

MOTOR BAKAR

Pada Mesin Konversi Energi



Tim Penulis:

Rovida C. Hartantrie, I Gede Eka Lesmana,
Arif Riyadi T. K., Reza Abdu Rahman,
Agung Nugroho



MOTOR BAKAR

Pada Mesin Konversi Energi

Tim Penulis:

Rovida C. Hartantrie, I Gede Eka Lesmana,
Arif Riyadi T. K., Reza Abdu Rahman,
Agung Nugroho



MOTOR BAKAR PADA MESIN KONVERSI ENERGI

Tim Penulis:

**Rovida C. Hartantrie, I Gede Eka Lesmana, Arif Riyadi T. K.,
Reza Abdu Rahman, Agung Nugroho.**

Desain Cover:

Usman Taufik

Tata Letak:

Handarini Rohana

Editor:

Reza Abdu Rahman, S.Pd., M.T.

ISBN:

978-623-459-272-6

Cetakan Pertama:

Desember, 2022

Hak Cipta 2022, Pada Penulis

Hak Cipta Dilindungi Oleh Undang-Undang

Copyright © 2022

by Penerbit Widina Bhakti Persada Bandung

All Right Reserved

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit.

PENERBIT:

WIDINA BHAKTI PERSADA BANDUNG

(Grup CV. Widina Media Utama)

Komplek Puri Melia Asri Blok C3 No. 17 Desa Bojong Emas
Kec. Solokan Jeruk Kabupaten Bandung, Provinsi Jawa Barat

Anggota IKAPI No. 360/JBA/2020

Website: www.penerbitwidina.com

Instagram: [@penerbitwidina](https://www.instagram.com/penerbitwidina)

Telpon (022) 87355370

KATA PENGANTAR

Motor bakar merupakan salah satu aplikasi terpenting dari mesin konversi energi. Dengan banyaknya penggunaan motor bakar sebagai mesin penghasil gerak yang mengubah energi kimia pada bahan bakar menjadi energi gerak, maka pembahasan motor bakar pada Mata Kuliah Mesin Konversi Energi layak untuk diberi perhatian lebih. Motor bakar bekerja dengan menerapkan konsep termodinamika yang menjadi prasyarat mata kuliah mesin konversi energi sehingga kajian pada modul ini merupakan aplikasi dari mata kuliah termodinamika. Modul berbentuk teks ini merupakan pegangan tambahan dari buku utama terkait dengan Motor Bakar dan Mesin Konversi Energi. Kajian teoritis dan perhitungan detail dapat dipelajari pada modul ini. Pada modul ini, terdapat 5 (lima) Bab yakni:

1. Pengantar Konversi Energi
2. Pengantar Termodinamika
3. Pengantar Motor Bakar
4. Siklus 2 dan 4 Tak
5. Siklus Otto dan Diesel

Pengguna diharapkan melakukan proses pembelajaran secara berkesinambungan untuk memastikan capaian pembelajaran pada pokok materi ini. Materi yang disajikan mendukung untuk pembiasaan berpikir kritis dan juga inovasi berkelanjutan dengan mempelajari beberapa contoh kasus yang ada. Semoga dengan hadirnya bahan ajar ini diharapkan pengguna dapat memahami secara lebih komprehensif dan dapat memberikan manfaat yang lebih banyak bagi seluruh pengguna bahan ajar ini.

Tim Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	iv
BAB 1 PENGANTAR KONVERSI ENERGI	1
A. Tujuan Pembahasan Pengantar Konversi Energi	1
B. Materi Ajar	1
1. Energi	1
2. Sumber Energi	9
a. Sumber Energi dari Bumi	10
b. Sumber Energi dari Luar Bumi	11
3. Bahan Bakar	11
a. Minyak Bumi	12
b. Batubara	12
c. Bahan Bakar Gas	13
4. Mesin Konversi Energi	16
C. Latihan	17
BAB 2 PENGANTAR TERMODINAMIKA	19
A. Tujuan Pembahasan Pengantar Termodinamika	19
B. Materi Ajar	19
1. Sistem, Proses dan <i>Properties</i>	23
2. Zat Murni	28
3. Gas Ideal	30
4. Proses Termodinamika	34
a. Isobarik	34
b. Isotermal	34
c. Proses Isokhorik	35
5. Hukum Pertama Termodinamika	39
6. Hukum Kedua Termodinamika	40
7. Mesin Kalor	44
8. Siklus Carnot	49
9. Mesin Carnot	51
C. Latihan Bagian II	54

BAB 3 PENGANTAR MOTOR BAKAR	55
A. Tujuan Pembahasan Pengantar Motor Bakar	55
B. Materi Ajar.....	55
1. Klasifikasi Motor Bakar.....	55
2. Aplikasi Motor Bakar.....	58
3. Desain Mesin Dasar pada Motor Bakar Dalam	60
a. Mesin Rotasi-Motor Wankel	60
b. Mesin Rotasi-Turbin Gas Sistem Terbuka.....	64
c. Mesin Bolak-Balik-Motor Bensin dan Diesel	69
4. Konfigurasi Umum Mesin Bolak-Balik.....	70
5. Geometri Piston dan Silinder	73
BAB 4 SIKLUS 2 DAN 4 TAK	75
A. Tujuan Pembahasan Siklus 2 dan 4 Tak.....	75
B. Materi Ajar.....	75
1. Konsep Motor Bakar	75
2. Kelengkapan Komponen Motor Bakar Tipe Silinder	76
3. Proses Termodinamika pada Motor Bakar	78
4. Langkah pada Motor Bakar	78
a. Langkah Hisap.....	79
b. Langkah Kompresi	79
c. Langkah Usaha.....	80
d. Langkah Buang.....	81
5. Mekanisme Katup	82
6. Siklus 4 dan 2 Tak	83
a. Proses Kerja Siklus 4 Tak.....	85
b. Proses Kerja Siklus 2 Tak.....	85
C. Latihan	86
BAB 5 SIKLUS OTTO DAN DIESEL	89
A. Tujuan Pembahasan Siklus Otto dan Diesel	89
B. Materi Ajar.....	89
1. Parameter Kerja Mesin	89
2. Kerja (<i>Work</i>)	92
3. Asumsi Udara Standar & MEP.....	93
4. Siklus Otto	95

5. Siklus Diesel	105
C. Latihan	109
REFERENSI	112
KUNCI JAWABAN	113
PROFIL PENULIS	131



PENGANTAR KONVERSI ENERGI

A. TUJUAN PEMBAHASAN PENGANTAR KONVERSI ENERGI

Bagian I dari modul ini membahas tentang pengantar energi dan konversi energi, khususnya tentang sumber energi dan konsep mesin konversi energi. Melalui pembahasan ini, mahasiswa diharapkan mampu:

1. Menjabarkan sumber dan kategori energi
2. Mengklasifikasikan bentuk dan model energi
3. Menyeleksi prinsip konversi energi pada perangkat mesin konversi energi

B. MATERI AJAR

1. Energi

Energi merupakan suatu istilah yang sangat umum digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Pendekatan definisi energi yang lebih spesifik dan terukur diperlukan untuk memahami definisi energi dalam bidang sains dan teknik. Sebagai contoh, mengacu kepada konsep umum tentang energi yang disebut sebagai “kapasitas dalam melakukan kerja”, akan sulit dibuktikan dalam bidang sains karena kata “kerja (*work*)” memiliki definisi sendiri yakni “besarnya gaya dalam jarak tertentu”. Sehingga jika energi hanya disamakan dengan kapasitas melakukan kerja, maka pada satu titik jumlah energi sama dengan jumlah kerja. Tentunya hal ini tidak mungkin karena mengacu ke hukum kedua termodinamika, sebagian dari energi

tidak bisa melakukan kerja yang diharapkan karena adanya kerugian sistem.

Pendekatan energi yang lebih ideal seperti yang dinyatakan oleh Nobel Laureate Richard Feynman. Menurutnya, *“energi bukan sesuatu yang dapat didefinisikan dengan jelas, namun lebih sebagai suatu kuantitas yang harus diperhitungkan secara komprehensif menggunakan standar-standar acuan yang spesifik”*. Definisi tersebut cukup memberikan penjelasan yang lebih bisa diterima untuk bidang teknik yakni energi sebagai kuantitas. Kuantitas hanya digunakan untuk menyatakan suatu nilai atau kadar, kuantitas tidak dideskripsikan sebagai suatu fungsi yang jelas. Sebagai contoh: kuantitas air pada gelas tersebut 400 ml, kuantitas tersebut tidak menjelaskan air yang ada akan atau dapat digunakan untuk apa.

Pemahaman energi seperti yang dinyatakan oleh Feynman sangat sesuai dengan hukum termodinamika pertama yang menyatakan energi tidak bisa diciptakan atau dimusnahkan, energi hanya bisa diubah dari satu bentuk ke bentuk lain. Pemahaman energi sebagai kuantitas tentunya sangat sesuai dengan kaidah termodinamika tersebut. Hal ini perlu dipahami dengan sangat baik karena pembahasan terkait dengan konversi energi akan sangat erat dengan pemahaman tentang “kuantitas”. Bagaimana nilai energi bisa diubah, bagaimana cara mengubah energi tersebut menggunakan suatu mesin, apakah seluruh nilai yang diubah dapat menghasilkan kerja atau bentuk energi yang diharapkan sepenuhnya. Lebih lanjut, pemahaman energi ini juga untuk menghindari konsep *“free energy”* atau *“perpetual motion”* yang sangat menyesatkan karena hal ini mutlak bertentangan dengan konsep termodinamika.

Satuan energi menurut SI adalah Joule (J) yang mana nilai ini juga digunakan untuk menyatakan satuan “kerja (*work*)”. Perbedaan yang sangat penting adalah jika energi = 1,000 J, maka tidak bisa dinyatakan sebagai kerja = 1,000 J juga. Pernyataan tersebut berkaitan dengan kerugian-kerugian dalam sistem konversi energi yang merubah energi masukan menjadi kerja. Pendekatan yang lebih tepat untuk “kerja (*work*)” dengan unit yang disamakan dengan energi (Joule atau J) adalah *“work done”* atau kerja yang selesai/berhasil dilakukan. Untuk melihat

perbedaan yang jelas untuk satuan Joule sebagai “energi”, “kerja (*work*)” dan “kerja selesai (*work done*)” perhatikan dua contoh berikut.

