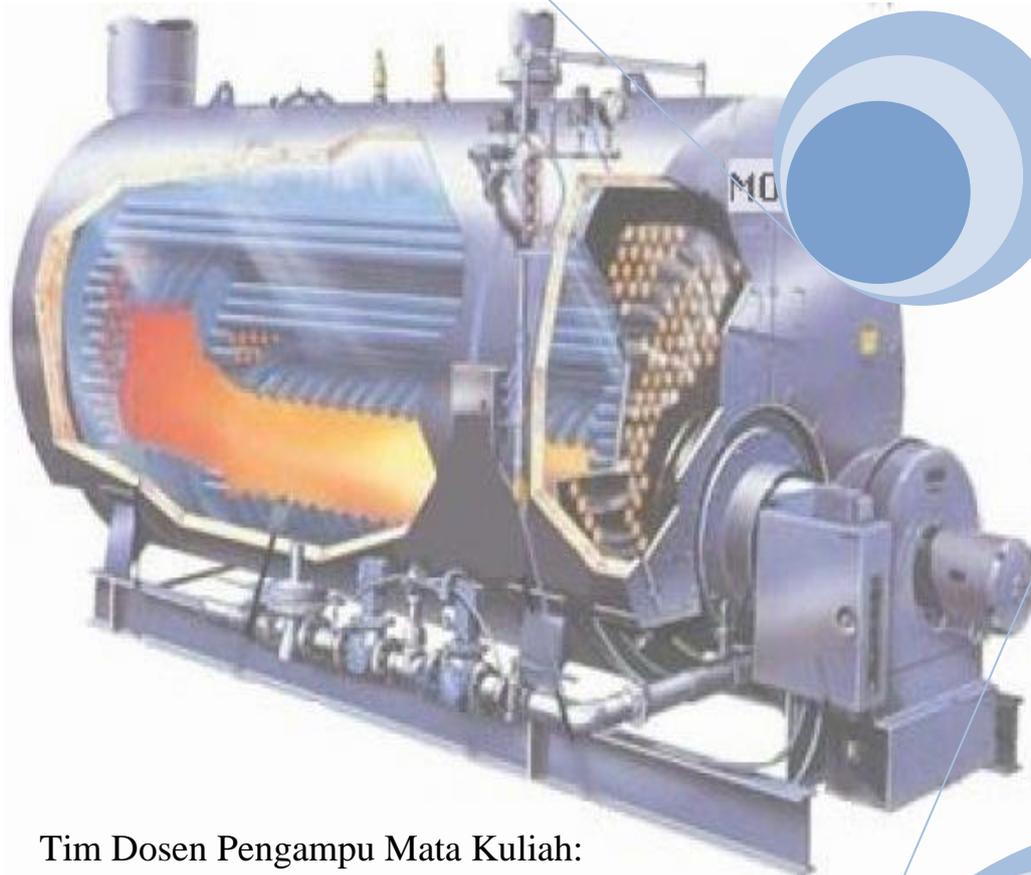


MODUL

TEKNIK PEMBAKARAN



Tim Dosen Pengampu Mata Kuliah:

Dr. Dori Yuvenda, S.Pd., M.T

Andre Kurniawan, S.T., M.T

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS NEGERI PADANG

2022

MODUL 1

TEKNIK PEMBAKARAN

Penyusun : Dr. Dori Yuvenda S.Pd.M.T.
Mata Perkuliahan : Teknik Pembakaran
Semester/SKS : 7/3
Topik : Pengenalan Teknik Pembakaran

1. Rambu-rambu Perkuliahan
 - a. Mahasiswa mengisi presensi kehadiran setiap perkuliahan.
 - b. Mahasiswa mempelajari modul setiap pertemuan sesuai dengan rencana pembelajaran semester (RPS).
 - c. Mahasiswa mengerjakan soal evaluasi setelah mempelajari modul pada setiap bab modul dalam rangka meningkatkan penguasaan pada materi.
2. Tujuan Perkuliahan
 - a. Dapat mengetahui pengantar tentang Teknik pembakaran.
 - b. Dapat mengetahui apa itu pembakaran.
 - c. Dapat mengetahui sejarah perkembangan terkait pembakaran.
3. Materi Perkuliahan
 - a. Pengantar tentang Pembakaran

Pembakaran adalah phenomena yang amat kompleks dan menjadi objek dari subjek penelitian yang intensif bertahun-tahun, namun sampai sekarangpun belum sepenuhnya dipahami secara mendalam dan detail. Pembakaran dapat diartikan sebagai kombinasi kimia relatif cepat dari hydrogen dan karbon di bahan bakar dengan oksigen di udara yang menghasilkan energi dalam bentuk panas.

Pembakaran mungkin merupakan fenomena klasik paling rumit yang baru sedikit dapat diungkapkan secara teoritis. Mekanisme reaksi yang banyak, yang berbeda untuk tiap jenis bahan bakar, perambatan

nyala, aliran multidimensi yang tunak atau transient, yang kompresibel dan inkompresibel, laminar atau turbulen, viskos atau non viskos, kerugian kalor, mempengaruhi struktur nyala sekaligus kajian teoritisnya. Analisis non-linier (*weakly non-linear theory*) melahirkan teori percabangan (*bifurcation theory*) yakni penggunaan persamaan eksplisit pada permukaan nyala seperti kelengkungan nyala (*curvature*), peregangan (*stretch*), vortisitas.

Kondisi yang harus ada untuk dapat terjadi pembakaran adalah sebagai berikut:

- 1) Campuran yang siap terbakar
- 2) Sesuatu yang menyulut pembakaran
- 3) Stabilisasi dan propagasi dari api dalam ruang bakar.

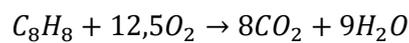
Pembakaran di dalam silinder dapat berlangsung apabila ketiga syarat pembakaran terpenuhi, dimana bahan bakar yang digunakan harus dalam bentuk gas, atau kabut gas melalui proses pengkabutan. Semakin banyak kabut gas yang digunakan dalam pembakaran maka proses pembakarannya akan berlangsung dengan semakin cepat sehingga akan semakin tinggi putaran poros engkol yang dihasilkan.

Sistem karburasi yaitu suatu sistem yang mengubah bahan bakar cair menjadi kabut gas dan mencampurnya dengan udara dengan perbandingan tertentu yang dibentuk oleh karburator dan merupakan campuran eksplosif yang akan menghasilkan pembakaran sempurna (normal), yaitu bahan bakar dan udara (1:14,7). Dalam proses pembakaran mesin *Spark Ignition*, campuran yang dapat terbakar diruang bakar memperoleh loncatan bunga api listrik yang ditimbulkan oleh spark plug (busi). Busi akan menyala saat campuran bahan bakar-udara mencapai rasio kompresi, temperatur, dan tekanan tertentu sehingga akan terjadi reaksi pembakaran yang menghasilkan tenaga untuk mendorong torak bergerak bolak-balik.

Terdapat 3 (tiga) teori mengenai pembakaran hidrogen tersebut yaitu:

- 1) Hidrokarbon terbakar bersama-sama dengan oksigen sebelum karbon bergabung dengan oksigen.
- 2) Karbon terbakar lebih dahulu daripada hidrogen.
- 3) Senyawa hidrokarbon terlebih dahulu bergabung dengan oksigen dan membentuk senyawa (hidrolisasi) yang kemudian dipecah secara terbakar.

Persamaan kimia untuk setiap hidrakerbon dapat dengan mudah untuk dituliskan. Misalnya untuk iso-oktana (C_8H_{18}) maka persamaannya adalah:

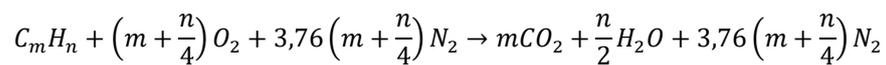


Adalah sudah diketahui bahwa proses pembakaran tidak sederhana dan kombinasi langsung dari atom-atom seperti yang ditunjukkan persamaan kimia. Sebagai aturan reaksi oksidasi mempunyai banyak tingkat alami dan reaksi berantai yang mana peranan penting dilakukan oleh produk antar aktif yang dibentuk selama reaksi.

b. Pengertian Pembakaran.

Pembakaran dapat didefinisikan sebagai proses/reaksi oksidasi yang sangat cepat antara bahan bakar (*fuel*) dan oksidator dengan menimbulkan nyala dan panas. Bahan bakar merupakan segala substansi yang melepaskan panas ketika dioksidasi dan secara umum mengandung unsur-unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S). Sementara oksidator adalah segala substansi yang mengandung oksigen (misalnya udara) yang akan bereaksi dengan bahan bakar. Fenomena-fenomena yang terjadi pada pembakaran antara lain interaksi proses-proses kimia dan fisika, pelepasan panas yang berasal dari energi ikatan-ikatan kimia, proses perpindahan panas, proses perpindahan massa, dan gerakan fluida. Sehingga kajian pembakaran membutuhkan saling keterkaitan antara ilmu dasar dan turunannya yakni Termodinamika, Mekanika Fluida, Perpindahan Kalor dan Massa, Material, Statistika dan Probabilitas .

Pembakaran menghasilkan panas sehingga disebut sebagai proses oksidasi eksotermis. Jika oksigen yang dibutuhkan untuk proses pembakaran diperoleh dari udara kering, di mana udara kering terdiri dari 21% oksigen dan 78% nitrogen, maka reaksi stoikiometrik pembakaran hidrokarbon murni $C_m H_n$ dapat ditulis dengan persamaan:



Persamaan ini telah disederhanakan karena cukup sulit untuk memastikan proses pembakaran yang sempurna dengan rasio ekivalen yang tepat dari udara. Jika terjadi pembakaran tidak sempurna, maka hasil persamaan di atas CO_2 dan H_2O tidak akan terjadi, akan tetapi terbentuk hasil oksidasi parsial berupa CO, CO_2 , dan H_2O . Juga sering terbentuk hidrokarbon tak jenuh, formaldehida dan kadang-kadang terdapat juga karbon.

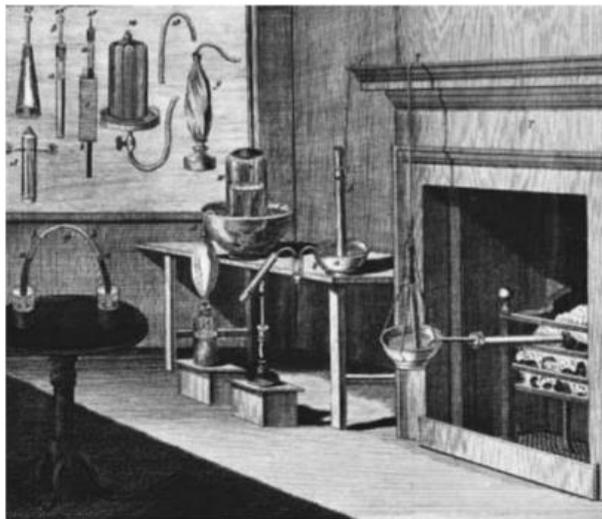
Pada temperatur yang sangat tinggi gas-gas pecah atau terdisosiasi menjadi gasgas yang tak sederhana, dan molekul-molekul dari gas dasar akan terpecah menjadi atom-atom yang membutuhkan panas dan menyebabkan kenaikan temperatur. Reaksi akan bersifat endotermik dan disosiasi tergantung pada temperatur dan waktu kontak.

c. Sejarah Perkembangan terkait Pembakaran

Api telah banyak digunakan oleh manusia sejak lama untuk berbagai keperluan seperti memasak, produksi logam, dan peperangan. Namun, karena fenomena pembakaran yang sangat kompleks, sehingga pemahaman tentang teori pembakaran oleh para ahli terus berkembang pesat dalam dalam dekade terakhir melalui kolaborasi penelitian eksperimen dan teori.

Penelitian awal dilakukan oleh Johann Baptista van Helmont (1580-1644) yang menyatakan bahwa bahan yang terbakar menghasilkan asap dan nyala api. Dari sini, dia menyimpulkan bahwa pembakaran melibatkan pelepasan “roh liar (wild spirit)” dari zat yang terbakar. Kemudian teori Van Helmont dikembangkan lebih lanjut oleh

Johann Becher (1635–1682) dan muridnya Georg Ernst Stahl (1660–1734) berkembangsaan Jerman menjadi teori *phlogiston theory* berpendapat bahwa semua bahan yang mudah terbakar mengandung zat khusus yang disebut dengan flogiston yang dilepaskan selama pembakaran. Teori ini bertahan selama dua abad dan kuat oleh Joseph Priestley (1733–1804) dengan Carl Wilhelm Scheele yang juga merupakan seorang sebagai penemu unsur oksigen. Gambar 1 menunjukkan laboratorium Priestley.



Gambar 1. Laboratorium Joseph Priestley sekitar tahun 1773 (Sumber: Museum Deutsches, Munich, Jerman dalam buku Lackner dkk, 2010)

Kemudian peneliti lain yang berkontribusi dalam perkembangan teknologi pembakaran adalah James Watt (1736–1819) yang merupakan seorang penemu mesin uap yang melakukan perbaikan pada mesin uap Newcomen, dan kemudian juga Rudolf Diesel (1858–1913) yang merupakan seorang penemu mesin diesel dan Nikolaus Otto (1832–1891) yang merupakan seorang penemu mesin bensin.

Selama Revolusi Industri (1750–1850), pembakaran bahan bakar fosil mulai digunakan secara besar-besaran untuk produksi energi, bahan baku, pembuatan berbagai barang, terutama dari baja, dan transportasi, misalnya, melalui mesin uap. Asap hitam yang keluar dari

cerobong asap pabrik selama Revolusi Industri dipandang sebagai tanda kemajuan dan kemakmuran.



Gambar 2. Revolusi Industri (Sumber: Lackner dkk, 2010)

Berikut sejarah perkembangan teknologi pembakaran dari masa ke masa dalam kehidupan manusia adalah sebagai berikut:

Tabel 1. sejarah perkembangan pembakaran dari waktu ke waktu.

Tahun	Penemuan dan perkembangan
Abad sebelum masehi (500.000 tahun pertama)	
7000 SM	Manusia menemukan batu-batu
3000 SM	Orang Mesir menemukan lilin, terbuat dari lilin lebah
1000 SM	Orang Cina menggunakan gas alam untuk lampu
500 SM	Orang Yunani menggambarkan pembakaran dengan 4 unsur: bumi, air, udara dan api,
450 SM	Herodotus menggambarkan lubang minyak di dekat Babel
Abad mendekati pertengahan	
100 M	Cina menciptakan bubuk mesiu dan kembang api
1242	Roger Bacon, seorang biarawan Inggris, menerbitkan formula bubuk mesiu
Abad ke 15 (500 tahun yang lalu)	
1556	Georgius Agricola menerbitkan "De re metallica", sebuah buku membuat katalog keadaan seni di pertambangan, pemurnian, dan peleburan logam
400 tahun yang lalu	

1627	Penggunaan bubuk hitam pertama yang tercatat untuk peledakan batu di Hongaria
1650	Otto von Guericke menunjukkan bahwa lilin tidak terbakar di ruang hampa.
1678	Abbè Hautefeuille menjelaskan mesin untuk menaikkan air yang ditenagai oleh bubuk mesiu yang terbakar
1698	Thomas Savery membangun pompa air bertenaga uap untuk mengeluarkan air dari tambang
1700	Christiaan Huygens muncul dengan ide internal combustion engine
300 tahun yang lalu	
1712	Thomas Newcomen membangun pompa air bertenaga uap menggunakan piston dan silinder untuk mengeluarkan air dari tambang.
1772	Carl Wilhelm Scheele melakukan eksperimen untuk membelah udara dan menemukan oksigen.
1778	Alessandro Volta menemukan analogi antara penyalan gas dan api fen di rawa-rawa.
1750–1850	Revolusi industri
1769	James Watt mematenkan mesin uap
1790-an	Perintis kapal uap Samuel Morey menciptakan roda dayung bertenaga uap
1791	John Barber memperoleh paten untuk turbin gas
1792	William Murdoch menemukan penyulingan gas dari batu bara dan penggunaannya untuk penerangan.
1974	Konsep untuk mesin pembakaran dalam pertama oleh Robert Street
1800	Phillippe Lebon mematenkan mesin yang menggunakan udara terkompresi dan listrik untuk pengapian
1801	Mesin uap bertenaga batubara pertama
1806	Francois Isaac de Rivaz menciptakan mesin pembakaran dalam bertenaga hidrogen
200 tahun yang lalu	
1814	George Stephenson membuat lokomotif uap
1815-1819	Sir Humphry Davy menemukan pembakaran katalitik

1816	Robert Stirling menciptakan mesin Stirling udara panasnya
1824	Nicolas Lèonard Sadi Carnot memperkenalkan bahwa efisiensi maksimum mesin kalor tergantung pada perbedaan suhu antara mesin dan lingkungan.
1834	Joseph Morgan mengembangkan mesin yang memproduksi lilin cetak yang berkelanjutan.
1837	Paten Amerika pertama untuk motor listrik
1850	Rudolf Clausius menjelaskan hukum pertama dan kedua dari termodinamika.
1855	Robert Bunsen membuat peralatan pembakar Bunsen
1855	Johan Edvard Lundstrom (Swedia) mematenkan peralatan keamanan pertandingan.
1857	Pengembangan lampu minyak tanah
1859	John Tyndall menemukan bahwa beberapa gas menghalangi radiasi inframerah. Dia menyarankan bahwa perubahan konsentrasi gas bisa membawa perubahan iklim.
1860	Ètienne Lenoir dan Nikolaus Otto membangun mesin pembakaran dalam
1860	Penemuan alat pemadam kebakaran
1863	J.D. Rockefeller membuka perusahaan penyulingan minyak di Cleveland
1863	Julius Bernhard Friedrich Adolph Wilbrand menciptakan trinitrotoluene (TNT)
1866	Kimiawan Swedia Alfred Nobel menciptakan dinamit dengan mencampurkan kieselguhr dengan nitroglycerine
1877	Nikolaus Otto mematenkan mesin pembakaran dalam empat langkah
1880	Thomas Alva Edison membuat pembangkit listrik
1882	James Atkinson menciptakan mesin siklus Atkinson, yaitu digunakan oleh kendaraan hybrid.
1884	Charles Parsons mengembangkan turbin uap
1885	Karl Benz membuat mobil bertenaga bensin
1885	Gottlieb Daimler mematenkan supercharger pertama

1892	Rudolf Diesel mematenkan mesin Diese
1896	Svante Arrhenius mengeluarkan perhitungan pertama pemanasan global dari emisi CO ₂
1899	Ferdinand Porsche menciptakan kendaraan hybrid pertama
1903	Penerbangan pertama oleh Wright Brothers, Orville dan Wilbur di Kitty Hawk
1906	Frederick Gardner Cottrell menciptakan pencetus asap elektrostatis
100 tahun yang lalu	
1913	Renè Lorin menciptakan mesin ramjet
1915	Leonard Dyer menciptakan mesin enam langkah, sekarang dikenal sebagai mesin Crower enam Langkah yang dinamai menurut penemunya Bruce Crower
1920	Robert H. Goddard mengembangkan prinsip bahan bakar cair pada roket luar angkasa
1923	Fritz Pregl menerima Hadiah Nobel untuk analisis pembakaran
1929	Felix Wankel mematenkan mesin putar Wankel
1930-an	Tren pemanasan global sejak akhir abad kesembilan belas yang dilaporkan.
1936	Penerbangan perdana dari pesawat "Hindenburg" LZ 129 berkapsitas 200.000 m ³ berisi hydrogen.
1954	Yayasan "Institut Pembakaran"
1957	Rusia meluncurkan satelit bumi "Sputnik I" buatan pertama
50 tahun yang lalu	
1969	Amerika Serikat mendaratkan manusia di bulan menggunakan Roket Saturnus V yang dikembangkan oleh Wernher von Braun menggunakan sistem pengapian yang dikontrol secara elektronik yang juga ditemukan pada mesin mobil
1973	Embargo minyak dan kenaikan harga minyak membawa "krisis energi" pertama
1975	Konverter katalitik diperkenalkan pada produksi mobil di Amerika Serikat yang diciptakan bersama oleh Carl Donald Keith.

