Flash point (°C, minimum)	38	52	55
Cloud point (°C)	Local requirement	Local requirement	Local requirement
Water and sediment (vol %, max)	0.05	0.05	0.05
Carbon residue	0.15	0.35	—
10% Btm (% , max)			
Ash, wt (% , max)	0.01	0.01	0.10
Distillation 90% point (°C)	288 max	282–338	—
Viscosity at 40°C (cSt)	1.3–2.4	1.9–4.1	5.5–24
Sulfur (wt %, max)	0.05	0.05	2.0
Copper strip corrosion, max	No. 3	No. 3	—
Cetane no. (minimum)	40	40	30

Tabel 6. Typical Properties of Fuel Oils

Typical properties of fuel oils

Grade no.	1	2	4	5	6
	Kerosene	Distillate	Very light residual	Light residual	Residual
Color	Clear	Amber	Black	Black	Black
Specific gravity, at 16°C	0.825	0.865	0.928	0.953	0.986
Kinematic viscosity at 38°C (m <sup>2</sup> /s)	$1.6 \times 10^{-6}$	$2.6 \times 10^{-6}$	$15 \times 10^{-6}$	$50 \times 10^{-6}$	$360 \times 10^{-6}$
Pour point (°C)	< -17	< -18	-23	-1	19
Flash point (°C)	38	38	55	55	66
Autoignition temperature (°C)	230	260	263	—	408
Carbon (%)	86.5	86.4	86.1	85.5	85.7
Carbon residue (%)	Trace	Trace	2.5	5.0	12.0
Hydrogen (%)	13.2	12.7	11.9	11.7	10.5
Oxygen (%)	0.01	0.04	0.27	0.3	0.38–0.64
Ash (%)	—	< 0.01	0.02	0.03	0.04
HHV (MJ/kg)	46.2	45.4	43.8	43.2	42.4

# Table 7. National Bureau of Standards Specifications for Fuel Oils

**Table 8-1**  
**Typical Residual Fuel Oil Analysis**

	High Sulfur	Mid-Continent	West Coast	West Coast†	Gulf Coast	Venezuela	Venezuela†
Gravity, °API	17.3	9.3	8.3	6.8	12.0	14.1	15.5
Viscosity SUS @ 38°C (100°F)	3800	1900*	1600*	1100*	1700*	1900*	1200*
Carbon, wt %	86.23	—	—	—	—	—	—
Hydrogen, wt %	11.23	—	—	—	—	—	—
Sulfur, wt %	2.14	1.45	1.3	1.5	2.1	2.37	1.5
Nitrogen, wt %	0.45	—	—	—	—	—	—
Conradson carbon residue, wt %	12.46	—	—	12.6	—	9.6	—
Heptane insoluble, wt %	10.37	—	—	—	—	—	—
Water and sediment, wt %	—	0.04	0.3	—	—	0.10	—
Flash point, °F	—	315	—	265	155	206	265
Pour point, °F	—	30-40	—	5	35	20	—
Ash, wt %	0.08	0.22	0.09	0.06	0.02	0.05	—
Vanadium, ppm	350	117	—	79	—	—	236
Sodium, ppm	15	18	—	—	—	—	—
Lead, ppm	—	<1.0	—	—	—	—	—
Manganese, ppm	—	<1.0	—	—	—	—	—
Magnesium, ppm	—	6.2	—	—	—	—	—
Calcium, ppm	—	34.4	—	78	—	—	—
Nickel, ppm	50	26.9	—	—	—	—	86
Iron, ppm	—	—	—	—	—	—	—

\*Viscosity obtained at 122°F using Saybolt Seconds Furol in the original publication. Translated into SUS in this table.

†Shows variations in published data.

Sources: Goldstein, H. L., and C. W. Siegmund, "Particulate Emissions from Residual Fuel Fired Boilers: Influence of Combustion Modification," Paper No. 76-WA/APC-3, *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Power*, December 1976; and Barrett, R. E., et al. "Residual Fuel Oil - Water Emulsions," Report PB 189 076, Battelle Memorial Institute, Columbus, Ohio, 43201, January 12, 1970.

**Table 8-8 continued**

Grade of fuel oil <sup>a</sup>	Flash point, °F	Pour point, °F	Water and sediment, %	Carbon residue on 10% residuum, %	Ash, %	Distillation temperatures, °F				Viscosity				Gravity, °API
						10%	90%	End point	Universal at 100°F	Saybolt		Kinematic centistokes at		
										Furol at 122°F	100°F	122°F		
No. 1 for use in burners equipped with preheaters permitting a high-viscosity fuel.	150 or legal		2.00							300	45		(638)	(92)

<sup>a</sup>Recognizing the necessity for low-sulfur fuel oils used in connection with heat treatment, nonferrous metal, glass and ceramic furnaces, and other special uses, a sulfur requirement may be specified in accordance with the following table:

No.	Grade of fuel oil	Sulfur, max, percent
23	No. 1	0.5
24	No. 2	1.0
25	Nos. 4, 5, and 6	No limit

Other sulfur limits may be specified only by mutual agreement between the buyer and seller.

<sup>b</sup>It is the intent of these classifications that failure to meet any requirement of a given grade does not automatically place an oil in the next lower grade unless in fact it meets all requirements of the lower grade.

<sup>c</sup>No. 1 oil shall be tested for corrosion in accordance with standards for 3 hours at 122°F. The exposed copper strip shall show no gray or black deposit.

<sup>d</sup>Lower or higher pour points may be specified whenever required by conditions of storage or use. However, these specifications shall not require a pour point lower than 0°F under any conditions.

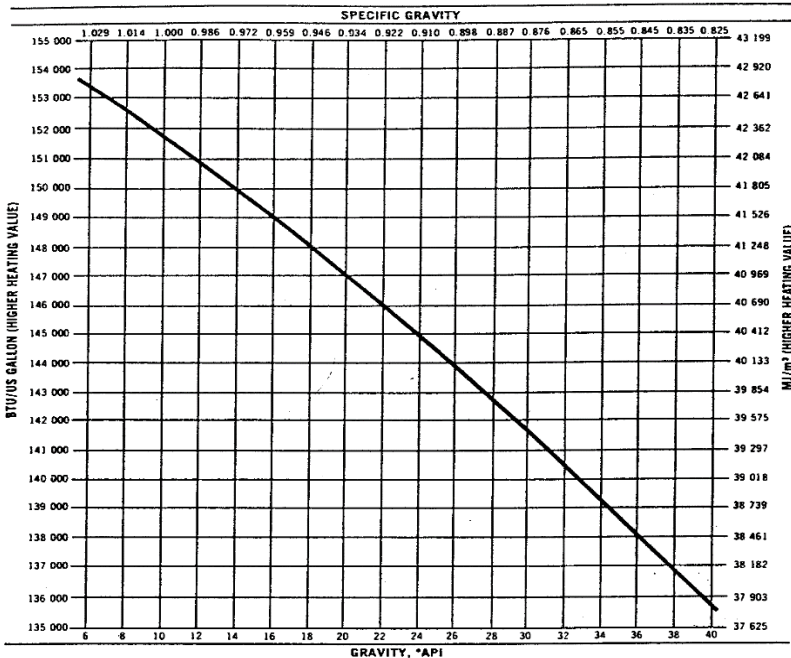
<sup>e</sup>The 10-percent point may be specified at 440°F. Maximum for use in other than atomizing burners.

<sup>f</sup>The amount of water by distillation plus the sediment by extraction shall not exceed 2.00 percent. The amount of sediment by extraction shall not exceed 0.50 percent. A deduction in quantity shall be made for all water and sediment in excess of 1.0 percent.

## Tabel 8. Typical Residual Fuel Oil Analysis

**National Bureau of Standards Specifications for Fuel Oils\***

Grade of fuel oil <sup>1</sup>	Flash point, °F		Pour point, °F	Water and sediment, %	Carbon residue on 10% residuum, %	Ash, %	Distillation temperatures, °F				Viscosity				Gravity, °API	
							10% point	90% point	End point	Saybolt		Kinematic centistokes at				
										Universal at 100°F	Furol at 122°F	100°F	122°F			
Number	Description	min	max	max	max	max	max	max	max	min	min	max	min	min	min	
1	Distillate oil intended for vaporizing pot-type burners and other burners requiring this grade. <sup>2</sup>	100 or legal	0	Trace	0.15		max	max	max	max	max	max	max	max	max	15
2	Distillate oil for general purpose domestic heating for use in burners not requiring No. 1.	100 or legal	20	0.10	0.35	(e)	675		40			(4.3)				26
4	Oil for burner installations not equipped with preheating facilities.	130 or legal	20	.50		0.10				125	45		(26.4)	(5.8)		
5	Residual-type oil for burner installations equipped with preheating facilities.	130 or legal		1.00		.10					150	40	(32.1)	(81)		



\*Values derived from this graph will not necessarily agree with heating values shown for specific fuels on Table 1 of typical values for fuel oils. This is because graph does not allow for variance due to sulfur content.

Specific gravity of fuel oil vs. heat content. (Source: *Fundamentals of Boiler Efficiency*, Exxon Company U.S.A., 1976.)

### Gambar 3. Grafik Specific Gravity of Fuel Oil



### 3. Bahan Bakar Padat

Dibandingkan dengan bahan bakar gas atau cair, bahan bakar padat mengandung **impurity** berupa air, abu, nitrogen dan sulfur dalam jumlah yang signifikan.

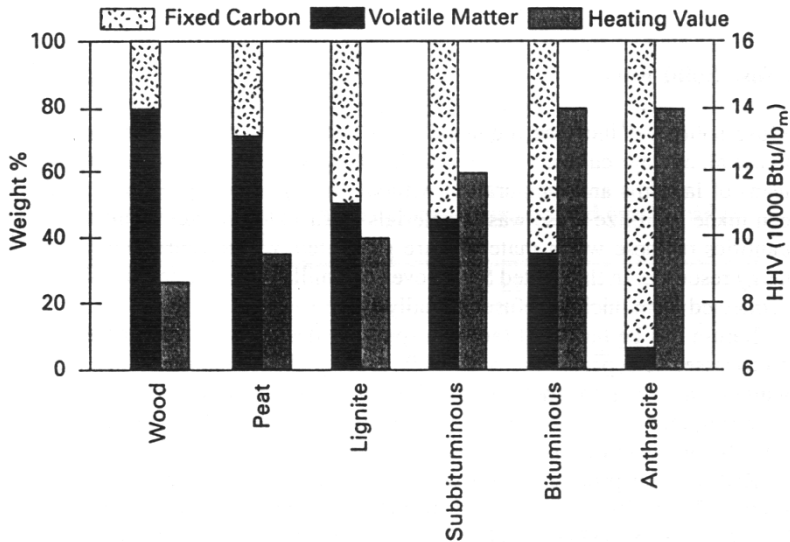
#### Jenis-jenis bahan bakar padat:

- a. **Biomass** dapat dibagi menjadi kayu dan non-kayu. Arang didapatkan dengan memanaskan kayu dengan tanpa oksigen.
- b. **Peat** berasal dari daun-daunan, ranting, atau batang tumbuhan yang membusuk.
- c. **Batubara** berasal dari fosil biomassa yang telah terkubur selama ratusan ribu tahun. Batubara dapat diklasifikasikan berdasarkan **rangking** dan **grade**.

Ranking batubara didasarkan kepada besarnya nilai kalor untuk batubara ranking rendah, dan prosentase karbon untuk batubara ranking tinggi.

#### Jenis-jenis batubara berdasar rangking:

- a. **Lignite** berwarna coklat kehitam-hitaman dan termasuk rangking rendah. Secara kimiawi sifatnya mirip dengan **peat** (sampah tanaman) yaitu banyak mengandung air dan unsur volatil (*volatile matter*). Secara fisis lignite mudah pecah.
- b. **Subbituminous** berwarna hitam kusam. Kandungan air lebih sedikit dibanding dengan **lignite**.
- c. **Bituminous** berwarna hitam gelap dengan kandungan air yang rendah dan kandungan unsur volatil tinggi sampai medium. *Bituminous* lebih tahan terhadap cuaca dibanding *lignite* dan *subbituminous*.
- d. **Anthracite** berujud keras, mudah retak, dan mengkilap. Hampir tidak mengandung air atau volatil.



Typical volatile matter, fixed carbon, and higher heating value for wood, peat, and coal on a moisture and ash free basis.

Gambar 4. Jenis-jenis Batubara

*Grade* batubara tergantung kepada kandungan abu, temperatur fusi abu, kandungan sulfur. *Grade* batubara bisa ditingkatkan dengan *cleaning* untuk menghilangkan abu dan senyawa sulfur. Secara mekanis pembersihan abu bisa sampai 10~70%, sedangkan untuk sulfur bisa sampai 35%.

**Pengujian batubara :**

- (a) **Proximate analysis** menunjukkan *moisture*, volatil mampu bakar, karbon, dan abu.
- (b) **Ultimate analysis** menunjukkan komposisi kimiawi batubara.
- (c) **Hardgrove grindability** menunjukkan kemampuan batubara untuk dihaluskan.
- (d) **Ash fusion temperature** (titik leleh abu) menunjukkan kecenderungan terjadinya *fouling* dan *slagging* dalam sebuah boiler.

Tabel 9. Representative Proximate Analysis, Ultimate Analysis, and Heating Value of Solid Fuels

**Representative proximate analysis, ultimate analysis, and heating value of solid fuels (dry, ash-free)**

	Fuel type				
	Wood	Peat	Lignite	Bituminous coal	Refuse-derived fuel
Proximate analysis (wt %)					
Volatile matter	81	65	55	40	85
Fixed carbon	19	35	45	60	15
Ultimate analysis (wt %)					
Hydrogen	6	6	5	5	7
Carbon	50	55	68	78	52
Sulfur	0.1	0.4	1	2	0.3
Nitrogen	0.1	1	1	2	0.6
Oxygen	44	38	25	13	40
Higher heating value (Btu/lb)	8700	9500	10,000	14,000	9700

Tabel 10. Classification of Coals by Rank

**Classification of coals by rank (dry, ash-free basis)  
[by permission of ASTM © 1990]**

Rank	Fixed carbon (%)	Higher heating value (Btu/lb <sub>w</sub> )
Meta-anthracite	> 98	
Anthracite	92–98	
Semianthracite	86–92	
Low volatile bituminous	78–86	
Medium volatile bituminous	69–78	
High volatile A bituminous		> 14,000
High volatile B bituminous		13,000–14,000
High volatile C bituminous		11,500–13,000
Subbituminous A		10,500–11,500
Subbituminous B		9500–10,500
Subbituminous C		8300–9500
Lignite A		6300–8300
Lignite B		< 6300

Tabel 11. Composition on Solid Fuels

**Typical percent oxygen, water, and ash in solid fuels**

<b>Fuel</b>	<b>Oxygen (dry, ash-free)</b>	<b>Moisture (ash-free)</b>	<b>Ash (dry)</b>
Wood	45%	15–50%	0.1–1.0%
Peat	35%	90%	0.1–10%
Lignite coal	25%	30%	> 5%
Bituminous coal	5%	5%	> 5%
Anthracite coal	2%	4%	> 5%
Refuse-derived fuel	40%	24%	10–15%

# BAB III

## PEMBAKARAN DENGAN BAHAN BAKAR GAS

### Kompetensi

Agar mahasiswa dapat menjabarkan proses pembakaran dengan bahan bakar gas.

---

### A. Jenis Pembakaran

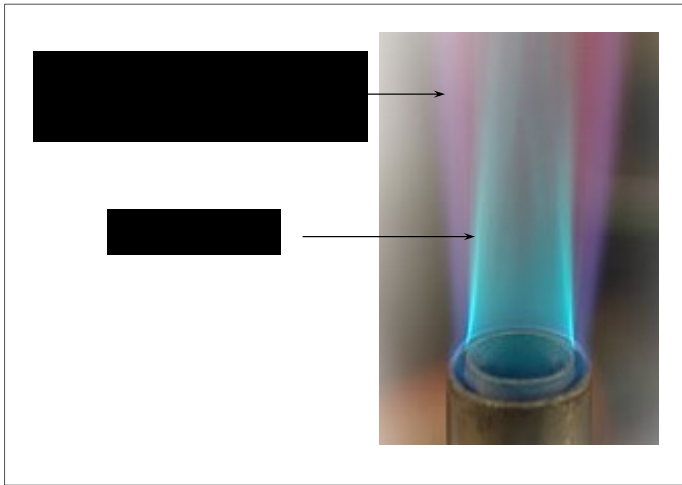
Dilihat dari kondisi reaktan, jenis pembakaran dibagi menjadi:

1. Pembakaran *premixed*, apabila sebelum masuk ruang bakar bahan bakar dan udara dicampur dahulu secara homogen
2. Pembakaran difusi, apabila pencampuran bahan bakar dan oksidan terjadi dalam ruang bakar secara difusi

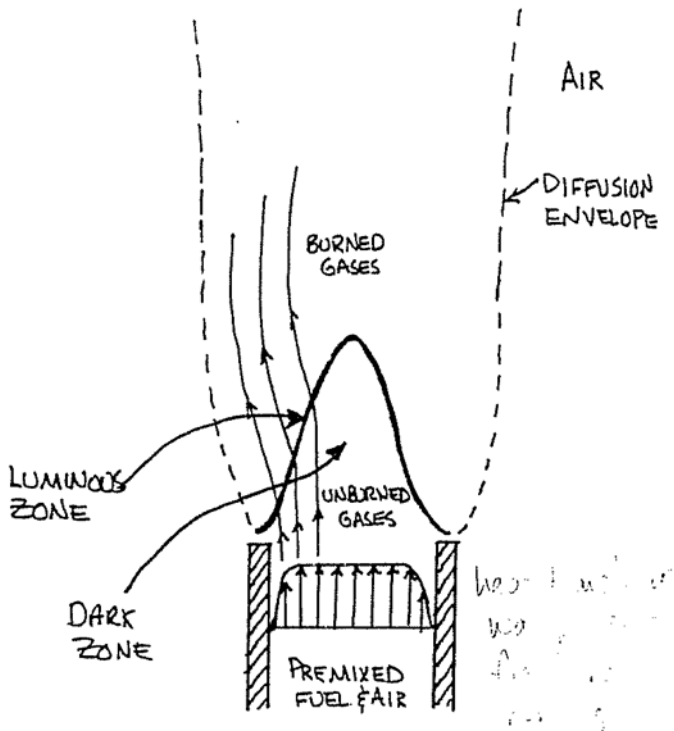
### Pembakaran *Premixed*



Gambar 5. Teknik Pembakaran *Premixed* - 1



Gambar 6. Teknik Pembakaran *Premixed* - 2

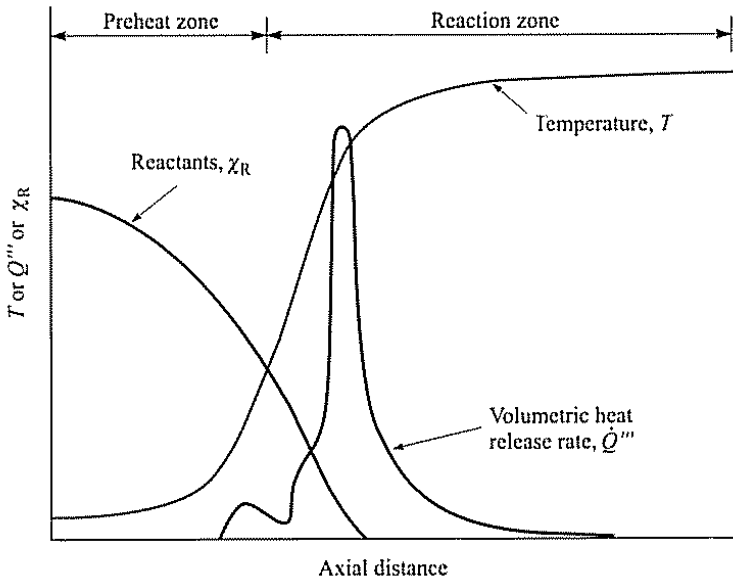


Gambar 7. Teknik Pembakaran *Premixed* - 3

Dalam kondisi laminer, api yang terbentuk disebut sebagai api **premixed** laminer yang mempunyai sifat-sifat:

1. Api diapit oleh gas yang belum terbakar (*unburned gas*) dan gas yang sudah terbakar (*burned gas*).
2. Api mengalami propagasi (perambatan) ke arah gas yang belum terbakar.
3. Kecepatan rambatan api sama dengan kecepatan konsumsi bahan bakar sehingga disebut kecepatan pembakaran laminer (*laminar burning velocity* LBV).
4. Syarat terjadinya propagasi adalah kondisi campuran berada dalam batas mampu bakar (*limit of flammability*).

Struktur api *premixed* laminer adalah sebagai berikut, dimana temperature dan profil kecepatan pengeluaran panas berdasarkan dari eksperimen Friedman and Burke.