Pada kasus sistem termal

“Untuk menaikkan suhu air 1 °C (misalnya dari 30 °C menjadi 31 °C) dengan massa 1 kg, dibutuhkan energi sebesar 4.2 kJ”

Berdasarkan data di atas, maka dengan mudah kita dapat memperhitungkan berapa energi yang dibutuhkan untuk membuat air dengan massa 1 kg mendidih (100 °C) pada kondisi STP (*Standard Temperature Pressure*) dari suhu awal 30 °C yakni 294 kJ. Pertanyaannya adalah: Apakah bahan bakar atau listrik yang digunakan akan sama dengan total energi yang dibutuhkan tersebut? Jawabannya tidak. Pada aplikasinya, dibutuhkan energi yang lebih besar karena digunakan juga untuk memanaskan wadah, kerugian energi akibat perbedaan suhu ruang dan kerugian dari kompor yang digunakan. Jika data tersebut diurai, maka akan terlihat lebih jelas, yakni:

- a. Energi yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu air pada kasus di atas adalah 294 kJ
- b. Kompor (asumsikan kompor listrik) melakukan kerja (*work*) untuk memanaskan air tersebut lebih dari 294 kJ. Katakan total kerugian kompor sebesar 30%, sehingga total kompor melakukan kerja (*work*) adalah $294 \text{ kJ} + (30\% \times 294 \text{ kJ}) = 382.2 \text{ kJ}$
- c. Kompor melakukan “kerja selesai (*work done*)” sebesar 294 kJ (sesuai dengan energi yang dibutuhkan untuk berhasil menaikkan air pada kondisi di atas)
- d. Total energi yang masuk ke kompor adalah 382.2 kJ

Harap perhatikan dan baca lagi contoh di atas berkali-kali untuk memahami perbedaan antara energi, work, dan work done.

Pada kasus sistem mekanik (perpindahan) sederhana

“Untuk memindahkan benda persegi dengan massa 10 kg pada percepatan 2 m/s^2 sejauh 1 meter dibutuhkan energi sebesar 20 N.m atau 20 J”

Berdasarkan data di atas, maka dengan mudah kita dapat memperhitungkan berapa energi yang dibutuhkan jika ingin memindahkan benda tersebut sejauh 1 km yakni 20,000 J atau 20kJ. Pertanyaannya: jika benda tersebut didorong oleh manusia, apakah energi yang dikeluarkan oleh manusia tersebut sama dengan 20kJ? Jawabnya tentu tidak.

Adanya koefisien gesek permukaan, atau bahkan gesekan dengan udara, gesekan antara alas kaki dengan permukaan tanah membutuhkan energi. Katakan dibutuhkan energi ekstra untuk melawan kerugian (gesekan-gesekan tersebut) dengan total 20% dari energi yang dibutuhkan untuk benda tersebut. Maka, dapat ditulis dengan lebih jelas sebagai berikut:

- a. Energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan benda tersebut pada kondisi di atas adalah 20 kJ
- b. Manusia yang melakukan kerja (*work*) untuk menggerakkan benda tersebut membutuhkan energi sebesar $20\text{kJ} + (20\% \times 20\text{kJ}) = 24 \text{ kJ}$. Maka, total kerja (*work*) yang dilakukan manusia tersebut adalah 24 kJ
- c. Manusia melakukan “kerja selesai (*work done*)” sebesar 20 kJ (sesuai dengan energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan benda tersebut pada kondisi yang disebutkan)
- d. Total energi yang dikeluarkan manusia adalah sama dengan jumlah kerja (*work*) yakni 24 kJ

Definisi energi pada hakikatnya jauh lebih luas lagi, namun konsep di atas sudah cukup mencakup aspek penting sebagai pengetahuan utama untuk memahami konsep mesin konversi energi. Pemahaman dari konsep energi pada bagian definisi ini harus dipahami dan diresapi secara kuat karena menjadi modal penting untuk pembahasan berikutnya.

Hampir seluruh kegiatan yang dilakukan makhluk hidup memerlukan energi. Secara istilah, pengertian energi didefinisikan sebagai kemampuan melakukan suatu usaha. Sedangkan usaha sendiri merupakan gaya yang diberikan untuk melakukan perpindahan. Dari kedua definisi tersebut, seolah-olah pengertian energi sangat sempit karena energi hanya digunakan untuk melakukan perpindahan. Padahal alam menyediakan berbagai macam energi dengan bentuk dan jenis agar dapat dimanfaatkan sesuai dengan kebutuhan. Energi yang disediakan oleh alam tidak hanya

berupa tanah, air, udara namun ada berbagai benda dan mineral di dalam tanah juga dapat dimanfaatkan sebagai energi.

Berdasarkan bentuknya, energi dapat dikategorikan sebagai energi yang bergerak (energi transisional) dan energi tersimpan. Energi transisional merupakan energi yang dapat berpindah dan bergerak melewati batas sistem. Energi tersimpan memerlukan media atau alat untuk memanfaatkan energinya dan biasanya diubah menjadi energi transisional. Berikut ini beberapa jenis energi:

1) Energi Mekanik

Energi mekanik merupakan energi yang dapat diubah secara langsung menjadi kerja mekanis seutuhnya dengan menggunakan alat mekanis seperti turbin, *crane* pengangkat beban atau alat penggerak lainnya. Semua energi yang memiliki kemampuan bergerak pasti memiliki energi mekanik. Definisi lain tentang energi mekanik yaitu jumlah antara energi kinetik (E_k) dan energi potensial (E_p).

$$E_M = E_P + E_K \quad (1.1)$$

- a. Energi kinetik yaitu energi yang dimiliki suatu benda akibat dari gerak benda itu sendiri. Dapat pula disederhanakan sebagai “energi yang dimiliki oleh benda yang bergerak”. Berdasarkan pengertian tersebut dapat dijabarkan bahwa suatu benda pasti memiliki massa (m) dan saat benda bergerak, ada pengaruh kecepatan (v) di dalamnya. Jika dituliskan kedalam Bahasa matematika, energi kinetik (E_K) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.2)$$

- b. Energi Potensial yaitu energi yang dimiliki benda karena kedudukannya dari suatu acuan ketinggian tertentu. Kedudukan benda disini, bukan hanya benda yang berada pada suatu ketinggian tertentu seperti bola yang diletakkan di atas pohon. Walaupun memiliki ketinggian, bola tersebut tidak memiliki energi potensial. Namun, jika bola tersebut pada akhirnya jatuh dari pohon, saat terjatuh itulah bola memiliki energi potensial. Dengan kata lain, energi potensial dimiliki oleh benda yang bergerak secara vertikal baik dari atas ke bawah maupun sebaliknya. Energi potensial (E_p) dipengaruhi

oleh massa benda (m), ketinggian benda (h) dan kecepatan gravitasi (g). Untuk mengetahui besarnya energi potensial, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$E_p = mgh \quad (1.3)$$

2) Energi Panas

Energi panas merupakan energi yang terjadi karena adanya perbedaan temperatur. Secara alami, energi panas dapat dihasilkan oleh pergerakan partikel dalam suatu zat yang mengalami gesekan sehingga menghasilkan panas. Sedangkan semua benda atau material yang dapat menghasilkan panas disebut sumber panas. Besarnya energi panas *sensible* dipengaruhi oleh beda temperatur (ΔT), *specific heat* (c_p) dan massa suatu benda (m). Perhitungan energi panas *sensible* dapat ditulis sebagai berikut:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1) \quad (1.4)$$

Berdasarkan asas *black* dan hukum ke-0 termodinamika, jika terdapat dua benda atau lebih dengan temperatur yang berbeda, saat kedua benda tersebut digabungkan maka benda yang temperaturnya lebih tinggi akan melepaskan kalor dan benda yang temperaturnya lebih rendah, menerima kalor yang dilepas tersebut. Jika kedua benda tersebut didekatkan dalam jangka waktu yang cukup lama, maka temperatur kedua benda tersebut lama-lama akan sama (*equilibrium*). Dengan kata lain, kalor yang dilepas oleh benda pertama akan sama dengan kalor yang diterima oleh benda kedua ($Q_{lepas} = Q_{terima}$)

3) Energi Listrik

Merupakan energi yang dihasilkan oleh muatan listrik yang bergerak dinyatakan dalam *watt*-jam (Wh) atau *kilowatt*-jam (kWh). Energi ini berkaitan dengan arus dan pergerakan muatan elektron. Akumulasi muatan elektron pada pelat kapasitor merupakan hasil dari medan listrik yang disimpan sebagai energi medan elektrostatik. Energi medan listrik ekuivalen dengan energi medan elektromagnetik.

4) Energi Elektromagnetik

Energi elektromagnetik merupakan bentuk energi yang berkaitan dengan radiasi elektromagnetik. Energi radiasi dinyatakan dalam satuan energi yang sangat kecil, yaitu *elektron-volt* (eV) atau mega *elektron-volt* (Mev), yang juga digunakan dalam evaluasi energi nuklir. Radiasi elektromagnetik merupakan bentuk energi murni dan tidak berkaitan dengan massa. Radiasi ini merupakan energi transmisi yang bergerak dengan kecepatan cahaya (c). Energi transmisi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = h \cdot f \quad (1.5)$$

Dimana:

- E = energi transmisi (J)
- h = konstanta *plank* ($6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$)
- f = frekuensi (s^{-1})
- λ = panjang gelombang (m)

Energi transmisi semakin besar atau semakin *energetic* apabila panjang gelombangnya semakin pendek dan frekuensinya semakin tinggi. Sumber radiasi atau panjang gelombang elektromagnetik dibagi atas beberapa kelas salah satunya adalah sinar *gamma* (γ) yang merupakan jenis radiasi paling *energetic* dari energi elektromagnetik. Sinar X dihasilkan oleh keluarnya orbit elektron.

5) Energi Kimia

Energi kimia merupakan energi yang keluar sebagai hasil interaksi elektron dimana dua atau lebih atom/molekul berkombinasi sehingga menghasilkan senyawa kimia yang stabil. Energi kimia hanya dapat terjadi dalam bentuk energi tersimpan. Jika energi dilepaskan dalam suatu reaksi kimia, reaksi ini disebut reaksi eksotermis (*exothermic*), dan sebaliknya jika energi diserap dalam suatu reaksi kimia maka reaksi disebut reaksi endotermis (*endothermic*). Sumber energi yang terkandung pada bahan bakar yang mana sangat penting bagi manusia adalah reaksi kimia eksotermis yang biasa disebut sebagai reaksi pembakaran. Reaksi Pembakaran melibatkan oksidasi dari bahan bakar fosil.

6) Energi Nuklir

Energi nuklir adalah energi dalam bentuk tersimpan yang dapat dilepas akibat interaksi partikel dengan atau di dalam inti atom. Energi nuklir biasanya dinyatakan dalam satuan juta-elektron per reaksi. Energi ini dilepas sebagai hasil usaha partikel-partikel untuk memperoleh konfigurasi yang lebih stabil. Energi nuklir juga merupakan energi yang dihasilkan dari reaksi peluruhan bahan radioaktif. Bahan radioaktif sifatnya tidak stabil, sehingga bahan ini dapat meluruh menjadi molekul yang stabil dengan mengeluarkan sinar alpha, sinar beta, sinar gamma dan mengeluarkan energi yang cukup besar. Energi yang dihasilkan dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik ataupun untuk keperluan pengobatan dan lain-lain.

Contoh Kasus

Seorang pengrajin besi membuat tapal kuda di atas bara api dan mendinginkannya sesaat pada suhu ruangan. Untuk mempercepat proses pendinginan, tapal kuda dengan massa 0.4 kg dan temperatur 190 °C tersebut dimasukkan ke dalam bejana yang diisi dengan air. Setelah diperkirakan kondisi setimbang, temperatur air diukur dengan termometer dan menunjukkan angka 35°C. Dengan mengabaikan pengaruh udara sekitar dan panas yang merambat pada bejana, analisis apa yang terjadi pada tapal kuda dan air tersebut? Tentukan pula besarnya kalor yang dilepas dan diterima pada kasus tersebut?