1979-1981	Harga minyak naik dari \$13.00 ke \$34.00/barel
1981-2011	Space Shuttle, sistem peluncuran yang dapat digunakan kembali sebagian dan pesawat orbital ruang angkasa, dioperasikan oleh US National Administrasi Penerbangan dan Antariksa (NASA) untuk manusia misi luar angkasa
1980-an	Injeksi bahan bakar elektronik muncul di mobil mesin bensin
1986	Populasi mobil dunia melebihi 500 juta kendaraan
25 tahun yang lalu	
1990	IPCC Pertama (Intergovernmental Panel on Climate Change) melaporkan bahwa dunia telah memanas dan akan terjadi pemanasan di masa depan.
1990-an	Pengenalan pasar kendaraan hibrid yang mengkombinasikan mesin pembakaran dalam dan motor listrik dengan pengereman regeneratif
1990-an	CFD (computational fluid dynamics) banyak digunakan sebagai alat untuk simulasi pembakaran
1997	Toyota memperkenalkan mobil hibrid Prius di Jepang yang merupakan pasar massal pertama
1997	Konferensi Protokol Kyoto untuk Kerangka Perserikatan Bangsa-Bangsa Konvensi Perubahan Iklim (UNFCCC) mengikat kewajiban negara-negara industri untuk mengurangi emisi gas rumah kaca
1998	Moratorium 50 tahun pertambangan dan eksplorasi minyak di antartika disetujui
Abad saat ini	
2002	Gasifikasi biomassa Güssing (demonstration plant dengan 8 MWth gabungan panas dan daya).
2003	Pemerintah AS mengumumkan rencananya untuk membangun dekat pembangkit listrik tenaga batu bara tanpa emisi untuk hidrogen dan produksi listrik menggunakan penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS)
2007	Uni Eropa memperkenalkan peraturan lingkungan baru untuk mengurangi emisi gas rumah kaca
2008	Wärtsilä membangun mesin reciprocating terbesar

	di dunia, mesin diesel turbocharged dua langkah yang dirancang untuk kapal container besar dengan kekuatan 80.000 kW
2009	Tingkat CO2 di atmosfer mencapai 385 ppm
2010	1 milyar mobil sudah digunakan di jalan raya.
2013	Boiler dengan model pembakaran fluidized bed terbesar di dunia (600 MW) beroperasi di Cina

Sumber: Lackner dkk, 2010

4. Soal Evaluasi

Kerjakan soal latihan yang diberikan dan jawablah pertanyaan dengan benar dan tepat agar dapat meningkatkan pemahaman pada materi ini.

1. Jelaskan pengertian pembakaran secara ringkas dan tepat?
2. Jelaskan kondisi yang harus dipenuhi agar terjadi proses pembakaran?
3. Jelaskan secara ringkas sejarah perkembangan pembakaran dari zaman ditemukan api sampai saat ini?

5. Referensi

Ganesan, V. (2003). *Internal combustion engine* (second edi). Tata McGraw-Hill Pub.

Ganesan, V. (2007). *IC engines* (Third edit). Tata McGraw-Hill Pub.

Ganesan, V. (2017). *IC Engines Fourth Edition*. Tata McGraw Hill Education Private Limited.

Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. In *McGrawHill series in mechanical engineering* (Vol. 21). <https://doi.org/10987654>

Lackner, M., Palotás, Á. B., & Winter, F. (2010). *Handbook of Combustion*. Markono Print Media Pte Ltd.

Naryanto, R. F. (2021). Teknik Pembakaran. In M. K. Delimayanti (Ed.), *News.Ge. Literasi Nusantara*.

Turns, S. R. (2000). An introduction to combustion: concepts and applications. In *System* (Vol. 499, p. 411). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.121>

MODUL 2

TEKNIK PEMBAKARAN

Penyusun : Dr. Dori Yuvenda S.Pd.M.T.

Mata Perkuliahan : Teknik Pembakaran

Semester/SKS : 7/3

Topik : Termodinamika Pembakaran

1. Rambu-rambu Perkuliahan

- a. Mahasiswa mengisi presensi kehadiran setiap perkuliahan.
- b. Mahasiswa mempelajari modul setiap pertemuan sesuai dengan rencana pembelajaran semester (RPS).
- c. Mahasiswa mengerjakan soal evaluasi setelah mempelajari modul pada setiap bab modul dalam rangka meningkatkan penguasaan pada materi.

2. Tujuan Perkuliahan

- a. Dapat mengetahui konsep termodinamika pembakaran

3. Materi Perkuliahan

- a. Neraca energi untuk mendapatkan panas pembakaran.

Hukum 1 termodinamika (keseimbangan energi) yang diterapkan pada sistem tertutup (tidak ada perpindahan massa):

$$dE = \delta Q + \delta W$$

dimana perpindahan panas yang terjadi ke sistem bernilai positif, dan kerja yang dilakukan oleh sistem bernilai negatif. Jika ΔKE dan $\Delta PE = 0$ maka,

$$dU = \delta Q + \delta W$$

atau

$$U_2 - U_1 = {}_1Q_2 + {}_1W_2$$

Jika usaha yang dilakukan adalah kompresi atau ekspansi, energi yang dibutuhkan untuk mengubah volume sebesar dV pada tekanan p adalah $-pdV$ maka,

$$dU = \delta Q - pdV$$

Perhatikan bahwa perubahan energi dalam adalah perubahan perpindahan panas untuk sistem volume konstan. Untuk memudahkan, entalpi fungsi keadaan didefinisikan sebagai berikut:

$$H = U + pV$$

atau

$$dH = dU + pdV + VdP$$

Substitusi dalam hukum ke-1, maka untuk entalpi dapat disederhanakan lagi

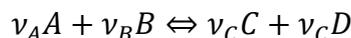
$$dH = \delta Q + VdP$$

Perhatikan bahwa perubahan entalpi adalah perubahan perpindahan panas untuk sistem tekanan konstan.

Untuk sistem terbuka (flow-through),

$$\frac{du}{dt} = \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_e \dot{m}_e h_e + (\pm \dot{Q}) + (\pm \dot{W})$$

Untuk reaksi kimia:



dimana ν 's adalah koefisien stoikiometrik senyawa kimia. LHS adalah reaktan; RHS adalah produk.

Konservasi massa:

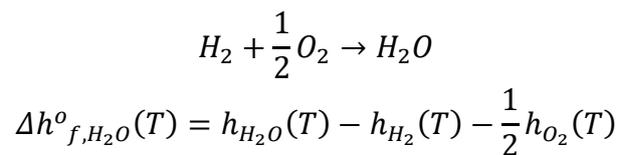
$$\sum_i \dot{m}_i = \sum_e \dot{m}_e = \dot{m}$$

Konservasi energi:

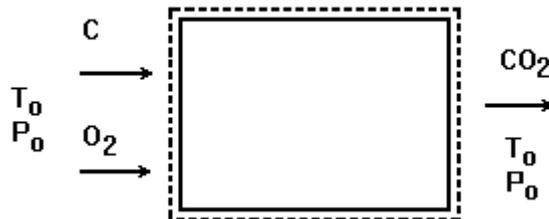
$$\nu_C h_C(T) + \nu_D h_D(T) - \nu_A h_A(T) - \nu_B h_B(T) = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} = \Delta h_r(T)$$

dimana $h_i(T)$ adalah entalpi atau panas pembentukan spesies i . Perpindahan panas per mol yang diperlukan untuk mempertahankan proses pada suhu konstan (T) disebut entalpi reaksi.

Entalpi spesies i didefinisikan relatif terhadap kondisi referensi dimana entalpi dianggap nol. Kondisi referensi ini adalah $T_o = 298$ K dan $P_o = 1$ atm = 101 kPa, atau suhu dan tekanan referensi, dan didasarkan pada unsur murni dalam keadaan stabil secara kimia pada T_o dan P_o , C adalah grafit padat, H ada sebagai gas H_2 , N sebagai gas N_2 , O sebagai gas O_2 , S sebagai belerang padat, dan seterusnya. Oleh karena itu, entalpi senyawa seperti air pada keadaan standar adalah entalpi pembentukannya:

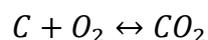


Pembentukan Entalpi adalah energi yang dilepaskan atau diserap ketika senyawa terbentuk dari unsur-unsurnya (dengan reaktan dan produk semuanya pada kondisi standar. Tanda (o) menunjukkan referensi untuk keadaan referensi kimia. Entalpi pembentukan unsur murni pada keadaan referensi adalah nol (lihat tabel pada lampiran terlampir).



Gambar 1. Entalpi pembentukan.

Pada Gambar 1, C dan oksigen memasuki reaktor dan bereaksi sempurna pada keadaan tunak membentuk karbon dioksida pada T dan P yang sama. Karbon dioksida terbentuk menurut



Reaksi ini merupakan eksotermis sehingga panas harus dipindahkan dari reaktor ke lingkungan agar produk keluar pada suhu dan tekanan yang sama. Keseimbangan energi menghasilkan:

$$0 = \dot{Q}_{CV} + \dot{n}_C \bar{h}_C + \dot{n}_{O_2} \bar{h}_{O_2} - \dot{n}_{CO_2} \bar{h}_{CO_2}$$

Di sini, \dot{n} adalah laju aliran molar dan \bar{h} merupakan entalpi permol. Penyelesaian entalpi karbon dioksida dari persamaan reaksi dimana semua laju aliran molar adalah sama.

$$\bar{h}_{CO_2} = \frac{\dot{Q}_{CV}}{\dot{n}_{CO_2}} + \bar{h}_C + \bar{h}_{O_2}$$

Karena C dan O_2 adalah unsur yang stabil pada keadaan standar, $\bar{h}_C = 0$ dan $\bar{h}_{O_2} = 0$. Oleh karena itu, entalpi spesifik karbon dioksida pada keadaan standar adalah perpindahan panas per mol dari gas CO_2 , antara reaktor dan lingkungan. Dimana nilainya adalah -394.088 kJ per kmol dari CO_2 yang terbentuk. Tandanya adalah $-ve$ karena panas ditransfer dari reaktor pada reaksi eksotermik, jika panas harus ditransfer ke reaktor, reaksinya endotermik. Energi ini adalah pembentukan entalpi.

Entalpi dari senyawa pada suhu berapa pun merupakan jumlah entalpi pembentukan pada T_o dan entalpi sensibel yang terkait dengan ΔT dari T_o ke T :

$$h^o(T) = h(T) - h(T_o) + \Delta h^o_f(T_o)$$

Entalpi sensibel adalah integral atas suhu panas spesifik pada tekanan konstan:

$$C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

$$h(T) - h(T_o) = \int_{T_o}^T C_p(T') dT'$$

Dalam sistem pembakaran, variasi C_p tidak dapat diabaikan karena rentang suhu yang besar. Sebuah pendekatan linier untuk C_p adalah:

$$C_p \approx a + bT$$

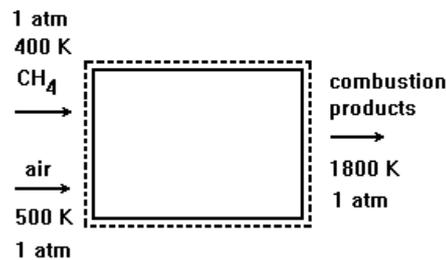
$$h(T) - h(T_o) = \int_{T_o}^T (a + bT') dT' = \left(aT + b \frac{T^2}{2} \right) \Big|_{T_o}^T$$

$$= a(T - T_o) + \frac{b}{2} (T^2 - T_o^2)$$

Nilai a dan b untuk spesies yang penting dalam pembakaran HC tercantum dalam tabel 1.

Contoh soal 1.

Gas metana pada 400 K memasuki ruang bakar, dimana ia bercampur dengan udara yang masuk pada temperatur sebesar 500 K dan tekanan sebesar 1 atm. Produk pembakaran yang keluar pada temperatur 1800 K dan tekanan 1 atm. Untuk operasi keadaan tunak, tentukan laju perpindahan panas dari ruang bakar dalam kJ per kmol bahan bakar. Abaikan pengaruh energi kinetik dan energi potensial.

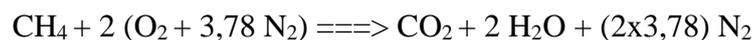


Asumsikan:

- 1) tidak ada pekerjaan yang dilakukan oleh/pada SSCV;
- 2) mengabaikan efek KE & PE;
- 3) reaktan dan produk dapat dimodelkan sebagai gas ideal;
- 4) nitrogen atmosfer bersifat inert.

Penyelesaian:

Pertama, menyetarakan reaksi pembakaran (kekekalan mol).



Kekekalan energi direduksi menjadi:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Q}_{CV}}{\dot{n}_{\text{CH}_4}} &= \bar{h}_p - \bar{h}_R \\ &= \left[(\bar{h}^o_f + \Delta\bar{h})_{\text{CO}_2} + 2(\bar{h}^o_f + \Delta\bar{h})_{\text{H}_2\text{O}(g)} + 7.52(\bar{h}^o_f + \Delta\bar{h})_{\text{N}_2} \right] \\ &\quad - \left[(\bar{h}^o_f + \Delta\bar{h})_{\text{CH}_4} + 2(\bar{h}^o_f + \Delta\bar{h})_{\text{O}_2} + 7.52(\bar{h}^o_f + \Delta\bar{h})_{\text{N}_2} \right] \end{aligned}$$

Perhatikan bahwa \bar{h}_f^o untuk O₂ dan N₂ (pada kedua sisi reaksi) adalah 0.

Kemudian masukkan nilai pada tabel 1 sesuai dengan persamaan reaksinya:

$$\frac{\dot{Q}_{CV}}{\dot{n}_{CH_4}} = \left[\begin{aligned} & \left(-394,088 + \int_{298}^{1800} (44.3191 + 0.0073T') dT' \right)_{CO_2} \\ & + 2 \left(-242,174 + \int_{298}^{1800} (32.4766 + 0.00862T') dT' \right)_{H_2O(g)} \\ & + 7.52 \left(\int_{298}^{1800} (29.2313 + 0.00307T') dT' \right)_{N_2} \end{aligned} \right] \\ - \left[\begin{aligned} & \left(-74,980 + \int_{298}^{400} (44.2539 + 0.02273T') dT' \right)_{CH_4} \\ & + 2 \left(\int_{298}^{500} (30.5041 + 0.00349T') dT' \right)_{O_2} \\ & + 7.52 \left(\int_{298}^{500} (29.2313 + 0.00307T') dT' \right)_{N_2} \end{aligned} \right]$$

Selanjutnya lakukan integrasi:

$$\frac{\dot{Q}_{CV}}{\dot{n}_{CH_4}} = \left[\begin{aligned} & \left(-394,088 + 44.3191(1800 - 298) + \frac{0.0073(1800^2 - 298^2)}{2} \right) \\ & + 2 \left(-242,174 + 32.4766(1800 - 298) + \frac{0.00862(1800^2 - 298^2)}{2} \right) \\ & + 7.52 \left(29.2313(1800 - 298) + \frac{0.00307(1800^2 - 298^2)}{2} \right) \end{aligned} \right] \\ - \left[\begin{aligned} & \left(-74,980 + 44.2539(400 - 298) + \frac{0.02273(400^2 - 298^2)}{2} \right) \\ & + 2 \left(30.5041(400 - 298) + \frac{0.00349(500^2 - 298^2)}{2} \right) \\ & + 7.52 \left(29.2313(400 - 298) + \frac{0.00307(500^2 - 298^2)}{2} \right) \end{aligned} \right]$$

Kemudian kombinasikan kedalam persamaan:

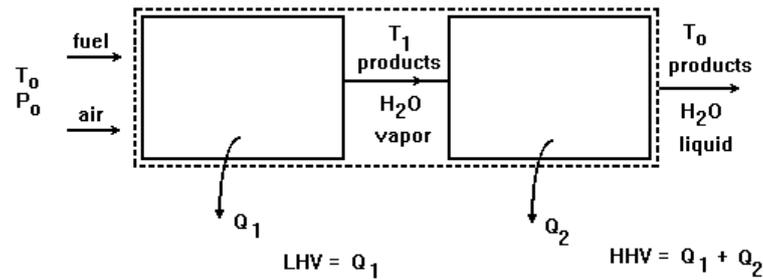
$$\frac{\dot{Q}_{CV}}{\dot{n}_{CH_4}} = \left[\begin{aligned} & \left(-394,088 + 44.3191(1502) + \frac{0.0073(3.15E6)}{2} \right) \\ & + 2 \left(-242,174 + 32.4766(1502) + \frac{0.00862(3.15E6)}{2} \right) \\ & + 7.52 \left(29.2313(1502) + \frac{0.00307(3.15E6)}{2} \right) \end{aligned} \right]$$

$$\begin{aligned}
& - \left[\begin{aligned} & \left(-74,980 + 44.2539(102) + \frac{0.02273(7.12E4)}{2} \right) \\ & + 2 \left(30.5041(202) + \frac{0.00349(1.61E5)}{2} \right) \\ & + 7.52 \left(29.2313(202) + \frac{0.00307(1.61E5)}{2} \right) \end{aligned} \right] \\
\frac{\dot{Q}_{CV}}{\dot{n}_{CH_4}} &= \left[\begin{aligned} & (-394,088 + 66,567 + 11,501) + 2(-242,174 + 48,780 + 13,582) \\ & + 7.52(43,905 + 4,837) \end{aligned} \right] \\
& - [(-74,980 + 4,514 + 809) + 2(6,162 + 281) + 7.52(5,905 + 247)] \\
\frac{\dot{Q}_{CV}}{\dot{n}_{CH_4}} &= [-316,020 - 359,624 + 366,540] - [-69,657 + 12,886 + 46,260] \\
\frac{\dot{Q}_{CV}}{\dot{n}_{CH_4}} &= [-309,104] - [-10,511] = -298.6 \frac{kJ}{mol}
\end{aligned}$$

b. Nilai kalor tinggi (HHV) dan nilai kalor rendah (LHV)

Komposisi kimia dari banyak bahan bakar praktis tidak diketahui. Juga, data entalpi harus diketahui untuk semua reaktan dan produk untuk menghitung entalpi pembakaran. Jika tidak, entalpi reaksi pembakaran harus diperoleh secara eksperimental dalam kalorimeter. Kalorimeter aliran dan kalorimeter volume konstan biasanya mengukur nilai kalor yang lebih tinggi (HHV) dari suatu bahan bakar. Maka perlu membedakan antara nilai kalor yang tinggi (HHV) dan nilai kalor yang lebih rendah (LHV) dari bahan bakar.