Gambar 8. Struktur Aliran Laminer

- A. Zona *preheat*: sejumlah kecil panas dilepaskan
- B. Zona reaksi: sebagian besar panas dilepaskan
  - A.1. Wilayah tipis dengan reaksi kimia yang cepat (*fast zone*)
    - ✚ Terurainya molekul bahan bakar dan pembentukan spesies *intermediate*

- ✚ Pada tekanan atmosfer, *fast zone* kurang dari 1 mm
- ✚ Gradien temperatur dan konsentrasi spesies sangat besar
- ✚ Gradien yang besar membuat api tetap menyala, yaitu difusi panas dan spesies radikal dari zona reaksi ke zona *preheat*

B.1. Wilayah lebar dengan reaksi kimia yang lambat

- ✚ Reaksi kimia didominasi oleh reaksi rekombinasi, seperti  $\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$
- ✚ Pada tekanan atmosfer, zona ini dapat mencapai beberapa mm

5. LBV, selain kepada jenis bahan bakar, juga tergantung kepada perbandingan massa udara dan bahan bakar (*air-fuel ratio* AFR), temperatur awal, tekanan awal.

- LBV untuk gas hidrogen  $\text{H}_2$  paling besar dan paling lebar batas mampu bakar
- LBV untuk gas metana  $\text{CH}_4$  paling kecil dan paling sempit batas mampu bakar
- LBV maksimum didapatkan pada daerah kaya di sekitar stoikiometris
- Untuk menurunkan LBV dapat dilakukan dengan mensirkulasi kembali produk pembakaran, dan sebaliknya untuk menaikannya bisa ditambahi  $\text{H}_2$
- LBV turun dengan kenaikan tekanan, dimana secara empiris berlaku hubungan,

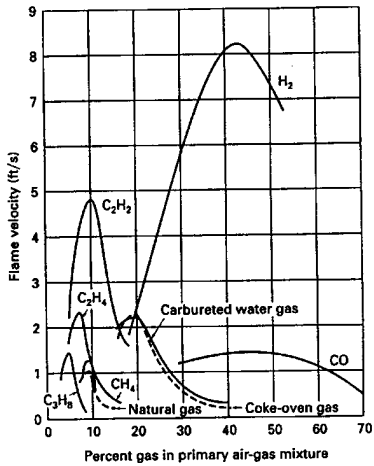
$$\text{LBV} = a \times p^\beta$$

dimana untuk  $\text{LBV} < 0,6 \text{ m/s}$   $\beta = 0 \sim 0,5$ ;  $\text{LBV} > 0,6 \text{ m/s}$   $\beta = 0$  atau sedikit positif.

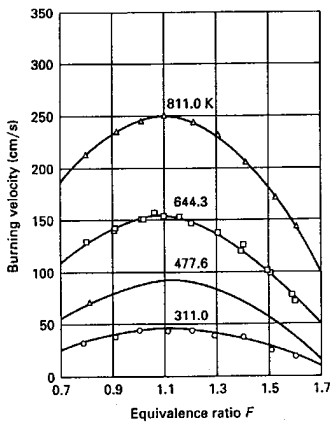
- LBV naik dengan kenaikan temperatur

6. Apabila kondisi aliran adalah turbulen maka kecepatan rambat api (*flame speed*) berubah menjadi besar sekali, dimana apabila kecepatannya lebih kecil dari kecepatan suara disebut *deflagration*, dan apabila lebih besar disebut *detonation*





Variation of laminar burning velocity in air-gas mixtures with variation of gas content, at atmospheric pressure [Elliott and Denués].

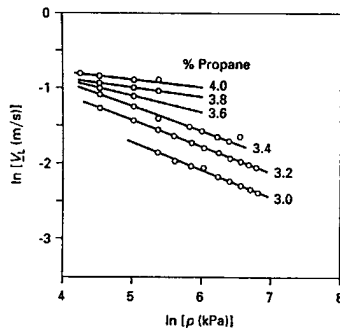


Limits of flammability of natural gas in 20°C dry air versus pressure (% by volume) [Jones et al.]

Pressure (atm)	Lean limit	Rich limit
1	4.50	14.2
35	4.45	44.2
69	4.00	52.9
137	3.60	59.0
205	3.15	60 (est.)

Limits of flammability in standard air (% by volume)

Fuel vapor	Stoichiometric	Lean limit	Rich limit
Methane	9.47	5.0	15.0
Ethane	5.64	2.9	13.0
Propane	4.02	2.0	9.5
Isooctane	1.65	0.95	6.0
Carbon monoxide	29.50	12.5	74
Acetylene	7.72	2.5	80
Hydrogen	29.50	4.0	75
Methanol	12.24	6.7	36



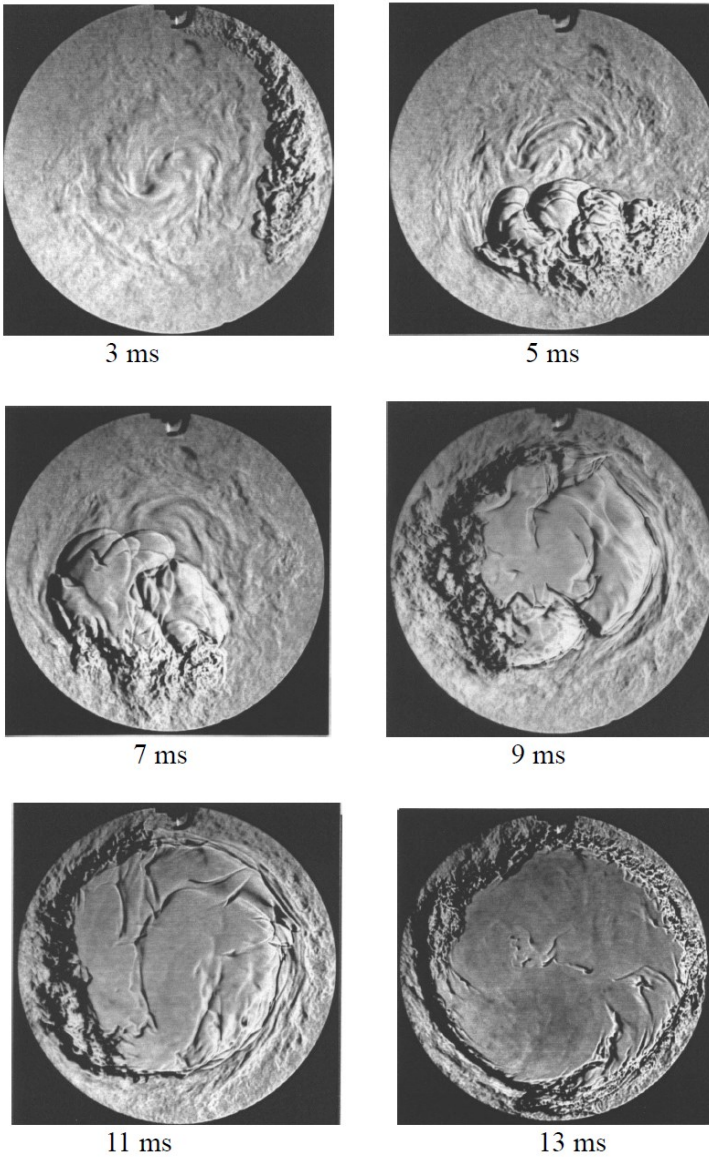
Influence of pressure on laminar burning velocity of propane-air mixtures at ambient temperatures [Egerton and Lefebvre, by permission of The Royal Society].

Empirical fit to laminar burning velocity data in constant-volume chamber

$$V_L = V_{L0}(T/298)^\alpha (p)^\beta, \text{ for } T(\text{K}) \text{ and } p(\text{atm})$$

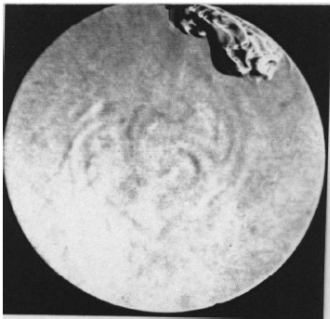
Fuel	$F = 0.8 \quad F = 1.0 \quad F = 1.2$		
	$V_{L0}(\text{cm/s})$		
Methanol	25.6	32.7	38.1
Propane	23.2	31.9	33.8
Isooctane	19.2	27.0	27.6
RMFD-303*	19.1	25.2	28.1
Temperature exponent, $\alpha$			
Methanol	2.47	2.11	1.98
Propane	2.27	2.13	2.06
Isooctane	2.36	2.26	2.03
RMFD-303*	2.27	2.19	2.02
Pressure exponent, $\beta$			
Methanol	-0.21	-0.13	-0.11
Propane	-0.23	-0.17	-0.17
Isooctane	-0.22	-0.18	-0.11
RMFD-303*	-0.17	-0.13	-0.087

Source: Reprinted by permission of Elsevier Science Inc. from "Burning Velocity of Mixtures in Air with Methanol, Isooctane, and Indoline at High Pressures and Temperatures," by Meighalchi and Keck, *Combustion and Flame*, vol. 48, pp. 191-210, © 1982 by The Combustion Institute.  
\*Synthetic gasoline (45% toluene, 14% undecene, and 41% isooctane).

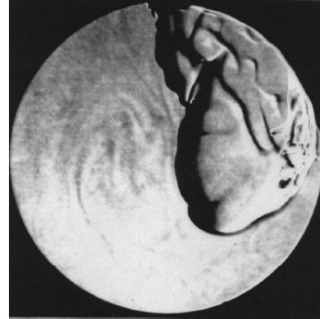


**Fig.6 Schlieren photographs** for methane/air mixtures; equivalence ratio  $\phi=1.3$  and ignition time  $t_{ig}=20$  ms, time noted under each photograph is a time elapsed from ignition.

Gambar 9. Hasil Fotografi Schlieren untuk *Methane/ Air mixtures* bagian 1



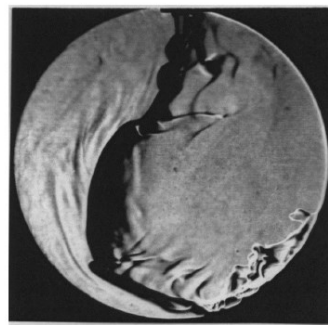
10 ms



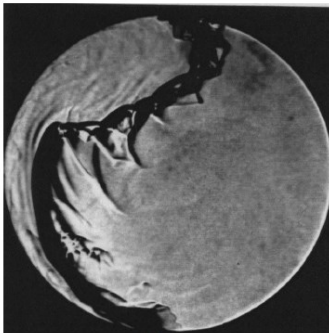
15 ms



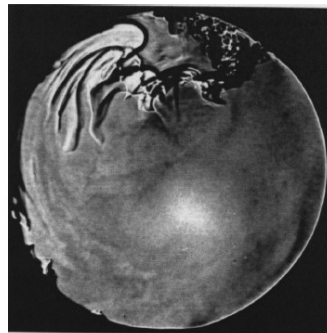
20 ms



25ms



30 ms



40 ms

**Fig.8 Schlieren photographs for methane/air mixtures; equivalence ratio  $\phi=1.3$ , ignition time  $t_{ig}=300$  ms, time noted under each photograph is a time elapsed from ignition.**

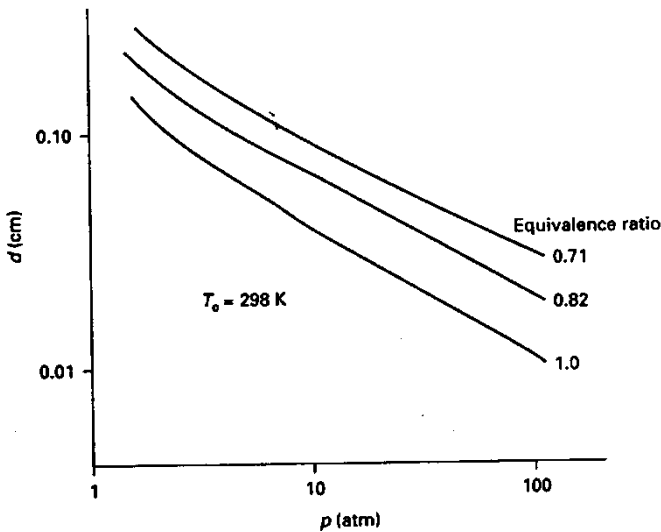
Gambar 10. Hasil Fotografi Schlieren untuk Methane/ Air mixtures bagian 2

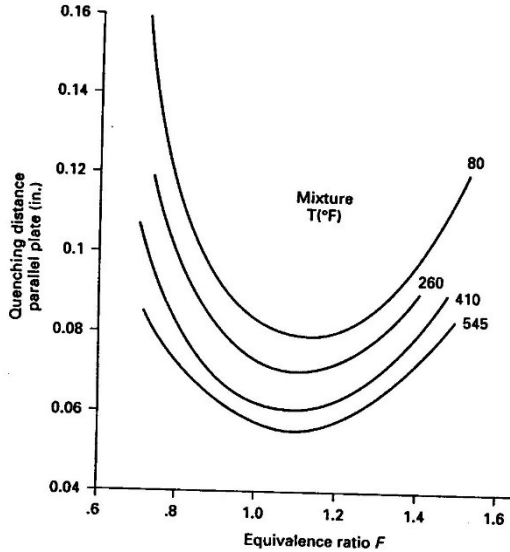
## B. Flame Quenching

*Flame quenching* adalah fenomena padamnya api karena api kehilangan panas ke sekitarnya, sehingga tidak dapat mempertahankan keberlangsungan reaksi kimia yang terjadi. Pengetahuan tentang *flame quenching* diperlukan untuk menentukan ukuran maksimal dari saluran campuran bahan bakar dan udara, misal diameter pipa, sehingga api *premixed* tidak merambat lebih lanjut.

Untuk sebuah pipa, perbandingan permukaan pipa yang bersinggungan dengan api dan volume api adalah  $4/d$ . Sehingga apabila diameter pipa membesar maka luas permukaan api yang bersinggungan turun. Akibatnya *heat loss* yang terjadi juga turun, dan sebaliknya. Artinya, pada diameter tertentu *heat loss* sangat tinggi sehingga menyebabkan api tidak merambat lebih lanjut. Diameter ini disebut sebagai *quench distance*  $d_0$  yang tergantung kepada bentuk geometri dinding, jenis bahan bakar, kondisi campuran, tekanan, temperatur reaktan, intensitas turbulensi. Untuk pipa *rectangular* dengan campuran propana dan udara, dapat dinyatakan sebagai berikut,

- $p$  naik  $\rightarrow d_0$  turun  
pada campuran stoikiometris :  $d_0 \propto p^{-0,88}$  ( $C_3H_8$ )  
:  $d_0 \propto p^{-1,14}$  ( $H_2$ )





- $\phi$  naik  $\rightarrow d_o$  turun
- $T$  naik  $\rightarrow d_o$  turun di mana  $\frac{d_o V_{BL}}{T_0} = \text{konstan}$
- Harga  $d_o$  untuk beberapa bahan bakar

Tabel 12. Jarak Quench Untuk Berbagai Variasi Stoichiometric  
**Quench distance (mm) for various stoichiometric fuel-air mixtures at 1 atm and 20°C**

Hydrogen	0.6	Isooctane	2.0
Methane	1.9	Methanol	1.8
Propane-air	2.1	Propane-He-O <sub>2</sub> *	2.5

Source: Bartok and Sarofim, *Fossil Fuel Combustion: A Source Book*, © 1991, Wiley, by permission of John Wiley and Sons, Inc.

\* He replaced N<sub>2</sub> in air proportions.

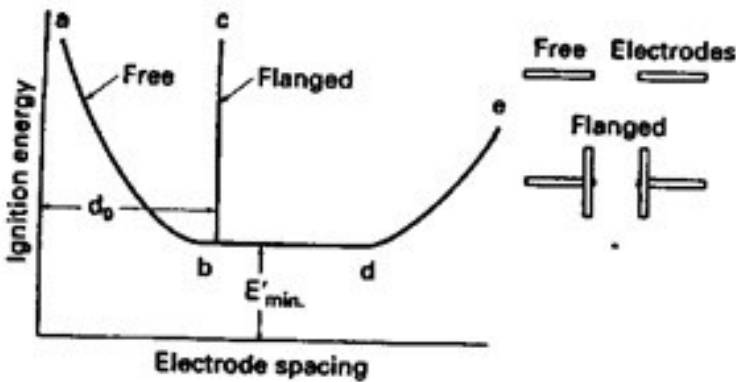
- Intensitas turbulensi naik  $\rightarrow$  heat loss naik  $\rightarrow d_o$  naik
- $d_o$  untuk pipa *rectangular* 65% lebih kecil dari pipa bundar

### C. Ignition

Syarat terjadinya *ignition* (penyalaan) adalah, disamping harus tercukupinya energi penyalaan, maka volume reaktan yang harus dipanaskan harus cukup besar sehingga apabila *igniternya* dipindahkan maka *heat loss* yang terjadi tidak melebihi laju energi yang dilepas oleh proses pembakaran.

Apabila digunakan *spark-plug* sebagai *igniter*, keberhasilan *ignition* dipengaruhi oleh kondisi elektroda dan kondisi campuran gas di sekeliling busi. Pada prinsipnya semakin dekat jarak elektroda butuh energi penyalaan yang besar.

- untuk jenis *free electrode* → tidak ada  $d_0$

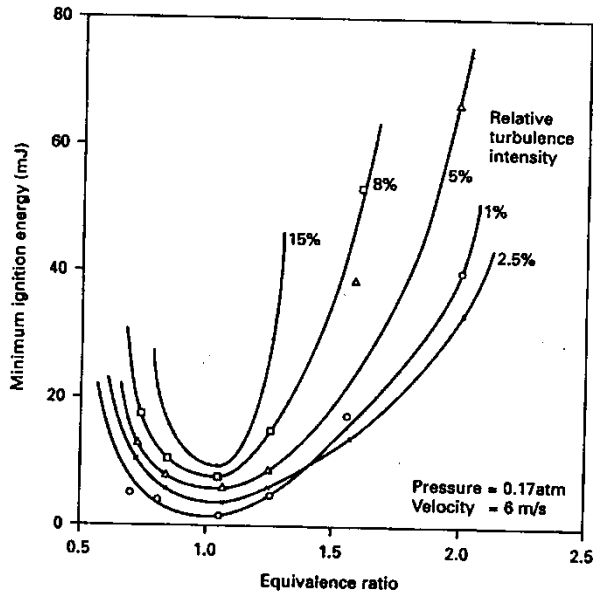


Gambar 11. Minimum Ignition Energies For Various Electrode Configuration

- untuk jenis *flanged electrode* → ada  $d_0$   
Dari gambar 11, diketahui pada jarak b-d energi penyalaan konstan, sedangkan pada jarak d-e energi penyalaan naik karena *heat loss* meningkat.

Untuk campuran  $C_3H_8$  dan udara pada tekanan  $p=0,17$  atm diketahui,

- kecepatan aliran meningkat dan intensitas turbulensi relatif meningkat → energi minimum yang dibutuhkan meningkat.