Penyelesaian:

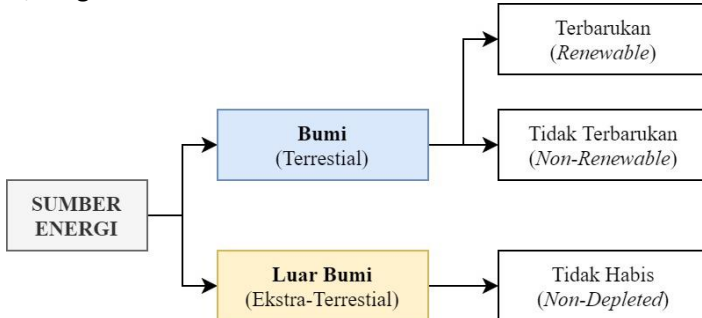
Berdasarkan penjelasan dari soal, tapal kuda memiliki temperatur lebih tinggi dari pada air yaitu sebesar $T_1 = 190^\circ\text{C}$. Karena memiliki temperatur tinggi, saat dimasukkan ke dalam air yang temperaturnya lebih rendah maka tapal kuda tersebut melepaskan kalor dan kemudian kalor tersebut diserap oleh air sehingga temperatur air menjadi meningkat. Setelah didiamkan beberapa saat hingga mencapai kondisi setimbang yang artinya temperatur air dan temperatur tapal kuda sama yaitu sebesar $T_2 = 35^\circ\text{C}$. Karena kondisi setimbang maka besarnya kalor yang dilepas oleh tapal kuda sama dengan kalor yang diterima oleh air. Untuk menghitung besarnya kalor yang diterima oleh air dan kalor yang dilepas tapal kuda,

dapat dilakukan dengan menghitung kalor yang dilepas tapal kuda. Dengan massa tapal kuda (m) = 0.4 kg dan dari tabel sifat material didapat besarnya *specific heat* (c)= 450 J/kg°C maka:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{lepas}} &= Q_{\text{terima}} \\
 &= m_{\text{tapal kuda}} c_{\text{tapal kuda}} (T_1 - T_2) \\
 &= 0.4 \text{ kg} \cdot 450 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \cdot (190 - 35)^\circ\text{C} \\
 &= 27900 \text{ J} \\
 &= 27.9 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

2. Sumber Energi

Berdasarkan sumbernya, energi dapat dibedakan menjadi dua: *terrestrial* atau energi yang berasal dari bumi dan energi yang berasal dari luar bumi yang disebut *extraterrestrial*. Sumber energi dari bumi dikategorikan menjadi energi terbarukan (*renewable*) atau *non-depleted* energi dan energi tak terbarukan (*non-renewable*) atau *depleted energy*. Sumber energi yang *renewable* atau dapat diperbarui, seperti energi kayu, biomassa, biogas.



Gambar 1.1 Klasifikasi Sumber Energi

Sumber energi dari luar bumi, misalnya energi surya dan energi sinar kosmis yang sifatnya tidak habis atau *non-depleted energy resource*. Sedangkan energi seperti minyak bumi, batubara dan gas alam adalah sumber energi yang bersifat tidak dapat diperbaharui atau *non-renewable* sehingga jika pemakaian dilakukan secara terus menerus dalam jangka waktu yang cukup lama, energi *non-renewable* dapat habis. Klasifikasi sumber energi dapat disederhanakan seperti pada Gambar 1.1.

a. Sumber Energi dari Bumi

Sumber energi dari bumi memiliki dua kategori yaitu energi yang dapat diperbarui biasa disebut dengan energi terbarukan dan energi yang tidak dapat diperbarui biasa disebut dengan energi tak terbarukan. Sumber energi yang tidak dapat diperbarui (*non-renewable*) merupakan sumber energi konvensional yang pada umumnya berupa energi fosil. Energi fosil terbentuk akibat penguraian makhluk hidup yang sudah mati dan terkubur di dalam perut bumi. Proses pembentukan energi fosil, memerlukan waktu yang sangat panjang hingga ratusan tahun. Karena tidak dapat dihasilkan oleh bumi dalam waktu yang singkat, jika penggunaannya dilakukan secara terus menerus maka suatu saat sumber energi ini akan habis.

Selain sumber energi yang berasal dari fosil, terdapat sumber energi lain misalnya energi nuklir. Sumber energi ini merupakan sumber energi hasil tambang yang lain, yang dapat dibudidayakan melalui proses fisi dan fusi. Energi nuklir, meskipun bersih, mengandung risiko bahaya radiasi yang mematikan sehingga pengolahannya harus ekstra hati-hati, di samping memerlukan modal yang besar untuk investasi awalnya. Sumber energi terbarukan (*renewable*) didefinisikan sebagai sumber energi yang dapat dengan cepat diisi kembali oleh alam. Berikut ini merupakan beberapa contoh sumber energi terbarukan yang ada di bumi:

1) Angin

Energi angin adalah energi yang dihasilkan oleh udara yang berhembus di permukaan bumi. Energi angin dapat diubah menjadi mekanik untuk menghasilkan usaha. Karena angin tidak menimbulkan polusi, maka banyak negara-negara membangun turbin angin sebagai sumber tenaga listrik tambahan.

2) Panas Bumi

Energi panas bumi adalah energi panas yang berasal dari dalam bumi. Energi panas ini dihasilkan di dalam inti bumi yang ditimbulkan oleh peristiwa peluruhan partikel-partikel radioaktif di dalam batuan. Inti bumi terbentuk dari magma yang mengalir menembus berbagai lapisan batuan di bawah tanah. Saat mencapai *reservoir* air bawah tanah, terbentuklah air panas bertekanan tinggi yang keluar ke

permukaan bumi melalui celah atau retakan di kulit bumi, maka timbul sumber air panas yang biasa disebut uap panas.

3) Energi Air

Air merupakan sumber energi karena dapat digunakan sebagai penggerak turbin air sehingga menghasilkan listrik. Secara alami, alat penggerak yang memanfaatkan tenaga air (*hydropower*) bergantung pada energi potensial air pada ketinggian tertentu. Energi potensial air dikonversikan menjadi energi mekanis melalui turbin air kemudian digunakan untuk menggerakkan generator sehingga menghasilkan energi listrik.

b. Sumber Energi dari Luar Bumi

Sumber energi dari luar bumi yang sangat berguna adalah energi elektromagnetik dari matahari serta energi potensial dari bulan yang menghasilkan aliran pasang. Secara alami, panas dari matahari yang diikuti dengan rotasi bumi menghasilkan beberapa arus konveksi besar dalam bentuk angin di atmosfer dan arus laut di samudra. Penyerapan energi matahari oleh laut juga menghasilkan energi potensial untuk memproduksi tenaga. Penguapan permukaan air yang akan menimbulkan awan dan pada akhirnya menghasilkan hujan sehingga dapat menjadi sumber energi hidroelektrik atau tenaga air. Pemanfaatan energi matahari juga dapat menggunakan alat konversi energi dimana energi matahari yang diperoleh dari cahaya panas matahari diubah menjadi listrik.

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

3. Bahan Bakar

Sumber energi yang tersedia di Bumi sebagian diolah lagi sebagai bahan bakar untuk menggerakkan motor bakar atau mesin kalor. Bahan bakar tersebut, sebagian berasal dari sumber energi yang dapat diperbarui dan sebagian lagi dari sumber energi yang tidak dapat diperbarui. Bahan

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

a. Minyak Bumi

Minyak bumi (*petroleum*) dianggap berasal dari kehidupan laut yang membusuk sebagian. Menurut teori, minyak bumi berasal dari sisa-sisa binatang kecil dan tumbuhan yang hidup di laut jutaan tahun yang lalu yang mengendap dan mendapat tekanan dari lempengan bumi sehingga secara alami larut dan berubah menjadi minyak bumi. Minyak bumi atau minyak mentah adalah komposisi dari berbagai senyawa organik. Analisis ultimasi semua minyak mentah menunjukkan nilai yang cenderung konstan. Fraksi massa karbon berkisar antara 84 hingga 87%, fraksi massa hidrogen berkisar antara 11 hingga 16%, jumlah fraksi oksigen dan nitrogen berkisar antara 0 hingga 7%, dan fraksi massa sulfur berkisar antara 0 hingga 4%.

b. Batubara

Batubara adalah batuan sedimen yang berasal dari material organik (*organoclastic sedimentary rock*), yang memiliki kandungan utama berupa karbon, hidrogen dan oksigen. Batubara ini merupakan hasil akumulasi dan material organik pada suatu lingkungan pengendapan tertentu. Batubara yang kita kenal dibentuk dari sisa-sisa tumbuhan yang terkubur di dasar rawa selama jutaan tahun yang lalu. Pertama, sisa-sisa tumbuhan berubah menjadi bahan yang padat disebut gambut akibat tekanan dan pemanasan dari lapisan bagian atas. Tumbuhan yang padat ini tanpa adanya udara, dengan dipengaruhi oleh tekanan dan suhu tinggi selanjutnya akan berubah menjadi *turf* (tumbuhan lapuk), kemudian menjadi batubara cokelat, lalu menjadi *lignite*, kemudian menjadi batubara subbitumin, lalu menjadi bitumin, dan akhirnya menjadi batubara antrasitik. Dengan berlangsungnya proses *aging* (penuaan),

batubara akan menjadi keras, kandungan hidrogen dan oksigennya berkurang dan kandungan karbon meningkat.

c. Bahan Bakar Gas

Bahan bakar gas pada umumnya berasal dari sumber energi fosil maupun hasil sampingan dari pengolahan energi tersebut. Bahan bakar gas digolongkan menjadi gas alam, gas pabrik dan gas hasil sampingan. Penggolongan bahan bakar gas berdasarkan sumber dan proses pengolahannya terbagi dua yakni gas alam yang dihasilkan langsung dari sumber energi fosil dan berwujud gas dan gas pabrik ataupun gas hasil sampingan, bahan bakar gas didapatkan dari beberapa tahap pengolahan.

Gas alam merupakan satu-satunya gas yang langsung dihasilkan oleh sumber energi fosil. Biasanya, gas alam terperangkap di dalam lapisan batu kapur (*limestone*) di atas *reservoir* minyak bumi. Tekanan *reservoir* berkisar antara 350 bar-700 bar. Gas alam terutama dari metana dengan sedikit fraksi gas-gas lain. Gas alam mempunyai nilai pembakaran gravimetrik yang tinggi sekitar 55,800 kJ/kg. Nilai pembakaran volumetrik gas alam adalah sekitar 37,000 kJ/m³ pada 1 atm dan 20°C. Diantara ketiga kelas utama bahan bakar fosil, gas alam mempunyai cadangan dalam bumi yang paling sedikit. Kelebihan gas alam yaitu mudah terbakar dan proses pengangkutannya cukup mudah karena cukup disalurkan melalui pipa. Gas pabrik merupakan hasil pengolahan langsung sumber energi fosil menjadi gas. Terdapat beberapa jenis gas pabrik diantaranya: *liquified petroleum gas* (LPG), gas air, gas air karburasi, gas alam pengganti atau sintetis dan gas produser.