HHV mencakup panas penguapan uap air yang terbentuk selama pembakaran karena diasumsikan bahwa semua air dalam produk pembakaran telah mengembun menjadi cair. LHV mengasumsikan bahwa semua produk pembakaran tetap gas. Ketika percobaan dilakukan pada suhu kamar dalam kalorimeter (yaitu, reaktan mulai pada 298 K dan reaktan didinginkan hingga 298 K), uap air yang terbentuk selama pembakaran akan mengembun. Hal ini meningkatkan pelepasan panas nyata karena panas laten penguapan.



Karena suhu gas buang biasanya cukup tinggi untuk mencegah kondensasi, LHV lebih relevan. Oleh karena itu, ketika HHV diberikan, seringkali perlu diubah menjadi LHV.

$$\text{LHV} = \text{HHV} - n_{\text{fg,H}_2\text{O}}$$

Contoh soal 2.

Sebuah bahan bakar minyak dengan rumus molekul $\text{CH}_{2,186}$ dengan nilai HHV sebesar -44.135 J/g . Hitung nilai LHV bahan bakar tersebut dalam kJ/mol ?

Penyelesaian:

Panas laten penguapan pada tekanan 298 K untuk air adalah $-43,961 \text{ J/mol}$.

maka,

$$\text{LHV} = -44,135 \text{ J/g} \times (12 + 2,186) \text{ g/mol} - 2,186/2 \text{ g/mol} \times (-43,961) \text{ J/mol}$$

$$\text{LHV} = -626,099 \text{ J/mol} + 48,049 \text{ J/mol} = -578 \text{ kJ/mol}$$

c. Temperatur Api Adiabatik

Suhu pembuangan maksimum dari ruang bakar dapat dicapai jika tidak ada panas yang dilepaskan ke dinding pembakar, dan jika pembakaran stoikiometrik, lengkap, dan tidak ada disosiasi dari produk. Suhu yang dicapai oleh pembakaran ideal adiabatik ini disebut nyala api adiabatik atau suhu pembakaran adiabatik. Suhu nyala adiabatik dapat dihitung dengan menggunakan hukum kekekalan massa dan kekekalan energi. Asumsikan bahwa udara pembakaran dan produk pembakaran membentuk campuran gas ideal. Karena semua

perpindahan panas adalah internal, keseimbangan energi berkurang menjadi:

$$\bar{h}_p = \bar{h}_R$$

$$\sum_P n_e (\bar{h}^o_f + \Delta\bar{h})_e = \sum_R n_i (\bar{h}^o_f + \Delta\bar{h})_i$$

atau

$$\sum_P n_e \Delta\bar{h}_e = \sum_R n_i \Delta\bar{h}_i + \sum_R n_i \bar{h}^o_{f_i} - \sum_P n_e \bar{h}^o_{f_e}$$

Jumlah mol (n) diperoleh dari reaksi kimia yang seimbang. Entalpi pembentukan produk ditabulasi. Data entalpi pembakaran mungkin harus digunakan ketika entalpi pembentukan bahan bakar tidak diketahui. Istilah $\Delta\bar{h}$ untuk reaktan dapat dievaluasi dari data C_p . Suhu nyala adiabatik yang tidak diketahui muncul secara implisit dan karenanya harus diselesaikan secara iteratif.

Tabel 1. Appendix A. Approximate Thermodynamic Data for Species of Combustion Interest (Flagan and Seinfeld, 1988)

Species	Name	Δh_f° (298 K) (J / mol)	s° (298 K) (J / mol K)	$C_p = a + bT$ (J / mol K)	
				a	b
C	Carbon, monatomic	716,033	158.215	20.5994	0.00026
C (s)	Graphite (ref.)	0	5.694	14.926	0.00437
CH	Methylidene	594,983	183.187	27.6451	0.00521
CH ₂	Methylene	385,775	181.302	35.5238	0.01000
CH ₃	Methyl	145,896	194.337	42.8955	0.01388
CH ₄	Methane	-74,980	183.413	44.2539	0.02273
CN	Cyano	435,762	202.838	28.2979	0.00469
CO	Carbon monoxide	-110,700	197.810	29.6127	0.00301
COS	Carbonyl sulfide	-138,605	231.804	47.6042	0.00659
CO ₂	Carbon dioxide	-394,088	213.984	44.3191	0.00730
C ₂ H	CCH radical	447,662	207.615	40.4732	0.00880
C ₂ H ₂	Acetylene	227,057	201.137	51.7853	0.01383
C ₂ H ₄	Ethylene	52,543	219.540	60.2440	0.02637
C ₂ H ₄ O	Ethylene oxide	-52,710	243.272	70.1093	0.03319
C ₂ N ₂	Cyanogen	309,517	241.810	63.7996	0.00913
H	Hydrogen, monatomic	218,300	114.773	20.7859	0
HCHO	Formaldehyde	-116,063	218.970	43.3037	0.01465
HCN	Hydrogen cyanide	135,338	202.000	38.9985	0.00885
HCO	Formyl	-12,151	245.882	37.3667	0.00766
HNO	Nitroxyl hydride	99,722	220.935	38.2143	0.00750

HNO ₂	Nitrous acid, <i>cis</i> -	-76,845	249.666	54.0762	0.01100
HNO ₂	Nitrous acid, <i>trans</i> -	-78,940	249.498	54.5058	0.1075
HNO ₃	Nitric acid vapor	-134,499	266.749	68.1195	0.01549
HO ₂	Hyperoxyl	20,950	227.865	38.3843	0.00719
H ₂	Hydrogen (ref.)	0	130.770	27.3198	0.00335
H ₂ O	Water vapor	-242,174	188.995	32.4766	0.00862
H ₂ O ₂	Hydrogen peroxide	-136,301	232.965	41.6720	0.01952
H ₂ S	Hydrogen sulfide	-20,447	205.939	35.5142	0.00883
H ₂ SO ₄	Sulfuric acid vapor	-741,633	289.530	101.7400	0.02143
H ₂ SO ₄	Sulfuric acid liquid	-815,160	157.129	144.0230	0.02749
N	Nitrogen, monatomic	476,326	153.413	20.7440	0.00004
NH	Imidogen	339,392	181.427	28.0171	0.00349
NH ₂	Amidogen	167,894	194.785	33.5349	0.00837
NH ₃	Ammonia	-45,965	192.866	38.0331	0.01593
NO	Nitric oxide	90,421	210.954	30.5843	0.00278
NO ₂	Nitrogen dioxide	33,143	240.255	43.7014	0.00575
NO ₃	Nitrogen trioxide	71,230	253.077	61.1847	0.00932
N ₂	Nitrogen (ref.)	0	191.777	29.2313	0.00307
N ₂ H	Diimide	213,272	218.719	43.2755	0.01466
N ₂ O	Nitrous oxide	82,166	220.185	44.9249	0.00693
N ₂ O ₅	Dinitrogen pentoxide	11,313	346.933	122.4940	0.01018
O	Oxygen, monatomic	249,553	161.181	21.2424	-0.0002
OH	Hydroxyl	39,520	183.858	28.0743	0.00309
O ₂	Oxygen (ref.)	0	205.310	30.5041	0.00349
O ₃	Ozone	142,880	239.166	43.3802	0.00553
S (g)	Sulfur, gas	279,391	168.019	22.4619	-0.0004
S (l)	Sulfur, liquid	1,425	35.364	28.5005	0.00976
S (s)	Sulfur, solid (ref.)	0	31.970	13.9890	0.02191
SO ₂	Sulfur dioxide	-297,269	248.468	45.8869	0.00574
SO ₃	Sulfur trioxide	-396,333	256.990	62.1135	0.00877

4. Soal Evaluasi

Kerjakan soal latihan yang diberikan dan jawablah pertanyaan dengan benar dan tepat agar dapat meningkatkan pemahaman pada materi ini.

1. Gas metana pada 550 K memasuki ruang bakar, dimana ia bercampur dengan udara yang masuk pada temperatur sebesar 650 K dan tekanan sebesar 1 atm. Produk pembakaran yang keluar pada temperatur 2000 K dan tekanan 1 atm. Untuk operasi keadaan tunak, tentukan laju perpindahan panas dari ruang bakar dalam kJ per kmol bahan bakar. Abaikan pengaruh energi kinetik dan energi potensial.

2. Sebuah bahan bakar minyak diesel dengan rumus molekul C_8H_{18} memiliki nilai HHV nilai sebesar $-46,455 \text{ J/g}$. Hitung LHV bahan bakar tersebut dalam kJ/mol ?

5. Daftar Pustaka

Flagan, R. C., and Seinfeld, J.H., Fundamentals of Air Pollution Engineering, Prentice Hall, 1988.

Skull, D. R., and Prophet, H., "JANAF Thermochemical Tables," 2nd Edition, National Bureau of Standards NSRDS-NBS 37, 1971.

MODUL 3

TEKNIK PEMBAKARAN

Penyusun : Dr. Dori Yuvenda S.Pd.M.T.

Mata Perkuliahan : Teknik Pembakaran

Semester/SKS : 7/3

Topik : Rekasi Kimia pada Proses Pembakaran

1. Rambu-rambu Perkuliahan

- a. Mahasiswa mengisi presensi kehadiran setiap perkuliahan.
- b. Mahasiswa mempelajari modul setiap pertemuan sesuai dengan rencana pembelajaran semester (RPS).
- c. Mahasiswa mengerjakan soal evaluasi setelah mempelajari modul pada setiap bab modul dalam rangka meningkatkan penguasaan pada materi.

2. Tujuan Perkuliahan

- a. Dapat mengetahui apa itu reaksi pembakaran.
- b. Dapat mengetahui reaksi stoikiometri dari pembakaran.
- c. Dapat mengetahui apa itu *air fuel ratio*.
- d. Dapat mengetahui apa itu *equivalent ratio*.

3. Materi Perkuliahan

- a. Reaksi pembakaran.

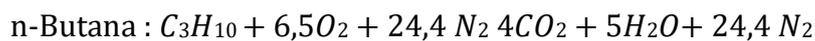
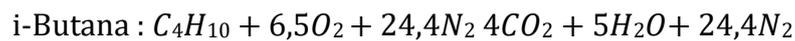
Pembakaran dapat didefinisikan sebagai kombinasi secara kimiawi dari unsur oksigen dengan unsur yang mudah terbakar dari bahan bakar (reaksi oksidasi) yang berlangsung secara cepat maupun lambat pada suhu dan tekanan tertentu. Pada reaksi oksidasi yang berlangsung cepat di hasilkan sejumlah energi elektromagnetik (cahaya), energi panas dan energi mekanik (suara). Pada semua jenis pembakaran, kondisi campuran udara dan bahan bakar merupakan faktor utama yang harus diperhatikan untuk mendapatkan campuran yang sempurna, pada reaksi pembakaran

pada unsur – unsur yang dapat terbakar dari bahan bakar menghasilkan pembebasan energi yang tergantung pada produk pembakaran yang terbentuk tiga unsur utama yang dapat terbakar pada sebagian besar bahan bakar adalah karbon, hidrogen dan belerang. Pada reaksi pembakaran, berlaku kekekalan massa sehingga massa dari produk pembakaran sama dengan massa dari reaktan. total massa untuk masing-masing unsur yang bereaksi sebelum dan sesudah reaksi adalah sama meskipun masing-masing unsur memiliki rumus kimia yang berbeda. Oksigen yang digunakan dalam proses pembakaran biasanya berasal dari udara yang mengakibatkan terikutnya unsur lain dalam unsur yang tidak dapat terbakar dalam bahan bakar dan akan melewati proses pembakaran tanpa mengalami perubahan dan akan membentuk polutan (NO_2). Dalam pembakaran adalah : “oksidasi cepat yang menghasilkan panas dan juga oksidasi lambat yang disertai oleh sedikit panas dan tanpa api”. Definisi ini menekankan pada dasarnya pembakaran merupakan proses transformasi energi antara ikatan kimia yang berupa panas dan dapat digunakan dalam berbagai cara, dengan kata lain pembakaran dapat menghasilkan api. Definisi lain dari pembakaran adalah : “reaksi kimia yang meliputi kombinasi bahan bakar dan oksigen yang menghasilkan panas produk pembakaran”. Dari beberapa definisi diatas terlihat bahwa proses pembakaran selalu membutuhkan oksigen sebagai oksidan, hal ini sangat bertentangan dengan realita yang terjadi, bahwa selama proses pembakaran sebagai oksidannya adalah udara yang pada kenyataannya mengandung 21% Oksigen 78% Nitrogen dan 1% merupakan unsur lain. Dan untuk tujuan perhitungan, gas nitrogen dianggap hanya melewati proses pembakaran tanpa mengalami perubahan.

b. Reaksi stoikiometri dari pembakaran.

Kondisi pembakaran stoikiometrik adalah dimana relatif jumlah bahan bakar dan udara secara teoritis dibutuhkan minimal untuk memberikan pembakaran yang sempurna, dan dapat dihitung melalui analisa pada bahan bakar gas yang bereaksi dengan oksigen. Pada penelitian ini

menggunakan LPG sesuai dengan spesifikasi yang dikeluarkan oleh Pertamina yang meliputi ethana (C_2H_6), propane (C_3H_8), isobutana (C_4H_{10}), normal-butana (C_4H_{10}), iso-pentana (C_5H_{12}) seperti yang ditunjukkan pada lembaran C, sedangkan untuk perhitungan stoikiometrik hanya unsur yang dominan : propane (C_3H_8), i-butana (C_4H_{10}), n-butana (C_4H_{10}). Sehingga persamaan reaksi pembakaran stoikiometriknya adalah sebagai berikut :



dari beberapa persamaan diatas, sebagai contoh untuk persamaan reaksi pembakaran eoritis gas propane adalah:



1 mole 5 mole 18,8 mole 3 mole 4 mole 18,8 mole.

Jadi secara teoritis dapat dilihat bahwa kebutuhan bahan bakar dan udara sebanding dengan jumlah koefisien masing-masing reaktan dan produk. Sehingga konsentrasi CO_2 pada produk pembakaran stoikiometrik :

$$\% CO_2 \text{ (wet)} = \frac{3}{3+4+18,8} \times 100\% = 11,63\%$$

$$\% CO_2 \text{ (dry)} = \frac{3}{3+18,8} \times 100\% = 13,76\%$$

Kondisi pembakaran secara stoikiometri pada umumnya sulit untuk dicapai, hal ini dikarenakan laju reaksi yang terbatas dan adanya proses pencampuran bahan bakar yang tidak sempurna, sehingga pembakaran biasanya diekspresikan dengan *excess air*. Hal ini akan menjamin tidak adanya bahan bakar yang terbuang dan sempurnanya proses pembakaran.

c. Air fuel ratio.

Metode ini paling sering digunakan dalam mendefinisikan campuran dan merupakan perbandingan antara massa dari udara dengan bahan bakar pada suatu titik tinjau. Secara simbolis, AFR dihitung sebagai:

$$AFR = \frac{m_a}{m_f} = \frac{M_a N_a}{M_f N_f}$$

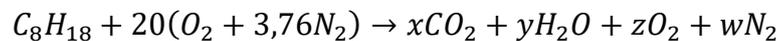
Jika nilai aktual lebih besar dari nilai AFR, maka terdapat jumlah udara yang lebih banyak dari pada yang dibutuhkan sistem dan proses pembakaran dan dikatakan miskin bahan bakar dan jika nilai aktual lebih kecil dari AFR stoikiometrik maka tidak cukup terdapat udara pada sistem dan dikatakan bahan bakar kaya.

Contoh soal 1.

Satu kmol diesel dibakar dengan 20 kmol udara kering. Apabila diasumsikan produk pembakaran terdiri dari CO_2 , H_2O , O_2 , N_2 tentukan jumlah mol dari tiap gas dan AFR-nya. Udara kering di sini didefinisikan sebagai udara dengan komposisi 21% O_2 dan 79% N_2

Penyelesaian:

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	: 8	x=8
H	: 18=2y	y=9
O	: 40=2x+y+2z	z=7,5
N ₂	: (20)(3,76)=w	w=75,2

Dari sini maka persamaan lengkapnya adalah:



Rasio massa udara dan bahan bakar AFR actual adalah:

$$AFR = \frac{m_a}{m_f}$$

$$AFR = \frac{20x(1 + 3,76)x29}{1x(8x12 + 18x1)} = 24,2 \frac{kg \text{ udara}}{kg \text{ bahan bakar}}$$

d. Equevalent ratio

Metode ini termasuk juga metode yang umum digunakan. Rasio ekivalen didefinisikan sebagai perbandingan antara rasio udara-bahan bakar (AFR) aktual atau juga sebagai perbandingan antara rasio bahan bakar-udara (FAR) aktual dengan rasio bahan bakar stoikiometrik.

$$\Phi = \frac{AFR_s}{AFR_a} = \frac{FAR_a}{FAR_s}$$

$\Phi > 1$ terdapat kelebihan bahan bakar dan campurannya sehingga disebut campuran kaya bahan bakar.

$\Phi < 1$ terdapat kekurangan bahan bakar dan campurannya sehingga disebut campuran miskin bahan bakar.

$\Phi = 1$ merupakan campuran stoikiometri.

4. Soal Evaluasi

Kerjakan soal latihan yang diberikan dan jawablah pertanyaan dengan benar dan tepat agar dapat meningkatkan pemahaman pada materi ini.