Gambar 12. Grafik Equivalence Ratio vs Min Ignition Energy

- intensitas turbulensi meningkat

$$\left\{ \begin{array}{l} V_B \text{ meningkat} \rightarrow \text{energi minimum turun} \\ \text{heat loss meningkat} \rightarrow \text{energi minimum naik} \end{array} \right.$$

di mana efek kedua > efek pertama

Kondisi untuk mudahnya penyalaan bunga api dan energi penyalaan minimum yang rendah:

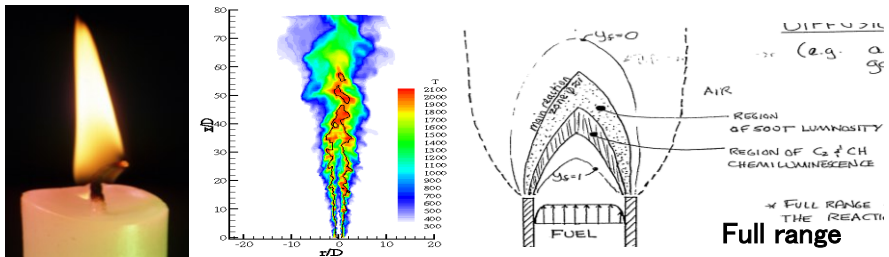
- temperatur awal tinggi
- kecepatan reaksi tinggi
- kapasitas panas rendah ( $\rho c_p$ )
- konduktivitas campuran ( $k$ ) rendah
- tekanan total tinggi
- kondisi stoikiometris ( $\phi \approx 1$ )
- turbulensi rendah
- jarak elektroda  $\approx d_0$

Untuk penyalaan bunga api dan campuran homogen, batas miskin campuran untuk terjadinya propagasi dapat diperlebar dengan,

- meningkatkan tingkat homogenitas campuran

- menurunkan tingkat pengenceran
- menaikkan rasio kompresi
- menurunkan kecepatan mesin
- *centered spark plug*
- *multiple spark plug*

#### D. Pembakaran Difusi



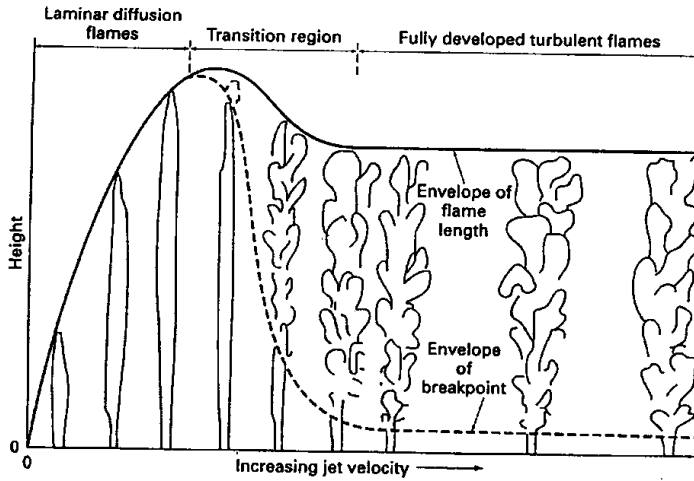
Gambar 13. Teknik Pembakaran Difusi

Dalam kondisi laminer, api yang terbentuk disebut sebagai api **difusi** laminer yang mempunyai sifat-sifat:

1. Kecepatan reaksi pembakaran sangat bergantung kepada kecepatan difusi bahan bakar dan udara ke arah api
2. Tidak terjadi propagasi api sehingga aplikasi pembakaran difusi lebih aman dan banyak dipakai di industri-industri. Jenis api difusi yang banyak dipakai adalah jenis api semburan (*jet diffusion flame*) dimana karakteristiknya sangat bergantung kepada bilangan Reynolds ( $\equiv V_{jet} \rho_{fuel} \phi_{pipa} / \mu$ ) dimana  $V_{jet}$ : kecepatan semburan bahan bakar;  $\rho_{fuel}$ : densitas bahan bakar;  $\phi_{pipa}$ : diameter pipa burner;  $\mu$ : viskositas bahan bakar. Karakteristik api semburan:
  - Pada kecepatan jet yang rendah, laju pencampuran bahan bakar-udara rendah, api yang terbentuk panjang dan laminer.
  - Panjang api laminer naik sebanding dengan kenaikan kecepatan jet sampai pada suatu kondisi dimana api mulai mengalami perubahan bentuk (turbulen).
  - Panjang api akan mengalami penurunan seiring dengan kenaikan intensitas pencampuran



- Mulai kecepatan jet tertentu, panjang api akan konstan dan posisi perpindahan dari laminar ke turbulen juga tetap
  - Panjang api akan sebanding dengan  $V_{jet}(\phi_{pipa})^2$  untuk kondisi laminar, dan sebanding dengan  $\phi_{pipa}$  untuk kondisi turbulen.
  - Kenaikan kecepatan jet tidak tak terbatas, yaitu mulai suatu kecepatan jet tertentu pangkal api akan bergerak menjauh dari burner sehingga terjadi *lifted flames* dan kenaikan lebih lanjut bisa menyebabkan terjadinya *blowoff*.
3. Untuk memperbaiki karakteristik api difusi sering juga digunakan api jet konsentrik (*concentric jet flame*), dimana bahan bakar dan udara masing-masing dialirkan melalui suatu tabung yang berbeda tetapi mempunyai sumbu yang sama. Api jenis ini mempunyai keunggulan yaitu mudahnya kontrol proses pencampuran.



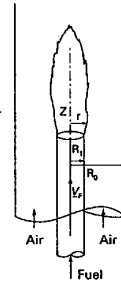
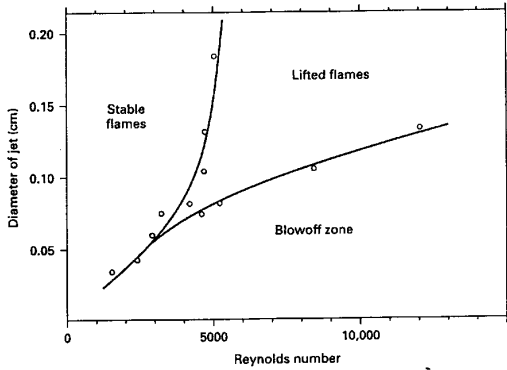
Free jet diffusion flame transition from laminar to turbulent flow [Hottel and Hawthorne, by permission of The Combustion Institute].

Gambar 14. Free Jet Diffusion Flame Transition

Tabel 13. Jet Diffusion Flame Transition to Turbulent Flow

**Jet diffusion flame transition to turbulent flow  
[Hottel and Hawthorne, by permission of The  
Combustion Institute]**

<b>Fuel into air</b>	<b>Transition Reynolds number</b>
Hydrogen	2000
City gas	3500
Carbon monoxide	4800
Propane	9000–10,000
Acetylene	9000–10,000



Concentric Jet

Stability regimes for free jet diffusion flame of ethylene-air mixture [Scholefield and Garside, by permission of The Combustion Institute].

Gambar 15. Concentric Jet Diffusion Flame and Stability Regimes for Free Jet Diffusion Flame



# BAB IV

## PEMBAKARAN DENGAN BAHAN BAKAR PADAT

### Kompetensi

Agar mahasiswa dapat menjabarkan proses pembakaran dengan bahan bakar padat.

---

#### A. Bahan Bakar Padat

Mekanisme pembakaran dengan menggunakan bahan bakar padat akan terdiri dari beberapa proses:

1. *Drying* (pengeringan)
2. *Devolatilization* (penguapan unsur-unsur volatil) atau *pyrolysis*
3. *Char burnout* (pembakaran arang)

Dari ketiga mekanisme di atas mana yang lebih penting akan tergantung kepada jenis bahan bakar. Misalnya untuk batu bara yang sedikit kandungan airnya, sedikit unsur volatil, banyak arang dibanding kayu maka mekanisme ketiga adalah yang dominan. Untuk butiran halus (*pulverized*) ketiga proses berlangsung berurutan dan untuk butiran kasar berlangsung bersamaan.

#### 1. *Drying Process*

Dalam ruang bakar panas dikonveksikan dan diradiasikan ke permukaan partikel dan dikonduksikan ke dalam partikel. Untuk sebuah butiran halus bahan bakar padat (mis. 100 $\mu$ m) air yang terkandung akan menguap secara cepat sebelum volatil dilepaskan. Di sini waktu yang dibutuhkan,

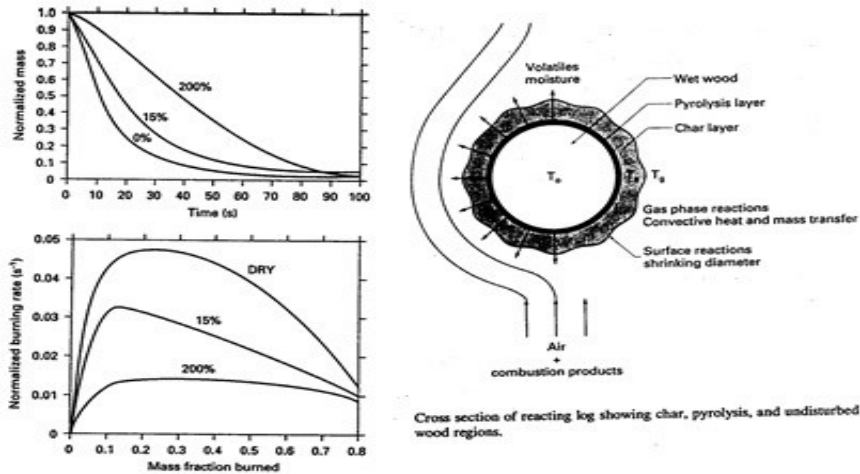
$$t_{\text{dry}} \approx \frac{(m_{w,i}c_w + m_{df}c_{df})(373 - T_i) + m_{w,i}h_{fg}}{\varepsilon\sigma A_p(T_b^4 - T_p^4) + \tilde{h}A_p(T_g - T_p)}$$

dimana  $m_{w,i}$ : massa air awal;  $df$ : indeks bahan bakar kering;  $\varepsilon$ :emissivitas;  $A_p$ :luas permukaan partikel;  $T_b$ : temperatur furnace;  $T_p$ : temperatur partikel.

Untuk butiran cukup besar (*stoker coal* atau *wood chips*) persamaan di atas tidak berlaku. Di sini akan terjadi aliran uap air keluar dan ke dalam secara bersamaan hanya dengan intensitas yang berbeda. Apabila terjadi pelepasan uap air maka transfer kalor dan massa ke permukaan partikel menurun sehingga terjadi penurunan laju reaksi. Kandungan air yang meningkat akan menurunkan laju reaksi.

Untuk bahan bakar dalam bentuk batangan, maka *drying*, *pyrolysis* dan *char burn* berlangsung secara bersamaan sampai sebagian besar massa telah terkonsumsi sehingga hanya tinggal arang.

Skema pembakaran di sini bisa dilihat dari gambar di bawah dimana lapisan arang akan terbentuk paling luar, berwarna hitam dan berpori-pori, lapisan *pyrolysis* berwarna coklat dan tipis, sedangkan bagian paling dalam berwarna putih dengan temperatur di bawah 100°C walaupun di luar temperturnya sangat tinggi.



Effect of moisture (% dry basis) on 10-mm pine cubes burned in air at 1100 K and  $Re = 120$ : (a) the normalized mass, (b) normalized burning rate (time derivative of mass per initial mass), and (c)  $CO$ ,  $CO_2$ , and  $H_2O$  products, 200% moisture [Simmons and Ragland, © 1985, by permission of Gordon and Breach Publishers].

Gambar 16. Effect of Moisture a) Normalized Mass and b) Normalized Burning Rate

## 2. Devolatilization

Pada tahap ini dengan semakin meningkatnya temperatur maka unsur volatil akan kemudian mengalir keluar sehingga akan menghambat aliran oksigen dari luar untuk masuk dalam butiran bahan bakar. Hal inilah yang membuat tahap ini juga disebut sebagai *pyrolysis*.

Laju devolatilization dan produksi produk *pyrolysis* akan tergantung kepada temperatur dan jenis bahan bakar. Produk *pyrolysis* ini akan

menyala dan membentuk api yang menempel pada butiran bahan bakar padat. Selanjutnya api akan memanasi butiran sehingga terjadi *pyrolysis* lebih lanjut.

Untuk batu bara *lignite*, *pyrolysis* mulai pada 300~400°C melepas  $CO$  dan  $CO_2$  dan penyalaan volatil berlangsung pada 400~600°C. Pada temperatur 700~900°C  $CO$ ,  $CO_2$ , uap  $HC$ , tar,  $H_2$  diproduksi dan pada temperatur 900°C tahap *pyrolysis* selesai.

Untuk batubara *bituminous* tahap *pyrolysis* berbeda dengan batu bara *lignite* karena lebih sedikit mengandung oksigen. Awalnya partikel akan melunak dan mengembang dimana tar akan mengalir keluar dan partikel akan pecah menjadi beberapa bagian. Bersamaan

dengan ini akan berlangsung *pyrolysis* melepas CO, HC, dan jelaga yang akan terbakar menjadi api.

$$\frac{dm_v}{dt} = -m_v k_{pyr}$$

Laju *devolatilization* bisa dituliskan sebagai berikut, dimana  $m_v = m_p - m_c - m_a$  dan  $k_{pyr} = k_{0,pyr} \exp(-E_{pyr}/RT_p)$ .

Tabel 14. Representative Pyrolysis Parameters for Several Solid Fuels

Representative pyrolysis parameters for several solid fuels		
Fuel	$k_{0,pyr}$ ( $s^{-1}$ )	$E_{pyr}$ (kcal/gmol)
Lignite	280	11.3
Bituminous coal	700	11.8
Wood	$7 \times 10^7$	31.0

Apabila temperatur partikel bisa dianggap konstan maka bisa didapatkan perubahan massa akibat *pyrolysis*,

$$\ln \left[ \frac{m_p - m_c - m_a}{m_{p,i} - m_c - m_a} \right] = -k_{pyr} t$$

Untuk partikel yang lebih besar waktu yang dibutuhkan untuk memanasi sampai temperatur *pyrolysis* adalah lebih besar.

Penyalan bahan bakar padat terjadi karena penyalan arang pada permukaan bahan bakar atau penyalan volatil dalam lapis batas sekitar partikel. Ini akan tergantung kepada laju transfer kalor konveksi dan radiasi.

- Radiasi besar → permukaan bahan bakar cepat sekali mencapai temperatur penyalan
- Konveksi besar → permukaan bahan bakar juga cepat mengalami kenaikan temperatur tetapi akan diikuti oleh tersapunya volatil sehingga tidak bisa terakumulasi. Apabila temperatur permukaan bahan bakar rendah maka volatil akan terlebih dahulu terbakar.

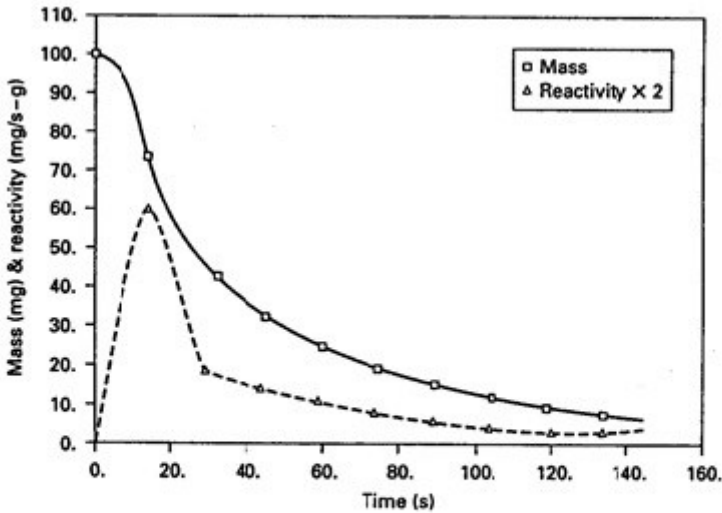
Keterlambatan penyalan akan tergantung kepada ukuran partikel, difusivitas termal, laju pemanasan, dan laju *pyrolysis*. Dimana untuk



butiran halus (*pulverized*) ordenya milidetik, sedangkan untuk butiran besar ( $\pm 10\text{mm}$ ) ordenya detik.

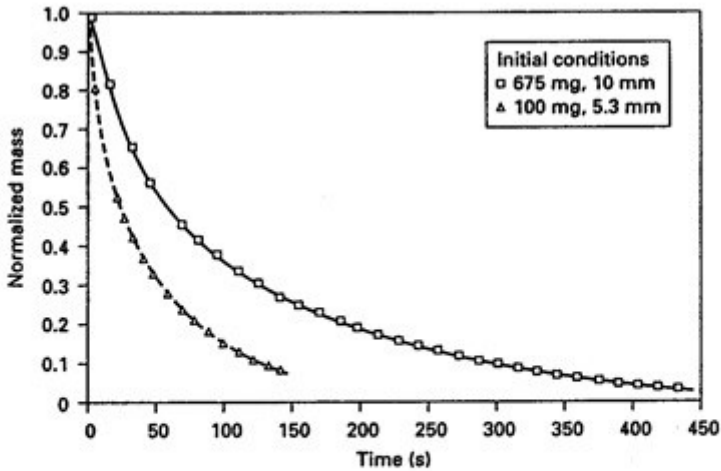
Tabel 15. Typical Ignition Temperature for Selected Solid Fuels

Fuel	Ignition temperature	
	(°F)	(°C)
Graphite	1500	820
Bituminous coal char	765	410
Bituminous coal volatiles	660	350
Wood char	650	340
White pine volatiles	500	260
Paper	450	230



Typical curves of transient mass and reactivity for bituminous coal particles of 5.3 mm with 1100-K air at 2 m/s [Reprinted by permission of Elsevier Science Inc. from "Combustion of Millimeter Sized Coal Particles in Convective Flow," by Ragland and Yang, *Combustion and Flame*, vol. 60, pp. 285–297, © 1985 by The Combustion Institute.].

Gambar 17. Typical Curves of Transient Mass and Reactivity For Bituminous Coal Particle with 1100-K



Effect of particle size on transient mass for bituminous coal particles with 1200-K air at 2 m/s [Reprinted by permission of Elsevier Science Inc. from "Combustion of Millimeter Sized Coal Particles in Convective Flow," by Ragland and Yang, *Combustion and Flame*, vol. 60, pp. 285-297, © 1985 by The Combustion Institute.].

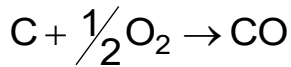
Gambar 18. Effect of Particle on Transient Mass for Bituminous Coal Particle with 1200-K

### 3. Pembakaran Char

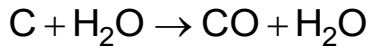
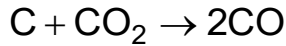
Setelah tahap *devolatilization* selesai maka yang tertinggal hanya arang dan abu (*ash*). Arang adalah sangat berpori dimana untuk porositas untuk arang kayu adalah 0,9 (90% pori-pori), dan batu bara 0,7.

Karena pada tahap ini sudah tidak ada volatil dan karena keporosan dari arang maka oksigen bisa berdifusi sampai ke pori-pori. Laju reaksi tergantung kepada laju reaksi antara karbon-oksigen yang terjadi di permukaan dan laju difusi oksigen ke lapis batas dan ke dalam partikel yang hal ini akan dipengaruhi oleh konsentrasi  $O_2$ , temperatur gas, bilangan Reynolds, ukuran dan porositas arang.

Reaksi di permukaan terutama menghasilkan CO dimana CO kemudian akan bereaksi di luar lapis batas untuk menghasilkan  $CO_2$ . Reaksi permukaan akan membuat temperatur permukaan meningkat 100~200°C lebih dari pada temperatur sekeliling. Reaksi utama yang berlangsung di permukaan:



Juga akan berlangsung reaksi seperti berikut,



Laju reaksi untuk pembakaran arang:

$$\frac{dm_c}{dt} = -\pi d^2 \frac{12}{16} k_e \rho_{O_2}$$

dimana persamaan diatas bila diintegalkan dengan memakai asumsi seperti di bawah akan menghasilkan waktu yang dibutuhkan untuk pembakaran arang.

a. Model diameter konstan (densitas berkurang)

$$t_c = \frac{\rho_c d_i}{4,5 k_e \rho_{O_2}}$$

b. Model densitas konstan (diameter berkurang) dimana faktor difusi dominan (temperatur tinggi dan partikel besar)

$$t_c = \frac{\rho_c d_i}{6 D_{AB} \rho_{O_2}}$$

c. Model densitas konstan (diameter berkurang) dimana faktor kinetik dominan (temperatur rendah dan partikel kecil)

$$t_c = \frac{\rho_c d_i}{1,5 k_c \rho_{O_2}}$$

dimana  $k_e$  adalah konstanta laju reaksi efektif yang dihitung dari:

$$k_e = \frac{\tilde{h}_D k_c}{\tilde{h}_D + k_c}$$

sedangkan  $k_c$  adalah laju reaksi kinetik yang bisa dihitung dari:

$$k_c = \frac{k_p T_g \hat{R}}{M_{O_2}}$$

dengan  $k_p$  bisa dihitung sebagai berikut,

$$k_p = k_{p,0} \exp\left(\frac{-\hat{E}_c}{\hat{R}T_p}\right)$$

dimana harga  $k_{p,0}$  dan  $E$  bisa dilihat dari tabel di bawah.

Tabel 16. Representative Global Coal Char Oxidation

**Representative global coal char oxidation rate constants**  
[Smoot and Smith, by permission of Plenum Publishing Corp.]

Coal type	$k_{p,0}$ [g/(cm <sup>2</sup> ·s·atm O <sub>2</sub> )]	$\hat{E}$ (cal/gmol)
Anthracite	20.4	19,000
Bituminous (high volatile A)	66	20,360
Bituminous (high volatile C)	60	17,150
Subbituminous (class C)	145	19,970

Tabel 17. Typical Ignition Delay and Total Burn Times

**Typical ignition delay and total burn times for Douglas fir bark particles**

Particle size (μm)	Moisture (%)	Ignition delay (ms)	Burnout time (ms)
36	10	0	30
300	10	5	540
300	28	30	570
612	10	20	655

## **B. Furnace Berbahan Bakar Padat**

Dalam *furnace* yang menggunakan bahan bakar padat maka selain persoalan yang menyangkut kestabilan proses pembakaran maka perlu juga diperhatikan sistem suplai bahan bakar, penanganan abu, emisi gas buang dan partikel.

Jenis-jenis dapur dengan bahan bakar padat adalah sebagai berikut :

### **1. *Stoker-Fired Boiler***

Di sini proses pembakaran yang terjadi bisa digolongkan sebagai *fixed-bed combustion* yaitu dimana bahan bakar diletakkan dalam suatu *bed* berbentuk *grate* (contoh sederhana dari *fixed-bed* adalah pembakaran sate) dengan menggunakan bahan bakar padat yang berbentuk bongkahan dengan ukuran sekitar 4cm.

Berdasarkan cara suplai bahan bakar dan udara maka bisa dibagi menjadi,

- ***Crossfeed***

Di sini bahan bakar diletakkan di atas *grate* yang bergetar dan bergerak miring dimana udara mengalir ke atas melewati *grate*.