- a. Gas LPG terdiri dari distilasi ringan dari minyak bumi, terutama propana dan butana. Oleh karena berat molekular serta kerapatan lebih tinggi pada gas ini, ia mempunyai nilai pembakaran volumetrik yang lebih tinggi dari gas alam lain. Bahan bakar gas ini diangkut dan disimpan dengan tekanan yang berkisar antara 4 hingga 20 bar, tergantung tekanan atmosfer.
- b. Gas air adalah suatu bahan bakar gas pabrik yang diproduksi dengan cara mengalirkan uap dan udara bergantian melalui suatu lapisan kokas pijar. Uap bereaksi dengan kokas panas dan menghasilkan hidrogen dan karbon monoksida. Jika ditambahkan minyak ke atas gas

air tersebut maka nilai perbakarannya naik dan gas yang dihasilkan disebut gas air karburasi.

- c. Gas alam sintesis atau gas alam substitusi atau disingkat SNG (*synthetic natural gas*), adalah gas dari proses konversi dari batubara. Konversi ini memerlukan tambahan hidrogen ke batubara. Dalam proses hidrogenisasi, hidrogen yang dimampatkan pada 900 °C direaksikan dengan batubara untuk memperoleh sejumlah senyawa hidrokarbon ringan khususnya metana.

Gas Hasil sampingan yaitu gas yang dihasilkan saat mengolah sumber energi listrik yang bukan berupa gas. Biasanya, gas sampingan didapatkan saat mengolah batu bara. Beberapa contoh gas hasil sampingan batubara yaitu: gas produser dan gas dapur tinggi.

- a. *Gas produser* adalah bahan bakar gas yang terbentuk dengan cara membakar lapisan batubara *grade* rendah di dalam tanah atau “*in-situ*” dengan udara yang cukup agar terjadi pembakaran sempurna. Lapisan akan bersuhu tinggi sehingga hidrogen dilepaskan dan sebagian karbon beroksidasi membentuk karbon monoksida.
- b. *Gas dapur tinggi* adalah bahan bakar kualitas rendah yang merupakan produk samping dari industri baja. Ia dihasilkan dengan membakar batubara dengan udara yang cukup. Gas buang yang diperoleh dipakai untuk memberikan pengurangan atmosfer pada logam yang lumer untuk mencegah terjadinya oksidasi. Komposisi gas dapur tinggi terutama adalah nitrogen, karbon monoksida, dan karbon dioksida. Komponen yang dapat terbakar dari gas ini hanyalah karbon monoksida.

Penggunaan sumber bahan bakar fosil secara terus-menerus, mengakibatkan ketersediaan bahan bakar tersebut mulai menipis. Beberapa inovasi terhadap bahan bakar dilakukan untuk mengantisipasi kelangkaan bahan bakar fosil dan sebagai energi *alternative*. Inovasi tersebut dilakukan dengan melakukan pengolahan terhadap beberapa tumbuhan dan sisa pembuangan makhluk hidup sehingga dapat dijadikan bahan bakar. Contoh energi *alternative* yaitu biomassa, *biofuel* dan *biogas*.

a. Biomassa

Biomassa merupakan sumber energi yang dapat diperbaharui karena tumbuh-tumbuhan dapat kita tanam setiap saat. Biomassa terbentuk dari proses daur ulang tumbuhan melalui fotosintesis dengan bantuan energi surya. Tumbuh-tumbuhan mengolah energi surya menjadi energi kimia kemudian disimpan di dalam tumbuhan itu sendiri. Energi kimia yang tersimpan pada tumbuh-tumbuhan dapat dimanfaatkan menjadi bahan bakar seperti etanol, metana maupun gas lain. Dari berbagai macam bahan bakar biomassa, kayu merupakan kebutuhan yang sangat banyak digunakan, seperti pada rumah tangga dan ketel uap. Bahan bakar yang berasal dari tumbuhan kering memiliki nilai kalor mencapai 4,800 kCal/kg. Membakar biomassa bukan cara satu-satunya untuk menghasilkan energi karena biomassa dapat dikonversi ke bentuk energi lain diantaranya gas metana atau etanol dan biosolar. Untuk mengkonversi biomassa menjadi bahan bakar, dapat dilakukan dengan berbagai macam proses, diantaranya adalah:

- Proses pirolisa
- Proses hidrogasifikasi
- Proses hidrogenisasi
- Proses distilasi destruktif
- Proses hidrolisa asam.

b. Biofuel

Biofuel adalah bahan bakar perantara yang terbentuk dari material organik umpan kimiawi (*chemical feedstock*) sebagai transformasi proses melalui radiasi surya secara fotosintesis untuk menghasilkan *biodiesel* dan *bioethanol*. *Biodiesel* memiliki bahan baku yang berasal dari minyak sawit, minyak jarak, minyak kelapa dan minyak kedelai. Bahan baku tersebut diolah untuk dimurnikan sehingga menjadi *biodiesel*. Sedangkan bahan baku *bioethanol* berasal dari umbi-umbian seperti singkong. Kandungan pati dari umbi-umbian diekstrak untuk diambil minyaknya kemudian difermentasikan sehingga menghasilkan etanol. *Bioethanol* dapat menggantikan bensin sebagai bahan bakar.

c. *Biogas*

Biogas merupakan sumber energi yang bersih dan murah, diproduksi dari kotoran binatang melalui proses anaerobik yang merupakan kegiatan *microbial organism*. Kotoran binatang (pada umumnya kotoran sapi) dicampur dengan air dalam tangki pencampur, diaduk hingga rata dan membentuk lumpur kotoran yang biasa disebut *slurry*. *Slurry* dimasukkan ke dalam *digester* sehingga mikroorganisme di dalam kotoran tersebut bereaksi dan menghasilkan gas. Gas yang dihasilkan di dalam *digester* ditampung dan dimanfaatkan sebagai bahan bakar. Pada umumnya, biogas digunakan sebagai bahan bakar di rumah tangga sebagai pengganti gas LPG. Gas yang dihasilkan mengandung sekitar 70% metana.

4. Mesin Konversi Energi

Secara umum, mesin konversi energi merupakan alat yang digunakan untuk mengubah bentuk satu jenis energi menjadi bentuk energi lainnya sehingga dapat dimanfaatkan untuk mempermudah kegiatan manusia. Contoh mesin konversi energi sederhana yang biasa digunakan di dalam rumah tangga yaitu kompor gas. Kompor gas merubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi panas sehingga dapat digunakan untuk memasak. Sedangkan di bidang industri, contoh mesin konversi energi adalah turbin. Turbin merubah energi gerak dengan menggunakannya untuk memutar poros dan generator sehingga menghasilkan energi listrik. Jenis mesin konversi energi bermacam-macam tergantung pada bentuk energi yang akan dikonversikan.

Mesin konversi energi dapat diklasifikasikan menjadi mesin konversi energi konvensional dan mesin konversi energi *non*-konvensional. Mesin energi konvensional pada umumnya menggunakan sumber energi konvensional yang tidak dapat diperbarui kecuali turbin tenaga *hydro*. Beberapa jenis mesin konversi energi konvensional yaitu Motor pembakaran dalam, motor pembakaran luar, mesin fluida, mesin pendingin dan mesin pengkondisian udara.

Mesin konversi energi *non*-konvensional pada umumnya menggunakan sumber energi yang dapat diperbarui. Beberapa contoh mesin konversi energi *non*-konvensional yaitu pembangkit daya tenaga

nuklir, sistem pembangkit tenaga panas bumi, mesin konversi energi gelombang air laut dan lain-lain.

C. LATIHAN

1. Sebuah pemanas tipe tahanan listrik dengan daya sebesar 4 kW digunakan untuk memanaskan air hingga mencapai target temperatur yang diinginkan dengan durasi 3 jam. Tentukan besarnya energi yang digunakan dalam satuan kWh dan kJ.
2. Pembangkit listrik tenaga air memiliki penampung pada ketinggian (*head*) 120 m dengan kemampuan laju suplai air sebesar 2400 kg/detik. Tentukan daya potensial yang dapat dibangkitkan.
3. Sebuah sungai mengalir dengan laju $175 \text{ m}^3/\text{s}$ dipertimbangkan untuk pembangkit listrik tenaga air. Tim ahli mempertimbangkan untuk membangun bendungan dengan ketinggian 80 m. Tentukan daya yang dapat dibangkitkan dari air sungai tersebut ketika bendungan sudah diisi penuh.
4. Mobil dengan massa 1150 kg digunakan untuk menanjak sejauh 100 m dengan kemiringan 30° dalam waktu 12 detik. Tentukan:
 - a. Daya pada kecepatan tetap
 - b. Dari kondisi diam hingga kecepatan 30 m/s
 - c. Dari kecepatan 35 m/s hingga kecepatan 5 m/sAbaikan gesekan, tahanan udara dan *rolling resistance*.



PENGANTAR TERMODINAMIKA

A. TUJUAN PEMBAHASAN PENGANTAR TERMODINAMIKA

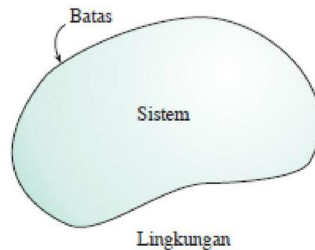
Bagian II dari modul ini membahas tentang pengantar termodinamika yang berkaitan erat dengan mesin konversi energi, khususnya mesin konversi energi model motor bakar. Melalui pembahasan ini, mahasiswa diharapkan mampu:

1. Mengemukakan aspek termodinamika dasar pada mesin konversi energi
2. Mengklasifikasikan proses termodinamika untuk motor bakar
3. Menelaah fungsi siklus Carnot pada motor bakar

B. MATERI AJAR

Termodinamika berasal dari kata *thermos* yang artinya panas dan *dynamic* yang artinya perubahan. Ilmu termodinamika adalah ilmu yang mempelajari tentang perubahan panas. Perubahan panas yang dimaksud yaitu cara memanfaatkan energi panas untuk menghasilkan atau merubah suatu energi menjadi bentuk energi yang lain. Sesuai dengan teori hukum termodinamika I, "*energi tidak dapat diciptakan dan dimusnahkan tetapi dapat berubah dari suatu bentuk energi ke bentuk energi lainnya*". Tidak semua energi dapat berubah dengan sendirinya, oleh karena itu, dengan adanya kemajuan teknologi, berbagai mesin diciptakan untuk membantu perubahan energi sehingga hasilnya dapat dimanfaatkan oleh manusia. Hal ini yang menjadi dasar mengapa pengetahuan tentang termodinamika

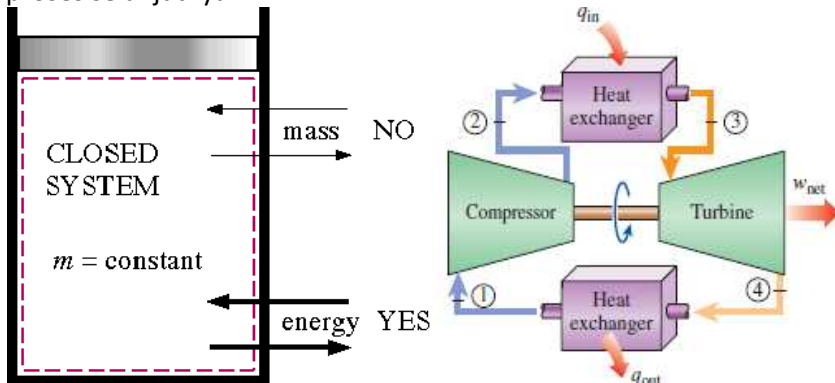
sangat diperlukan untuk menganalisis kondisi serta kinerja mesin yang berhubungan dengan panas dan kerja.