1. Etana (C_2H_6) dibakar dengan 20% udara lebih. Apabila pembakaran berlangsung sempurna dan dilakukan pada 100 kPa, tentukan AFR?
2. Bensin dibakar dengan udara kering. Analisa volumetris secara kering terhadap produk pembakaran menunjukkan CO_2 (10,02%), O_2 (5,62%), CO (0,88%), N_2 (83,48%). Tentukanlah
 - (a) AFR dan
 - (b) %udara teori yang digunakan?

5. Daftar Referensi

- Ganesan, V. (2003). *Internal combustion engine* (second edi). Tata McGraw-Hill Pub.
- Ganesan, V. (2007). *IC engines* (Third edit). Tata McGraw-Hill Pub.
- Ganesan, V. (2017). *IC Engines Fourth Edition*. Tata McGraw Hill Education Private Limited.
- Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. In *McGrawHill series in mechanical engineering* (Vol. 21). <https://doi.org/10987654>
- Kusairi Samlawi, A. (2017). *Buku Ajar Teknik Pembakaran*. Universitas Lambung Mangkurat.
- Lackner, M., Palotás, Á. B., & Winter, F. (2010). *Handbook of Combustion*. Markono Print Media Pte Ltd.

Naryanto, R. F. (2021). Teknik Pembakaran. In M. K. Delimayanti (Ed.),
News.Ge. Literasi Nusantara.

Suryawan, A. A. A. (2019). *Teknik Pembakaran dan Penomena Knocking*.
UNIVERSITAS UDAYANA.

Turns, S. R. (2000). An introduction to combustion: concepts and
applications. In *System* (Vol. 499, p. 411).
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.121>

MODUL 4

TEKNIK PEMBAKARAN

Penyusun : Dr. Dori Yuvenda S.Pd.M.T.

Mata Perkuliahan : Teknik Pembakaran

Semester/SKS : 7/3

Topik : Teori Nyala Api

1. Rambu-rambu Perkuliahan

- a. Mahasiswa mengisi presensi kehadiran setiap perkuliahan.
- b. Mahasiswa mempelajari modul setiap pertemuan sesuai dengan rencana pembelajaran semester (RPS).
- c. Mahasiswa mengerjakan soal evaluasi setelah mempelajari modul pada setiap bab modul dalam rangka meningkatkan penguasaan pada materi.

2. Tujuan Perkuliahan

- a. Dapat mengetahui apa teori api laminar.
- b. Dapat mengetahui apa teori api turbulen.
- c. Dapat mengetahui apa itu *flem quenchin*.
- d. Dapat mengetahui apa itu penyalaan api difusi.

3. Materi Perkuliahan

- a. Teori api laminar

Kajian teoritis tentang pembakaran telah berkembang lama diawali oleh teori detonasi oleh Chapman Jouguet, teori nyala difusi oleh Burke-Schuman, teori pembakaran spontan atau energi aktivasi asimptotik oleh Frank-Kamenetskii, teori deflagrasi oleh Zeldovich serta pendekatan asimptotik menggunakan Bilangan Peclet oleh Darrieus-Landau. Sebagian besar kajian matematikanya merupakan penerapan konsep asimptotik yang membutuhkan parameter yang besar dan koordinat ruang sebagai dasarnya.

Kajian teoritis meskipun dengan pendekatan yang sederhana terbukti lebih memperjelas pemahaman fisik dari pembakaran. Namun demikian penyesuaian model matematis menjadi penting saat terjadi perbedaan dengan hasil eksperimental atau penyelesaian numerik. Perkembangan komputasi numerik juga terjadi pada kajian pembakaran seiring dengan perkembangan teknologi informasi. Hal ini tidak berarti penyelesaian numerik menyelesaikan kesulitan pemahaman tentang pembakaran karena penyelesaian numerik masih relatif lebih sederhana jika dibandingkan dengan penyelesaian mekanisme reaksi.

Pembakaran mungkin merupakan fenomena klasik paling rumit yang baru sedikit dapat diungkapkan secara teoritis. Mekanisme reaksi yang banyak, yang berbeda untuk tiap jenis bahan bakar, perambatan nyala, aliran multidimensi yang tunak atau transient, yang kompresibel dan inkompresibel, laminar atau turbulen, viskos atau non viskos, kerugian kalor, mempengaruhi struktur nyala sekaligus kajian teoritisnya. Analisis non-linier (*weakly non-linear theory*) melahirkan teori percabangan (*bifurcation theory*) yakni penggunaan persamaan eksplisit pada permukaan nyala seperti kelengkungan nyala (*curvature*), peregangan (*stretch*), vortisitas.

b. Teori api turbulen

Pemodelan pembakaran turbulen diawali oleh Damkohler pada tahun 1940 mengenai pengaruh intensitas turbulensi pada struktur nyala. Kemudian Schelkin, pada tahun 1943 menyatakan pengaruh waktu terhadap kecepatan pembakaran turbulen dan dilanjutkan oleh Karlovitz, Summerfield dan Kovasznyay. Dengan mengacu pada metode pembakaran laminar pada tahun 1982 ditemukan analisa asimptotik skala jamak (*multiple-scale asymptotic analyses*) yang digunakan untuk memprediksi kecepatan pembakaran laminar.

Metode pemodelan untuk pembakaran premix turbulen sebagian besar berdasarkan pada pendekatan Persamaan G (*G-equation*) antara lain: Reynold Average Navier-Stokes Simulation (RANS), *Direct Numerical*

Simulation (DNS) dan *Large Eddy Simulation* (LES). Metode pemodelan yang berdasarkan konsep probabilitas adalah metode PDF atau *Probability Density Function* yang memisahkan antara model kimiawi dengan pencampuran molekuler. Sedangkan untuk pembakaran non *premixed* diperkenalkan konsep *flamelet* dan *mixture fraction based model*

c. *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* yang tergantung kepada bentuk geometri dinding, jenis bahan bakar, kondisi campuran, tekanan, temperatur reaktan, intensitas turbulensi.

d. Penyalaan api difusi

Nyala api (*flame*) adalah merupakan suatu hasil penyebaran secara terus menerus atau kontinyu, memiliki batas daerah pembakaran dengan kecepatan dibawah gelombang suara (*subsonic*), dapat disimpulkan bahwa *flame* adalah merupakan sebuah gelombang panas yang terjadi dikarenakan suatu reaksi kimia yang sangat cepat.

Nyala api (*flame*) dapat di klasifikasikan menjadi dua jenis yaitu nyala api difusi (*diffusion flame*) dan nyala api premix (*premixed flame*). *Diffusion flame* adalah merupakan suatu nyala api yang dapat terbentuk pada saat udara masuk atau berdifusi kedalam aliran bahan bakar dan tanpa adanya pencampuran terlebih dahulu antara bahan bakar dan udara

sehingga oksidator berasal dari udara luar, Sedangkan dengan premixed flame adalah suatu nyala api yang dapat terbentuk setelah adanya pencampuran terlebih dahulu antara bahan bakar dan udara sebelum terjadinya suatu proses pembakaran. Contoh penggunaan premixed flame adalah mesin bensin sedangkan contoh penggunaan diffusion flame adalah boiler, dan mesin diesel. Nyala api difusi memiliki karakteristik, dimana laju pembakaran di pengaruhi oleh oksidator dan bahan bakar yang bereaksi dengan ukuran yang tepat. beda dengan nyala api premix yang laju pembakaran dipengaruhi oleh laju pelepasan energi dan laju reaksi oksidasi sebelumnya telah bercampur antara oksidator dengan bahan bakar. Laju konsumsi oksidator pada proses nyala api premix seribu kali lebih banyak dibandingkan dengan laju konsumsi oksidator yang terjadi pada nyala api difusi, oleh karena itu pembakaran yang terjadi pada nyala api premix dapat dikatakan proses lebih sempurna dibandingkan dengan pembakaran pada nyala api difusi, ketika gas dialirkan keatas partikelnya akan mengalir ke bagian sisi luar sedangkan oksidator partikelnya mengalir ke bagian sisi dalam. Invers diffusion flame (IDF) merupakan salah satu jenis dari nyala api difusi dengan pipa jet udara yang dikelilingi oleh pipa jet bahan bakar luar baik di dalam suatu kondisi terbatas atau tanpa batas dan tidak menunjukkan flashback, pemuatan jelaganya lebih sedikit dibandingkan dengan nyala api difusi normal (NDF), NO_x nya rendah dan memiliki sifat yang mudah terbakar. IDF terpilih di karena muatan jelaga yang lebih rendah dan penyedotan sampel-sampelnya minimum dibandingkan dengan nyala api NDF. Struktur nyala api difusi inverse laminer (IDF) dipelajari agar mendapatkan wawasan tentang pembentukan jelaga dan pertumbuhan di bawah pembakaran berventilasi. Nyala api difusi (IDF) hamper mirip dengan api difusi normal (NDF), hanya saja posisi dari bahan bakar dan oksidator yang terbalik.

4. Soal Evaluasi

Kerjakan soal latihan yang diberikan dan jawablah pertanyaan dengan benar dan tepat agar dapat meningkatkan pemahaman pada materi ini.

1. Jelaskan dengan gambar bentuk dari api laminar beserta contoh aplikasinya?
2. Jelaskan dengan gambar bentuk dari api tubulen beserta contoh aplikasinya?
3. Jelaskan dengan gambar bentuk dari nyala api difusi beserta contoh aplikasinya?

5. Daftar Pustaka

Ganesan, V. (2003). *Internal combustion engine* (second edi). Tata McGraw-Hill Pub.

Ganesan, V. (2007). *IC engines* (Third edit). Tata McGraw-Hill Pub.

Ganesan, V. (2017). *IC Engines Fourth Edition*. Tata McGraw Hill Education Private Limited.

Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. In *McGrawHill series in mechanical engineering* (Vol. 21). <https://doi.org/10987654>

Kusairi Samlawi, A. (2017). *Buku Ajar Teknik Pembakaran*. Universitas Lambung Mangkurat.

Lackner, M., Palotás, Á. B., & Winter, F. (2010). *Handbook of Combustion*. Markono Print Media Pte Ltd.

Naryanto, R. F. (2021). *Teknik Pembakaran*. In M. K. Delimayanti (Ed.), *News.Ge*. Literasi Nusantara.

Suryawan, A. A. A. (2019). *Teknik Pembakaran dan Penomena Knocking*. UNIVERSITAS UDAYANA.

Turns, S. R. (2000). *An introduction to combustion: concepts and applications*. In *System* (Vol. 499, p. 411). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.121>

MODUL 5

TEKNIK PEMBAKARAN

Penyusun : Dr. Dori Yuvenda S.Pd.M.T.

Mata Perkuliahan : Teknik Pembakaran

Semester/SKS : 7/3

Topik : Teori Pembakaran pada Bahan Bakar Gas

1. Rambu-rambu Perkuliahan

- a. Mahasiswa mengisi presensi kehadiran setiap perkuliahan.
- b. Mahasiswa mempelajari modul setiap pertemuan sesuai dengan rencana pembelajaran semester (RPS).
- c. Mahasiswa mengerjakan soal evaluasi setelah mempelajari modul pada setiap bab modul dalam rangka meningkatkan penguasaan pada materi.

2. Tujuan Perkuliahan

- a. Dapat mengetahui apa konsep pembakaran pada bahan bakar gas.

3. Materi Perkuliahan

- a. Pembakaran pada bahan bakar gas.

Analisa Gas Alam Komposisi gas alam tergantung dari tempat gas alam ditemukan tetapi perbedaan komposisi gas alam tidak terlalu besar. Sehingga tidak ada klasifikasi gas alam. Dibawah ini ditunjukkan tabel gas alam.

Dilihat dari komposisi bahan bakar gas, gas alam merupakan bahan bakar yang relatif bersih dan merupakan bahan bakar yang dianggap ideal karena dalam proses pembakaran tidak memerlukan persyaratan persiapan dan pencampuran dengan udara pembakaran yang terlalu rinci. Kelemahan pemakaian bahan bakar gas (gas alam) dibandingkan dengan pemakaian bahan bakar lainnya (batubara, minyak) adalah bahwa gas alam merupakan bahan bakar yang sukar disimpan, karena gas alam mempunyai titik didih yang sangat rendah. Teknologi

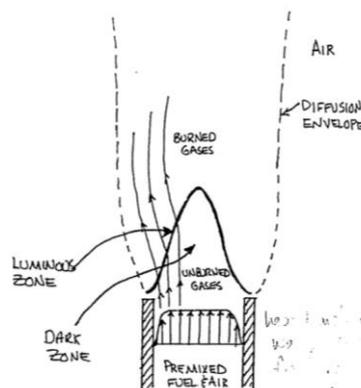
penyimpanan gas alam membutuhkan biaya yang sangat mahal. Dimana penyimpanan gas alam dilakukan dengan cara pendinginan, kemudian dimasukkan dalam tangki dalam keadaan cair. Gas alam yang disimpan dalam bentuk liquid tersebut disebut LNG (Liquid Natural Gas). Biasanya unit pembangkit yang menggunakan gas alam sebagai bahan bakar terletak di dekat sumber/tambang gas alam.

Nilai kalor Nilai kalor dari gas alam berkisar antara 36 sampai dengan 42 kJ/liter. Besarnya nilai kalor ditentukan oleh perbedaan komposisi dari gas alam tersebut. Karena perbedaan komposisi relatif tidak berbeda jauh maka nilai kalor dari gas alam relatif hampir sama. Bau dan Warna Gas alam dari sumber / tambang tidak berbau dan tidak berwarna. Karena sifat gas alam yang sangat mudah terbakar sehingga untuk mengetahui kebocoran dari gas alam maka gas alam tersebut dalam penggunaannya di Industri diberi bau yang menyengat.

b. Jenis Pembakaran

Dilihat dari kondisi reaktan, jenis pembakaran dibagi menjadi 2 yaitu Pembakaran premixed, apabila sebelum masuk ruang bakar bahan bakar dan udara dicampur dahulu secara homogen dan Pembakaran difusi, apabila pencampuran bahan bakar dan oksidan terjadi dalam ruang bakar secara difusi.

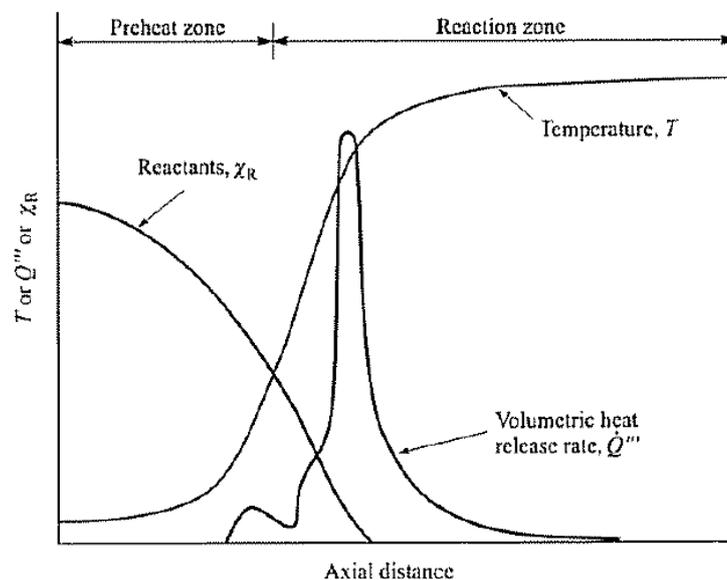
1) Pembakaran *Premixed*



Gambar 1. Teknik Pembakaran *Premixed*

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

- Api diapit oleh gas yang belum terbakar (*unburned gas*) dan gas yang sudah terbakar (*burned gas*).
- Api mengalami propagasi (perambatan) ke arah gas yang belum terbakar.
- Kecepatan rambatan api sama dengan kecepatan konsumsi bahan bakar sehingga disebut kecepatan pembakaran laminar (*laminar burning velocity LBV*).
- Syarat terjadinya propagasi adalah kondisi campuran berada dalam batas mampu bakar (*limit of flammability*). Struktur api *premixed laminar* adalah sebagai berikut, dimana temperature dan profil kecepatan pengeluaran panas berdasarkan dari eksperimen Friedman and Burke.



Gambar 2. Struktur Aliran Laminar

Zona *preheat*: sejumlah kecil panas dilepaskan. 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

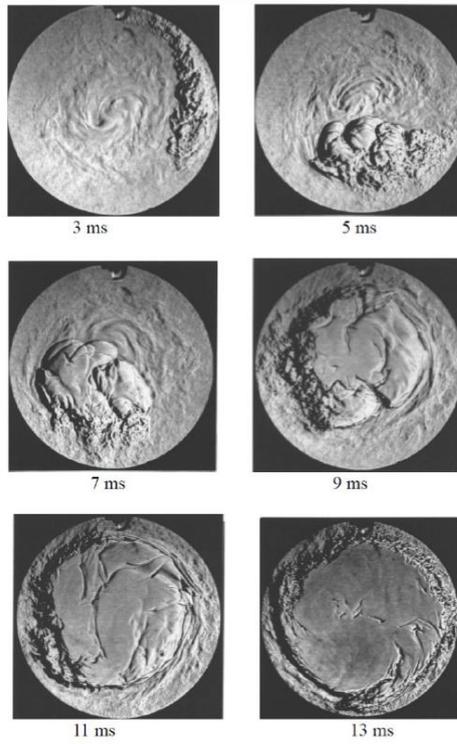
- Gradien yang besar membuat api tetap menyala, yaitu difusi panas dan spesies radikal dari zona reaksi ke zona *preheat*
- Zona reaksi: sebagian besar panas dilepaskan. Wilayah lebar dengan reaksi kimia yang lambat.
 - Reaksi kimia didominasi oleh reaksi rekombinasi, seperti $\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$
 - Pada tekanan atmosfer, zona ini dapat mencapai beberapa mm
- 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 H₂ paling besar dan paling lebar batas mampu bakar
 - LBV untuk gas metana CH₄ 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 H₂
 - LBV turun dengan kenaikan tekanan, dimana secara empiris berlaku hubungan,

$$LBV = axp^{\beta}$$

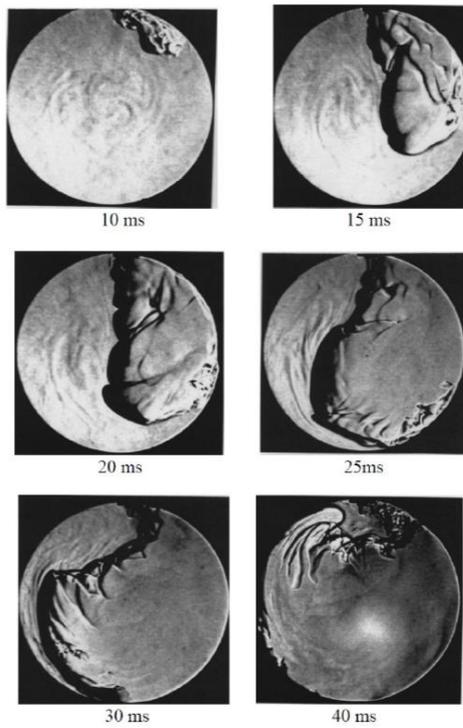
Dimana untuk

$$LBV < 0,6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \beta = 0 - 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}; \quad LBV > 0,6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \beta = 0 \text{ atau sedikit positif}$$

- LBV naik dengan kenaikan temperatur
- 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*.