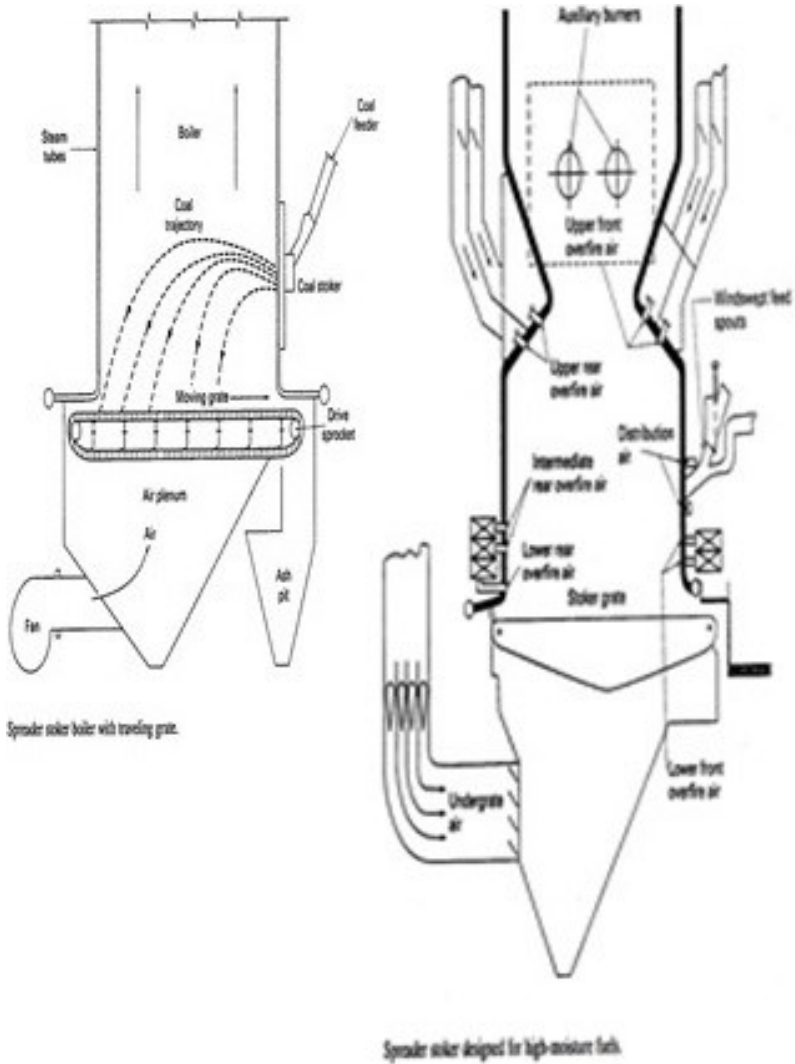
- ***Overfeed***

Di sini arah aliran bahan bakar dan udara berlawanan. Bahan bakar akan disuplai ke atas *bed* (ketebalan 10~20cm) dan udara dialirkan ke atas melewati lapisan abu, arang, dan bahan bakar. Untuk menyempurnakan pembakaran digunakan *overfire air*. Dalam sistem *overfeed* biasa digunakan *spreader* untuk meratakan distribusi bahan bakar di atas *bed*. Kecepatan *grate* sekitar 1~6m/h dan dikontrol supaya bahan bakar sudah terbakar habis sebelum sampai ke ujung *grate*. *Grate* dibuat dari baja dengan lubang-lubang berdiameter 6mm.

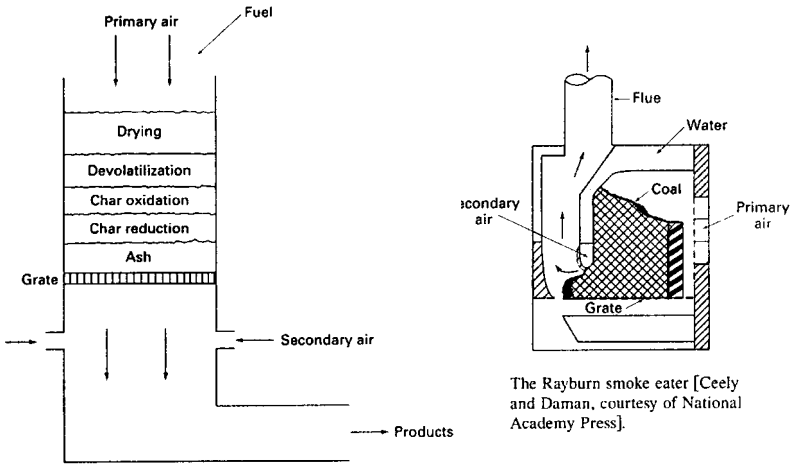
### **2. *Pulverized Coal Combustion System***

Di sini batu bara dibuat menjadi butiran-butiran halus (*pulverized*) untuk kemudian diinjeksikan ke dalam dapur. Pembakaran yang terjadi bisa digolongkan menjadi *suspension burning* (pembakaran melayang). Sistem ini adalah yang paling banyak dipakai pada unit pembangkit listrik karena mudah di-*scaled up* dan mudah pengontrolan terhadap perubahan beban. Dalam *pulverizer* dialirkan udara yang dipanaskan sampai  $\pm 340^{\circ}\text{C}$  untuk proses *drying* dan mendorong batu bara ( $\phi = \pm 50\mu\text{m}$ ) ke burner.

*Pulverized coal* akan keluar dari nosel dengan temperatur 50~100°C dan kecepatan 25m/s (kecepatan ini harus lebih besar dari *flame speed*). Bentuk api dikontrol dengan jumlah udara sekunder dan posisi burner.

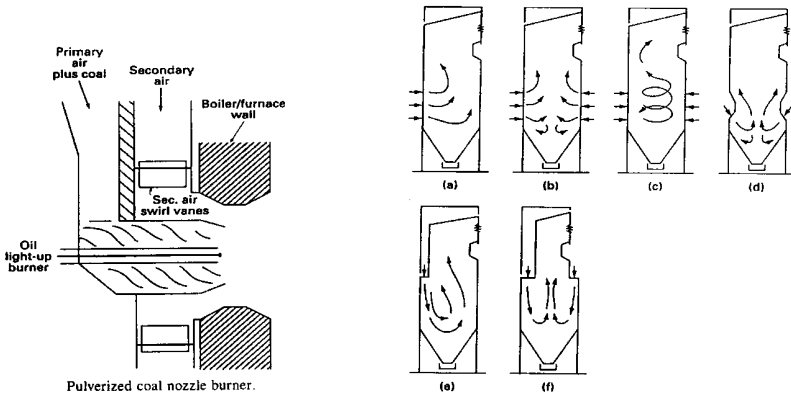


Gambar 19. Boiler/Burner



Schematic diagram of top-feed downdraft combustor.

Gambar 20. Pulverized Coal Nozzel Burner and Burner Configuration



Pulverized coal nozzle burner.

Dry bottom furnace and burner configurations: (a) horizontal (front and rear), (b) opposed horizontal, (c) tangential, (d) opposed inclined, (e) single U-flame, (f) double U-flame [Elliott, by permission of National Academy Press].

Gambar 21. Schematic Diagram of Top Feed Downdraft Combustor

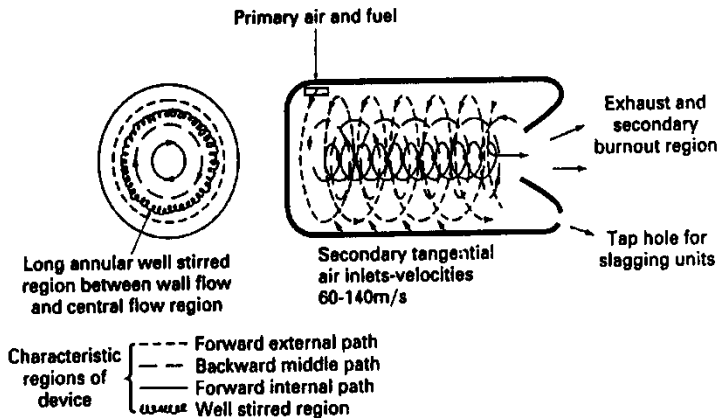
### 3. Cyclone Combustor

Dapur ini mempunyai kelebihan dapat menggunakan batubara yang kandungan abunya banyak dan titik leleh abu rendah. *Cyclone*

*combustor* adalah sebuah ruang bakar muka berbentuk silinder dalam posisi horisontal. Batubara terbakar dalam gerakan memutar akibat aliran udara yang masuk secara tangensial. Dengan melapisi batu tahan api temperatur pembakaran mencapai 1650°C sehingga abu meleleh pada dinding dapur.

Batubara ditumbuk sehingga mempunyai 95% berdiameter 5mm dengan diameter rata-rata massanya 0,5mm. Batubara dimasukkan dari ujung dapur yang masuk dalam aliran pusar dari udara primer (20% udara pembakaran). Abu yang meleleh dibuang melalui lubang di dekat saluran gas pembakaran.

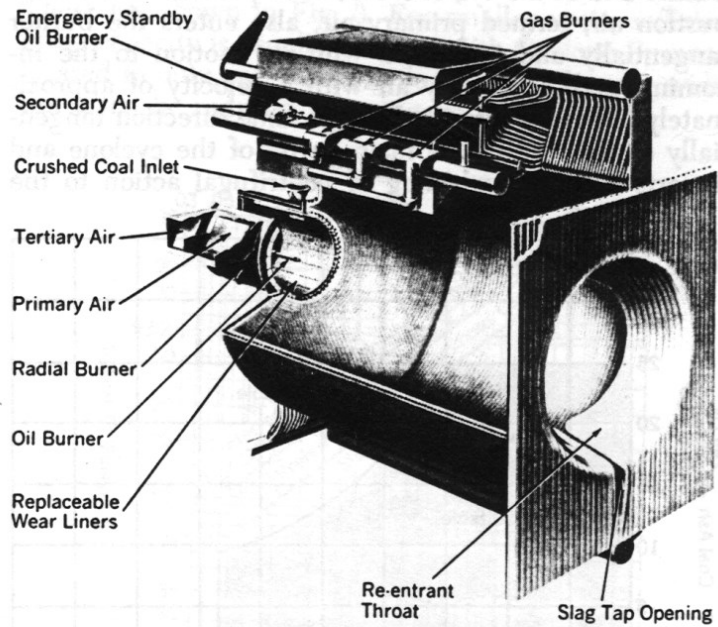
Gas pembakaran keluar menuju ke bagian konveksi. Jarak antar pipa-pipa konveksi dapat dibuat lebih sempit karena hampir 80% abu telah dibuang pada bagian dapur.



Flow pattern in a cyclone combustor [Reprinted from Syred et al., "Cyclone Combustors," in *Principles of Combustion Engineering for Boilers*, Lawn (ed.), © 1987, by permission of Academic Press Ltd.].

Gambar 22. Flow Pattern in A Cyclone Combustor





The Cyclone Furnace, in the form of a horizontal cylinder, is completely water cooled by connection to the main boiler circulation. All combustion gases leave through the re-entrant throat at the rear. Molten slag drains from the bottom at the rear through a small opening into the adjacent boiler furnace.

Gambar 23. The Cyclone Furnace



# BAB V

## PEMBAKARAN DENGAN BAHAN BAKAR CAIR

### Kompetensi

Agar mahasiswa dapat menjabarkan proses pembakaran dengan bahan bakar cair.

---

### A. Bahan Bakar Cair

Pada intinya bentuk api yang terjadi pada pembakaran dengan bahan bakar cair tidak jauh berbeda dengan bahan bakar gas. Karakteristiknya sangat tergantung kepada kondisi pengkabutan, intensitas campuran, dan mudah tidaknya bahan bakar menguap (volatilitas).

- Apabila densitas droplet (butiran bahan bakar) rendah, tingkat campuran tinggi, dan volatilitas rendah maka droplet bahan bakar akan terbakar secara individu.
- Apabila densitas droplet tinggi, tingkat campuran rendah, dan volatilitas tinggi maka api akan terbentuk di bagian luar dari *spray*.

Berikut ini adalah tahapan pembakaran menggunakan bahan bakar cair yakni :

1. Droplet bahan bakar mengalami kenaikan temperatur sehingga komponen-komponen yang mempunyai titik didih rendah akan menguap.
2. Penyalaan unsur-unsur volatil di sekitar butiran.
3. Butiran mendidih dan mengembang yang diikuti pembakaran lebih lanjut

Ukuran droplet bahan bakar belum dapat diprediksikan secara teoritis. Secara aktual dilakukan pengukuran terhadap diameter droplet dan distribusi jumlahnya. Dari sini dikenal *Sauter mean diameter* ( $SMD = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2}$ ) yang dapat dihasilkan oleh suatu injektor.

- *Simplex pressure-swirl atomizer*
- *Prefilming air blast atomizer*

$$SMD = 7,3\sigma^{0,6}v^{0,2}\dot{m}^{0,25}\Delta p^{-0,4}$$

$$SMD = 3,33 \times 10^{-3} \left( \frac{\sigma \rho_f d_p}{\rho_a^2 V_a^2} \right)^{0,5} \left( 1 + \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \right) + 13,0 \times 10^{-3} \left( \frac{\mu_f^2}{\sigma \rho_f} \right)^{0,425} d_p^{0,575} \left( 1 + \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \right)^2$$

Pengkabutan *fuel oil* biasanya dilakukan dengan metode:

1. *Single fluid atomizer* dipakai untuk burner dalam rumah tangga dan industri skala kecil yang menggunakan *fuel oil*#2. Yang menggunakan *atomizer* jenis ini adalah *high-pressure gun-type burner*.

Dalam aplikasi di industri skala besar digunakan *swirl pressure jet atomizer* atau *spill pressure jet atomizer* untuk pengkabutan *fuel oil*#6

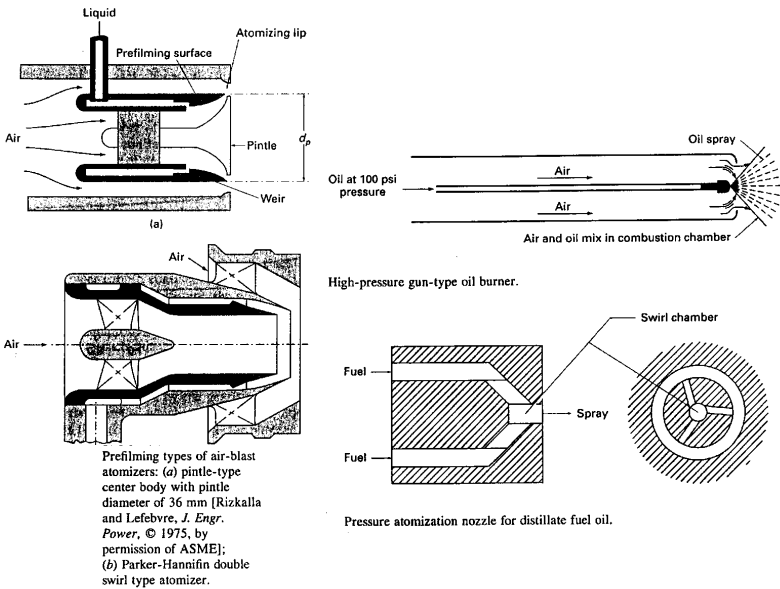
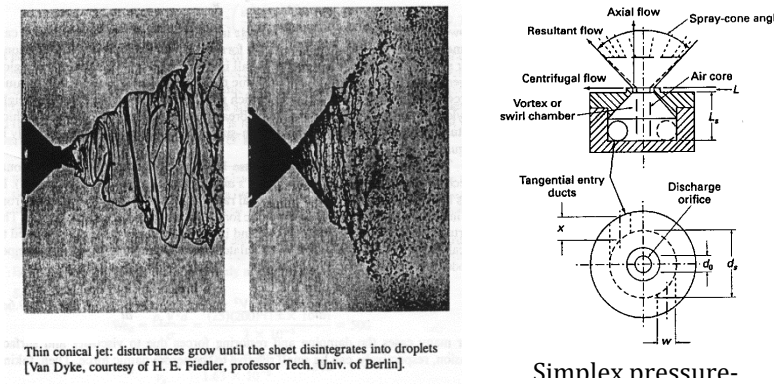
2. *Twin fluid atomizer* menggunakan tumbukan aliran udara bertekanan tinggi atau uap. Ukuran dan distribusi droplet bahan bakar tidak berbeda dengan *single fluid* tetapi terjadi reduksi tekanan bahan bakar.
3. *Rotary cup atomizer* memanfaatkan saluran bahan bakar yang diputar dengan kecepatan tinggi. Tekanan bahan bakar dapat dikurangi tetapi ukuran droplet relatif besar.

Dinamika aliran udara sangat menentukan bentuk dari zona pembakaran. Dalam sebuah burner skala kecil pencampuran antara bahan bakar-udara dibantu dengan adanya *retention cone* yang juga berfungsi untuk menstabilkan api. Dalam sebuah burner skala besar *spray* bahan bakar diijenkinsikan dengan momentum tinggi secara aksial dan udara dihembuskan dengan melewati *swirler*.

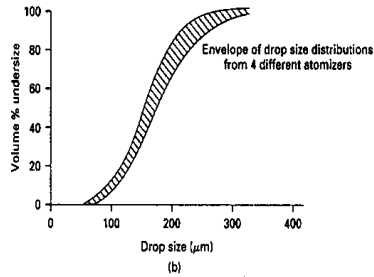
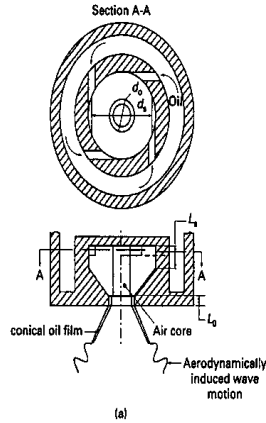
- Pada intensitas *swirl* rendah api yang terbentuk adalah panjang dan sempit. Gas di sekitar api akan ditarik oleh momentum aliran bahan bakar sehingga akan terjadi aliran resirkulasi di batas api →

cocok untuk *corner-fired furnace* dan *furnace* dalam industri yang memerlukan radiasi termal.

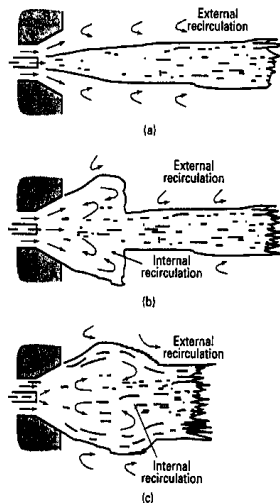
- Untuk aliran dengan intensitas *swirl* yang tinggi maka api yang terbentuk adalah pendek dan berbentuk *brushlike* → *wall-fired boiler* dan pemanas dalam industri.



Gambar 24. Proses Pembakaran dengan Bahan Bakar Cair

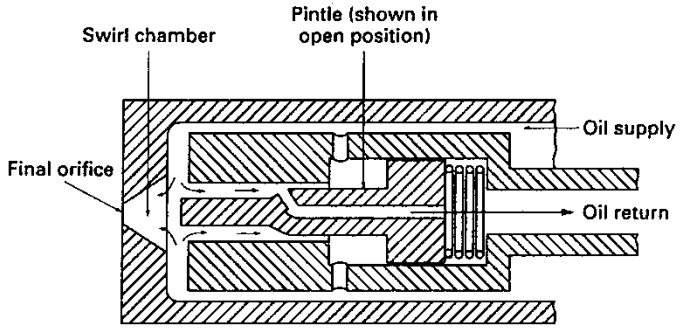


Swirl pressure jet atomizer for heavy fuel oil: (a) atomizer, (b) drop size distribution [Lawn, by permission of Academic Press, Inc.].

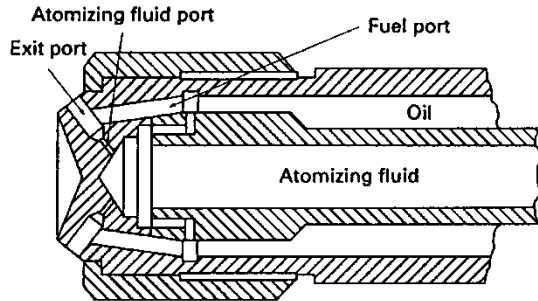


Flame types: (a) long jet flame, no swirl (type-0 flame); (b) combination jet flame and partial internal recirculation zone, intermediate swirl (type-1 flame); and (c) flame with closed internal recirculation zone, high swirl (type-2 flame) [Reprinted from *Prog. Energy Comb. Sci.*, vol. 18, Weber and Dugue, "Combustion Accelerated Swirling Flows in High Confinements," pp. 349-367, © 1992 with kind permission from Elsevier Science Ltd., The Boulevard, Langford Lane, Kidlington OX516B, UK].

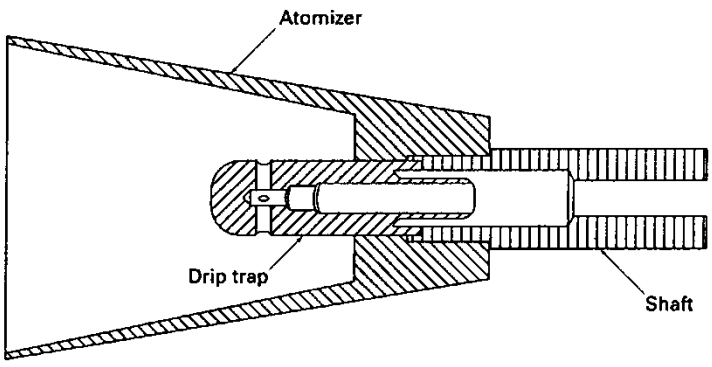
Gambar 25. Berbagai Tipe Pembakaran dengan Bahan Bakar Cair



Spill pressure jet atomizer with shut-off [Lawn, by permission of Academic Press, Inc.].