Gambar 2.1 Lingkungan, Sistem dan Batas Sistem

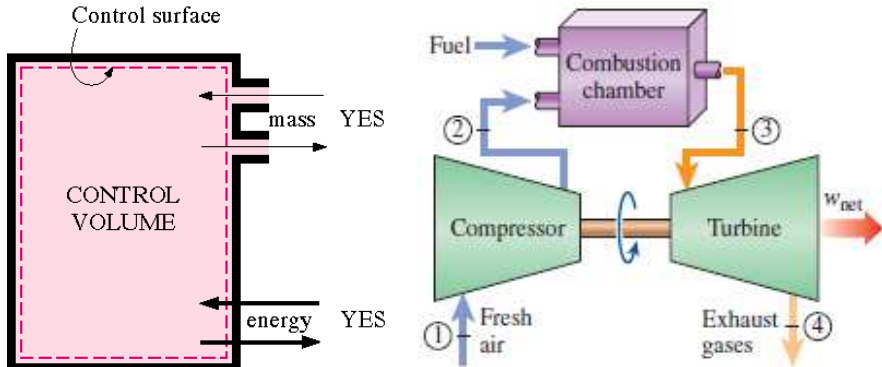
Analisis terhadap kinerja mesin yang dipelajari pada ilmu termodinamika lebih mendetail pada fluida kerja mesin tersebut. Untuk mempermudah analisis dilakukan beberapa pengelompokan untuk daerah yang akan dianalisis yaitu lingkungan, batas sistem (*boundary*) dan sistem. Pengelompokan tersebut dilakukan untuk membedakan benda kerja (sistem) dengan lingkungan sekitarnya. Sedangkan batas sistem merupakan garis imajiner yang membatasi sistem dengan lingkungan seperti yang terlihat pada Gambar 2.1.

Berdasarkan prosesnya, sistem dibagi menjadi dua yaitu sistem terbuka dan sistem tertutup. Pada sistem tertutup, terjadi perubahan energi tanpa diikuti perubahan massa. Hal ini terjadi karena massa tidak melewati batas sistem dan sisa energi dari seluruh proses digunakan untuk proses selanjutnya.



Gambar 2.2 Sistem tertutup [1]

Sedangkan sistem terbuka, perubahan energi di dalam sistem diikuti oleh perubahan massa. Pada sistem terbuka, energi dan massa melewati batas sistem sehingga terjadi interaksi antara sistem dengan lingkungan. Sisa energi pada sistem terbuka, dibuang ke lingkungan.



Gambar 2.3 Sistem terbuka [1]

Pada sistem terbuka, energi dan massa dapat keluar atau masuk ke dalam sistem melewati batas sistem. Sebagian besar siklus kerja mesin konversi energi menggunakan sistem terbuka. Salah satu mesin konversi energi yang menggunakan sistem terbuka yaitu motor bakar. Energi kimia diubah menjadi panas di dalam silinder piston yang berfungsi sebagai ruang bakar. Campuran bahan bakar dan udara masuk ke dalam silinder piston dan terjadi proses pembakaran. Gas buang hasil pembakaran keluar sistem melalui katup buang yang lebih dikenal dengan knalpot pada kendaraan bermotor. Beberapa mesin konversi energi lain yang menggunakan sistem terbuka yaitu turbin gas, turbin uap, pesawat jet dan lain-lain. Secara simultan pada mesin-mesin tersebut terdapat energi dan massa keluar-masuk sistem tersebut.

Kedadaan suatu sistem tertutup yang berada dalam kesetimbangan (*equilibrium*) merupakan kondisi yang ditentukan berdasarkan nilai dari sifat atau karakteristik termodinamikanya. Karakteristik yang menentukan sifat dari *system* disebut properti. Properti dari sistem, seperti tekanan (P), temperatur (T), volume (V), massa (m), viskositas, konduksi panas, dan lain-lain. Selain itu ada juga properti yang didefinisikan dari properti yang lainnya seperti, berat jenis, volume spesifik, panas jenis, dan lain-lain.

Suatu sistem dapat berada pada suatu kondisi yang tidak berubah, apabila masing-masing jenis properti sistem tersebut dapat diukur pada semua bagiannya dan tidak berbeda nilainya. Kondisi tersebut disebut sebagai keadaan (*state*) tertentu dari sistem, di mana sistem mempunyai nilai properti yang tetap. Apabila propertinya berubah, maka keadaan sistem tersebut disebut mengalami perubahan keadaan. Suatu sistem yang tidak mengalami perubahan keadaan disebut sistem dalam keadaan seimbang (*equilibrium*).

Dalam analisis termodinamika selalu dibutuhkan data nilai properti dari suatu zat, pada semua lingkup keadaan untuk masing-masing zat yang diteliti. Nilai properti dapat diprediksi dengan mengembangkan suatu persamaan matematis hubungan antar properti dari zat yang bersangkutan. Namun biasanya bentuk hubungan antar properti untuk semua zat sangat kompleks, sehingga sangat sulit untuk direpresentasikan dalam suatu persamaan yang sederhana.

Tabel 2.1 Contoh tabel *properties* [1]

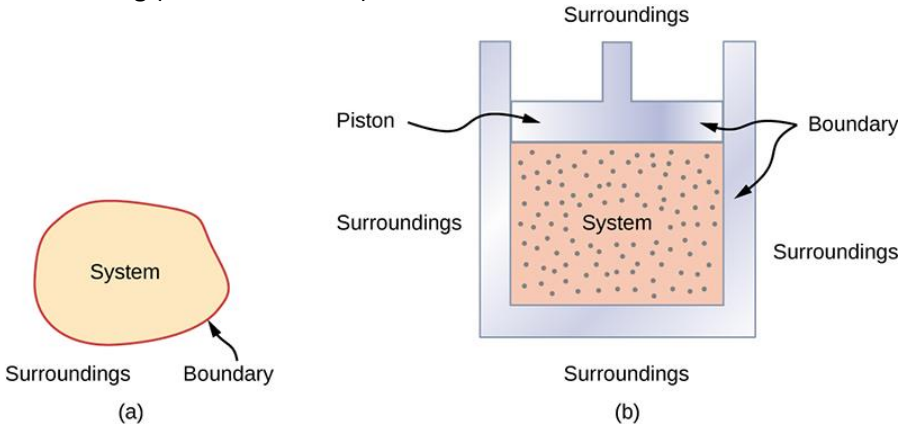
TABLE A-12												
Saturated refrigerant-134a—Pressure table												
Press., <i>P</i> kPa	Sat. temp., <i>T</i> _{sat} °C	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K		
		Sat. liquid, <i>v</i> _{<i>f</i>}	Sat. vapor, <i>v</i> _{<i>g</i>}	Sat. liquid, <i>u</i> _{<i>f</i>}	Evap., <i>u</i> _{<i>fg</i>}	Sat. vapor, <i>u</i> _{<i>g</i>}	Sat. liquid, <i>h</i> _{<i>f</i>}	Evap., <i>h</i> _{<i>fg</i>}	Sat. vapor, <i>h</i> _{<i>g</i>}	Sat. liquid, <i>s</i> _{<i>f</i>}	Evap., <i>s</i> _{<i>fg</i>}	Sat. vapor, <i>s</i> _{<i>g</i>}
240	−5.38	0.0007620	0.083897	44.48	182.67	227.14	44.66	202.62	247.28	0.17794	0.75664	0.93458
280	−1.25	0.0007699	0.072352	49.97	179.50	229.46	50.18	199.54	249.72	0.19829	0.73381	0.93210
320	2.46	0.0007772	0.063604	54.92	176.61	231.52	55.16	196.71	251.88	0.21637	0.71369	0.93006
360	5.82	0.0007841	0.056738	59.44	173.94	233.38	59.72	194.08	253.81	0.23270	0.69566	0.92836
400	8.91	0.0007907	0.051201	63.62	171.45	235.07	63.94	191.62	255.55	0.24761	0.67929	0.92691

Karena itu data properti biasanya dipresentasikan dalam bentuk Tabel Termodinamika (Tabel 2.1.), yang berisi data properti dari beberapa zat yang sering digunakan dalam aplikasi termodinamika. Tabel tersebut membutuhkan data properti yang sangat banyak, yang dikumpulkan dari hasil pengukuran yang membutuhkan waktu yang lama. Jenis properti yang biasanya ada dalam Tabel Termodinamika adalah tekanan,

temperatur, volume spesifik, energi dalam (*internal energy*) (u), panas laten, dan dua properti baru yaitu entalpi (h) dan entropi (s).

1. Sistem, Proses dan *Properties*

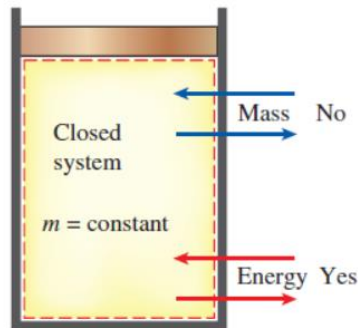
Sebuah sistem dalam analisis termodinamika didefinisikan sebagai kuantitas dari suatu materi atau daerah pada suatu area batasan studi. Istilah untuk kuantitas massa atau keadaan di luar sistem disebut dengan area sekitar (*surroundings*). Bagian yang menjadi batas antara sistem dan area sekitar baik itu dalam bentuk nyata maupun imajiner untuk keperluan analisis disebut dengan batasan (*boundary*). Secara prinsip *boundary* merupakan daerah yang membatasi langsung antara sistem dan *surrounding*. Sebagaimana Gambar 2.4. terlihat bahwa ada area imajiner pada Gambar 2.4. (a) yang memperlihatkan batasan antara sistem, *surrounding* dan *boundary* serta pada Gambar 2.4. (b) menunjukkan *boundary* nyata dalam hal ini adalah dinding silinder dan penampang piston. Secara matematis, *boundary* tidak memiliki ketebalan, sehingga *boundary* dikatakan tidak mungkin memiliki massa maupun menempati suatu ruang (memiliki volume).



Gambar 2.4 Hubungan antara sistem, batasan dan area sekitar [2]

Sistem terdiri dari dua kemungkinan yakni sistem tertutup (*closed*) dan sistem terbuka (*open*). Hal ini bergantung apakah massa atau volume dari sistem yang dibuat tetap untuk tujuan studi. Sistem tertutup (disebut juga dengan sistem kontrol massa kadang disebut hanya sebagai sistem untuk

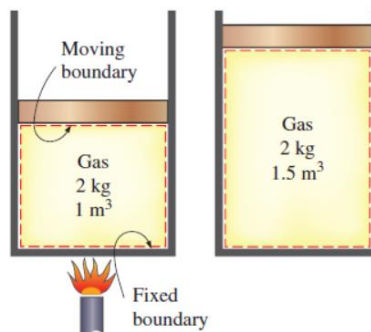
konteks yang jelas menyatakan modelnya) terdiri dari jumlah massa yang tetap dan tidak ada aliran massa yang dapat melewati *boundary*.