Gambar 3. Hasil Fotografi Schlieren untuk *Methane/ Air mixtures*
bagian 1



Gambar 4. Hasil Fotografi Schlieren untuk *Methane/ Air mixtures*
bagian 2

2) Pembakaran Difusi

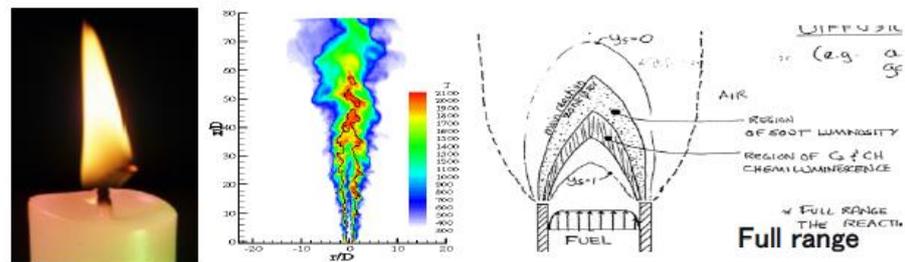
Dalam kondisi laminer, api yang terbentuk disebut sebagai api *difusi* laminer yang mempunyai sifat-sifat:

- a) Kecepatan reaksi pembakaran sangat bergantung kepada kecepatan difusi bahan bakar dan udara ke arah api
- b) 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 ($\approx V_{jet} \rho_{fuel} \Phi_{pipa} / \mu$) dimana V_{jet} : kecepatan semburan bahan bakar; ρ_{fuel} : densitas bahan bakar; Φ_{pipa} : diameter pipa burner; μ : viskositas bahan bakar. Karakteristik api semburan yaitu sebagai berikut:

- 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 laminer ke turbulen juga tetap.
 - Panjang api akan sebanding dengan $V_{jet}(\Phi_{pipa})^2$ untuk kondisi laminer, dan sebanding dengan Φ_{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*.
- c) 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.



Gambar 5. Teknik Pembakaran Difusi

4. Soal Evaluasi

Kerjakan soal latihan yang diberikan dan jawablah pertanyaan dengan benar dan tepat agar dapat meningkatkan pemahaman pada materi ini.

1. Jelaskan konsep pembakaran pada bahan bakar gas pada sebuah mesin?
2. Jelaskan secara ringkas jenis pembakaran menggunakan bahan bakar gas?
3. Jelaskan karakteristik pembakaran premix menggunakan bahan bakar gas?
4. Jelaskan karakteristik pembakaran difusi menggunakan bahan bakar gas?

5. Daftar Pustaka

Ganesan, V. (2003). *Internal combustion engine* (second edi). Tata McGraw-Hill Pub.

Ganesan, V. (2017). *IC Engines Fourth Edition*. Tata McGraw Hill Education Private Limited.

Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. In *McGrawHill series in mechanical engineering* (Vol. 21). <https://doi.org/10987654>

Lackner, M., Palotás, Á. B., & Winter, F. (2010). *Handbook of Combustion*. Markono Print Media Pte Ltd.

Naryanto, R. F. (2021). Teknik Pembakaran. In M. K. Delimayanti (Ed.), *News.Ge. Literasi Nusantara*.

Turns, S. R. (2000). An introduction to combustion: concepts and applications. In *System* (Vol. 499, p. 411).
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.121>

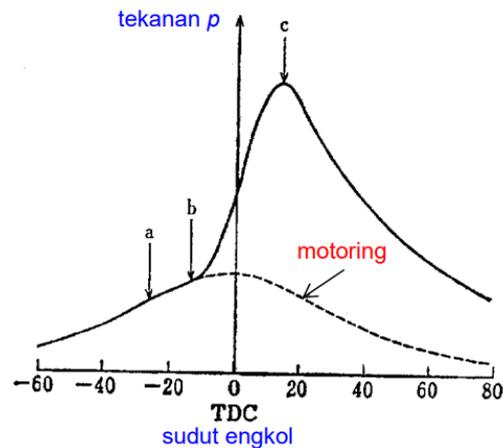
MODUL 6

TEKNIK PEMBAKARAN

Penyusun : Dr. Dori Yuvenda S.Pd.M.T.
Mata Perkuliahan : Teknik Pembakaran
Semester/SKS : 7/3
Topik : Teori pembakaran Mesin Bensin

1. Rambu-rambu Perkuliahan
 - a. Mahasiswa mengisi presensi kehadiran setiap perkuliahan.
 - b. Mahasiswa mempelajari modul setiap pertemuan sesuai dengan rencana pembelajaran semester (RPS).
 - c. Mahasiswa mengerjakan soal evaluasi setelah mempelajari modul pada setiap bab modul dalam rangka meningkatkan penguasaan pada materi.
2. Tujuan Perkuliahan
 - a. Dapat mengetahui proses pembakaran pada mesin bensin
3. Materi Perkuliahan
 - 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 1. Tahapan pembakaran pada mesin bensin

- 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 motor bensin, 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 penyalaan harus lebih cepat.

b. Prinsip kerja pada mesin bensin 4 langkah

Motor bensin 4 langkah memerlukan 4 langkah torak untuk 1 kali pembakaran dan 1 kali langkah kerja dalam 2 kali putaran poros engkol, pada motor bensin, bensin dibakar untuk memperoleh tenaga panas. selanjutnya tenaga inilah yang digunakan untuk menggerakkan torak. Daya dari torak diteruskan oleh conneting rod (batang torak) ke poros engkol, dan oleh poros engkol diubah menjadi gerak rotasi. Gerak rotasi poros engkol akan mengatur gerakan torak untuk melakukan kerja selanjutnya. Kerja priodik di dalam silinder di mulai dari pemasukan campuran udara dan bensin ke dalam silinder, sampai pada kompresi, pembakaran dan gas sisa pembakaran di dalam silinder disebut *Engine Cycle* (siklus mesin). Agar lebih jelas akan diterangkan prinsip kerja dari motor bensin empat langkah (four stroke) memerlukan 4 langkah torak untuk 1 kali pembakaran dan 1 kali langkah kerja dalam 2 kali putaran poros engkol dalam cara kerjanya. Secara spesifik, prinsip kerja motor bensin 4 langkah dapat dijelaskan sebagai berikut:

1) Langkah Hisap

Pada langkah ini di mulai dengan bergeraknya piston kebawah dari Titik Mati Atas (TMA) menuju Titik Mati Bawah (TMB) sambil menghisap campuran bahan bakar dan usaha kedalam silinder. Saat langkah ini, katup isap aka membuka dan kembali menutup setelah piston beberapa saat meninggalkan TMB, sedangkan katup buang selama langkah ini di dalam keadaan tertutup. Poros engkol akhirnya membuat setgah putaran pertamanya.

2) Langkah Kompresi

Pada langkah ini posisi katub masuk dan katub buang tertutup. Torakbergerak dari Titik Mati Bawah (TMB) KE Titik Mati Atas

(TMA), yang menyebabkan campuran bahan bakar udara kini terkurung dan dimampatkan oleh piston yang bergerak ke TMA. Dengan demikian volume ruang silinder di atas torak mengecil, karena itu tekanan dan suhu akan naik hingga campuran itu mudah sekali terbakar, tekanan ini disebut tekanan kompresi. Proses pemampatan ini disebut langkah kompresi atau langkah tekan. Pada akhir langkah kompresi dalam silinder, campuran bahan bakar dan udara akan diperkecilkan bunga api dari busi.

3) Langkah Kerja

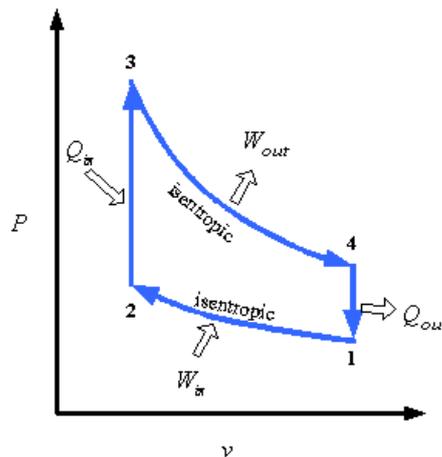
Pada langkah ini proses pembakaran menyebabkan campuran bahan bakar udara akan mengembang dan memuai, sehingga energi panas dihasilkan oleh pembakaran dalam ruang menimbulkan tekanan ke segala arah dan mendesak piston ke TMB. Langkah usaha inilah yang diharapkan pada mesin untuk dapat menjaga kelangsungan kerja dan peroleh tenaga mesin. Dari langkah kerja terlihat bahwa terjadi proses perubahan energi panas menjadi energi mekanis berupa gerak bolak-balik pada piston kemudian diubah lagi menjadi gerak putar pada poros engkol untuk selanjutnya ke roda.

4) Langkah Buang

Pada langkah buang ini posisi katup masuk tertutup dan katup buang terbuka, torak bergerak dari TMB ke TMA untuk mendorong keluar gas-gas yang telah terbakar dari dalam silinder menuju saluran gas buang. Bila torak mencapai TMA, yaitu sesudah melakukan langkah buang, torak akan kembali pada keadaan untuk mulai langkah isap. Sekarang motor telah melakukan empat gerakan penuh. Poros engkol berputar dua putaran penuh, dan telah menghasilkan satu tenaga. Di dalam mesin sebenarnya membuka menutupnya katup tidak terjadi tepat pada saat torak mencapai TMA atau TMB, tetapi akan berlaku lebih cepat atau lebih lambat.

c. Siklus Udara Volume Konstan (Siklus Otto)

Siklus ideal volume konstan ini adalah siklus untuk mesin otto. Siklus volume konstan sering disebut dengan siklus ledakan (*explosion cycle*) karena secara teoritis proses pembakaran terjadi sangat cepat dan menyebabkan peningkatan tekanan yang tiba-tiba. Penyalaan untuk proses pembakaran dibantu dengan loncatan bunga api. Nikolaus August Otto menggunakan siklus ini untuk membuat mesin sehingga siklus ini sering disebut dengan siklus otto.



Gambar 1. Siklus otto standar

Siklus otto merupakan model ideal dari penyalaan busi, mesin empat tak. Adapun prosesnya adalah sebagai berikut terlihat pada gambar 1.

- Kompresi *adiabatic reversible*
- Pemasukan volume panas secara konstan mewakili pembakaran dari akhir langkah piston
- Ekspansi *adiabatic reversible*, mewakili tenaga yang dihasilkan oleh langkah piston
- Pembuangan volume secara konstan, mewakili pembuangan gas buang

Proses dari tahap 1 ke 2 merupakan proses *adiabatic reversible* (isentropis) sehingga kerjanya adalah *isentropis* ($n=k$), yaitu:

$$W_{1,2} = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{1 - k} = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1 - k}$$

dimana

$W_{1,2}$ = Kerja isentropis yang dilakukan gas dari titik 1 ke 2

p_2, p_1 = tekanan titik 1 dan 2

R = konstanta gas ideal (udara standart)

m = massa gas

T_2, T_1 = temperatur titik 1 dan 2

k = konstanta gas adiabatik

Perpindahan panas dari proses yang sama adalah nol (*reversible* dan *adiabatic*). Penambahan panas (tanpa batasan kerja), diberikan sebagai berikut:

$$Q_{23} = m(u_3 - u_2)$$

dimana

Q_{23} = *heat transfer* dari titik 2 ke 3

u_3, u_2 = masing-masing energi dalam pada titik 2 dan 3

Untuk panas spesifik konstan, persamaan ini menjadi

$$Q_{23} = m_{cv}(u_3 - u_2)$$

Kerja ekspansi 3 ke 4 dari siklus otto juga merupakan proses isentropis persamaannya ditunjukkan sebagai berikut:

$$W_{3,4} = \frac{P_4V_4 - P_3V_3}{1 - k} = \frac{mR(T_4 - T_3)}{1 - k}$$

dimana

W_{34} = kerja isentropis yang dilakukan gas dari titik 3 ke 4

p_3, p_4 = tekanan titik 3 dan 4

T_3, T_4 = temperatur pada titik 3 dan 4

Perpindahan panas Q_{34} juga tidak ada (nol). Proses diakhiri dengan pembuangan panas sejajar dengan pemasukan panas pada kondisi volume konstan. Proses akhir, pengeluaran panas sejajar dengan pemasukan panas pada volume konstan dinyatakan sebagai:

$$Q_{41} = m(u_1 - u_4)$$

dimana

Q_{41} = *heat transfer* dari titik 4 ke 1

u_1, u_4 = masing-masing energi dalam pada titik 1 dan 4

Panas spesifik menjadi $Q_{41} = m_{cv}(T_1 - T_4)$. Rasio kompresi r , didasarkan atas nilai volume terbesar sampai terkecil (diambil dari langkah piston selama kompresi) $r = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$, ternyata rasio volume spesifik sama dengan rasio volume (untuk sistem tertutup).

Mean effective pressure (MEP) atau tekanan efektif rata-rata didefinisikan sebagai siklus kerja dibagi dengan perubahan maksimum pada volume

$$MEP = \frac{W_{cycle}}{V_2 - V_1}$$

MEP merupakan ukuran untuk kerja yang tidak berguna dalam siklus kerja. Akhirnya efisiensi panas dapat dinyatakan sebagai $\eta = \frac{W_{cycle}}{Q_{23}}$, Untuk panas spesifik konstan persamaan dapat disederhanakan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{W_{cycle}}{Q_{23}} = 1 - \frac{C_v (T_4 - T_1)}{C_v (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

d. 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 temperaturnya pun 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 menumbuknya 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 cara sebagai berikut:

- Meningkatkan kecepatan pembakaran dari suatu pembakaran normal
- Memperpendek jarak yang dibutuhkan oleh api untuk sampai ke end gas.

2) Penyalaan Permukaan (*Surface Ignition*)

Ini adalah fenomena dimana ada bagian dari dalam silinder yang mempunyai temperatur tinggi (*hot spot*) sehingga akan menyebabkan terjadinya penyalaan. 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.

4. Soal Evaluasi

Kerjakan soal latihan yang diberikan dan jawablah pertanyaan dengan benar dan tepat agar dapat meningkatkan pemahaman pada materi ini.

1. Jelaskan konsep dasar pembakaran pada mesin bensin?
2. Jelaskan tahapan pembakaran pada mesin bensin?
3. Jelaskan secara ringkas prinsip kerja mesin bensin empat langkah?
4. Jelaskan secara ringkas siklus otto pada mesin bensin?
5. Jelaskan pembakaran abnormal pada mesin bensin?

5. Daftar Pustaka

Ganesan, V. (2003). *Internal combustion engine* (second edi). Tata

McGraw-Hill Pub.

Ganesan, V. (2007). *IC engines* (Third edit). Tata McGraw-Hill Pub.

Ganesan, V. (2017). *IC Engines Fourth Edition*. Tata McGraw Hill Education Private Limited.

Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. In *McGrawHill series in mechanical engineering* (Vol. 21). <https://doi.org/10987654>

Kusairi Samlawi, A. (2017). *Buku Ajar Teknik Pembakaran*. Universitas Lambung Mangkurat.

Lackner, M., Palotás, Á. B., & Winter, F. (2010). *Handbook ofCombustion*. Markono Print Media Pte Ltd.

Naryanto, R. F. (2021). *Teknik Pembakaran*. In M. K. Delimayanti (Ed.), *News.Ge. Literasi Nusantara*.

Suryawan, A. A. A. (2019). *Teknik Pembakaran dan Penomena Knocking*. UNIVERSITAS UDAYANA.

Turns, S. R. (2000). *An introduction to combustion: concepts and applications*. In *System* (Vol. 499, p. 411). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.121>

MODUL 7

TEKNIK PEMBAKARAN

Penyusun : Dr. Dori Yuvenda S.Pd.M.T.

Mata Perkuliahan : Teknik Pembakaran

Semester/SKS : 7/3

Topik : Teori Semprotan pada Sistem Injeksi

1. Rambu-rambu Perkuliahan

- a. Mahasiswa mengisi presensi kehadiran setiap perkuliahan.
- b. Mahasiswa mempelajari modul setiap pertemuan sesuai dengan rencana pembelajaran semester (RPS).
- c. Mahasiswa mengerjakan soal evaluasi setelah mempelajari modul pada setiap bab modul dalam rangka meningkatkan penguasaan pada materi.

2. Tujuan Perkuliahan

- a. Dapat mengetahui formasi dan distribusi semburan
- b. Dapat mengetahui injektor bahan bakar
- c. Dapat mengetahui dinamika semburan
- d. Dapat mengetahui penguapan droplet

3. Materi Perkuliahan

- a. Formasi dan distribusi semburan

Sistem bahan bakar injeksi atau EFI dapat digambarkan sebagai suatu sistem penyalur bahan bakar yang memanfaatkan pompa bahan bakar pada tekanan tertentu untuk merubah bentuk bahan bakar cair menjadi bentuk gas dan mencampurnya dengan udara yang kemudian masuk ke dalam ruang bakar melalui injektor yang pada umumnya diletakkan di bagian ujung intake manifold. Pada saat katup masuk terbuka yaitu pada langkah hisap, sehingga udara yang masuk dapat bercampur dengan bahan bakar. (Wahyu D. H: 2013) Secara ideal, sistem bahan bakar injeksi (EFI) harus dapat menyuplai bahan bakar

yang disemprotkan dari injektor agar dapat dengan mudah bercampur dengan udara dan menghasilkan campuran yang homogen dalam perbandingan campuran yang tepat sesuai dengan putaran dan beban mesin, kebutuhan mesin, dan kondisi antara suhu mesin dengan suhu atmosfer saat itu. Sistem juga harus dapat menyuplai bahan bakar yang bervariasi, dengan jumlah yang sesuai dalam berbagai kondisi mesin, agar setiap perubahan kondisi kerja mesin tersebut dapat tercapai dengan kinerja mesin yang optimal (Sutiman: 2005). Perbandingan udara dan bahan bakar atau AFR (Air Fuel Ratio) yang ideal disebut juga dengan perbandingan stoichiometric yang mana perbandingannya adalah 14,7 gr udara dengan 1 gr bahan bakar. Apabila perbandingan bahan bakar atau AFR lebih dari 14,7 gr maka campuran tersebut adalah campuran kurus/miskin dan apabila perbandingan bahan bakar atau AFR kurang dari 14,7 gr, maka disebut dengan campuran gemuk/kaya (Sutiman: 2005).