Y-jet atomizer [Lawn, by permission of Academic Press, Inc.].



Rotary cap atomizer, showing arrangement for preventing drip of fuel oil into atomizer after shutdown of burner.

Gambar 26. Berbagai Alat yang Menggunakan Bahan Bakar Cair





# BAB VI

## PENGUKURAN BILANGAN OKTANA

### **Kompetensi**

Agar mahasiswa dapat mendefinisikan hal yang dimaksud pengukuran bilangan oktana.

---

### **A. Definisi Bilangan Oktana**

Nama oktan berasal dari oktana (C<sub>8</sub>), karena dari seluruh molekul penyusun bensin, oktana yang memiliki sifat kompresi paling bagus. Oktana dapat dikompres sampai volume kecil tanpa mengalami pembakaran spontan, tidak seperti yang terjadipada heptana, misalnya, yang dapat terbakar spontan meskipun baru ditekan sedikit. Bilangan oktan adalah angka yang menunjukkan seberapa besar tekanan yang bisa diberikan sebelum bensin terbakar secara spontan. Di dalam mesin, campuran udara dan bensin (dalam bentuk gas) ditekan oleh piston sampai dengan volume yang sangat kecil dan kemudian dibakar oleh percikan api yang dihasilkan busi. Karena besarnya tekanan ini, campuran udara dan bensin juga bisa terbakar secara spontan sebelum percikan api dari busi keluar. Jika campuran gas ini terbakar karena tekanan yang tinggi (bukan karena percikan api dari busi), maka akan terjadi knocking atau ketukan di dalam mesin. Knocking ini akan menyebabkan mesin cepat rusak, sehingga sebisa mungkin harus dihindari. Bensin dengan bilangan oktan 87, berarti bensin tersebut terdiri dari 87% oktana dan 13% heptana.

Nilai heptana (atau campuran molekul lainnya). Bensin ini akan terbakar secara spontan pada tingkat kompresi tertentu yang diberikan, sehingga hanya diperuntukkan untuk mesin kendaraan yang memiliki ratio kompresi yang tidak melebihi angka tersebut. Bilangan oktan dari bensin adalah satu pengindikasian bagaimana bensin itu melaksanakan unjuk kerja di bawah berbagai kondisi mesin. Nilai yang berbeda tersebut adalah termasuk: Research Octane Number (RON) dan Motor Octane Number (MON). Bensin sebagai hasil akhir harus memenuhi spesifikasi angka oktan tertentu. Jadi; Dengan demikian kilang-kilang penyulingan harus mengendalikan parameter ini selama produksi dan harus menjamin bahwa suatu bensin memenuhi ketentuan khusus sebelum dipasarkan.

## **B. Metode Pengukuran Bilangan Oktana**

Berikut ini adalah berbagai teknik dalam pengukuran bilangan okтана, adalah sebagai berikut:

### **1. Metode Knock Engine**

Metoda laboratorium tradisional untuk menentukan angka okтана adalah metoda knock engine di mana suatu bensin dibakar dan ciri-ciri pembakarannya dibandingkan dengan standar-standar yang diketahui. Metoda ini sangat membutuhkan waktu dan tenaga laboran yang intensive, serta tanpa kemampuan untuk memberikan kendali waktu nyata produksi.

### **2. Metode Near-Infrared (NIR) spektroskopi**

Penggunaan hardware dan software gelombang terpandu (*Guided Wave*) untuk pengukuran angka okтана di dalam bensin yang menggunakan serat (fiber) berbasis optik (*Near-Infrared (NIR) spektroskopi*), dapat diterapkan secara langsung dalam waktu nyata sebagai proses monitoring atau sebagai suatu prosedur laboratorium. NIR adalah suatu alternatif penghematan biaya dan waktu pada metoda-metoda tradisional dalam mengukur bilangan okтана. Daerah NIR spektrum electromagnet mengizinkan pemakaian overtone dan kombinasi ikatan-ikatan fundamental C-H, O-H, dan N-H. Dengan pengukuran NIR spectra dari satu sample rangkaian bahan bakar dengan angka okтана yang diketahui, suatu model kuantitatif yang dapat mengembangkan pengukuran dari sample-sample kedepannya hanya berdasarkan pada spektrum NIR nya. Pengukuran angka okтана dari bensin yang menggunakan NIR spektroskopi lebih cepat dan dapat diandalkan dengan memanfaatkan peralatan hardware dan software

gelombang terpandu (Guided Wave). Metoda ini memperkecil kebutuhan akan koleksi sample laboratorium. Hasil-hasil dapat dipercaya pada waktu nyata (detik) untuk parameter-parameter di dalam aliran-aliran yang kompleks.

### **C. Pengujian Dan Pengetesan Bilangan Oktan**

Dalam pengujian dan pengetesan bilangan oktana, terdapat berbagai tipe penilaian yakni sebagai berikut:

#### **1. Research Octane Number (RON)**

Tipe penilaian dari oktana yang paling umum di seluruh dunia adalah berbasis pada Research Octane Number (RON). RON ditentukan dengan menjalankan tes bahan bakar dalam mesin dengan variabel rasio kompresi di bawah kondisi yang terkendali, dan membandingkan hasilnya secara keseluruhan untuk campuran iso-oktana dan n-heptana.

#### **2. Motor Octane Number (MON)**

Tipe lain dalam penilaian oktana, disebut Motor Octane Number (MON), MON merupakan pengujian yang lebih baik tentang bagaimana perilaku bahan bakar ketika mengalami pembebanan seperti yang dilakukan pada 900 rpm, bukannya pada 600 rpm seperti pada pengujian RON. Pengujian MON menggunakan mesin uji yang sama dengan yang digunakan pada pengujian RON, tapi dengan memanaskan campuran bahan bakar terlebih dahulu, kecepatan mesin yang lebih tinggi, dan variabel waktu pembakaran untuk menitik-beratkan secara lebih lanjut pada daya tahan bahan bakar dari knocking. Tergantung pada komposisi bahan bakar, MON pada bensin modern berkisar 8 sampai 10 poin lebih rendah dari RON. Biasanya, spesifikasi bahan bakar mengharuskan RON dan MON bernilai minimum.

#### **2. Anti-Knock Index (AKI)**

Di sebagian besar negara, termasuk semua dari Eropa, dan Australia, RON ditampilkan pada pompa bahan bakar bensin sebagai "judul" nilai oktana, tetapi di Amerika Serikat, Kanada, dan beberapa negara lain, nilai informasi utama adalah nilai rata-rata dari RON dan MON, yang disebut Anti-Knock Index (AKI). Mungkin juga kadang-kadang disebut sebagai Road Octane Number (RdON), Pump Octane Number (PON), atau  $(R + M) / 2$

#### **D. Pengaruh Dari Nilai Oktan**

Nilai Oktan yang lebih tinggi berkorelasi dengan energi aktivasi. Energi aktivasi adalah jumlah energi yang diperlukan untuk memulai reaksi kimia. Karena bahan bakar yang beroktan lebih tinggi memiliki energi aktivasi yang lebih tinggi, sehingga sangat kecil kemungkinan bahwa kompresi tertentu yang diberikan akan menyebabkan detonasi. Bahan bakar dengan oktan yang lebih tinggi dapat dijalankan pada rasio kompresi yang lebih tinggi tanpa detonasi. Kompresi terkait langsung dengan output daya yang dihasilkan, sehingga mesin yang memakai oktan yang lebih tinggi biasanya memberikan daya yang lebih besar. Daya mesin adalah fungsi dari bahan bakar, serta desain mesin, dan terkait dengan nilai oktan bahan bakar. Daya yang dihasilkan dibatasi oleh jumlah maksimum campuran udara-bahan bakar yang dapat dipaksa masuk ke ruang pembakaran. Ketika throttle (gas) terbuka sebagian, hanya sebagian kecil dari total daya yang dapat dihasilkan karena manifold beroperasi jauh di bawah tekanan atmosfer. Dalam kasus ini, oktan yang dibutuhkan jauh lebih rendah daripada ketika throttle dibuka penuh dan tekanan manifold meningkat menjadi tekanan atmosfer, atau untuk yang lebih tinggi seperti dalam kasus supercharged ataupun mesin turbocharged. Namun, pembakaran bahan bakar dengan oktan yang lebih rendah dari yang dibutuhkan oleh mesin sering mengurangi output daya dan efisiensi .

Jika mesin mulai mengalami knocking, hal tersebut akan mengurangi daya dan efisiensi yang dihasilkan karena sebuah knocking akan menyebabkan tekanan dalam silinder naik jauh melampaui batas-batas desain silinder, sebelum gaya dari gas yang berekspansi dapat diserap oleh piston yang bergerak ke bawah. Banyak mesin mobil modern yang menggunakan fitur sensor knocking (a small piezoelectric microphone), yang mendeteksi knocking, dan kemudian mengirimkan sinyal ke unit kontrol mesin untuk memperlambat waktu pengapian. Perlambatan waktu pengapian mengurangi kecenderungan untuk detonasi, tetapi juga akan mengurangi output daya dan efisiensi bahan bakar.

# BAB VII

## PENGUKURAN

### BILANGAN SETANA

#### Kompetensi

Agar mahasiswa dapat mendefinisikan hal yang dimaksud pengukuran bilangan setana

---

#### A. Definisi Bilangan Setana

*Cetana Number* (Bilangan Setana) sebenarnya adalah sebuah ukuran penundaan penyalaan bahan bakar, masa antara awal injeksi dan awal penyalaan (ignition) dari bahan bakar. Dalam mesin diesel tertentu, bahan bakar dengan bilangan setana yang lebih tinggi akan memiliki periode penundaan penyalaan yang lebih pendek daripada bahan bakar dengan bilangan setana yang lebih rendah. Pengukuran kualitas pembakaran berdasarkan bilangan setana dari bahan bakar diesel (solar) selama pengapian kompresi adalah ekspresi yang penting dari kualitas bahan bakar diesel di antara sejumlah pengukuran lain dalam menentukan kualitas bahan bakar diesel secara keseluruhan. Bilangan setana hanya digunakan untuk distilasi minyak diesel yang relatif ringan. Untuk bahan bakar yang lebih berat (residu), dua skala minyak yang digunakan adalah *The Calculated Carbon Aromaticity Index* (CCAI) dan *The Calculated Ignition Index* (CII), yaitu indeks dari kualitas penyulutan minyak bakar residu. Kedua skala tersebut diberikan dalam formula sebagai berikut :

$$CII = (270.795 + 0.10387) - 0.254565D + 23.709 \log (\log(V + 0.7))$$

Dimana :

**D** = Density at 15°C (kg/m<sup>3</sup>)

**V** = Viscosity (cST)

**T** = Viscosity temperature (°C)

Umumnya, mesin diesel berjalan dengan baik dengan bilangan setana 40-55. Bahan bakar dengan bilangan setana yang lebih tinggi memiliki penundaan penyalaan yang lebih pendek, memberikan lebih banyak waktu untuk proses pembakaran bahan bakar secara sempurna. Oleh karena itu, mesin diesel dengan kecepatan yang lebih tinggi akan beroperasi lebih efektif dengan bahan bakar yang memiliki bilangan setana lebih tinggi. Tidak ada keuntungan peningkatan performa atau pengurangan emisi gas buang ketika bilangan setana ditingkatkan melebihi 55, setelah nilai ini, performa bahan bakar cenderung stabil.

Dimetil eter dapat dibuktikan lebih menguntungkan sebagai bahan bakar diesel di masa mendatang karena memiliki bilangan setana yang tinggi (55) dan dapat diproduksi sebagai biofuel. Alkil nitrat (terutama 2-ethyl hexyl nitrat) dan di-tert-butyl peroksida digunakan sebagai aditif untuk meningkatkan bilangan setana. Biodiesel dari sumber minyak nabati telah diteliti dan tercatat memiliki bilangan setana pada kisaran 46-52, dan biodiesel dari lemak hewan memiliki rentang bilangan setana pada 56-60.

## **B. Relevansi Kimia**

*Cetane* adalah rantai terbuka tidak bercabang dari molekul alkana yang sangat mudah terbakar di bawah kompresi, sehingga ia ditandai dengan bilangan setana 100, sementara alfa-metil naphthalene ditandai dengan bilangan setana 0. Semua hidrokarbon lain yang terkandung dalam bahan bakar diesel ditunjukkan pada cetane sebagai seberapa baik bahan bakar tersebut menyala di bawah kompresi. Oleh karena itu bilangan setana adalah untuk mengukur seberapa cepat bahan bakar mulai terbakar (auto-ignition) pada mesin diesel. Karena ada ratusan komponen dalam bahan bakar diesel (solar), dengan masing-masing memiliki kualitas cetane yang berbeda, maka secara keseluruhan bilangan setana dari bahan bakar diesel adalah kualitas cetane rata-rata dari semua komponen.

Berikut ini adalah Metode Pengukuran Bilangan Setana yakni :

**1. Cooperative Fuel Research (CFR) Engine.**

Untuk mengukur dengan benar bilangan setana agak sulit, karena membutuhkan pembakaran bahan bakar secara khusus (sulit ditemukan), yaitu mesin diesel yang disebut dengan mesin Cooperative Fuel Research (CFR). Pada kondisi pengujian standar, operator dari mesin CFR menggunakan hand-wheel (pengaturan manual) untuk meningkatkan tekanan dalam silinder mesin hingga waktu antara injeksi (pengisian) bahan bakar dan penyalaan bahan bakar (2.407 ms). Bilangan setana yang dihasilkan kemudian dihitung dengan menentukan campuran cetane (hexadecane) dan isocetane (2,2,4,4,6,8,8-heptamethylnonane) yang akan mengakibatkan keterlambatan pembakaran (ignition delay) yang sama.

**2. Ignition Quality Tester .**

Cara lain yang dapat diandalkan dan metode yang lebih tepat dalam mengukur bilangan setana bahan bakar diesel (solar) adalah Ignition Quality Tester (IQT). Instrumen ini lebih sederhana, pendekatan yang lebih baik pada pengukuran bilangan setana dari pada CFR (Cooperative Fuel Research) . Bahan bakar diinjeksikan ke dalam ruang pembakaran volume konstan dengan temperatur sekitar 575 ° C. Bahan bakar terbakar, dan perubahan tekanan dengan kecepatan yang tinggi dalam ruang pembakaran mendefinisikan awal pembakaran. Penundaan pengapian (ignition delay) bahan bakar kemudian dapat dihitung sebagai perbedaan waktu antara awal penginjeksian bahan bakar dan awal pembakaran. Bilangan setana dari bahan bakar kemudian dapat dihitung menggunakan hubungan empiris terbalik pada penundaan pengapian.

**3. Cetane Index.**

Metode lain untuk control kualitas bahan bakar adalah dengan menggunakan *Cetane Index (CI)*, yaitu merupakan bilangan yang dihitung berdasarkan kepadatan (density) dan range destilasi bahan bakar. Ada berbagai versi dari metode ini, tergantung pada apakah menggunakan metrik unit atau Imperial unit, dan berapa banyak distillation points (titik-titik penyulingan) digunakan. Belakangan ini sebagian besar perusahaan minyak menggunakan metode „4-Titik', ASTM D4737, berdasarkan kerapatan 10%, 51% dan 89% dari temperatur evaporasi. Metode '2-Titik' yang didefinisikan dalam ASTM D976, hanya menggunakan kepadatan dan 50% penguapan.

Metode „**2-titik**“ ini cenderung terlalu menaksir Cetane index dan tidak dapat direkomendasikan. Perhitungan-perhitungan Cetane indeks tidak dapat memperhitungkan zat tambahan (additif) peningkat cetane dan karenanya tidak dapat mengukur bilangan setana total dari bahan bakar diesel dengan zat tambahan peningkat Cetane. Operasi mesin diesel terutama adalah berkaitan dengan bilangan setana actual sedangkan bilangan Cetane index hanyalah perkiraan dasar (unadditized) terhadap bilangan setana.

### **C. Standar Bilangan Setana**

#### **1. Automotive Diesel.**

Sebelum pengenalan tentang standar diesel automotif oleh Act (Fuel Quality Standards Act - 2000), Australian Standard AS3570 – 1998, maka untuk bahan bakar Automotive diesel telah merujuk pada standar industri. Standar ini di set pada suatu batas bilangan setana 45 (min) dan merujuk pada metoda pengujian ASTM D613 Standard Test Method untuk pengukuran bilangan setana dari bahan bakar minyak diesel. Standar industri yang digunakan untuk mengukur bilangan setana adalah ASTM D-613 (ISO 5165) dan D-6890.

#### **2. Biodiesel.**

Bilangan setana dari biodiesel tergantung pada distribusi fatty acid (zat asam) di dalam minyak. Rantai karbon fatty acid yang lebih panjang dan molekul-molekul yang lebih jenuh, memiliki bilangan setana yang lebih tinggi. Berdasarkan pada parameter ini, biodiesel dari berbagai bahan baku, cenderung memiliki bilangan setana yang lebih tinggi dibandingkan bahan bakar diesel, oleh karena itu cenderung meningkatkan kinerja mesin.

Standar internasional untuk biodiesel ((i.e. German DIN, European EN and/or US ASTM biodiesel quality standards), batasan bilangan setana berkisar pada 47(min) hingga 51(min).

#### **3. Diesohol.**

Campuran Diesel-alcohol dikenal dengan sejumlah nama lain termasuk E-diesel, M-diesel, Oxy-diesel dan diesohol. Diesohol yang digambarkan di dalam Fuel Quality Standards Regulations 2001 adalah sebagai suatu campuran utama yang berisikan diesel dan alkohol”. Diesohol digunakan di dalam Compression ignition engines sebagai suatu bahan bakar diesel alternatif. Bilangan setana dari alkohol murni adalah sangat rendah (8 untuk etanol dan 3 untuk metanol) dan keduanya adalah bahan bakar compression ignition engine yang sangat



lemah. Secara kontras bilangan setana dari diesel biasanya adalah sekitar 40 –50. Bilangan setana diasohol adalah bergantung pada kualitas penyalaan yang berdasarkan pada diesel, persentase alkohol dalam campuran, dan penambahan additif peningkat cetane.

Cetane akan penting dalam pengaturan diesohol, terutama potensi alkohol untuk mengurangi cetane. Bilangan setana, sebagai kebalikan dari Cetane index, muncul sebagai ukuran yang sesuai untuk diesohol karena mencerminkan penambahan yang memperbaiki cetane.

#### **4. *Diesel-Water Emulsions.***

Diesel-water emulsions adalah bahan bakar diesel alternatif lainnya. Bahan bakar ini secara umum terdiri dari kira-kira 82-85% diesel, 13-15% air dan 2% oleh bahan tambahan dalam satuan volume.



# BAB VIII

## KESETIMBANGAN KIMIA

### Kompetensi

Agar mahasiswa dapat melakukan perhitungan reaksi kimia menuju kesetimbangan kimia pada proses pembakaran.

---

### A. Definisi Kesetimbangan Kimia (*Chemical Equilibrium*)

Kesetimbangan Kimia adalah kondisi di mana laju perubahan konsentrasi masing-masing spesies adalah nol pada suatu temperatur dan tekanan tertentu. Dalam suatu reaksi yang kompleks, beberapa spesies menjadi setimbang secara cepat karena laju reaksi yang cepat atau perubahan konsentrasi yang sangat kecil, sedang untuk spesies yang lain menjadi setimbang lebih lambat. Secara umum dapat dikatakan kesetimbangan tidak terjadi di bagian api, tetapi terjadi pada *postflame*.