Gambar 2.5 Sketsa contoh sistem tertutup [2]

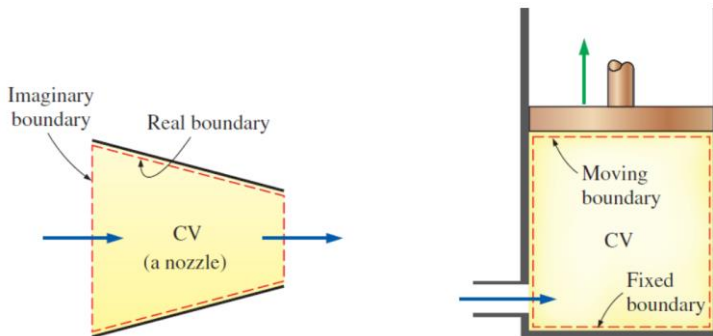
Sehingga, tidak ada massa yang dapat masuk maupun keluar dari sistem tertutup, sebagaimana yang diperlihatkan pada Gambar 2.5. meskipun tidak ada aliran massa keluar atau masuk ke sistem, sistem tertutup tetap memungkinkan adanya aliran energi yang keluar atau masuk ke sistem. Energi dalam bentuk kalor maupun kerja dapat masuk ke sistem dimana ada perubahan volume, sehingga volume pada sistem tertutup dapat berubah.

Gambar 2.6. menyajikan bagaimana energi masuk ke sistem tertutup. Sebuah sistem yang terdiri dari piston dan silinder memiliki massa gas sebesar 2 kg dengan volume 1 m^3 . Energi dalam bentuk kalor diberikan ke sistem.



Gambar 2.6 Perubahan energi pada sistem tertutup [2]

Fokus kajian adalah gas sehingga ini adalah kajian utama sebagai sistem. Bagian dalam dari silinder dan piston membentuk *boundary*, dan karena ini sistem tertutup maka massa tidak dapat melewati *boundary*. Akan tetapi, volume dapat berubah dan dalam hal ini bagian dalam piston tidak tetap, sehingga energi yang dapat melewati batasan sistem masuk ke dalam sistem dan merubah nilai volume gas menjadi 1.5 m^3 dengan massa gas yang tetap sama yakni 2 kg. Seluruh aspek di luar gas, termasuk piston dan silinder, disebut dengan *surrounding*.



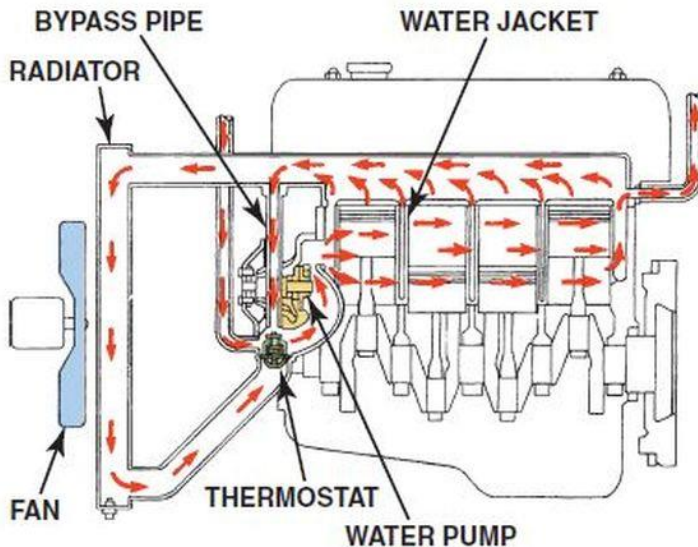
Gambar 2.7 Contoh batasan pada sistem terbuka [3]

Sistem berikutnya adalah sistem terbuka (*open*) atau dikenal dengan istilah kontrol volume. Sistem ini biasanya menggunakan peralatan yang melibatkan adanya aliran massa pada sistem seperti kompresor, turbin dan nozel. Aliran yang melalui pada peralatan tersebut untuk keperluan studi atau analisis dilakukan dengan memilih bagian di dalam peralatan yang menjadi batasan volume, sehingga energi maupun massa dapat melintasi sistem untuk kontrol volume. Gambar 2.7. memberikan contoh penempatan batasan yang nyata dan batasan imajiner pada sistem terbuka. Pada kasus khusus dimana tidak boleh ada aliran massa, volume dan energi, maka sistem ini disebut dengan sistem terisolir (*isolated*).

Banyak aplikasi pada bidang rekayasa yang melibatkan adanya aliran massa pada sistem termodinamik yang memungkinkan massa keluar dan masuk ke sistem, oleh karenanya model ini dianalisis sebagai sistem terbuka. Pemanas air baku, sistem pendingin air untuk kendaraan, turbin, dan kompresor semuanya melibatkan aliran massa sehingga harus

dianalisis sebagai sistem terbuka (kontrol volume) dan bukan dianggap sebagai sistem tertutup (kontrol massa). Pada prinsipnya, tidak ada aturan baku yang menyatakan batasan imajiner dari sistem kontrol volume, namun untuk memudahkan proses analisis maka batasan ini harus dipilih sesuai dengan keperluan analisis dan fungsi peralatannya. Sebagai contoh, jika analisis ditujukan untuk aliran udara pada nozel, maka pilihan yang baik untuk menetapkan batasan imajiner (*boundary*) pada nozel adalah area di bagian dalam nozel seperti Gambar 2.7. Batasan-batasan pada kontrol volume disebut dengan permukaan kendali, dan dapat berupa bentuk nyata maupun imajiner. Pada kasus nozel seperti Gambar 2.7., bagian dalam permukaan nozel membentuk bagian nyata dari *boundary*, bagian saluran masuk dan keluar dari nozel membentuk batasan imajiner karena tidak ada permukaan nyata pada area ini.

Sebuah sistem kontrol volume dapat memiliki ukuran dan bentuk yang tetap seperti halnya nozel. Pada model lain, sistem kontrol volume dapat saja melibatkan *boundary* yang dapat bergerak, seperti terlihat pada Gambar 2.7.(b). Namun, kebanyakan sistem kontrol volume memiliki *boundary* yang tetap sehingga tidak melibatkan *boundary* yang dapat bergerak. Sebagaimana pada sistem kontrol massa, kontrol volume dapat melibatkan aliran energi dalam bentuk kalor maupun kerja. Contoh dari kontrol volume adalah sistem pendingin mobil yang menggunakan radiator dengan media pendinginan cairan pendingin. Pada sistem ini, cairan pendingin dapat bergerak dengan bebas pada batasan-batasan yang telah ditetapkan sebagaimana yang diperlihatkan pada tanda panah di Gambar 2.8. Cairan pendingin berpindah dari area radiator, ke *water jacket* dan kembali ke radiator melalui saluran-saluran khusus. Meskipun secara prinsip jumlah air pada sistem adalah sama, namun pada aktualnya jumlah air dapat saja berubah karena sistem ini dilengkapi dengan tangki penampung.



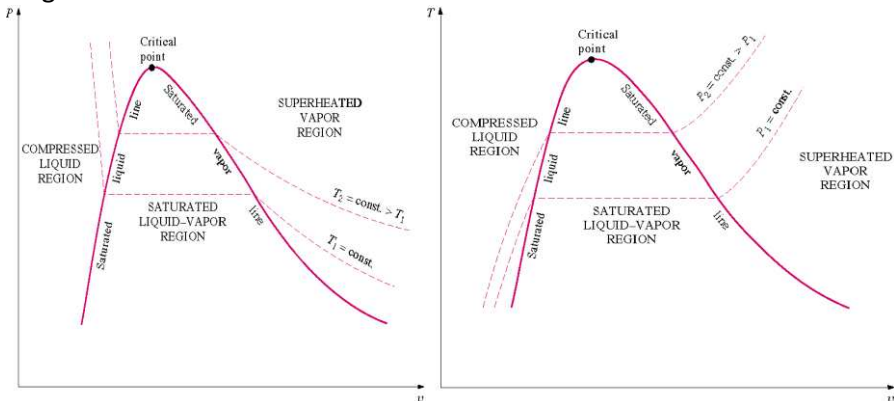
Gambar 2.8 Contoh kontrol volume pada sistem pendingin kendaraan [2]

Hal berikutnya yang menjadi penting untuk dipahami adalah sifat dari materi yang ada pada sistem atau diistilahkan dengan *properties*. Beberapa *properties* yang umum dikenal yakni tekanan (P), temperatur (T), volume (V) dan massa (m). *Properties* pada prinsipnya sangat banyak dan daftar yang dibuat bisa menjadi lebih panjang seperti viskositas, konduktivitas termal, modulus elastis, koefisien ekspansi termal, tahanan listrik, dll. *Properties* dikategorikan ke dalam dua sifat yang lebih detail yakni intensif (*intensive*) dan ekstensif (*extensive*). *Intensive properties* adalah *properties* yang tidak dipengaruhi oleh ukuran maupun jumlah dari materi yang mana tidak dapat diakumulasikan, seperti temperatur, tekanan dan densitas. Sebaliknya, *extensive properties* adalah sifat yang dipengaruhi oleh ukuran dan jumlah materi itu sendiri. Massa total, volume total dan momentum total merupakan beberapa contoh dari *extensive properties*.

2. Zat Murni

Zat murni merupakan suatu zat yang memiliki komposisi kimia tetap. Zat murni dapat berupa zat tunggal maupun campuran dari beberapa zat homogen yang masih memiliki sifat aslinya. Contoh zat murni sebagai zat tunggal adalah nitrogen (N) dan helium (He). Sedangkan air, udara dan CO₂ merupakan contoh zat murni campuran dari beberapa zat homogen. Berbeda halnya dengan campuran antara air dengan minyak, kedua zat tersebut jika dicampur tidak dapat dikatakan sebagai zat murni karena tidak dapat bercampur secara homogen.

Wujud dari zat murni dapat berupa padat, cair maupun gas. Perubahan fasa zat murni dari padat, cair maupun gas biasanya dipengaruhi oleh sifat *intensive* (temperatur, tekanan dll) dari zat tersebut. Posisi molekul pada fase padat relatif tetap, pada fase cair molekul bergerak secara *oscillate*, dan pada fase gas molekul-molekul bergerak bebas tidak beraturan dan saling bertabrakan satu sama lainnya. Pergerakan perubahan fasa zat murni dapat dilihat dari T-v dan P-v diagram.