Tabel 1. Perbandingan AFR dengan Kondisi Mesin (Sutiman: 2005)

No	Kondisi Kerja Mesin	AFR	No	Kondisi Kerja Mesin	AFR
1	Start Temperatur Dingin	2-3 : 1	6	Putaran Maks.	12-13 : 1
2	Start Temperatur Panas	7-8 : 1	7	Putaran Sedang	15-17 : 1
3	Saat Idling	8-10 : 1	8	Tenaga Optimal	12-13 : 1
4	Kecepatan Rendah	10-12 : 1	9	Emisi Rendah	15: 1
5	Akselerasi	2-3 : 1	10	Bahan Bakar Ekonomis	16-17 : 1

Perbandingan udara dan bahan bakar tersebut bergantung dari temperatur dan kondisi kerja mesin. Perbandingan campuran saat menghidupkan mesin berbeda dengan perbandingan campuran saat putaran idling, saat putaran lambat, maupun saat putaran dipercepat.

Perbandingan antara udara yang terpakai didalam proses pembakaran dengan kebutuhan udara teoritis disebut dengan faktor

lambda (λ), adapun perhitungan lambda (λ) menurut Sutiman (2005) yang dapat dirumuskan : $\lambda =$ Jika jumlah udara sesungguhnya 14,7 , maka : $\lambda = \rightarrow \lambda = 1$ Rumus diatas menunjukkan bahwa campuran yang ideal atau stoichiometric menghasilkan lambda (λ) = 1, berarti apabila lambda (λ) > 1 menunjukkan bahwa campuran kurus (lebih banyak udara), sedangkan apabila lamda (λ) < 1 maka disebut campuran kaya (kekurangan udara). Pemahaman mengenai nilai lambda (λ) ini memudahkan dalam menyatakan kondisi campuran yang masuk ke dalam ruang bakar, serta menganalisis kondisi mesin dengan cepat.

b. Injektor bahan bakar

Injektor sebagai suatu alat untuk mengabutkan bahan bakar sangat mempengaruhi kesempurnaan dari proses pembakaran di dalam silinder. Apabila pembakaran di dalam silinder tidak sempurna maka tenaga yang di hasilkan motor diesel tersebut akan berkurang. Kondisi pembakaran motor diesel sangat tergantung dari kondisi pengabut bahan bakar. Untuk mencapai pembakaran yang sempurna maka pengabut bahan bakar pada saat menyemprotkan bahan bakar harus sesuai dengan petunjuk manual book yaitu 280-350 kg/cm² dan dalam waktu singkat dengan memakai pompa penyemprot bahan bakar tekanan tinggi. Sistem pembakaran bahan bakar adalah jantung mesin diesel dan dikonstruksikan dengan ketelitian dan bahan-bahan bermutu dan merupakan sistem vital yang mempengaruhi kerja mesin diesel. Bagian-bagian terpenting untuk pemasukan dan pengabutan bahan bakar adalah pompa bahan bakar dan injektor. Pompa bahan bakar mendesak bahan bakar pada saat yang tepat dengan tekanan 300-500 bar melalui lubang mulut pengabut yang sangat kecil kedalam ruang bakar. Garis tengah lubang-lubang pengabut berkisar 0,4 – 0,9 mm. (P. V. Maanen dalam bukunya motor induk diesel, jilid 1), tekanan semprot yang tinggi dibutuhkan untuk memberi kecepatan awal yang tinggi kepada pancaran minyak. Akibatnya adalah terjadinya penyemprotan halus dan percikan minyak terdesak sejauh mungkin

kedalam ruang bakar untuk mendapat campuran yang baik dengan udara pembakaran.

Menurut P.V. Maanen dalam bukunya motor induk diesel (jilid 1), pembakaran adalah persenyawaan secara cepat dalam proses kimia antara bahan bakar udara dan suhu yang cukup untuk penyalaan. Pada mesin induk udara tersebut dikompresikan sehingga terjadi reaksi kimia yaitu pembakaran di dalam silinder, panas hasil pembakaran selanjutnya diubah menjadi tenaga mekanik. Pada mesin induk pembakarannya terjadi dikarenakan oleh bahan bakar minyak yang disemprotkan berupa kabut kedalam silinder yang bercampur dengan udara yang bersuhu tinggi. Dalam hal ini kecepatan pembakaran tergantung pada baik buruknya percampuran udara dengan bahan bakar. Oleh karena itu maka bahan bakar harus dikabutkan sehingga reaksi pembakaran dapat berlangsung dengan cepat.

c. Dinamika semburan

Jenis – jenis Injektor Jenis – jenis injektor dengan sifat pengabutan dan karakteristik yang berbeda, maka untuk fungsi pemakaiannya juga berbeda dimana bergantung pada proses pembakarannya. Proses pembakaran ini, ditentukan oleh bentuk ruang bakarnya. Dari segi karakteristik dan modelnya, injektor terdiri atas:

1) Injektor berlubang

- Injektor berlubang satu (*single hole*)
- Injektor berlubang banyak (*multi hole*)

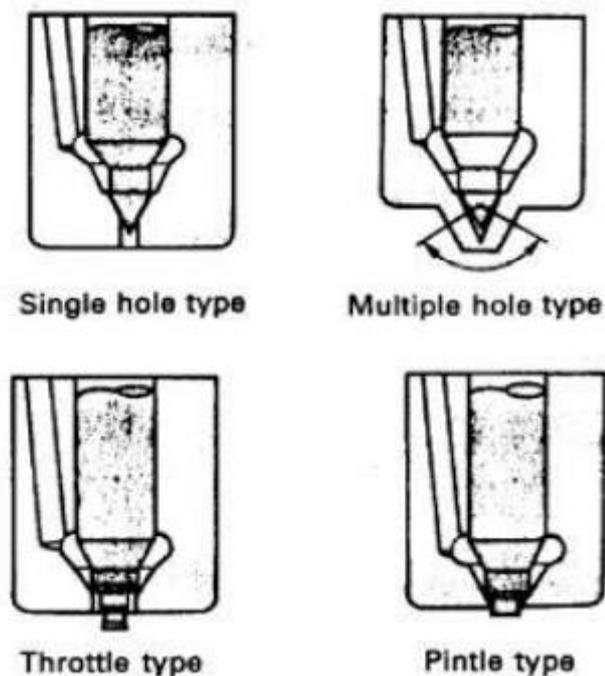
Injektor berlubang satu (*single hole*) proses pengabutannya sangat baik tetapi memerlukan tekanan injection pump yang tinggi. Demikian halnya dengan injektor berlubang banyak (*multi hole*) pengabutannya sangat baik. Injektor ini sangat tepat digunakan pada injektor langsung (*direct injection*). Injektor berlubang banyak tipe ini digunakan pada ruang bakar *valve* pada *nozzle* tipe ini mempunyai bentuk kerucut pada ujungnya yang didudukkan dengan tipe *direct injection*. Needle pada *valve seat*. Pada ujung *valve body* terdapat beberapa lubang yang

dibuat secara simetris. Diameter lubangnya berkisar antara 0.2-0.4 mm. Tekanan injeksi pada nozzle tipe ini berkisar antara 150-300 kg/cm². Untuk mencegah terjadinya keausan pada nozzle, maka diantara *guide hole* (pada *nozzle body*) dan permukaan luar dari *needle valve* diberikan celah sebesar 2-4.5 microns)

2. Injektor model *pin* atau *throttle*

- Injektor model *throttle*
- Injektor model *pintle*

Injektor model *throttle* dan model *pintle* lebih tepat digunakan pada motor diesel dengan ruang bakar yang memiliki *combustion chamber*, kamar muka maupun kamar puser (*turbulen*).

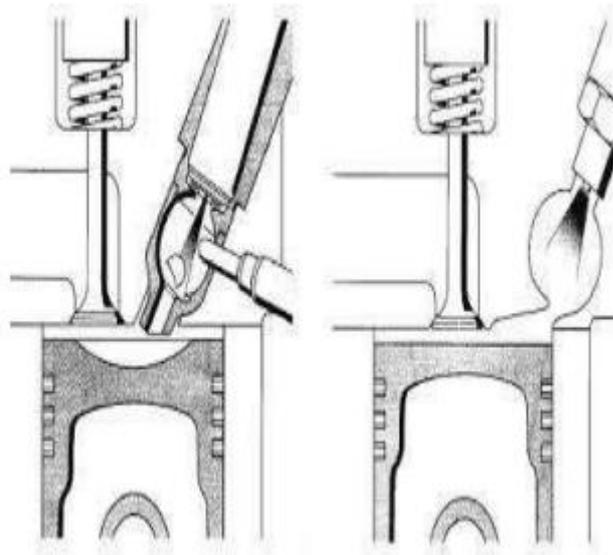


Gambar 1. Jenis – jenis injektor

Sedangkan dari segi pemakaian dan posisi injektor terdiri dari injektor tidak langsung (*precombustion chamber*) dan injektor langsung (*direct injection*). Kedua jenis injektor ini sering digunakan, karena keduanya memiliki kekurangan serta kelebihan masing-masing.

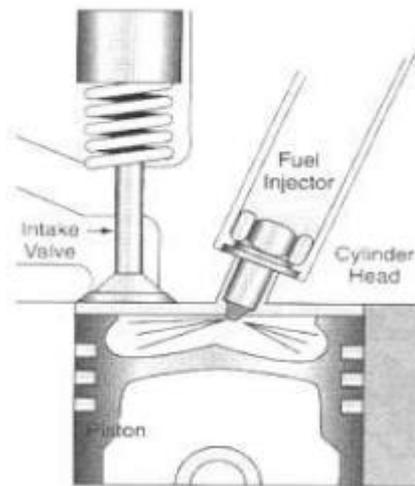
Adapun perbedaan antara injektor langsung dan tidak langsung adalah

a. Injektor jenis tidak langsung (*precombustion chamber*) Pada sistem ini bahan bakar tidak langsung disemprotkan langsung ke dalam silinder (ruang bakar utama), melainkan terlebih dahulu melalui suatu kamar muka atau *precombustion chamber* (PC), sehingga proses pembakaran terjadi secara menjalar ke ruang bakar utama.



Gambar 2. Injeksi tidak langsung (*precombustion chamber*)

b. Injeksi langsung (*direct injection*) Injeksi langsung pada motor diesel cara kerjanya adalah nozzle menyemprotkan bahan bakar dalam bentuk kabut ke dalam silinder (ruang bakar) sehingga proses pembakaran terjadi secara serempak.



Gambar 3. Injeksi langsung (*direct injection*)

Proses pengabutan bahan bakar diesel melalui injektor ini diperlukan agar terjadi proses pembakaran yang sempurna di dalam silinder, kendati pada motor diesel ini pembakaran diberikan melalui panas yang dihasilkan oleh pemampatan udara luar namun nyala api tidak akan terjadi tanpa adanya penambahan oksigen. Oleh karena itu, dalam proses pengabutan ini pada dasarnya adalah mencampur bahan bakar dengan oksigen, untuk itu proses pengabutan untuk memperoleh gas bahan bakar yang sempurna pada injektor dapat dilakukan dengan tiga sistem pengabutan yaitu:

1) Pengabutan Udara

Proses pengabutan udara terjadi pada saat bahan bakar yang bertekanan 240 sampai 250 Bar mengakibatkan tekanan pada rumah pengabut sebesar 240 Bar yang selalu berhubungan langsung dengan tabung udara dengan tekanan bahan bakar dari pompa mencapai 350 Bar pada Volume tertentu akan tertampung pada cincin pembagi dari pengabut tersebut. Tekanan bahan bakar dari pompa tadi juga akan mengangkat jarum pengabut dengan demikian, udara yang bertekanan tadi akan mengalir bersama bahan bakar melalui lubang-lubang halus pada cincin pembagi sehingga membentuk gas bahan bakar dan masuk ke dalam silinder. Gas bahan bakar yang terbentuk karena proses

persenyawaan antara udara dengan bahan bakar maka akan sangat mudah terbakar bila berhubungan dengan udara panas dan bertekanan tinggi. Dengan plunger pompa injeksi yang digerakan oleh poros yang berhubungan dan distel sedemikian rupa maka pengabutan hanya terjadi pada akhir kompresi.

2) Pengabutan Tekan

Pada proses pengabut tekan ini saluran bahan bakar dan ruangan dalam rumah pengabut harus selalu terisi penuh oleh bahan bakar, dengan jarum pengabut yang tertekan oleh pegas sehingga saluran akan tertutup. Namun ketika bahan bakar dari injection pump yang bertekanan 350 Bar mengalir ke bagian jarum pengabut, pengabut akan tertekan keatas sehingga saluran akan terbuka. Dengan demikian, bahan bakar akan terdesak melalui celah di antara jarum pengabut dalam bentuk gas. Untuk memperoleh proses pembakaran yang sempurna didalam silinder maka proses pemampatan udara di dalam silinder diusahakan menghasilkan turbulensi udara.

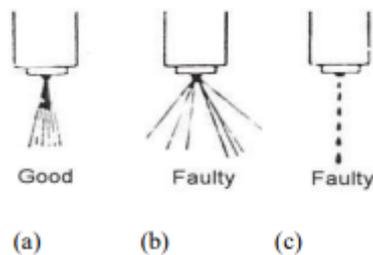
3) Pengabutan Gas

Pengabut ini dikonstruksi sedemikian rupadengan komponen-komponen yang terdiri atas rumah pengabut, katup dan bak pengabut yang ditempatkan di bagian bawah dari pengabut dan berada di dalam ruang bakar. Dalam proses pengabutan ini bahan bakar telah berada dalam keadaan bertekanan tinggi dan katup injeksi sudah terbuka sejak langkah pengisapan oleh torak dan pada kondisi demikian ini sebagian bahan bakar telah menetes ke bak pengabut yang di bagian sisinya terdapat lubang-lubang kecil. Keadaan ini akan mengakibatkan motor menjadi sangat panas sehingga bahan bakar tadi akan berubah menjadi kabut. Pada akhir langkah kompresi udara yang bertekanan akan menerobos masuk ke bak pengabut tersebut melalui lubang-lubang kecil dari bak pengabut tersebut dan mengakibatkan letusan. Namun hal ini tidak cukup membakar bahan bakar secara keseluruhan karena tidak cukup oksigen sehingga sisa bahan bakar yang tidak

terbakar akan keluar masuk didalam ruang bakar dan terbakar pada ruangan ini, oleh karena itu pada sisitem pengabutan ini akan terjadi dua kali proses pembakaran yaitu proses pembakaran mula dan proses pembakaran yang sebenarnya, kendati sistem ini jarang digunakan namun proses pengabutan dengan ini dapat menghasilkan kabut bahan bakar yang memenuhi syarat dalam kebutuhan proses pembakaran.

Bentuk-bentuk Pengabutan pada Injektor Di dalam menyemprotkan bahan bakar, nozzle memiliki bentuk bentuk penyemprotan bahan bakar, bentuk penyemprotan ini sangat berpengaruh terhadap kualitas campuran bahan bakar di dalam silinder.

Di bawah ini akan dijelaskan mengenai bentuk penyemprotan nozzle serta pengaruhnya terhadap pembakaran.



Gambar 4. Bentuk – bentuk penyemprotan pada injektor.

Keterangan:

1. Pada gambar 4a terlihat pengabutan yang sempurna dimana pengabutannya menyebar dan tidak berpusat pada satu titik. Pengabutan yang baik membentuk sudut pengabutan dengan sudut 14° . Pengabutan yang sempurna akan menghasilkan pembakaran yang sempurna dan pembakaran yang sempurna akan meningkatkan efisiensi mesin. Diameter nozzle akan mempengaruhi tekanan pengabutan tekanan pengabutan yang baik tergantung dari spesifikasi motor diesel.

2. Pada gambar 4b terlihat pengabutan yang tidak merata pada nozzle dan ini menandakan bahwa terjadi penyumbatan pada nozzle needle. Keadaan ini apabila dibiarkan akan menimbulkan kerugian serta

efek samping terhadap mesin. Nozzle yang tersumbat akan mengakibatkan penyemprotan bahan bakar tidak maksimal yang disalurkan ke dalam silinder, ini akan mengakibatkan mesin akan pincang dan tenaga akan berkurang bila nozzle yang tersumbat hanya satu buah.

3. Pada gambar 4c terlihat bahan bakar hanya menetes karena kebuntuan atau kerusakan pada nozzle dan keadaan ini mengakibatkan pembakaran tidaklah sempurna karena bahan bakar yang dikabutkan tidak terkabut secara sempurna dan pemakaian bahan bakar akan boros dan asap pada cerobong akan tebal dan berwarna putih.

d. Penguapan droplet

Karakteristik semprotan merupakan hal yang penting untuk meninjau performance pembakaran pada ruang bakar. Karakteristik semprotan dinyatakan dalam ukuran rata-rata droplet, droplet break up, distribusi droplet, sudut semprotan (spray cone angle) dan penetrasi semprotan. Ukuran rata-rata droplet, distribusi droplet dan droplet break up merupakan hal yang sangat penting untuk diperhatikan. Ketiganya merupakan karakteristik semprotan yang sepenuhnya dipengaruhi oleh proses atomisasi yang terjadi pada injector. Sedangkan sudut semprotan dan penetrasi sebagian dipengaruhi oleh atomisasi yang terjadi pada injector dan sebagian dari aerodynamic influences yang mengenai semprotan setelah keluar dari injector. Karakteristik semprotan bahan bakar ditentukan oleh tiga parameter tak berdimensi yaitu:

1) Weber Number

$$We = \rho l .vrel. 2 do \sigma l$$

2) Reynolds Number

$$Re = \rho l .vrel. do \mu l$$

3) Ohnesorge Number

$$On = \sqrt{We Re}$$

Apabila dilihat dari propertis bahan bakar pada persamaan di atas, maka nilai densitas, kekentalan dan tegangan permukaan menentukan karakteristik semprotan yang terjadi.

a) Karakteristik droplet

▪ Ukuran Rata-rata droplet

Ukuran droplet rata-rata biasanya diistilahkan dengan SMD (*Sauter Mean Diameter*), yaitu diameter dari sebuah droplet yang memiliki perbandingan volume dan luas permukaan yang sama dalam seluruh semprotan. SMD dapat digunakan untuk menghitung laju penguapan rata-rata dan sebagai perbandingan kualitas atomisasi dari bermacam-macam semprotan. Dari hasil pengukuran yang dilakukan oleh Hiroyasu, Arai dan Tabata (1989), untuk low-pressure injectors, SMD dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$SMD = 4,12d_{nozz}Re^{0,12}We^{-0,75}\left(\frac{\mu_f}{\mu_g}\right)^{0,54}\left(\frac{\rho_f}{\rho_g}\right)^{0,18}$$

Dengan d_{nozz} merupakan diameter nozzle, perbandingan antara viscositas dinamik bahan bakar dan udara. Persamaan tersebut mengasumsikan bahwa droplet pada semprotan memiliki distribusi ukuran yang tidak seragam yang dikemukakan oleh Rosin dan Rammer (1933).