Syarat: energi bebas Gibbs (*Gibbs free energy*  $G \equiv H - TS$ ) tidak berubah (konstan)

$$d(G)_{T,p} = 0$$

di mana

$$G = \sum_{j=1}^J N_j \bar{g}_j$$

sedangkan

$$\bar{g}_j = \bar{h}_j - T\bar{s}_j$$

dan

$$\bar{s}_j = \bar{s}_j^0 - R \ln \left( \frac{p_j}{p_0} \right) \text{ dan } \bar{s}_j^0 = \int_{T_{ref}}^T \frac{c_p}{T} dT$$

maka

$$\begin{aligned} \bar{g}_j &= \underbrace{\bar{h}_j - T\bar{s}_j^0}_{\equiv \bar{g}_j^0} + \bar{R}T \ln \left( \frac{p_j}{p_0} \right) \\ &= \bar{g}_j^0 + \bar{R}T \ln(x_j) + \bar{R}T \ln \left( \frac{p}{p_0} \right) \end{aligned}$$

Akhir perhitungan adalah sebagai berikut :

$$d\left(\sum N_j \bar{g}_j\right) = 0$$

dengan memperhatikan

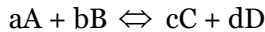
$$d\bar{g}_j = 0$$

maka didapatkan  $\sum \bar{g}_j dN_j = 0$

Untuk suatu reaksi  $dN_j = a_j d\varepsilon$

Dimana  $d\varepsilon$  : laju reaksi dan  $a_j$ : koefisien stoikiometris

Misal:



$$d(N_A) = -a d\varepsilon$$

$$d(N_B) = -b d\varepsilon$$

$$d(N_C) = c d\varepsilon$$

$$d(N_D) = d d\varepsilon$$

Sehingga  $(a\bar{g}_A + b\bar{g}_B - c\bar{g}_C - d\bar{g}_D)d\varepsilon = 0$

dan  $(a\bar{g}_A + b\bar{g}_B - c\bar{g}_C - d\bar{g}_D) = 0$

$$a \left[ \bar{g}_j^0 + \bar{R}T \ln \left( \frac{p_A}{p_0} \right) \right] + b \left[ \bar{g}_B^0 + \bar{R}T \ln \left( \frac{p_B}{p_0} \right) \right] - c \left[ \bar{g}_C^0 + \bar{R}T \ln \left( \frac{p_C}{p_0} \right) \right] - d \left[ \bar{g}_D^0 + \bar{R}T \ln \left( \frac{p_D}{p_0} \right) \right] = 0$$

$$a\bar{g}_j^0 + b\bar{g}_B^0 - c\bar{g}_C^0 - d\bar{g}_D^0 = -a\bar{R}T \ln \left( \frac{p_A}{p_0} \right) - b\bar{R}T \ln \left( \frac{p_B}{p_0} \right) + c\bar{R}T \ln \left( \frac{p_C}{p_0} \right) + d\bar{R}T \ln \left( \frac{p_D}{p_0} \right)$$

Kedua sisi dibagi  $\bar{R}T$

$$\underbrace{\frac{a\bar{g}_j^0 + b\bar{g}_B^0 - c\bar{g}_C^0 - d\bar{g}_D^0}{\bar{R}T}}_{\equiv \ln K_p} = \ln \left( \frac{p_C^c p_D^d}{p_A^a p_B^b} \right) + \ln(p_0)^{(a+b-c-d)}_{=1 \text{ atm}}$$

$$K_p = \frac{p_C^c p_D^d}{p_A^a p_B^b} = \frac{x_C^c x_D^d}{x_A^a x_B^b} p^{(c+d-a-b)} \quad (\text{p dalam atm})$$

$K_p$  di sini disebut konstanta kesetimbangan.

$$\ln K_p = \frac{a\bar{g}_A^0}{RT} + \frac{b\bar{g}_B^0}{RT} - \frac{c\bar{g}_C^0}{RT} - \frac{d\bar{g}_D^0}{RT}$$

Untuk produk pembakaran, reaksi kesetimbangan dalam fasa gas yang penting

- i.  $\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$
- ii.  $\text{CO}_2 \Leftrightarrow \text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2$
- iii.  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$
- iv.  $\text{H}_2 + \text{O}_2 \Leftrightarrow 2 \text{OH}$
- v.  $\text{O}_2 \Leftrightarrow 2\text{O}$
- vi.  $\text{N}_2 \Leftrightarrow 2\text{N}$
- vii.  $\text{H}_2 \Leftrightarrow 2\text{H}$
- viii.  $\text{O}_2 + \text{N}_2 \Leftrightarrow 2\text{NO}$

Reaksi i, ii, v, dan vii adalah reaksi disosiasi. Reaksi iii disebut reaksi *water-gas shift reaction*. Reaksi iv adalah reaksi pembentukan OH yang merupakan spesies penting dalam kinetika reaksi kimia, reaksi viii dipakai untuk menghitung NO. Hal lain yang perlu dipertimbangkan adalah tentang kesetimbangan jumlah atom.

$$\sum_{j=1}^{\tilde{J}} \bar{n}_{ij} N_j = A_i$$

$j$ : spesies;  $i$ : atom;  $\tilde{J}$ : jumlah total spesies,  $\bar{n}_{ij}$ : jumlah atom  $i$  dalam spesies  $j$ ;  $A_i$ : jumlah mol dari atom  $i$  dalam sistem.

### Beberapa catatan tentang $K_p$ .

1.  $K_p$  dari suatu reaksi hanya tergantung kepada temperatur, tidak tergantung kepada tekanan campuran dan tidak dipengaruhi oleh *inert gas*.
2.  $K_p$  dari reaksi balik adalah  $1/K_p$ .
3. Semakin besar  $K_p$  maka reaksi semakin sempurna, di mana
  - a. apabila  $K_p > 1000$  (atau  $\ln K_p > 7$ ) maka reaksi dapat diasumsikan sempurna.
  - b. apabila  $K_p < 0,001$  (atau  $\ln K_p < -7$ ) maka reaksi tidak terjadi.

4. Tekanan campuran dan *inert gas* mempengaruhi komposisi kesetimbangan.
5. Perhitungan kesetimbangan memberi informasi tentang komposisi kesetimbangan dari suatu reaksi, tetapi tidak memberi informasi tentang kecepatan reaksi.

# BAB IX

## TERMODINAMIKA

### REAKSI KIMIA PEMBAKARAN

#### Kompetensi

Agar mahasiswa dapat melakukan perhitungan termodinamika pada reaksi kimia pembakaran.

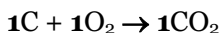
---

#### A. Energi Dalam Reaksi Kimia

Reaksi pembakaran merupakan salah satu contoh proses di mana terjadi reaksi kimia. Reaksi pembakaran memegang peranan yang sangat penting dalam pembangkitan energi primer yang terkandung dalam bahan bakar untuk diubah menjadi energi termal. Untuk sistem dimana tidak terjadi reaksi kimia maka energi yang dimiliki oleh suatu zat akan terdiri dari **energi dalam sensibel** (yang ditentukan oleh gerakan molekul dan berubah dengan perubahan  $p$  dan  $T$ ) dan **energi dalam laten** (berubah karena adanya perubahan fasa). Untuk sistem dengan reaksi kimia maka selain dari 2 bentuk energi dalam di atas maka akan ada energi dalam kimia (*chemical internal energy*) yang berubah-ubah dengan adanya pembentukan atau pelepasan ikatan antar atom.

#### 1. Stoikiometri Pembakaran

Berikut ini adalah contoh reaksi kimia:



Reaksi di atas dapat diinterpretasikan sebagai:

- 1 kmol C ditambah 1 kmol  $\text{O}_2$  menghasilkan 1 kmol  $\text{CO}_2 \rightarrow$  tidak berlaku kekekalan mol.

- b.  $(1 \times M_C)$  kg C bereaksi dengan  $(1 \times M_{O_2})$  kg  $O_2$  menghasilkan  $(1 \times M_{CO_2})$  kg  $CO_2$  di mana  $M_i$  adalah berat molekul unsur  $i$ . Dengan kata lain 12 kg C bereaksi dengan 32 kg  $O_2$  menghasilkan 44 kg  $CO_2$  → berlaku hukum kekekalan massa

## 2. Proses Pembakaran, Teori dan Aktualnya

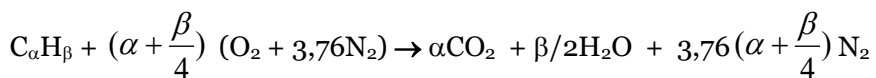
Secara teoritis proses pembakaran akan terjadi secara komplet/sepurna apabila jumlah udara yang tersedia adalah cukup sehingga,

- semua unsur karbon C berubah menjadi karbon dioksida  $CO_2$
- semua unsur hidrogen H berubah menjadi air  $H_2O$

Tetapi pada kenyataannya proses pembakaran berlangsung tidak sempurna yaitu tidak memenuhi syarat seperti di atas (timbulnya C,  $H_2$ , CO, OH atau yang lain). Hal ini dapat disebabkan oleh

- kekurangan oksigen
- kualitas campuran bahan bakar dan udara yang tidak baik
- terjadi disosiasi (pecahnya unsur-unsur stabil yang kemudian membentuk unsur baru)

Disini **pembakaran tidak sempurna** didefinisikan sebagai proses pembakaran yang jumlah oksigennya tidak memenuhi jumlah udara stoikiometris/teoritis untuk pembakaran sempurna. Sedangkan **pembakaran stoikiometris/teoritis** adalah apabila bahan bakar terbakar sempurna dengan jumlah udara minimum. Udara minimum ini disebut sebagai udara teori. Dengan kata lain pembakaran stoikiometris adalah pembakaran sempurna tanpa menyisakan oksigen  $O_2$  dalam produk pembakarannya. Pembakaran stoikiometris dengan bahan bakar hidrokarbon  $C_\alpha H_\beta$  dapat dinyatakan secara umum sebagai:



Pada prakteknya dengan tujuan (a) menjamin sempurnanya proses pembakaran dan/atau (b) menurunkan temperatur pembakaran, maka disuplai udara dalam jumlah yang berlebih. Kelebihan jumlah udara dibandingkan jumlah udara teori/stoikiometris disebut **udara lebih** (*excess air*) dimana,



$$\% \text{udara lebih} = \frac{m_{\text{udara,a}} - m_{\text{udara,s}}}{m_{\text{udara,s}}}$$

Untuk mengetahui seberapa banyak udara yang digunakan dibandingkan dengan jumlah udara teori/stoikiometris didefinisikan:

$$\% \text{udara teoritis} = \frac{m_{\text{udara,a}}}{m_{\text{udara,s}}} \times 100\%$$

dimana a dan s masing-masing menunjukkan kondisi aktual dan stoikiometris/teoritis. Dari definisi ini maka hubungan antara %udara lebih dan %udara teori,

$$x \% \text{udara lebih} = (100 + x) \% \text{udara teori}$$

Kondisi campuran reaksi pembakaran juga dapat dinyatakan sebagai berikut:

### ***Air-Fuel Ratio***

$$\text{AFR} = \left( \frac{m_{\text{udara}}}{m_{\text{bb}}} \right) \rightarrow$$

$$\text{AFR}_{\text{st}} = \left( \frac{m_{\text{udara}}}{m_{\text{bb}}} \right)_{\text{st}} = \frac{4,76 \times (\alpha + \beta / 4) MW_{\text{udara}}}{1 MW_{\text{bb}}}$$

### ***Equivalence Ratio***

$$\Phi = \frac{\text{AFR}_{\text{st}}}{\text{AFR}} = \frac{\text{FAR}}{\text{FAR}_{\text{st}}}$$

### ***% Stoichiometric Air***

$$\% \text{ stoichiometric air} = \frac{100\%}{\Phi}$$

### ***% Excess Air***

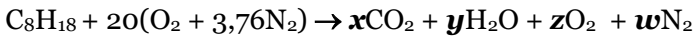
$$\% \text{ excess air} = \frac{(1 - \Phi)}{\Phi} \cdot 100\%$$

### **Contoh Soal**

Satu kmol bensin dibakar dengan 20 kmol udara kering. Apabila diasumsikan produk pembakaran terdiri dari CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> tentukan jumlah mol dari tiap gas dan AFR-nya. Udara kering di sini didefinisikan sebagai udara dengan komposisi 21% O<sub>2</sub> dan 79% N<sub>2</sub>.

### **Solusi**

Reaksi pembakaran yang terjadi adalah sempurna tetapi bukan reaksi stoikiometris. Persamaan reaksi yang terjadi adalah:



Dari hukum kekekalan massa (atau kekekalan jumlah atom) maka

$$C \quad : 8=x \quad \rightarrow x=8$$

$$H \quad : 18=2y \quad \rightarrow y=9$$

$$O \quad : 40=2x + y + 2z \quad \rightarrow z=7,5$$

$$N_2 \quad : (20)(3,76)=w \rightarrow w=75,2$$

Dari sini maka persamaan lengkapnya adalah:



Rasio massa udara dan bahan bakar AFR aktual

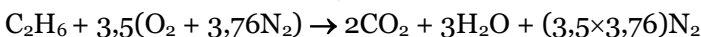
$$\begin{aligned} AFR &= \frac{m_{\text{udara}}}{m_{\text{bb}}} \\ &= \frac{20 \times (1 + 3,76) \times 29}{1 \times (8 \times 12 + 18 \times 1)} = 24,2 \text{ kg - udara/kg - bb} \end{aligned}$$

### **Contoh Soal**

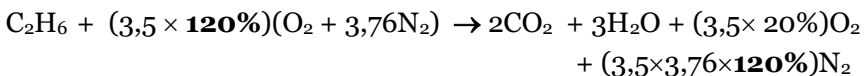
Etana (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) dibakar dengan 20% udara lebih. Apabila pembakaran berlangsung sempurna dan dilakukan pada 100 kPa, tentukan AFR.

### **Solusi**

Etana (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) → dari rumus umum α=2, β=6, sehingga persamaan kimia untuk reaksi stoikiometrisnya:



Karena udara lebih sama dengan 20% (udara aktual **120%**) maka persamaan kimia menjadi,



(a) Rasio massa udara dan bahan bakar:

$$\begin{aligned} \text{AFR} &= \frac{m_{\text{udara}}}{m_{\text{bb}}} \\ &= \frac{3,5 \times 120\% \times (1 + 3,76) \times 29}{1 \times (2 \times 12 + 6 \times 1)} = 19,3 \text{ kg - udara/kg - bb} \end{aligned}$$

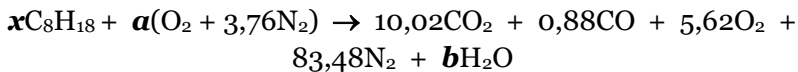
**Contoh Soal**

Bensin dibakar dengan udara kering. Analisa volumetris **secara kering** terhadap produk pembakaran menunjukkan CO<sub>2</sub> (10,02%), O<sub>2</sub>(5,62%), CO(0,88%), N<sub>2</sub>(83,48%). Tentukan (a) AFR, (b) %udara teori yang digunakan.

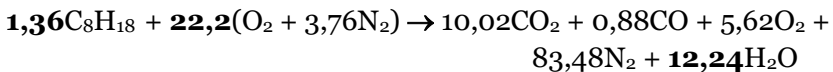
**Solusi**

Di sini yang perlu diperhatikan adalah **analisa secara kering** tidak bisa mendeteksi air (tetapi tidak berarti air tidak terbentuk!).

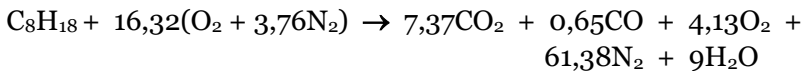
Dengan asumsi produk pembakaran adalah gas ideal maka perbandingan volume menunjukkan perbandingan jumlah mol. Sehingga apabila jumlah produk pembakaran yang terdeteksi ada 100 kmol maka,



Dari kekekalan jumlah atom sebelum dan sesudah reaksi didapatkan **a=22,2**, **x=1,36**, **b=12,24** sehingga,



Persamaan reaksi pembakaran untuk 1 kmol bahan bakar:

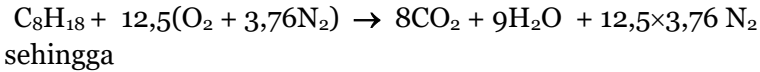


(a) Rasio massa udara dan bahan bakar:

$$\begin{aligned} \text{AFR} &= \frac{m_{\text{udara}}}{m_{\text{bb}}} \\ &= \frac{16,32 \times (1 + 3,76) \times 29}{1 \times (8 \times 12 + 18 \times 1)} = 19,76 \text{ kg - udara/kg - bb} \end{aligned}$$

(b) Untuk mengetahui berapa %udara teori yang dipakai harus ditentukan reaksi stoikiometrisnya untuk dibandingkan. Karena C<sub>8</sub>H<sub>18</sub> maka dari rumus umum α=8, β=18, γ=0 maka rumus reaksi

stoikiometrisnya adalah:



$$\begin{aligned} \% \text{udara teori} &= \frac{m_{\text{udara,a}}}{m_{\text{udara,s}}} \\ &= \frac{16,32 \times 4,76 \times 29}{12,5 \times 4,76 \times 29} = 131\% \end{aligned}$$

### 3. Entalpi Pembakaran dan Entalpi Pembentukan

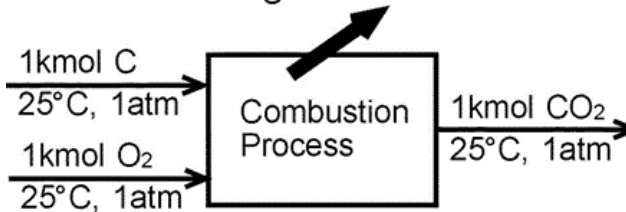
Dalam suatu sistem yang didalamnya terjadi reaksi pembakaran (reaksi kimia),

$$\Delta E_{\text{sys}} = \Delta E_{\text{keadaan}} + \Delta E_{\text{kimia}}$$

Dari persamaan ini maka apabila kondisi sistem inlet dan outlet adalah sama maka perubahan energi sistem akan sama dengan perubahan energi kimia dari unsur-unsur yang ada di sistem sehingga dalam termodinamika pembakaran dikenal **entalpi pembakaran** (*enthalpy of combustion*).

Entalpi pembakaran adalah perbedaan entalpi antara produk pembakaran pada keadaan tertentu dan reaktan pada keadaan yang sama untuk suatu reaksi pembakaran yang sempurna, atau bisa juga diartikan sebagai jumlah kalor yang dilepas selama proses pembakaran steady oleh 1 kmol atau 1 kg bahan bakar yang terbakar sempurna pada temperatur dan tekanan tertentu. Secara matematis bisa dituliskan,

$$\begin{aligned} h_C &= H_P - H_R \\ \bar{h}_C &= - 393.520 \text{kJ/kmol-C} \end{aligned}$$



Untuk bahan bakar tertentu pada 25°C, 1 atm maka harga entalpi pembakaran  $h_C$  dapat dilihat dari Tabel A-27. Untuk bahan bakar yang tidak tercantum dalam tabel bisa juga dicari entalpi pembakarannya dari **entalpi pembentukan** (*enthalpy of formation*) unsur-

unsurnya. Entalpi pembentukan  $\bar{h}_f^\circ$  dapat dilihat dari Tabel A-26 Pembakaran dimana ( $^\circ$ ) menunjukkan nilai pada kondisi standar. Dalam Tabel A-26 Pembakaran dapat dilihat bahwa untuk unsur-unsur yang stabil ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ , dan  $C$ ) pada kondisi referensi standar ( $25^\circ C$ , 1 atm) maka harganya adalah nol.

Dalam prakteknya istilah yang sering digunakan untuk menunjukkan besarnya energi yang dilepaskan oleh bahan bakar adalah **nilai kalor** (*heating value* HV) dimana besarnya adalah,

$$HV = |h_C| \quad [kJ/jg - fuel]$$

Nilai kalor ini dibagi menjadi 2 tergantung kepada fasa air dalam produknya.

- *Higher Heating Value* HHV apabila produk  $H_2O$  dalam fasa cair
- *Lower Heating Value* LHV apabila produk  $H_2O$  dalam fasa gas dimana hubungan antara HHV dan LHV adalah,

$$HHV = LHV + (N \times h_{fg})_{H_2O}$$

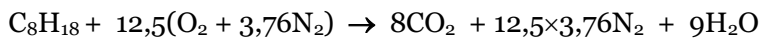
di sini  $N$ : jumlah mol air,  $h_{fg}$ : entalpi penguapan air pada temperatur tertentu [kJ/kmol].

### Contoh Soal

Tentukan entalpi pembakaran dari gas oktana pada  $25^\circ C$ , 1 atm menggunakan tabel entalpi pembentukan. Asumsikan air dalam bentuk fasa cair.

### Solusi

Entalpi pembakaran didapatkan pada reaksi stoikiometris. Gas oktana =  $C_8H_{18}$  maka dari rumus umum  $\alpha=8$ ,  $\beta=18$ ,  $\gamma=0$  maka rumus reaksi stoikiometrisnya adalah:



Entalpi pembakaran dihitung dari:

$$\begin{aligned} h_C &= H_P - H_R \\ &= (N \times \bar{h}_f^\circ)_P - (N \times \bar{h}_f^\circ)_R \\ &= (N \times \bar{h}_f^\circ)_{CO_2} + (N \times \bar{h}_f^\circ)_{H_2O} - (N \times \bar{h}_f^\circ)_{C_8H_{18}} \end{aligned}$$

Dari Tabel A-26 diketahui

$$\bar{h}_{f,\text{CO}_2}^{\circ} = -393.520 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{h}_{f,\text{H}_2\text{O}}^{\circ} = -285.830 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{h}_{f,\text{C}_8\text{H}_{18}}^{\circ} = -208.450 \text{ kJ/kmol}$$

sehingga

$$\begin{aligned} h_C &= (8 \times -393.520) + (9 \times -285.830) - (1 \times -208.450) \\ &= -5.512.180 \text{ kJ/kmol} - \text{C}_8\text{H}_{18} \end{aligned}$$

#### 4. Analisa Hukum Pertama Sistem dengan Reaksi

Pada prinsipnya disini yang membedakan dengan sistem tanpa reaksi adalah hanya pada timbulnya suhu yang menunjukkan energi kimia.

##### Sistem Terbuka (Steady)

Entalpi absolut (*standardized enthalpy*) suatu zat pada suatu kondisi tertentu dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \bar{h}(T) &= \bar{h}_f^{\circ}(T_{ref}) + \int_{T_{ref}}^T \bar{h}_s(T) \\ &= \bar{h}_f^{\circ} + (\bar{h}_s - \bar{h}_s^{\circ}) \end{aligned}$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa entalpi absolut dari suatu zat dalam sistem dengan reaksi akan sama dengan entalpi formasi pada kondisi standar  $\bar{h}_f^{\circ}$  ditambah dengan entalpi sensibel relatif terhadap kondisi referensi  $(\bar{h}_s - \bar{h}_s^{\circ})$ . Di sini tanda ( $^{\circ}$ ) menunjukkan kondisi referensi. Untuk selanjutnya *subscript* ( $_s$ ) yang menunjukkan sensibel dihilangkan.