Gambar 2.9 Diagram (a) Temperatur terhadap volume spesifik: T-v dan (b) Tekanan terhadap volume spesifik: P-v [1]

Pada Gambar 2.9. diagram T-v dan P-v di atas terlihat perubahan fasa yang terjadi pada zat murni. Garis tebal yang membentuk suatu kubah merupakan daerah jenuh. Daerah di luar kubah paling kiri menunjukkan bahwa fasa zat murni 100% cair. Sedangkan daerah di tengah-tengah

kubah, merupakan daerah fasa campuran (cair-gas) dan daerah di luar kubah paling kanan merupakan fasa zat murni 100% gas. Daerah jenuh ini merupakan titik awal terjadinya perubahan fasa zat baik dari 100% cair menjadi campuran yang biasa disebut dengan daerah cair jenuh (*saturated liquid*) maupun dari campuran menjadi 100% gas biasa disebut sebagai daerah uap jenuh (*saturated vapor*).

Properties zat murni pada titik cair jenuh dan uap jenuh dapat langsung dilihat pada tabel *properties*. Nilainya dapat diketahui saat jenis zat dan salah satu *properties* juga diketahui. Sedangkan pada fasa campuran, untuk mengetahui *properties* harus diketahui terlebih dahulu besarnya kualitas campuran. Kualitas campuran ini, menunjukkan besarnya kadar gas di dalam campuran zat murni tersebut. Besarnya kualitas campuran di antara nol dan satu ($0 \leq x \leq 1$). Jika nilai $x = 0$: zat murni berada pada kondisi cair jenuh dan jika nilai $x = 1$: zat murni berada pada kondisi uap jenuh. Cairan memiliki massa m_f dan volume V_f . Gas memiliki massa m_g dan volume V_g . Kualitas campuran didapatkan dari:

$$x = \frac{m_g}{m_g + m_f} = \frac{v - v_f}{v_{fg}} \quad 2.1$$

Garis putus-putus pada T-v diagram menunjukkan daerah tekanan konstan yang artinya selama zat murni berada pada satu garis tersebut, perubahan temperatur dan volume spesifik zat murni tidak mempengaruhi perubahan tekanan. Begitu juga pada P-v diagram, garis putus-putus menunjukkan daerah temperatur konstan yang artinya selama zat murni berada pada satu garis tersebut, perubahan tekanan dan volume spesifik zat murni tidak mempengaruhi perubahan temperatur.

Contoh Soal

Bejana tekan yang memiliki kapasitas 90 L berisi 4.5 kg *refrigerant-134a* pada tekanan 160 kPa. Berdasarkan data tersebut, tentukan apakah *refrigerant* yang tersimpan di dalam bejana tersebut berbentuk cair, campuran atau gas serta cari nilai temperatur, kualitas dan entalpi *refrigerant* di dalam bejana!

Penyelesaian.

Untuk mengetahui fase fluida tersimpan, dapat dilakukan dengan membandingkan nilai volume spesifik dari kasus di atas dengan volume spesifik yang ada di tabel R-134a pada tekanan 160 kPa. Sehingga perlu dilakukan perhitungan terlebih dahulu. Nilai volume spesifik didapat dari data: $V = 90 \text{ L} = 0.09 \text{ m}^3$ dan $m = 4.5 \text{ kg}$

$$v = \frac{V}{m} = \frac{0.09 \text{ m}^3}{4.5 \text{ kg}} = 0.02 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Kemudian, dari Tabel termodinamika untuk R-34a pada tekanan 160 kPa didapatkan:

$$v_f = 0.0007435 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_g = 0.12355 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$T_{\text{sat}@160\text{kPa}} = -15.6^\circ\text{C}$$

Berdasarkan data yang ada: $v_f < v < v_g$ maka fasa R-134a di dalam bejana tekan adalah campuran. Sehingga Temperatur R-134a dalam bejana = temperatur *saturated* pada tekanan 160 kPa = -15.6°C

Kualitas campuran didapatkan dari:

$$x = \frac{v - v_f}{v_{fg}} = \frac{0.02 - 0.0007435}{0.12355 - 0.0007435} = 0.157$$

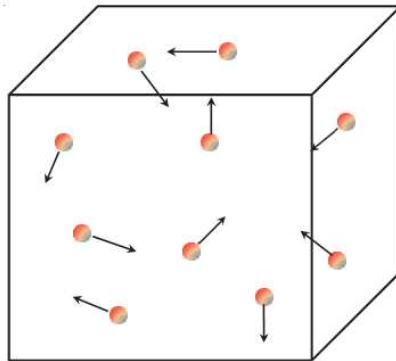
Pada tekanan 160 kPa, berdasarkan Tabel didapat nilai $h_f = 31,18 \text{ kJ/kg}$ dan $h_{fg} = 209,96 \text{ kJ/kg}$. Sehingga nilai entalpi R-134 di dalam bejana didapatkan:

$$\begin{aligned} h &= h_f + xh_{fg} \\ &= 31,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + (0,157)(209,96 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) \\ &= 64,1 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

3. Gas Ideal

Gas ideal merupakan model ideal dari fenomena suatu gas. Dalam analisis termodinamika terhadap zat murni yang berupa gas yang diperlakukan dengan pendekatan kondisi gas tersebut dalam keadaan ideal. Pendekatan ini dilakukan karena ikatan antar molekul gas sangat

lemah. Akibatnya jika suatu gas berada di dalam ruang tertutup, molekul-molekul gas tersebut akan bergerak tidak beraturan, saling bertumbukan antar molekul gas dan menabrak dinding yang membatasi ruangan tersebut. Tumbukan yang terjadi antara sesama molekul gas maupun molekul gas dengan dinding pembatas, dapat mengakibatkan tekanan di dalam ruangan tersebut meningkat (Gambar 2.10). Frekuensi tumbukan yang terjadi juga dipengaruhi oleh kecepatan fluida di dalam ruangan tersebut. Semakin tinggi temperatur gas mengakibatkan kecepatan gas semakin tinggi, sehingga menyebabkan momentum tumbukan yang terjadi semakin besar. Akibat dari keadaan tersebut, tekanan di dalam ruangan juga akan semakin tinggi.



Gambar 2.10 Pergerakan Molekul Gas pada Ruang Tertutup [1]

Fenomena pergerakan molekul gas tersebut memiliki hubungan antara variabel tekanan, volume dan temperatur. Analisis secara matematis tentang fenomena pergerakan tersebut sangat sulit dilakukan karena adanya gaya tarik-menarik antar molekul dan pengaruh perubahan volume molekul itu sendiri. Kondisi tersebut mengakibatkan gerakan molekul jadi sangat kompleks. Oleh karena itu, perlu dilakukan pendekatan terhadap asumsi gas ideal dalam menganalisis fenomena tersebut. Hal ini dilakukan karena gas ideal memiliki sifat-sifat sebagai berikut:

1) Tidak ada interaksi antar molekul-molekul gas

Pada gas ideal tidak terdapat gaya tarik-menarik maupun tolak-menolak antar molekul gas. Tumbukan antar molekul pada saat mengalami pergerakan bersifat lenting sempurna sehingga tidak terjadi perubahan total energi kinetik pada molekul-molekul gas tersebut. Oleh karena itu, walaupun jarak antar molekul sangat dekat dan saling bertumbukan, gas ideal tidak dapat mencair.

Berbeda dengan pada kondisi sebenarnya (gas nyata). Pada saat molekul gas nyata saling berdekatan, terjadi gaya tarik-menarik antar molekul gas sehingga mengakibatkan gas dapat mencair. Sifat gas nyata dapat mendekati gas ideal dengan meningkatkan temperatur dan memperkecil tekanan gas di dalam ruangan. Dengan melakukan hal tersebut, maka jarak rata-rata antar molekul gas menjadi jauh dan dapat diasumsikan bahwa tidak terdapat gaya tarik antar molekul (gaya tarik antar molekul sama dengan nol).

2) Ukuran partikel dari molekul gas ideal sangat kecil sehingga dapat diabaikan (dianggap nol)

Dengan mengasumsikan partikel gas ideal sangat kecil dapat dianggap gas menempati ruang kosong karena volume total seluruh partikel gas dianggap nol. Pada gas nyata, hal ini dapat didekati jika jarak molekul antar gas sangat jauh.

Dengan mempertimbangkan sifat-sifat gas ideal tersebut, beberapa ahli melakukan eksperimen untuk mendapatkan sifat makroskopisnya. Dari eksperimen tersebut dibuat rumus empiris berdasarkan data-data yang didapatkan. Kenaikan tekanan berbanding lurus dengan kenaikan temperatur namun berbanding terbalik dengan volume ruangan. Secara matematis, sesuai dengan teori gas ideal dapat dituliskan sebagai:

$$P \cdot v = R \cdot T \quad 2.2$$

Dimana:

P	=	Tekanan
v	=	Volume spesifik gas
R	=	Konstanta Gas
T	=	Temperatur

Berdasarkan eksperimen yang dilakukan oleh Boyle dan Gay Lussac terhadap gas nyata pada tekanan rendah sehingga kondisinya mendekati gas ideal, didapatkan persamaan gas ideal yang juga dapat diaplikasikan pada gas nyata. Berdasarkan perkembangan penelitian, pendekatan gas nyata terhadap gas ideal dapat dilakukan pada saat tekanan gas nyata berada pada temperatur dan tekanan yang sangat tinggi yaitu sekitar tujuh kali tekanan kritisnya.

Setiap gas memiliki nilai konstanta R_m yang berbeda dan dipengaruhi oleh massa setiap molekul gas tersebut. Untuk mendapatkan nilai konstanta suatu jenis zat digunakan persamaan:

$$R = \frac{R_m}{M} \quad 2.3$$

R merupakan konstanta gas universal dan memiliki nilai sama untuk semua jenis gas yaitu $R = 8.314 \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$. Massa gas (M) di dalam ruangan dapat dihitung apabila jumlah molekulnya diketahui, andaikan jumlah molekulnya n , maka massa gas di dalam ruangan tersebut:

$$m = M \cdot N \quad 2.4$$

Sedangkan Volume ruangan (V) merupakan perkalian antara massa dengan volume spesifik:

$$V = m \cdot v \quad 2.5$$

Sehingga persamaan gas ideal dapat dituliskan dalam variabel volume ruangan sebagai berikut:

$$P \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad 2.6$$

dan

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad 2.7$$

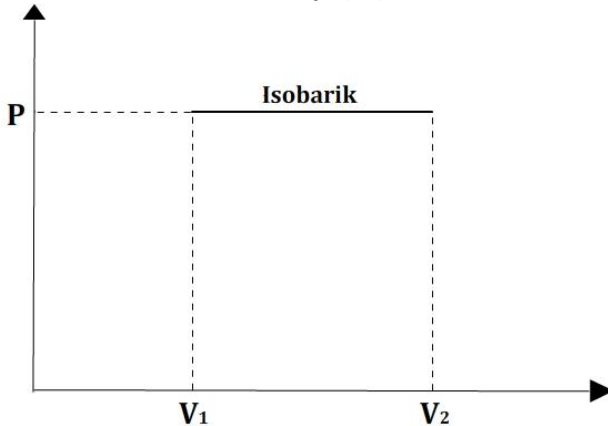
Dari (2.5) dapat diturunkan hubungan antara dua kondisi gas yang berbeda saat massa gas (m) konstan yaitu:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad 2.8$$

4. Proses Termodinamika

a. Isobarik

Proses isobarik merupakan proses yang terjadi di dalam sistem pada tekanan konstan. Dapat dijabarkan sebagai keadaan suatu sistem yang diberi kalor secara terus menerus sehingga volume fluida di dalam sistem tersebut meningkat namun tekanan tidak berubah. Hal ini menunjukkan bahwa sistem tersebut melakukan kerja (W).