▪ Distribusi ukuran droplet

Keragaman ukuran droplet yang terbentuk saat proses atomisasi merupakan salah satu parameter yang digunakan dalam menganalisis kualitas suatu semprotan. Distribusi ukuran droplet merupakan properties yang sangat sulit untuk diprediksikan baik secara teoritis maupun eksperimental.

▪ *Droplet Break-up*

Droplet break-up adalah proses pemecahan semprotan menjadi butiran-butiran yang lebih kecil dan selanjutnya mengalami proses penguapan. Breakiup droplet dapat dimodelkan secara *Taylor Analogy Break-up* (TAB) maupun *Wave break-up*.

- Sudut Semprotan

Sudut semprotan (*spray cone angle*) memiliki pengaruh yang besar pada kualitas pembakaran. Sudut semprotan dapat merepresentasikan proses atomisasi yang terjadi pada bahan bakar dan mempengaruhi gas buang sisa pembakaran.

- Penetrasi Semprotan

Penetrasi semprotan dapat dinyatakan sebagai jarak maksimum yang dapat ditempuh droplet setelah meninggalkan injector. Panjang semprotan dipengaruhi oleh dua gaya yang berlawanan yaitu energi kinetic awal droplet dan tahanan aerodinamik dari udara sekitar.

Sesaat ketika keluar dari injector, kecepatan dari liquid tinggi tetapi sebagaimana atomisasi berjalan, dan luasan permukaan semprotan bertambah, energi kinetic droplet akan semakin berkurang karena adanya gesekan antara droplet dengan udara disekitarnya.

4. Soal Evaluasi

Kerjakan soal latihan yang diberikan dan jawablah pertanyaan dengan benar dan tepat agar dapat meningkatkan pemahaman pada materi ini.

1. Jelaskan jenis-jenis injektor yang digunakan pada motor bakar?
2. Jelaskan secara ringkas sistem pengabutan pada injector?
3. Parameter apa yang mempengaruhi proses atomisasi pada saat injeksi bahan bakar?
4. Jelaskan karakteristik dari droplet?
5. Jelaskan model bentuk pengabutan pada sistem injeksi bahan bakar?

5. Daftar Pustaka

Ganesan, V. (2003). *Internal combustion engine* (second edi). Tata McGraw-Hill Pub.

Ganesan, V. (2007). *IC engines* (Third edit). Tata McGraw-Hill Pub.

Ganesan, V. (2017). *IC Engines Fourth Edition*. Tata McGraw Hill Education Private Limited.

Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. In

- McGrawHill series in mechanical engineering* (Vol. 21).
<https://doi.org/10987654>
- Kusairi Samlawi, A. (2017). *Buku Ajar Teknik Pembakaran*. Universitas Lambung Mangkurat.
- Lackner, M., Palotás, Á. B., & Winter, F. (2010). *Handbook of Combustion*. Markono Print Media Pte Ltd.
- Naryanto, R. F. (2021). Teknik Pembakaran. In M. K. Delimayanti (Ed.), *News.Ge. Literasi Nusantara*.
- Suryawan, A. A. A. (2019). *Teknik Pembakaran dan Penomena Knocking*. UNIVERSITAS UDAYANA.
- Turns, S. R. (2000). An introduction to combustion: concepts and applications. In *System* (Vol. 499, p. 411).
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.121>

MODUL 8

TEKNIK PEMBAKARAN

Penyusun : Dr. Dori Yuvenda S.Pd.M.T.

Mata Perkuliahan : Teknik Pembakaran

Semester/SKS : 7/3

Topik : Teori Pembakaran pada Bahan Bakar Cair

1. Rambu-rambu Perkuliahan

- a. Mahasiswa mengisi presensi kehadiran setiap perkuliahan.
- b. Mahasiswa mempelajari modul setiap pertemuan sesuai dengan rencana pembelajaran semester (RPS).
- c. Mahasiswa mengerjakan soal evaluasi setelah mempelajari modul pada setiap bab modul dalam rangka meningkatkan penguasaan pada materi.

2. Tujuan Perkuliahan

- a. Dapat mengetahui apa konsep pembakaran pada bahan bakar cair

3. Materi Perkuliahan

- a. Konsep pembakaran pada 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 $SMD = \sum n_i d_i^3 / \sum n_i d_i^2$ yang dapat dihasilkan oleh suatu injektor

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

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

Pengkabutan bahan bakar minyak biasanya dilakukan dengan metode sebagai berikut:

- *Single fluid atomizer* dipakai untuk burner dalam rumah tangga dan industri skala kecil yang menggunakan bahan bakar minyak. 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 bahan bakar minyak.
- *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.
- *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 diijeksikan 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.

4. Soal Evaluasi

Kerjakan soal latihan yang diberikan dan jawablah pertanyaan dengan benar dan tepat agar dapat meningkatkan pemahaman pada materi ini.

1. Jelaskan tahapan pembakaran dengan menggunakan bahan bakar cair?
2. Jelaskan metode pengkabutan bahan bakar cair pada proses pembakaran?
3. Jelaskan faktor yang mempengaruhi proses pengkabutan menggunakan bahan bakar cair?

5. Daftar Pustaka

Ganesan, V. (2003). *Internal combustion engine* (second edi). Tata McGraw-Hill Pub.

Ganesan, V. (2007). *IC engines* (Third edit). Tata McGraw-Hill Pub.

Ganesan, V. (2017). *IC Engines Fourth Edition*. Tata McGraw Hill Education Private Limited.

Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. In *McGrawHill series in mechanical engineering* (Vol. 21). <https://doi.org/10987654>

Kusairi Samlawi, A. (2017). *Buku Ajar Teknik Pembakaran*. Universitas Lambung Mangkurat.

Lackner, M., Palotás, Á. B., & Winter, F. (2010). *Handbook of Combustion*. Markono Print Media Pte Ltd.

Naryanto, R. F. (2021). Teknik Pembakaran. In M. K. Delimayanti (Ed.), *News.Ge. Literasi Nusantara*.

Turns, S. R. (2000). An introduction to combustion: concepts and applications. In *System* (Vol. 499, p. 411).
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.121>

MODUL 9

TEKNIK PEMBAKARAN

Penyusun : Dr. Dori Yuvenda S.Pd.M.T.

Mata Perkuliahan : Teknik Pembakaran

Semester/SKS : 7/3

Topik : Teori Pembakaran Mesin Diesel

1. Rambu-rambu Perkuliahan

- a. Mahasiswa mengisi presensi kehadiran setiap perkuliahan.
- b. Mahasiswa mempelajari modul setiap pertemuan sesuai dengan rencana pembelajaran semester (RPS).
- c. Mahasiswa mengerjakan soal evaluasi setelah mempelajari modul pada setiap bab modul dalam rangka meningkatkan penguasaan pada materi.

2. Tujuan Perkuliahan

- a. Dapat mengetahui proses pembakaran pada mesin diesel
- b. Dapat mengetahui prinsip kerja pada mesin diesel

3. Materi Perkuliahan

- a. Konsep pembakaran pada mesin diesel

Sistem pembakaran motor diesel terjadi dengan sendirinya karena tinggi suhu udara pada saat kompresi di dalam ruang bakar, sehingga tekanan di dalam silinder naik dengan cepat lalu mendorong piston dari titik mati atas ke titik mati bawah.

Motor bakar diesel adalah jenis khusus dari mesin pembakaran dalam karakteristik utama pada mesin diesel yang membedakannya dari motor bakar yang lain, terletak pada metode pembakaran bahan bakarnya. Ditinjau dari cara memperoleh energi termal ini mesin kalor dibagi menjadi dua golongan, yaitu mesin pembakaran luar dan mesin pembakaran dalam. Pada mesin pembakaran luar atau sering disebut

juga sebagai *eksternal combustion engine* (ECE) proses pembakaran terjadi di luar mesin, energi thermal dari gas hasil pembakaran dipindahkan ke fluida kerja mesin melalui dinding pemisah, Contohnya mesin uap. Pada mesin pembakaran dalam atau sering disebut juga sebagai *internal combustion engine* (ICE), proses pembakaran berlangsung di dalam motor bakar itu sendiri sehingga gas pembakaran yang terjadi sekaligus berfungsi sebagai fluida kerja. Mesin pembakaran dalam umumnya dikenal juga dengan nama motor bakar. Dalam kelompok ini terdapat motor bakar torak dan sistem turbin gas. Mesin diesel adalah sejenis mesin pembakaran dalam; lebih spesifik lagi, sebuah mesin pemicu, dimana bahan bakar dinyalakan oleh suhu tinggi gas yang dikompresi, dan bukan oleh alat berenergi lain seperti busi. Mesin ini ditemukan pada tahun 1892 oleh Rudolf Diesel dari Jerman, yang menerima paten pada 23 Februari 1893. Diesel menginginkan sebuah mesin untuk dapat digunakan dengan berbagai macam bahan bakar termasuk debu batubara.

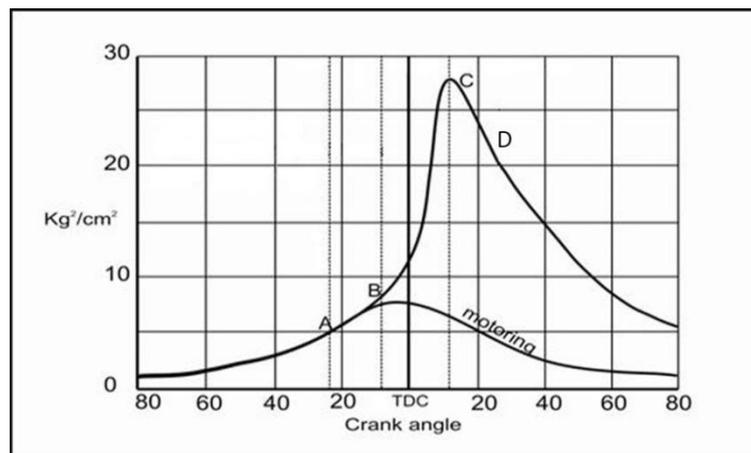
Dalam mesin diesel, bahan bakar diinjeksikan ke silinder yang berisi udara yang bertekanan sangat tinggi. Pada saat ini bahan bakar tidak dapat langsung terbakar, tetapi akan terjadi *ignition delay period* (periode keterlambatan penyalaan). Pada awalnya terjadi keterlambatan secara fisis karena pengkabutan 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.

b. Tahapan Pembakaran pada Motor Diesel

Untuk terjadinya pembakaran pada ruang bakar, ada beberapa syarat yang harus dipenuhi, antara lain: adanya campuran yang dapat terbakar, adanya sesuatu yang menyulut terjadinya pembakaran, stabilisasi dan propagasi dari api dalam ruang bakar.

Proses pembakaran pada motor diesel memiliki beberapa tahapan yang digambarkan dalam diagram P- θ seperti pada gambar 10. Tahapan pembakarannya yaitu:



Gambar 1. Tahapan pembakaran pada motor diesel.

1) Tahap Pertama

Tahap ini diistilahkan dengan *ignition delay period* yaitu area dalam rentang A-B pada gambar 1. Tahapan ini merupakan periode atau rentang waktu yang dibutuhkan bahan bakar ketika saat pertama kali bahan bakar diinjeksikan (titik A) hingga saat pertamakali muncul nyala pembakaran (titik B). Artinya, selama periode tersebut tidak terjadi proses pembakaran. Panjangnya periode ini biasanya dipengaruhi oleh properties yang dimiliki bahan bakar yaitu temperatur terbakar sendiri bahan bakar, tekanan injeksi atau ukuran *droplet*, sudut awal injeksi, rasio kompresi, temperatur udara masuk, temperatur cairan pendingin, temperatur bahan bakar, tekanan udara masuk (*supercharge*), kecepatan/putaran motor diesel, rasio udara-bahan bakar, ukuran motor, jenis ruang bakar.

2) Tahap kedua

Pada tahap ini diistilahkan dengan *Rapid* atau *Uncontrolled Combustion* yang maksudnya adalah periode awal pembakaran hingga *flame* mulai berkembang yang diindikasikan oleh area B-C pada gambar 1. Bahan bakar berupa *droplet-droplet* di selubungi oleh udara bertemperatur tinggi, sehingga panas yang diterima akan menguapkan *droplet-droplet* bahan bakar tersebut. Bagian terluar *droplet-droplet* tersebut yang lebih dulu menerima panas dan menguap kemudian terbakar. Panas yang ditimbulkan oleh pembakaran tersebut naik sangat drastis dan memicu proses yang sama pada bagian lain yang belum terbakar dengan cepat dan tidak beraturan. Proses ini menyebabkan kenaikan tekanan yang sangat besar.

3) Tahap ketiga

Pada tahap ini diistilahkan dengan *Controlled Combustion* seperti diindikasikan oleh area C-D pada gambar 10, dimana bahan bakar segera terbakar setelah diinjeksikan. Hal ini disebabkan nyala pembakaran yang terjadi pada periode sebelumnya bergerak bersama menuju butiran *droplet-droplet* yang baru diinjeksikan. Pembakaran dapat dikontrol dengan sejumlah bahan bakar yang diinjeksikan pada periode ini. Periode ini berakhir setelah injektor berhenti menginjeksikan bahan bakar ke ruang bakar.

4) Tahap keempat

Meskipun pada tahap ketiga telah selesai proses injeksi bahan bakar, kenyataannya masih ada bahan bakar yang belum terbakar seluruhnya. Dalam hal ini nyala pembakaran terus berkembang membakar bahan bakar yang tersisa pada ruang bakar. Periode ini disebut juga *afterburning* yang diindikasikan oleh area setelah titik D pada gambar 1. Apabila kenyataannya masih ada bahan bakar yang belum terbakar sementara piston telah bergerak dari Titik Mati Bawah (TMB) ke Titik Mati Atas (TMA) untuk melakukan langkah buang,

maka sisa-sisa bahan bakar tersebut akan ikut keluar bersama gas buang sebagai *unburnt fuel*.

c. Prinsip kerja pada mesin diesel

Tekanan gas hasil pembakaran bahan bakar dan udara akan mendorong torak yang dihubungkan dengan poros engkol menggunakan batang torak, sehingga torak dapat bergerak bolak-balik (*reciprocating*). Gerak bolak-balik torak akan diubah menjadi gerak rotasi oleh poros engkol (*crank shaft*). Dan sebaliknya gerak rotasi poros engkol juga diubah menjadi gerak bolak-balik torak pada langkah kompresi. Berdasarkan cara menganalisa sistem kerjanya, motor diesel dibedakan menjadi dua, yaitu motor diesel yang menggunakan sistem *airless injection (solid injection)* yang dianalisa dengan siklus dual dan motor diesel yang menggunakan sistem *air injection* yang dianalisa dengan siklus diesel (sedangkan motor bensin dianalisa dengan siklus otto).

Perbedaan antara motor diesel dan motor bensin yang nyata adalah terletak pada proses pembakaran bahan bakar, pada motor bensin pembakaran bahan bakar terjadi karena adanya loncatan api listrik yang dihasilkan oleh dua elektroda busi (*spark plug*), sedangkan pada motor diesel pembakaran terjadi karena kenaikan temperatur campuran udara dan bahan bakar akibat kompresi torak hingga mencapai temperatur nyala. Karena prinsip penyalaan bahan bakarnya akibat tekanan maka motor diesel juga disebut *compression ignition engine* sedangkan motor bensin disebut *spark ignition engine*.

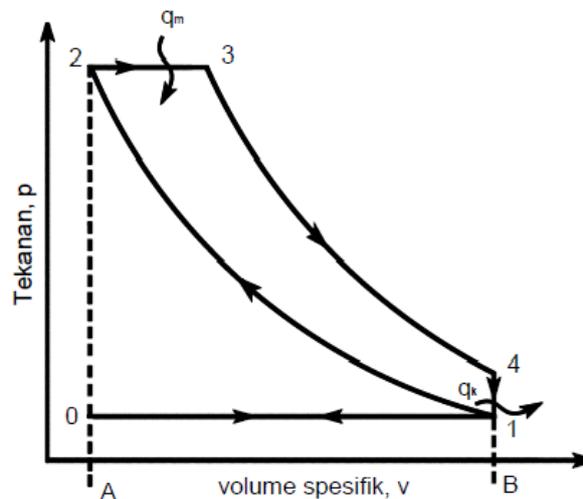
Motor diesel dikategorikan dalam motor bakar torak dan mesin pembakaran dalam (*internal combustion engine*). Prinsip kerja motor diesel adalah merubah energi kimia menjadi energi mekanis. Energi kimia di dapatkan melalui proses reaksi kimia (pembakaran) dari bahan bakar (solar) dan oksidiser (udara) di dalam silinder (ruang bakar). Pembakaran pada mesin Diesel terjadi karena kenaikan

temperatur campuran udara dan bahan bakar akibat kompresi torak hingga mencapai temperatur nyala.

d. Siklus Diesel Standar Udara

Siklus diesel merupakan model idealisasi dari sebuah proses kompres penyalaan, mesin empat langkah. Adapun prosesnya sebagai berikut terlihat pada gambar 2.

- Kompresi *reversible* dan *adiabatic* (isentropis)
- Pemasukan tekanan konstant, mewakili pembakaran pada akhir langkah piston
- Ekspansi *reversible* dan *adiabatic*, mewakili langkah tenaga piston
- Pengeluaran volume panas secara konstan, mewakili proses pembuangan gas



Gambar 1. Siklus diesel udara standar

Proses-proses dari tahap 1 ke 2 adalah *adiabatic* dan *reversible* sehingga kerja merupakan kerja isentropis ($n=k$):

$$W_{1,2} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - k} = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1 - k}$$

dimana

W_{12} = Kerja isentropis yang dilakukan gas dari titik 1 ke 2

p_2, p_1 = tekanan titik 2 dan 1

R = konstanta gas ideal (udara standart)

m = masa gas

T_2, T_1 = temperatur titik 2 dan 1

k = konstanta gas adiabatik

Perpindahan panas untuk proses-proses yang serupa adalah nol (*zero/reversible* dan adiabatik). *Heat transfer* pada tekanan konstan yaitu pada proses 2-3 diberikan sebagai:

$$Q_{23} = m(h_2 - h_3)$$

dimana

Q_{23} = *Heat transfer* pada tekanan konstan dari titik 2 – 3

h_2, h_3 = Entalpi pada titik 2 dan 3

Kerja dari 2 ke 3 merupakan tekanan konstan $Q_{23} = p_2(V_3 - V_2)$. Untuk panas spesifik konstan, perpindahan panas menjadi $Q_{23} = mc_p(T_3 - T_2)$. Kerja ekspansi 3 ke 4 dari siklus diesel merupakan kerja isentropis, diberikan oleh persamaan sebagai berikut:

$$W_{3,4} = \frac{P_4V_4 - P_3V_3}{1 - k} = \frac{mR(T_4 - T_3)}{1 - k}$$

dimana

W_{34} = Kerja isentropis yang dilakukan gas dari titik 3 ke 4

p_3, p_4 = tekanan titik 3 dan 4

T_3, T_4 = temperatur pada titik 3 dan 4

Sedangkan perpindahan panas Q_{34} juga bernilai nol (*zero*). Proses terakhir berupa proses pengeluaran panas pada sejajar dengan pemasukan panas pada volume konstan dinyatakan sebagai $Q_{41} = m(u_1 - u_4)$. Dan untuk panas spesifik konstan menjadi $Q_{41} = mc_v(T_1 - T_4)$. Perbandingan kompresi, r , didasarkan atas langkah piston selama kompresi: $r = \frac{V_1}{V_2}$. Kenyataannya perbandingan volume spesifik sama dengan perbandingan volume (*volume ratio*).