Apabila perubahan energi kinetik dan energi potensial bisa diabaikan maka hukum kekekalan energi untuk sistem dengan reaksi akan berbentuk sebagai berikut,

$$Q - W = H_P - H_R \text{ [kJ/kmol - bb]}$$

dimana,

$$H_P = \sum N_P (\bar{h}_f^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_P$$

$$H_R = \sum N_R (\bar{h}_f^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_R$$

Apabila persamaan entalpi untuk produk dan reaktan dimasukkan dalam persamaan kekekalan energi maka,

$$Q - W = \sum N_P (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_P - \sum N_R (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_R$$

$$= \bar{h}_C^\circ + \sum N_P (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_P - \sum N_R (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_R$$

### ***Sistem Tertutup***

Persamaan kekekalan energi untuk sistem tertutup,

$$Q - W = U_P - U_R \text{ [kJ/kmol-bb]}$$

dimana  $U_P$  dan  $U_R$  masing-masing adalah energi dalam produk dan reaktannya. Dari definisi entalpi  $\bar{u} = \bar{h} - p\bar{v}$  maka persamaan di atas menjadi,

$$Q - W = \sum N_P (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ - p\bar{v})_P - \sum N_R (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ - p\bar{v})_R$$

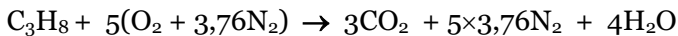
Suku  $p\bar{v}$  adalah cukup kecil untuk zat padat dan cair dan untuk gas ideal bisa digantikan dengan  $R_u T$

### ***Contoh Soal***

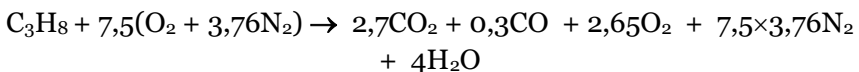
Propana cair masuk ke ruang bakar pada 25°C dan laju 0,05 kg/min dimana dicampur dan dibakar dengan udara dengan 50% udara lebih. Udara lebih ini masuk ke ruang bakar pada 7°C. Hasil analisa produk menunjukkan semua hidrogen menjadi air, tetapi hanya 90% karbon yang berubah menjadi karbon dioksida dan sisanya menjadi karbon monooksida. Apabila temperatur gas buang adalah 1500 K, tentukan (a) laju massa udara, (b) transfer kalor.

### ***Solusi***

Reaksi stoikiometrisnya:



Reaksi aktualnya:



(a) Dari persamaan reaksi aktual diatas,

$$\begin{aligned} \text{AFR} &= \frac{m_{\text{udara}}}{m_{\text{bb}}} \\ &= \frac{7,5 \times (1 + 3,76) \times 29}{1 \times (3 \times 12 + 8 \times 1)} = 25,53 \text{ kg - udara/kg - bb} \end{aligned}$$

Sehingga,

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{udara}} &= \text{AFR} \times \dot{m}_{\text{bb}} \\ &= 25,53 \times 0,05 = 1,18 \text{ kg - udara/min} \end{aligned}$$

(b) Transfer kalor untuk kasus ini adalah,

$$Q - W = \sum N_P (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_P - \sum N_R (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_R$$

Dengan mengasumsikan bahwa semua gas adalah gas ideal maka  $h=h(T)$  sehingga dari tabel didapatkan harga-harga sebagai berikut,

Unsur	$\bar{h}_f^\circ$ [kJ/kmol]	$\bar{h}_{280}$ [kJ/kmol]	$\bar{h}_{298}$ [kJ/kmol]	$\bar{h}_{1500}$ [kJ/kmol]
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-118.910	-	-	-
O <sub>2</sub>	0	8150	8682	49.292
N <sub>2</sub>	0	8141	8669	47.073
H <sub>2</sub> O	-241.820	-	9904	57.999
CO <sub>2</sub>	-393.520	-	9364	71.078
CO	-110.530	-	8669	47.517

$\bar{h}_{f, \text{C}_3\text{H}_8(l)}^\circ$  didapat dari  $\bar{h}_{f, \text{C}_3\text{H}_8(g)}^\circ$  dikurangi  $\bar{h}_{g, \text{C}_3\text{H}_8 @ 25^\circ\text{C}}$ . Dari nilai-nilai yang didapat maka apabila dimasukkan dalam persamaan kekekalan energi akan didapatkan,

$$\begin{aligned} Q &= -363.882 \text{ [kJ/kmol - C}_3\text{H}_8] \\ &= -363.882/44 = -8270 \text{ [kJ/kg - C}_3\text{H}_8] \end{aligned}$$

Sehingga laju kalor yang terjadi adalah,

$$\dot{Q} = 0,05 \times (-8270) = -413,5 \text{ [kJ/min]} = -6,89 \text{ [kW]}$$

## 5. Temperatur Api Adiabatik



Dalam proses pembakaran apabila tidak ada interaksi kerja antara sistem dan lingkungan dan perubahan energi kinetik dan potensial maka,

Energi kimia bb  $\left\{ \begin{array}{l} \text{transfer panas ke lingkungan} \\ \text{menaikkan temperatur produk pembakaram} \end{array} \right.$

Apabila transfer panas = 0 maka produk pembakaran menerima semua energi yang dibangkitkan dari proses pembakaran sehingga mencapai temperatur maksimum. Temperatur maksimum ini disebut **temperatur api adiabatik** (*adiabatic flame temperature*) dimana untuk proses pembakaran steady maka temperatur api adiabatik akan dicapai bila  $Q = W = 0$  sehingga di sini berlaku hubungan:

$$H_P = H_R$$

$$\sum N_P (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_P = \sum N_R (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_R$$

Dalam perhitungan temperatur adiabatik,

1. Entalpi reaktan  $H_R$  akan mudah ditentukan karena kondisi reaktan biasanya sudah diketahui
2. Untuk mengetahui entalpi produk  $H_P$  maka perlu mengetahui temperatur produk dimana temperatur ini sama dengan temperatur api adiabatik yang harus dicari secara iterasi (*trial and error*)
3. Iterasi pertama dapat diasumsikan bahwa produk semuanya adalah  $N_2$  (ini karena  $N_2$  adalah unsur paling dominan dalam pembakaran yang menggunakan udara)

Dalam desain ruang bakar (furnace) maka temperatur api adiabatik sangat penting dalam penentuan jenis material dimana temperatur api adiabatik ini bukan merupakan properti dari bahan bakar tetapi akan tergantung kepada:

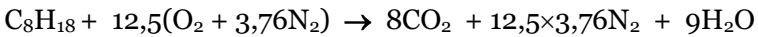
- kondisi reaktan (temperatur, tekanan)
- tingkat kesempurnaan reaksi pembakaran
- jumlah udara yang digunakan.

### Contoh Soal

Bensin cair masuk ke ruang bakar sistem turbin gas secara steady pada 1 atm, 25°C, dan dibakar dengan udara yang masuk dengan kondisi yang sama. Dengan mengabaikan perubahan energi kinetik dan energi potensial, tentukan temperatur api adiabatik untuk (a) pembakaran sempurna dengan 100% udara teori, (b) pembakaran sempurna dengan 400% udara teori, (c) pembakaran tidak sempurna dengan 90% udara teori.

**Solusi**

(a) Reaksi pembakaran dengan 100% udara teori:



Persamaan kekekalan energi berubah menjadi,

$$\begin{aligned} \sum N_P (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_P &= \sum N_R (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_R \\ &= N_R \times \bar{h}_{f,C_8H_{18}}^\circ \end{aligned}$$

Unsur	$\bar{h}_f^\circ$ [kJ/kmol]	$\bar{h}_{298}$ [kJ/kmol]
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	-249.950	-
O <sub>2</sub>	0	8682
N <sub>2</sub>	0	8669
H <sub>2</sub> O	-241.820	9904
CO <sub>2</sub>	-393.520	9364

Dengan mensubstitusikan harga-harga di atas dalam persamaan kekekalan energi, akan didapatkan,

$$8\bar{h}_{CO_2} + 9\bar{h}_{H_2O} + 47\bar{h}_{N_2} = 5.646.081[\text{kJ}]$$

Persamaan di atas bisa diselesaikan apabila temperatur produk diketahui. Disini pertama-tama diasumsikan semua produknya adalah N<sub>2</sub> sehingga akan didapatkan

$$5.646.081 / (8+9+47) = 88.220 \text{ kJ/kmol}$$

yang merupakan  $\bar{h}_{N_2}$  pada 2650K (lihat Tabel A-18).

Langkah berikutnya adalah mengasumsikan nilai baru yang biasanya besarnya lebih kecil dari nilai asumsi pertama. Misal  $T = 2400 \text{ K}$  maka persamaan kekekalan energi akan menjadi,

$$\begin{aligned} 8\bar{h}_{CO_2} + 9\bar{h}_{H_2O} + 47\bar{h}_{N_2} &= 8 \times 125.152 + 9 \times 103.508 + 47 \times 79.320 \\ &= 5.660.828 [\text{kJ}] \end{aligned}$$

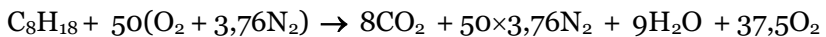
Nilai ini lebih besar dari 5.646.081 kJ. Oleh karena itu temperatur

adiabatis yang dicari adalah lebih kecil dari 2400 K. Berikutnya temperatur diasumsikan 2350K dimana persamaan kekekalan energinya berubah,

$$8\bar{h}_{\text{CO}_2} + 9\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} + 47\bar{h}_{\text{N}_2} = 8 \times 122.091 + 9 \times 100.846 + 47 \times 77.496 \\ = 5.526.654 \text{ [kJ]}$$

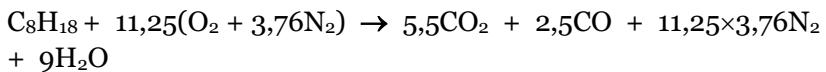
Nilai ini lebih kecil dari 5.646.081 kJ sehingga temperatur adiabatik yang dicari adalah terletak antara 2350 dan 2400 K. Dari interpolasi ditemukan  $T_{\text{prod}} = 2394,5 \text{ K}$ .

(b) Reaksi pembakaran untuk 400% udara teori,



Dengan mengikuti langkah seperti di atas akan didapatkan  $T_{\text{prod}} = 962 \text{ K}$ .

(c) Reaksi pembakaran untuk 90% udara teori,



Dengan cara yang sama didapatkan  $T_{\text{prod}} = 2236 \text{ K}$ .

Dari kenyataan di atas bisa diambil kesimpulan bahwa dari tinjauan termodinamika temperatur api adiabatik menurun akibat pembakaran tidak sempurna atau penggunaan udara lebih. Juga temperatur api adiabatik akan mencapai maksimum pada proses pembakaran dengan menggunakan 100% udara teori.

Tabel 18. Tabel Entalpy of Formation

Table B.1 Selected properties of hydrocarbon fuels: enthalpy of formation,<sup>a</sup> Gibbs function of formation,<sup>b</sup> entropy,<sup>a</sup> and higher and lower heating values all at 298.15 K and 1 atm; boiling points<sup>b</sup> and latent heat of vaporization<sup>c</sup> at 1 atm; constant-pressure adiabatic flame temperature at 1 atm,<sup>d</sup> liquid density<sup>e</sup>

Formula	Fuel	MW (kg/kmol)	$\bar{h}_f^\circ$ (kJ/kmol)	$\bar{g}_f^\circ$ (kJ/kmol)	$\bar{s}^\circ$ (kJ/kmol-K)	HHV <sup>†</sup> (kJ/kg)	LHV <sup>†</sup> (kJ/kg)	Boiling pt. (°C)	$h_{fg}$ (kJ/kg)	$T_{ad}^\ddagger$ (K)	$\rho_{liq}^e$ (kg/m <sup>3</sup> )
CH <sub>4</sub>	Methane	16.043	-74,831	-50,794	186.188	55,528	50,016	-164	509	2,226	300
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Acetylene	26.038	226,748	209,200	200.819	49,923	48,225	-84	—	2,539	—
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Ethene	28.054	52,283	68.124	219.827	50,313	47,161	-103.7	—	2,369	—
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Ethane	30.069	-84,667	-32,886	229.492	51,901	47,489	-88.6	488	2,259	370
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	Propene	42.080	20,414	62,718	266.939	48,936	45,784	-47.4	437	2,334	514
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Propane	44.096	-103,847	-23,489	269.910	50,368	46,357	-42.1	425	2,267	500
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	1-Butene	56.107	1,172	72,036	307.440	48,471	45,319	-63	391	2,322	595
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	n-Butane	58.123	-124,733	-15,707	310.034	49,546	45,742	-0.5	386	2,270	579
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	1-Pentene	70.134	-20,920	78,605	347.607	48,152	45,000	30	358	2,314	641
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	n-Pentane	72.150	-146,440	-8,201	348.402	49,032	45,355	36.1	358	2,272	626
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Benzene	78.113	82,927	129,658	269.199	42,277	40,579	80.1	393	2,342	879
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	1-Hexene	84.161	-41,673	87,027	385.974	47,955	44,803	63.4	335	2,308	673
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	n-Hexane	86.177	-167,193	209	386.811	48,696	45,105	69	335	2,273	659
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	1-Heptene	98.188	-62,132	95,563	424.383	47,817	44,665	93.6	—	2,305	—
C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	n-Heptane	100.203	-187,820	8,745	425.262	48,456	44,926	98.4	316	2,274	684
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	1-Octene	112.214	-82,927	104,140	462.792	47,712	44,560	121.3	—	2,302	—
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	n-Octane	114.230	-208,447	17,322	463.671	48,275	44,791	125.7	300	2,275	703
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	1-Nonene	126.241	-103,512	112,717	501.243	47,631	44,478	—	—	2,300	—
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	n-Nonane	128.257	-229,032	25,857	502.080	48,134	44,686	150.8	295	2,276	718
C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>	1-Decene	140.268	-124,139	121,294	539.652	47,565	44,413	170.6	—	2,298	—
C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	n-Decane	142.284	-249,659	34,434	540.531	48,020	44,602	174.1	277	2,277	730
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>	1-Undecene	154.295	-144,766	129,830	578.061	47,512	44,360	—	—	2,296	—
C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	n-Undecane	156.311	-270,286	43,012	578.940	47,926	44,532	195.9	265	2,277	740

Besarnya temperatur adiabatik

- Secara teoritis (tanpa memperhitungkan terjadinya disosiasi) maksimum apabila  $\Phi=1$  (kondisi stoikiometris) dan turun pada kondisi kaya maupun miskin
- Secara aktual tergantung sejauh mana terjadi disosiasi. Secara umum dikatakan disosiasi semakin berkurang dengan naiknya tekanan

# BAB X

## REAKSI PEMBAKARAN

### MOTOR BAKAR

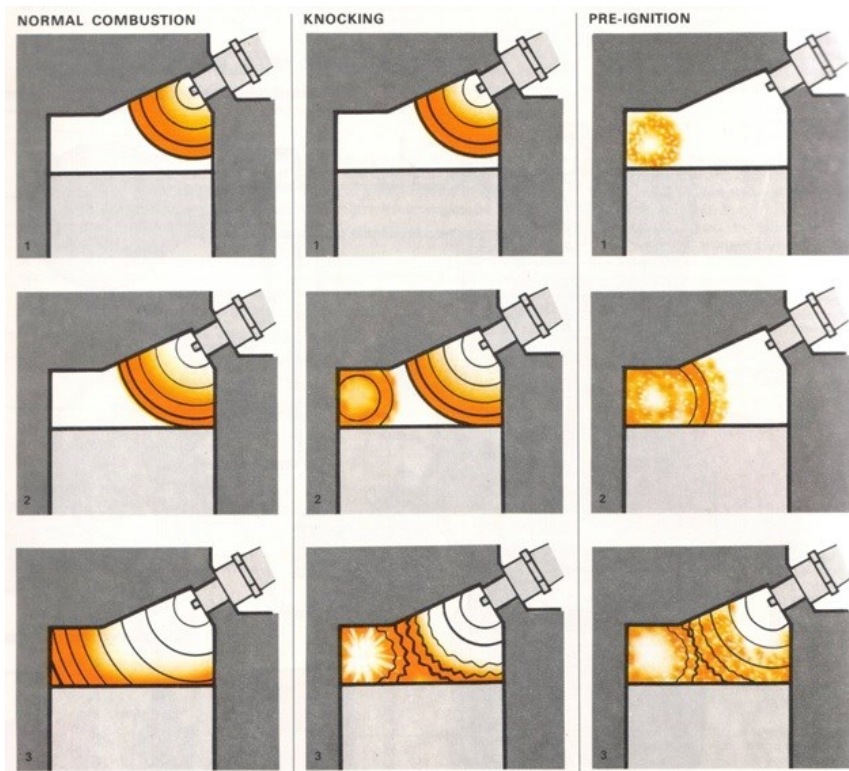
#### Kompetensi

Agar mahasiswa dapat melakukan perhitungan termodinamika pada reaksi kimia pembakaran.

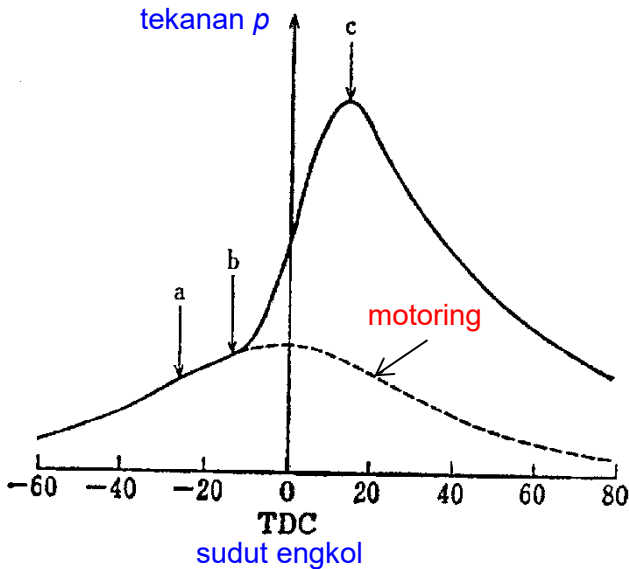
---

#### A. Definisi Motor Bensin

Proses pembakaran dimulai dari *spark plug* (busi) dimana energi yang dihasilkan dari pembakaran akibat *spark* (bunga api) lebih besar dari energi yang hilang ke dinding silinder. Apabila proses pembakaran bisa dimulai dengan baik maka akan terbentuk api berbentuk bola. Api mengalami propagasi (perambatan) ke arah *unburned gas* (gas belum terbakar) dengan kecepatan tertentu yang disebut *flame speed* (kecepatan api). Kecepatan ini akan meningkat dengan semakin tinggi *turbulent intensity* (tingkat turbulensi). *Unburned gas* mengalami kompresi, terbakar dan berubah menjadi *burned gas*. Api akan padam pada daerah di dekat dinding akibat adanya *heat loss* (rugi kalor) ke dinding silinder. Fenomena ini disebut *wall-quenching*.



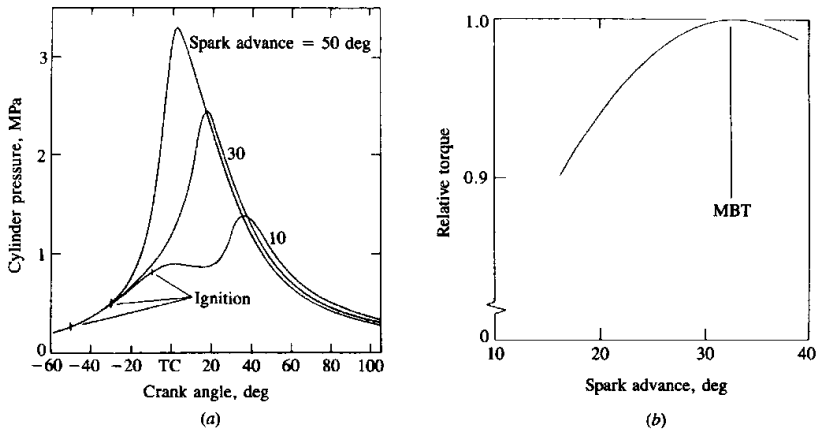
Gambar 27. Siklus Pembakaran Mesin Bensin



Gambar 28. Fenomena Pembakaran Terhadap Sudut Engkol

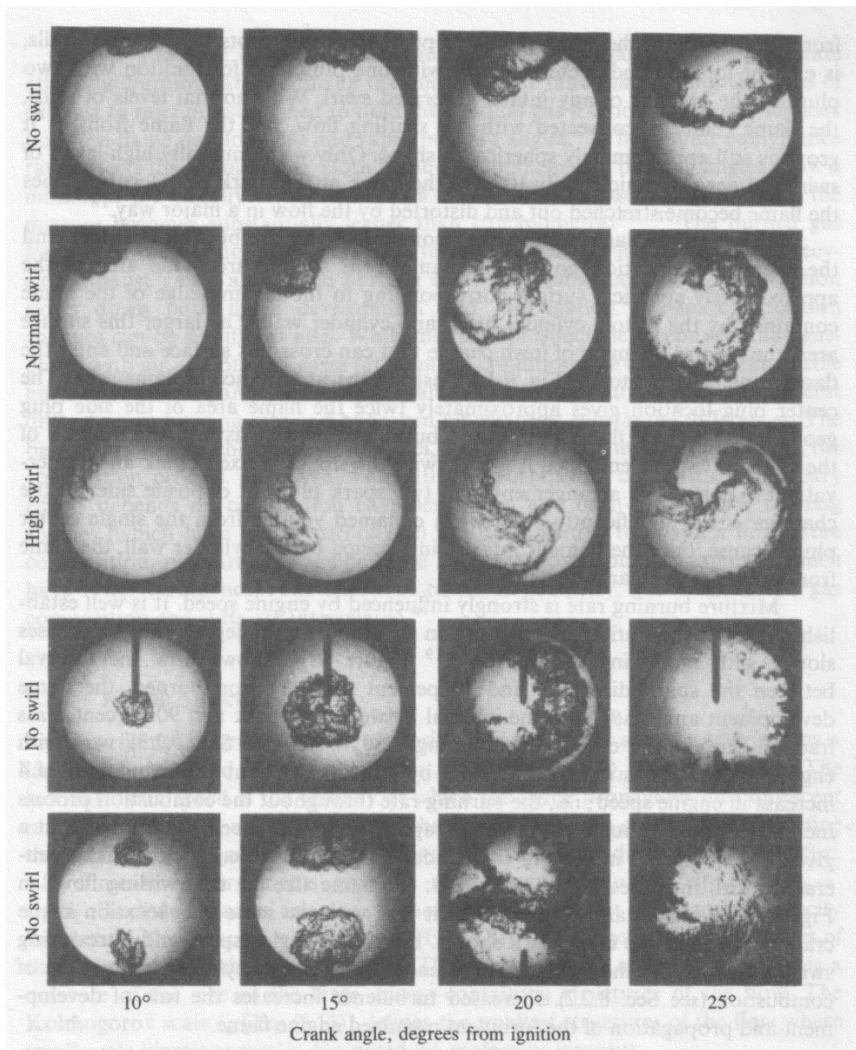
- a : penyalan busi dengan jangka waktu  $\pm 100 \mu\text{s}$  dengan energi penyalan 40~80 mJ
- b : terjadi kenaikan tekanan secara drastis  $\rightarrow$  menunjukkan mulai terjadi pembakaran.
- a-b : terjadi keterlambatan penyalan ( $\pm 1/600 \text{ sec}$ ) yang tergantung kepada rasio ekuivalen, kondisi aliran di sekitar busi, temperatur dan tekanan awal campuran.  
Apabila busi dinyalakan tapi tidak terjadi proses pembakaran terjadi *misfire* yang akan tergantung kepada kondisi campuran, kondisi aliran, kondisi bunga api, bentuk dan jarak elektroda (jarak terlalu sempit  $\rightarrow$  *quenching*, terlalu lebar  $\rightarrow$  pengaruh aliran sekitar busi sangat besar).
- b-c : waktu yang diperlukan api untuk propagasi ke seluruh bagian silinder yang tergantung kepada *flame speed* (maksimum pada daerah sedikit kaya) dan kondisi aliran. Pada prinsipnya semakin besar semakin baik.

Pada SIE, proses pembakaran sangat dipengaruhi oleh kapan busi menyala. Waktu penyalan busi menentukan kapan terjadi tekanan maksimum. Di sini yang perlu diperhatikan bahwa tekanan maksimum lebih baik terjadi terjadi sekitar  $10\sim 20^\circ$  derajat setelah TMA untuk mendapatkan torsi maksimum. Waktu penyalan busi dimana torsi maksimum didapatkan disebut sebagai *maximum brake torque timing* (MBT timing). Waktu MBT sendiri berubah sesuai dengan putaran mesin dimana dengan kenaikan rpm maka waktu penyalan harus lebih cepat.



Gambar 29. Grafik Crank Angle dan Spark Advance





Gambar 30. Pengaruh Dari Aliran Swirl dan Letak Busi

## **B. Pembakaran Abnormal Dalam Motor Bensin**

Pada kondisi-kondisi tertentu maka proses pembakaran akan berlangsung secara abnormal.

### **1. Knocking**

Di dalam silinder motor bakar dengan berlangsungnya proses pembakaran maka gas hasil pembakaran akan mengalami ekspansi yang akan mengakibatkan tekanan dalam silinder meningkat. Ini akan mengakibatkan campuran gas yang belum terbakar (*end-gas*) menjadi terkompresi dan karena adanya transfer kalor dari api yang merambat maka temperaturnyapun mengalami kenaikan. Apabila kenaikan temperatur *end-gas* melebihi *auto ignition temperaturnya* maka *end-gas* akan terbakar dengan sendirinya. Akibatnya terjadi gelombang tekanan dari pembakaran *end-gas* yang kemudian merambat menuju ke dinding silinder dan menembuknya sehingga akan menimbulkan apa yang disebut *knocking*.

Akibat dari knocking selain dari timbulnya suara adalah meningkatnya temperatur secara signifikan sehingga akan bisa menyebabkan kerusakan pada piston, kepala silinder, cincin torak dsb. Penanggulangan *knocking* pada dasarnya bisa dilakukan dengan

- meningkatkan kecepatan pembakaran dari suatu pembakaran normal
- memperpendek jarak yang dibutuhkan oleh api untuk sampai ke *end-gas*.

### **2. Penyalan Permukaan (*Surface Ignition*)**

Ini adalah fenomena dimana ada bagian dari dalam silinder yang mempunyai temperatur tinggi (*hot spot*) sehingga akan menyebabkan terjadinya penyalan. *Hot spot* ini biasanya terdapat pada elektroda busi, katup buang akibat adanya penumpukan karbon dari pembakaran.

*Surface ignition* bisa dibagi menjadi dua yaitu *pre-ignition* dan *post-ignition*. *Pre-ignition* mempunyai pengaruh yang fatal karena bisa mengakibatkan terjadinya proses pembakaran dalam langkah kompresi sehingga tenaga mesin menurun.

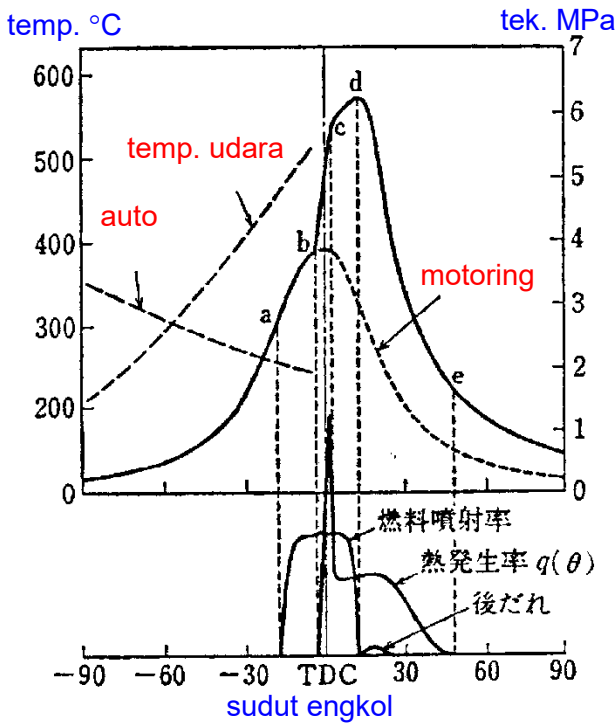
## **C. Motor Diesel**

Dalam CIE, bahan bakar diinjeksikan ke silinder yang berisi udara yang bertekanan sangat tinggi. Pada saat ini bahan bakar tidak dapat langsung terbakar, tetapi akan terjadi *Ignition Delay Period* (periode keterlambatan penyalan). Pada awalnya terjadi keterlambatan secara

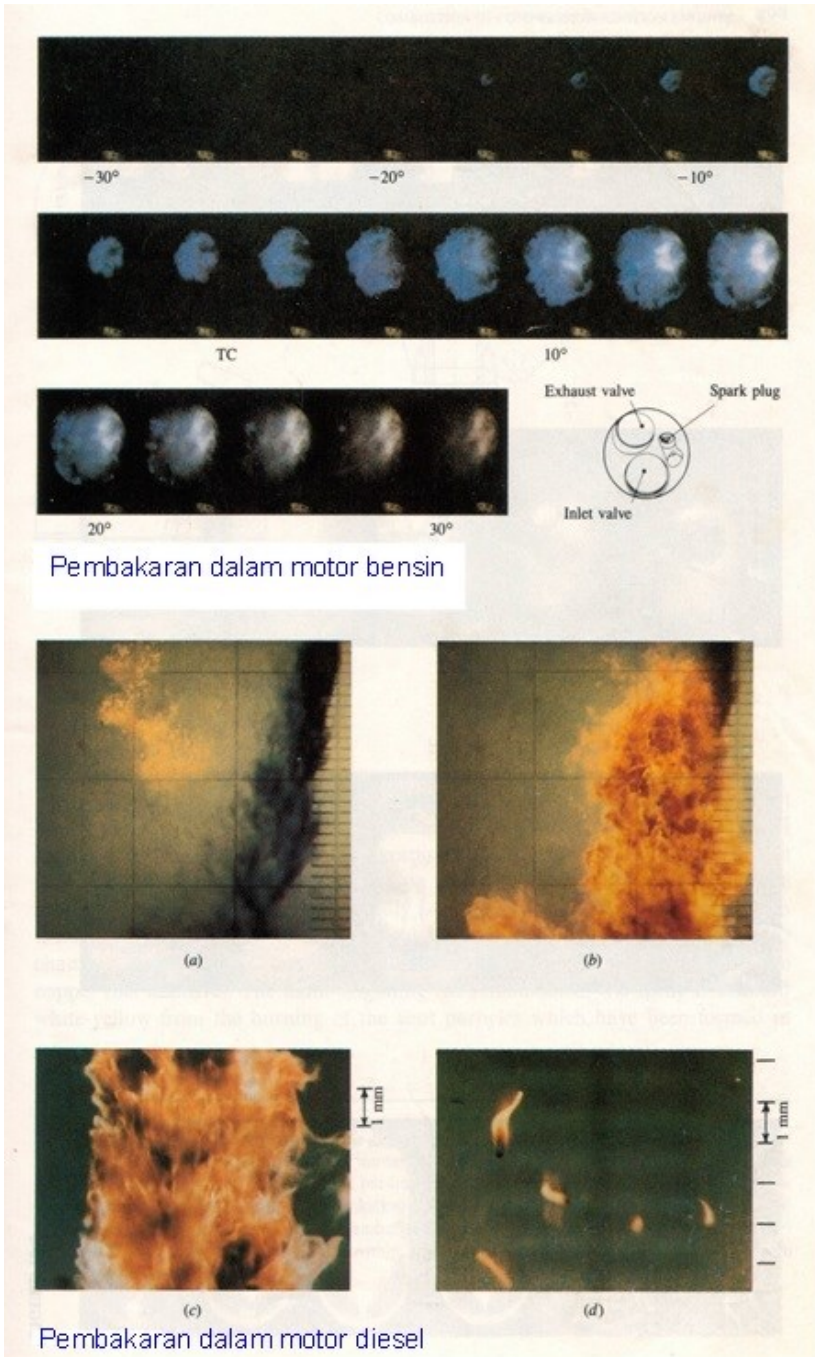
fisis karena pengkabutan bahan bakar, penguapan bahan bakar, dan pencampuran bahan bakar dan udara. Selanjutnya terjadi keterlambatan secara kimiawi yaitu reaksi kimia yang berlangsung sangat lambat sampai terjadinya penyalaan.

Pada beberapa bagian dari silinder terjadi api yang kemudian disusul dengan ledakan. Untuk bahan bakar fraksi ringan keterlambatan penyalaan secara kimiawi lebih dominan dibandingkan keterlambatan fisis, sedangkan untuk bahan bakar fraksi berat keterlambatan penyalaan secara fisis lebih dominan dibandingkan keterlambatan kimiawi.

Untuk mengurangi terjadinya keterlambatan secara fisis digunakan injektor tekanan tinggi dan intensitas turbulensi yang tinggi.

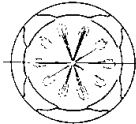
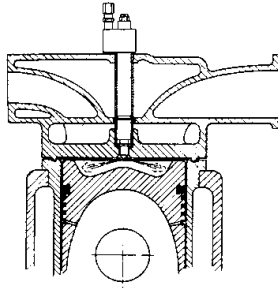


Gambar 31. Grafik Temperatur Udara Sudut Engkol

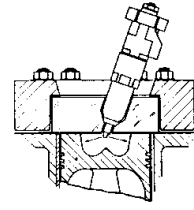
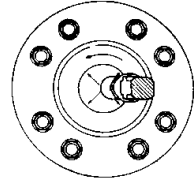


Gambar 32. Pembakaran Dalam Motor Diesel

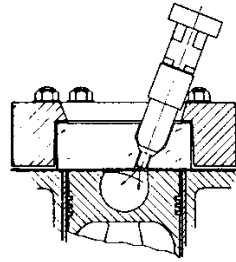
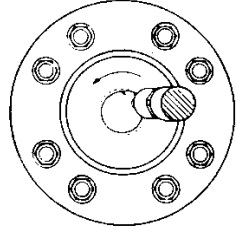
- c-d : periode pembakaran terkontrol (*controlled combustion period*). Pada periode ini bahan bakar yang diinjeksikan bisa langsung terbakar karena tingginya temperatur di dalam silinder. Pada tahap ini proses pembakaran bisa dikontrol dengan laju aliran injeksi bahan bakar.
- d-e : periode pembakaran lanjut (*after burning combustion*). Pada periode ini pembakaran terus berlanjut sedangkan injeksi bahan bakar sudah berhenti. Karena dalam silinder terdapat banyak sekali produk hasil pembakaran ( $O_2$  sedikit) maka mudah membentuk jelaga (*soot*). Periode ini diusahakan jangan terlalu panjang karena dapat menurunkan efisiensi, menaikkan temperatur gas buang dan menaikkan jumlah jelaga.



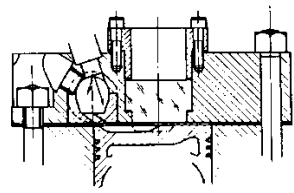
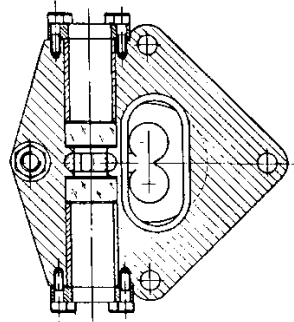
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 33. Combustion Chamber

## D. Ruang Bakar

Secara garis besar ruang bakar untuk motor diesel dapat dibagi menjadi:

- Tipe injeksi langsung (*direct injection*) yaitu apabila bahan bakar diinjeksikan langsung dalam ruang bakar. Rasio kompresi 12~18.
- Tipe injeksi tidak langsung (*indirect injection*) yaitu apabila bahan bakar diinjeksikan pada ruang bakar sekunder. Rasio kompresi berkisar 24~27. Pembakaran yang terjadi menekan bahan bakar dan udara yang belum terbakar masuk ke ruang bakar primer untuk menyempurnakan pembakaran.

Tipe ini terdiri dari 2 jenis ruang bakar sekunder:

- ✓ *pre-combustion chamber*, apabila volumenya sekitar 30% dari ruang bakar utama dan dihubungkan dengan saluran yang sempit. Bentuk sederhana dan biasanya terletak persis di atas ruang bakar utama.
- ✓ *turbulence chamber*, apabila bentuknya khusus untuk menghasilkan aliran turbulen dengan volume sekitar 80% dari ruang bakar utama. Dihubungkan dengan saluran yang relatif lebar dan ditempatkan menyamping dari ruang bakar utama.

Pada awalnya motor diesel kebanyakan bertipe injeksi langsung. Kemudian dalam perkembangannya berubah menjadi injeksi tak langsung. Dan akhir-akhir ini berubah lagi kembali ke injeksi langsung.

### Keuntungan injeksi langsung:

1. Efisiensi termal tinggi ↔ irit bahan bakar
2. Panas dari pembakaran bekerja langsung pada *piston head*.
3. Silinder dan piston tidak menerima beban yang berlebihan karena temperatur pembakaran tidak terlalu tinggi.
4. Emisi rendah

### Kerugian injeksi langsung:

- Mesin cenderung kasar karena periode keterlambatan penyalaan yang pendek sehingga kenaikan tekanan dan temperatur terjadi lebih cepat.
- Sensitif terhadap kondisi bahan bakar dan *injection timing*.
- Ada problem sistem injeksi bahan bakar karena butuh tekanan tinggi dan jenis nosel dengan banyak lubang.

### ***Diesel Knocking***

Apabila waktu keterlambatan penyalaan cukup besar maka bahan bakar terakumulasi dalam silinder sehingga apabila terjadi proses pembakaran maka tekanan dalam silinder akan meningkat dengan sangat cepat yang akan mengakibatkan terjadinya *diesel knocking*. Pada dasarnya fenomena *knocking* dalam mesin diesel bukan merupakan pembakaran abnormal tetapi karena akibatnya yang mirip dengan knocking dalam mesin bensin yaitu terjadinya getaran dan ketidak stabilan putaran mesin maka harus dihilangkan.



## DAFTAR PUSTAKA

- Application – Octane Number of Gasoline, Guided Wave Incorporated, Literature No. 3012-05-09 RevA1, 2005.
- Calculated Ignition Index, WIKIPEDIA PROJECT modified on 23 May 2009.
- Calculated Carbon Aromaticity Index, WIKIPEDIA PROJECT modified on 16 May 2009.
- Cetene Number, WIKIPEDIA PROJECT modified on 27 August 2009.
- Measuring Cetane Number, “Options for Diesel and Alternative Diesel Fuels”, Australian Government. Department of the Environment and Heritage April 2004.
- Octane Rating, WIKIPEDIA PROJECT modified on 14 September 2009.
- Oktan, WIKIPEDIA PROJECT modified on 23 August 2009
- Tri Agung Rahmat, 2010, Materi Kuliah Teori Pembakaran Pasca Sarjana Teknik Mesin UGM <https://id.wikipedia.org/wiki/Pembakaran>, 2018
- Cetene Number, WIKIPEDIA PROJECT modified on 27 August 2009.
- Calculated Ignition Index, WIKIPEDIA PROJECT modified on 23 May 2009.
- Calculated Carbon Aromaticity Index, WIKIPEDIA PROJECT modified on 16 May 2009.
- Measuring Cetane Number, “Options for Diesel and Alternative Diesel Fuels”, Australian Government. Department of the Environment and Heritage April 2004.
- Octane Rating, WIKIPEDIA PROJECT modified on 14 September 2009.
- Oktan, WIKIPEDIA PROJECT modified on 23 August 2009
- Application – Octane Number of Gasoline, Guided Wave Incorporated, Literature No. 3012-05-09 RevA1, 2005.



## BIOGRAFI PENULIS



Dr. Eng. Rizqi Fitri Naryanto, S.T., M.Eng saat ini adalah tenaga pengajar di Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang. Sarjana Teknik diselesaikan di tahun 1999-2004 di Institut Sains dan Teknologi AKPRIND Yogyakarta, Master of Engineering ditempuh pada tahun 2008-2011 di Universitas Gadjah Mada, dan Doctor of Philosophy in Engineering ditempuh di Kanazawa University Jepang di tahun 2016-2020 pada Applied Combustion Laboratory, Division of Mechanical Science and Engineering in the Graduate School of Natural Science and Technology dengan pembiayaan dari Beasiswa Unggulan Dosen Indonesia Luar Negeri (BUDI LN) LPDP tahun 2016, Kemenkeu-Republik Indonesia. Wakil Ketua Persatuan Pelajar Indonesia Jepang (PPIJ) Komsat Ishikawa 2017-2018 ini juga sangat aktif di beberapa organisasi profesi maupun organisasi kemahasiswaan.

Pria kelahiran Semarang ini tergabung dalam Society of Automotive Engineers of Japan (JSAE) dan Asosiasi Dosen dan Guru Vokasi Indonesia (ADGVI). Penulis memiliki ketertarikan di bidang Combustion (Teknik Pembakaran), Renewable Energy, Biomass, High Speed Combustion, Bahan Bakar dan Pelumas, Mekanika Fluida. Penulis juga aktif di beberapa publikasi ilmiah terindex Scopus maupun Web of Science (WoS) dengan Scopus ID: 57216648749, WoS Research ID: AAS-6062-2020, dan Sinta ID: 5976814. Sebagai penghobby barang antik dan penyuka jalan jalan, touring dengan motor antik adalah sesuatu yang menyenangkan sebagai pelepas kepenatan rutinitas kerja bagi penulis. Bagi pembaca yang ingin mengenal lebih dekat dapat berkunjung ke Research Gate di akun Rizqi Fitri Naryanto.