Mean effective pressure, MEP (tekanan efektif rata-rata) didefinisikan sebagai siklus kerja dibagi dengan perubahan maksimum pada volume dan dinyatakan sebagai $= \frac{W_{cycle}}{V_2 - V_1}$. MEP

juga merupakan ukuran dari kerja tidak berguna (tidak efektif) dari siklus tersebut.

Efisiensi thermal diberikan sebagai $\eta = \frac{W_{cycle}}{Q_{23}}$, untuk panas spesifik konstan, persamaan dapat disederhanakan menjadi:

$$\eta = \frac{W_{cycle}}{Q_{23}} = 1 - \frac{C_v (T_4 - T_1)}{C_v (T_3 - T_2)}$$

Parameter lain yang dipakai dalam siklus diesel adalah cutoff ratio yang dinyatakan dalam rumus sebagai berikut:

$$r_c = \frac{V_3}{V_2}$$

e. *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.

4. Soal Evaluasi

Kerjakan soal latihan yang diberikan dan jawablah pertanyaan dengan benar dan tepat agar dapat meningkatkan pemahaman pada materi ini.

1. Kenapa pada mesin diesel tidak menggunakan busi sebagai pematik untuk menginisiasi awal pembakaran?
2. Jelaskan yang dimaksud dengan *diesel knocking* dan bagaimana cara mengatasinya?
3. Jelaskan tahapan pembakaran pada mesin diesel?
4. Jelaskan secara ringkas prinsip kerja mesin diesel empat langkah?
5. Jelaskan secara ringkas siklus diesel pada mesin diesel?

5. Daftar Pustaka

- Ganesan, V. (2003). *Internal combustion engine* (second edi). Tata McGraw-Hill Pub.
- Ganesan, V. (2007). *IC engines* (Third edit). Tata McGraw-Hill Pub.
- Ganesan, V. (2017). *IC Engines Fourth Edition*. Tata McGraw Hill Education Private Limited.
- Heywood, J. B. (1988). Internal Combustion Engine Fundamentals. In *McGrawHill series in mechanical engineering* (Vol. 21). <https://doi.org/10987654>
- Kusairi Samlawi, A. (2017). *Buku Ajar Teknik Pembakaran*. Universitas Lambung Mangkurat.
- Lackner, M., Palotás, Á. B., & Winter, F. (2010). *Handbook of Combustion*. Markono Print Media Pte Ltd.
- Naryanto, R. F. (2021). Teknik Pembakaran. In M. K. Delimayanti (Ed.), *News.Ge*. Literasi Nusantara.
- Suryawan, A. A. A. (2019). *Teknik Pembakaran dan Penomena Knocking*. UNIVERSITAS UDAYANA.
- Turns, S. R. (2000). An introduction to combustion: concepts and applications. In *System* (Vol. 499, p. 411). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.121>

MODUL 10

TEKNIK PEMBAKARAN

Penyusun : Dr. Dori Yuvenda S.Pd.M.T.
Mata Perkuliahan : Teknik Pembakaran
Semester/SKS : 7/3
Topik : Teori Pembakaran pada Bahan Bakar Padat

1. Rambu-rambu Perkuliahan
 - a. Mahasiswa mengisi presensi kehadiran setiap perkuliahan.
 - b. Mahasiswa mempelajari modul setiap pertemuan sesuai dengan rencana pembelajaran semester (RPS).
 - c. Mahasiswa mengerjakan soal evaluasi setelah mempelajari modul pada setiap bab modul dalam rangka meningkatkan penguasaan pada materi.
2. Tujuan Perkuliahan
 - a. Dapat mengetahui konsep pembakaran pada bahan bakar padat.
3. Materi Perkuliahan

- a. Konsep pembakaran pembakaran pada bahan bakar padat

Proses pembakaran bahan bakar padat jauh lebih kompleks daripada bahan bakar cair ataupun gas, dimana pada umumnya bahan bakar padat mengalami 3 tahapan proses pembakaran yaitu; 1. *Drying* (pengeringan), 2. *Devolatilization* (penguapan unsur-unsur volatil) atau *pyrolysis*, dan 3. *Char burnout* (pembakaran arang)

- 1) Pengeringan

Pada tahap ini partikel bahan bakar dipanaskan di atas temperatur vaporasi. Proses ini berlangsung secara konveksi dengan melewati udara panas pada padatan. Air yang terkandung dalam bahan bakar terdiri dari dua bentuk, yang pertama yaitu air terikat, dimana air tertahan dalam ikatan kimiawi yang lemah atau

terperangkap dalam struktur mikro bahan bakar. Tahap kedua adalah air tak terikat yaitu berasal dari air terikat yang berlebih atau air yang terdapat pada struktur makro padatan (pada pori-pori padatan).

2) Devolatilisasi/Pirolisis

Setelah kadar air dihilangkan maka temperatur dari partikel semakin meningkat sehingga partikel mulai terdekomposisi dan terjadi proses pelepasan zat-zat yang mudah menguap (*volatile matter*). *Volatile matter* merupakan bagian dari bahan bakar padat yang bisa terbakar. Bagian ini terdiri dari bagian yang ringan sampai berat. Bagian yang ringan akan menguap terlebih dahulu. *Volatile matter* keluar rongga bahan bakar dan memenuhi pori-pori. Hal ini menyebabkan oksigen dari luar tidak dapat masuk kedalam partikel. Pada tahap ini terjadi pemanasan partikel tanpa kehadiran oksigen yang disebut pirolisis. Sebagian dari gas hasil pirolisis bereaksi dengan air dan gas produk pirolisis lain. Hasil pirolisis terbakar dan membentuk nyala yang memperbesar devolatilisasi. Pada bagian yang lain uap air akan mengalir keluar melewati pori-pori sehingga temperatur pembakaran turun. Setelah seluruh air keluar maka nyala api akan lebih besar dan temperatur naik.

3) Pembakaran Char (Karbon Tetap)

Char atau *fixed carbon* merupakan gumpalan matriks karbon dengan sedikit hidrogen yang terdapat pada senyawa bahan bakar. Bagian ini sangat berpori yang berarti luas permukaan bagian dalam sangat besar. Jika terdapat oksigen maka akan terjadi pembakaran pada char. Char memiliki nilai kalor yang paling tinggi dibandingkan dengan *volatile matter*. Ketika terjadi pembakaran pada char, maka temperatur akan naik lebih tinggi dari sekitarnya. Proses ini merupakan tahapan akhir dari proses pembakaran pada bahan bakar padat. Temperatur nyala adalah temperatur pada saat jumlah zat mudah terbakar meningkat secara cepat dan tepat sebelum bereaksi dengan oksigen secara kimia. Setiap unsur memiliki temperatur nyala yang

berbeda, misalnya karbon (C) memiliki temperatur nyala sekitar 343 deg C. Pada kondisi nyata, setiap zat tidak terbakar secara tepat pada temperatur nyala. Bentuk ruang bakar, rasio udara terhadap bahan bakar dan beragam dampak dari campuran zat yang mudah terbakar mempengaruhi temperatur nyala. Temperatur nyala bahan bakar batubara umumnya berada pada temperatur nyala karbon. Komponen volatil pada bahan bakar batubara akan terlepas seiring dengan peningkatan temperatur, namun tidak akan terbakar sebelum temperatur nyala tercapai.

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 $50\sim 100^{\circ}\text{C}$ dan kecepatan 25m/s (kecepatan ini harus lebih besar dari *flame speed*. Bentuk api dikontrol dengan jumlah udara sekunder dan posisi burner.

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

4. Soal Evaluasi

Kerjakan soal latihan yang diberikan dan jawablah pertanyaan dengan benar dan tepat agar dapat meningkatkan pemahaman pada materi ini.

1. Jelaskan konsep pembakaran pada bahan bakar padat?
2. Jelaskan secara ringkas tahapan pembakaran menggunakan bahan bakar padat?
3. Jelaskan jenis-jenis *furnace* yang digunakan sebagai peralatan pembakaran bahan bakar padat?

5. Daftar Pustaka

- Ganesan, V. (2003). *Internal combustion engine* (second edi). Tata McGraw-Hill Pub.
- Ganesan, V. (2007). *IC engines* (Third edit). Tata McGraw-Hill Pub.
- Ganesan, V. (2017). *IC Engines Fourth Edition*. Tata McGraw Hill Education Private Limited.
- Heywood, J. B. (1988). Internal Combustion Engine Fundamentals. In *McGrawHill series in mechanical engineering* (Vol. 21). <https://doi.org/10987654>
- Kusairi Samlawi, A. (2017). *Buku Ajar Teknik Pembakaran*. Universitas Lambung Mangkurat.
- Lackner, M., Palotás, Á. B., & Winter, F. (2010). *Handbook of Combustion*. Markono Print Media Pte Ltd.
- Naryanto, R. F. (2021). Teknik Pembakaran. In M. K. Delimayanti (Ed.), *News.Ge. Literasi Nusantara*.
- Turns, S. R. (2000). An introduction to combustion: concepts and applications. In *System* (Vol. 499, p. 411). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.121>

MODUL 11

TEKNIK PEMBAKARAN

Penyusun : Dr. Dori Yuvenda S.Pd.M.T.
Mata Perkuliahan : Teknik Pembakaran
Semester/SKS : 7/3
Topik : Teori Pembakaran *Fluidized Bed Combustion*

1. Rambu-rambu Perkuliahan
 - a. Mahasiswa mengisi presensi kehadiran setiap perkuliahan.
 - b. Mahasiswa mempelajari modul setiap pertemuan sesuai dengan rencana pembelajaran semester (RPS).
 - c. Mahasiswa mengerjakan soal evaluasi setelah mempelajari modul pada setiap bab modul dalam rangka meningkatkan penguasaan pada materi.
2. Tujuan Perkuliahan
 - a. Dapat mengetahui konsep pembakaran *fluidized bed combustion*
3. Materi Perkuliahan
 - a. Konsep pembakaran *fluidized bed combustion*

Fluidized bed combustor (FBC) merupakan salah satu teknologi pembakaran yang mempunyai keunggulan mengkonversi berbagai jenis bahan bakar baik sampah, limbah, biomassa ataupun bahan bakar fosil berkalori rendah. Teknologi ini menggunakan konsep turbulensi benda padat yang terjadi pada proses pembakaran, dimana dalam mekanisme pembakarannya tersebut terjadi perpindahan panas dan massa yang tinggi. Teknologi ini telah diperkenalkan sejak abad kedupuluh dan telah diaplikasikan dalam banyak sektor industri dan pada tahun-tahun belakangan ini telah diaplikasikan untuk mengkonversi biomassa menjadi energi.

Fluidized bed combustor memiliki bentuk seperti sebuah tungku pembakar biasa, namun memiliki media pengaduk berupa pasir. Pasir yang digunakan bisa pasir kuarsa ataupun pasir silika. Fungsi pasir ini berfungsi sebagai penyimpan dan pendistribusi panas, sehingga panas yang dihasilkan dapat merata. *Fluidized bed combustor* memiliki temperatur pengoperasian antara 700 oC sampai 900oC sehingga bahan bakar seperti limbah dapat habis terbakar hingga menjadi abu yang tidak berbahaya bagi lingkungan.

Teknologi ini dapat menjadi salah satu teknologi pembakaran limbah partikel atau padatan dalam jumlah yang relatif besar secara cepat. Emisi yang dihasilkan pembakaran juga relatif kecil sehingga menekan polusi udara yang mungkin timbul akibat pembakaran yang kurang sempurna. Teknologi *fluidized bed combustor* ini juga lebih baik bila dibandingkan dengan teknologi pembakaran biomassa yang konvensional, karena laju pembakaran yang cukup tinggi, dan juga dapat membakar limbah biomassa yang berkadar air tinggi. Namun masih ada beberapa kelemahannya seperti kurangnya penelitian yang dilakukan terhadap teknologi *fluidized bed combustor* ini di Indonesia.

b. Karakteristik *fluidized bed*

Adapun karakteristik dari *fluidized bed* adalah sebagai berikut:

- 1) Tekanan statis pada ketinggian apapun sama dengan berat *fluidized bed* per unit luas penampang di atas tingkat tersebut.
- 2) Benda yang lebih padat dari pada kerapatan bed akan tenggelam, sementara bola bulu tangkis akan mengapung.
- 3) Padatan dari *bed* dapat dikeringkan atau dikosongkan seperti cairan melalui lubang di bagian bawah atau di sisi wadah. Arus aliran padat mirip dengan aliran air.
- 4) Permukaan *bed* selalu rata secara horisontal, walaupun posisi bed dirubah rubah menjadi miring.

5) Partikel pada *bed* tercampur dengan baik, dan *bed* akan memiliki suhu yang hampir seragam di seluruh bagian pada saat dipanaskan.

c. Klasifikasi Mode Fluidisasi

Fluidisasi adalah sekelompok partikel padat yang berada dalam kontak yang akrab dengan fluida. Keadaan ini dibentuk dengan mengalirkan fluida cair atau gas dengan kecepatan yang cukup tinggi sehingga menyebabkan partikel-partikel itu terpisah satu sama lain dan melayang-layang naik ke atas mengikuti semburan fluida yang melewati pipa pendistribusian yang semata-mata karena ditunjang oleh fluida itu saja. Pembakaran sistem fluidisasi dioperasikan dengan cara memfluidisasikan partikel bahan bakar dengan gas pendorong yang berupa udara/oksigen. Gas pendorong memiliki dua fungsi, yaitu sebagai reaktan dan sebagai medium fluidisasi. Pada sistem fluidisasi ini, udara dan bahan bakar bercampur pada lapisan alas yang terdiri dari padatan inert berupa pasir. Keberadaan padatan inert tersebut sangat penting karena berfungsi sebagai medium penyimpanan panas. Menurut Kunii dkk menyatakan mode fluidisasi dapat digolongkan berdasarkan atas kecepatan fluida, antara lain:

1) *Fixed bed*

Yaitu lapisan partikel padat (*bed*) tidak bergerak yang terjadi jika kecepatan fluida terlalu rendah sehingga tidak mampu menimbulkan fluidisasi. Fluida yang mengalir hanya sebagian kecil mengalir melalui celah-celah antara partikel-partikel akibatnya partikel-partikel tidak bergerak atau takterfluidisas. Pada kecepatan fluida yang rendah, kejatuhan tekanan pada lapisan alas sebanding dengan kecepatan fluida.

2) *Incipient of minimum fluidization*

Yaitu terbentuknya keadaan lapisan yang partikel-partikelnya melayang-layang, akibat kecepatan fluida berangsur-angsur dinaikan, dan kejatuhan tekanan aliran fluida terhadap penampang melintang

lapisan partikel (*bed*) juga naik. Keadaan ini disebabkan gaya gesek antara partikel dan fluida tidak seimbang terhadap berat partikel, komponen gaya vertikal sebagai gaya tekan antara partikel yang berdekatan hilang, dan kejatuhan tekanan setiap penampang melintang (*bed*) sama dengan berat fluida dan partikel. Aliran fluida ini dinamakan “terfluidisasi”. Batasan kejatuhan tekanan pada keadaan ini sama dengan jumlah berat fluida dan partikel sedangkan kecepatan fluida yang terjadi adalah *minimum fluidization velocity*.

3) *Bubbling fluidization*

Yaitu suatu keadaan gelembung gas/udara mulai terbentuk dalam lapisan partikel, akibat kecepatan gas berangsur-angsur dinaikkan di atas kecepatan minimum fluidisasi, dan kejatuhan tekanan juga bertambah. Pada keadaan ini, kejatuhan tekanan sama dengan berat lapisan partikel. Selama kecepatan gas/udara dinaikkan, terjadi pembentukan gelembung menjadi lebih banyak, turbulensi yang kuat, pencampuran cepat dan gerakan partikel bertambah besar akibatnya volume lapisan partikel tidak melebihi volume minimum fluidisasi. Lapisan partikel padat menampilkan sifat cairan mendidih dan terlihat seperti fluida “lapisan gelembung fluida/*bubbling fluidized bed*”. Pada keadaan ini membuat lapisan alas partikel tidak berekspansi. Jika partikel pasir dalam keadaan terfluidisasikan dipanaskan hingga ke suhu nyala batubara, kemudian batubara diinjeksikan secara terus menerus ke *bed*, batubara akan terbakar dengan cepat dan *bed* akan mencapai suhu yang seragam. Pada kebanyakan proses fluidisasi dioperasikan pada daerah *bubbling fluidization*.

4) *Slugging*

Slugging adalah suatu keadaan lapisan partikel gelembung gas menyatu dan bergerak keatas akibat partikel-partikel diatas gelembung didorong ke atas membentuk gumpalan partikel besar, dan jatuh menyebar seperti hujan.

5) *Turbulent Fluidization*

Yaitu suatu keadaan permukaan atas lapisan partikel menghilang, dan membentuk gelembung gas/udara dari berbagai ukuran serta bentuk. Hal ini terjadi pada kecepatan gas yang tinggi.

4. Soal Evaluasi

Kerjakan soal latihan yang diberikan dan jawablah pertanyaan dengan benar dan tepat agar dapat meningkatkan pemahaman pada materi ini.

1. Jelaskan yang dimaksud dengan *fluidized bed combustion*?
2. Jelaskan karakteristik dari *fluidized bed combustion*?
3. Jelaskan secara ringkas klasifikasi mode fluidisasi pada *fluidized bed combustor*?

5. Daftar Pustaka

Lackner, M., Palotás, Á. B., & Winter, F. (2010). *Handbook of Combustion*. Markono Print Media Pte Ltd.

Turns, S. R. (2000). An introduction to combustion: concepts and applications. In *System* (Vol. 499, p. 411). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.121>