Gambar 2.11 Diagram P-V pada Proses Isobarik

Berdasarkan uraian tersebut, pada proses isobarik berlaku persamaan:

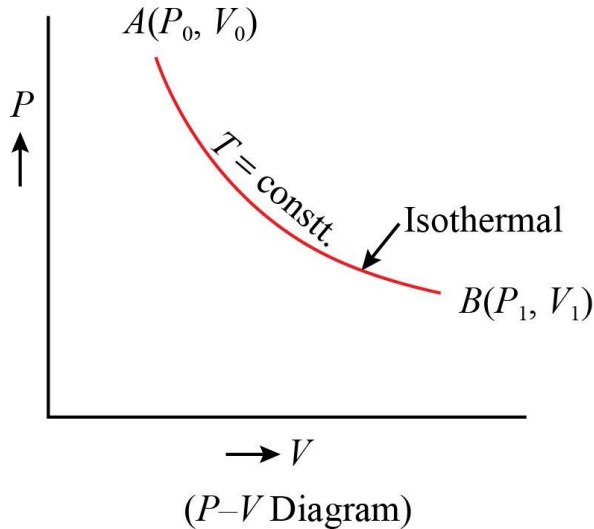
$$W = \int_1^2 P dV = P(V_2 - V_1) \quad 2.9$$

Sedangkan pada zat murni yang berupa gas dan gas ideal berlaku:

$$\frac{P_1}{V_1} = \frac{P_2}{V_2} = C \quad 2.10$$

b. Isotermal

Proses Isotermal merupakan proses pada suatu sistem pada temperatur konstan. Pada proses isotermal, perubahan tekanan berbanding terbalik dengan perubahan volume pada sistem namun tidak mempengaruhi perubahan temperatur. Dengan kata lain, pada proses isotermal, $\Delta T = 0$.



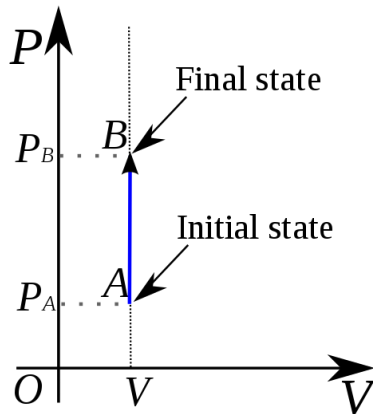
Gambar 2.12 Diagram P-V pada Proses Isotermal

Berdasarkan persamaan perubahan energi dalam ($\Delta U = Q - W$), diperoleh bahwa usaha yang dilakukan sama dengan jumlah kalor yang diberikan. Dengan mengacu kepada persamaan gas ideal $PV = mRT$, Jadi, pada proses isothermal berlaku persamaan:

$$W = \int_1^2 P dV = \int_1^2 \frac{mRT}{V} dV = mRT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad 2.11$$

c. Proses Isokhorik

Fenomena pada gas ideal dipengaruhi oleh tekanan, temperatur dan volume. Setelah mempelajari keadaan sistem pada tekanan dan temperatur konstan, maka variabel lain yang dapat dijaga konstan selama proses termodinamika di dalam sistem adalah volume zat. Perilaku gas pada volume konstan dibahas pada Hukum Gay Lussac. Berdasarkan hukum tersebut, pada saat volume dijaga konstan selama proses termodinamika, maka besarnya tekanan gas akan berbanding lurus dengan temperaturnya. Kondisi volume gas dijaga konstan selama proses disebut dengan istilah isokhorik. Dengan kata lain, pada proses isokhorik tidak terjadi perubahan volume selama proses ($\Delta V = 0$).



Gambar 2.13 Diagram P-V pada Proses Isokhorik

Pada proses isokhorik, sistem tidak mengalami perubahan volume, walaupun sejumlah kalor memasuki atau keluar sistem. Hal ini memberikan pengertian bahwa sistem tidak melakukan atau menerima usaha. Dengan kata lain, usaha yang dilakukan sistem atau yang dilakukan lingkungan pada sistem sama dengan nol ($W = 0$). Jadi, pada proses isokhorik berlaku persamaan:

$$Q = \Delta U \quad 2.12$$

Atau

$$W = \int_1^2 P dV = 0 \quad 2.13$$

Contoh Soal

Udara di dalam silinder piston memiliki tekanan 10 bar dan temperatur 400 °C. Udara tersebut dikompresi dan didinginkan pada tekanan konstan hingga dalam keadaan uap jenuh. Kemudian, uap jenuh dari pendinginan udara panas, didinginkan lagi pada volume konstan hingga temperatur mencapai 150 °C. Lakukan analisis untuk proses tersebut dan hitunglah besarnya perpindahan panas dan kerja yang dialami selama proses berlangsung!

Penyelesaian

Sebelum menentukan persamaan, beberapa asumsi perlu dilakukan untuk dapat menyederhanakan perhitungan. Asumsi yang diperlukan yaitu:

- 1) Proses terjadi pada sistem tertutup
- 2) Kerja hanya terjadi pada piston atau torak
- 3) Tidak terjadi perubahan energi kinetik dan energi potensial selama proses

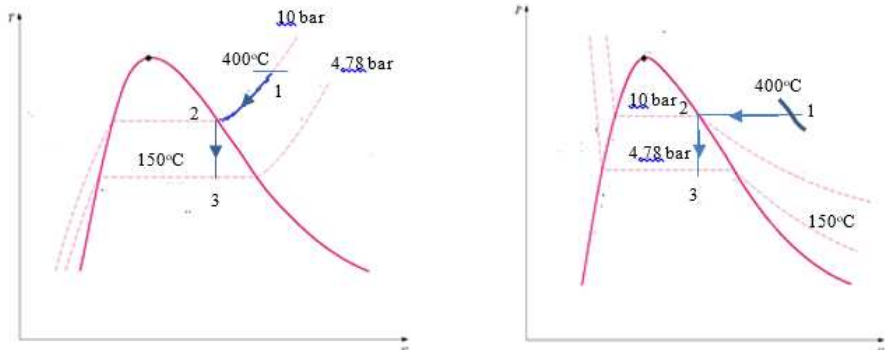
Analisis Proses

Dari tabel termodinamika untuk air, didapatkan pada saat tekanan *saturated air* 10 bar dan temperatur 179.9°C. Sedangkan pada keadaan pertama proses tersebut temperatur air 400 °C. Hal ini menunjukkan bahwa keadaan 1 berada pada fasa panas lanjut (berupa udara panas).

Proses 1-2 ada kerja di dalam silinder torak akibat proses kompresi dan kalor yang keluar akibat proses pendinginan pada sistem.

Proses 2-3 hanya terjadi pelepasan kalor tanpa adanya kerja pada *system*.

Dari analisis tersebut, dapat disederhanakan dengan P-v dan T-v diagram berikut:



Berdasarkan tabel termodinamika untuk uap kering, pada saat tekanan $P_1 = 10$ bar dan temperatur $T_1 = 400$ °C didapatkan nilai: $v_1 = 0.3066\text{m}^3/\text{kg}$ dan $u_1 = 2957.3$ kJ/kg. Sedangkan keadaan 2 pada kondisi jenuh, didapatkan $v_2 = 0.1944\text{m}^3/\text{kg}$.

Untuk mencari besarnya kerja yang dilakukan selama proses:

$$W = \int_1^3 P dV = \int_1^2 P dV + \int_2^3 P dV = m P (v_2 - v_1)$$

$$\frac{W}{m} = 10 \text{ bar} (0,1944 - 0,3066) \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$= -112,2 \text{ kJ/kg}$$

Tanda (-) menunjukkan bahwa kerja diberikan pada uap air oleh piston. Berdasarkan hukum termodinamika I untuk siklus tertutup didapatkan:

$$E = Q - w$$

$$m(u_3 - u_1) = Q - W$$

$$\frac{Q}{m} = (u_3 - u_1) + \frac{W}{m}$$

Nilai u_3 didapatkan pada saat air berada pada fasa campuran sehingga perlu dicari terlebih dahulu nilai kualitas campuran tersebut ($v_3 = v_2 = 0.1944 \text{ m}^3/\text{kg}$). *Properties* air pada temperatur 150°C pada kondisi *saturated* berdasarkan tabel termodinamika untuk air yaitu: $v_{f3} = 1.0905 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$, $v_{g3} = 0.3928 \text{ m}^3/\text{kg}$, $u_{f3} = 631.68 \text{ kJ/kg}$ dan $u_{g3} = 2559.5 \text{ kJ/kg}$.

$$x = \frac{v - v_f}{v_{fg}} = \frac{0.1944 - 1.0905 \times 10^{-3}}{0.3928 - 1.0905 \times 10^{-3}} = 0.494$$

Nilai energi dalam (u) didapatkan:

$$u_3 = u_{f3} + x(u_{g3} - u_{f3})$$

$$= 631.68 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.494(2559.5 - 631.68) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$= 1583.9 \text{ kJ/kg}$$

Sehingga perpindahan panas selama proses didapatkan:

$$\frac{Q}{m} = (1583.9 - 2957.3) \text{ kJ/kg} - 112.2 \text{ kJ/kg}$$

$$= -1485.6 \text{ kJ/kg}$$

Tanda minus menunjukkan bahwa sistem melepas panas.

5. Hukum Pertama Termodinamika

Hukum pertama termodinamika yang biasa dikenal sebagai hukum kekekalan energi menyatakan: “Energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan selama suatu proses, namun dapat diubah bentuknya”. Pada sistem tertutup, hukum pertama termodinamika menggambarkan bahwa jumlah energi yang masuk ke dalam sistem dikurangi dengan energi yang meninggalkan sistem merupakan perubahan energi yang terjadi pada sistem tersebut.

$$\left(\begin{array}{c} \text{Total Energi Masuk} \\ \text{ke dalam Sistem} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Total Energi} \\ \text{Meninggalkan Sistem} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Perubahan Energi Total} \\ \text{pada Sistem} \end{array} \right)$$

Secara matematis dapat dituliskan sebagai:

$$E_{in\ sistem} - E_{out\ sistem} = \Delta E_{sistem} \quad 2.14$$

Energi yang tersimpan atau energi total sistem dinyatakan sebagai jumlah dari perubahan energi dalam (ΔU), perubahan energi potensial (ΔE_p) dan perubahan energi kinetik (ΔE_k) yang dapat dituliskan sebagai:

$$\Delta E_{sistem} = \Delta U + \Delta E_p + \Delta E_k \quad 2.15$$

Menurut teori termodinamika klasik, energi yang ditambahkan sebagai perpindahan panas netto (Q_{nett}) ke sistem tertutup dan energi yang keluar dari sistem tertutup menjadi kerja netto (W_{nett}) merupakan perubahan energi di dalam sistem tertutup.

$$Q_{nett} - W_{nett} = \Delta E_{sistem} \quad 2.16$$

Dimana:

$$Q_{nett} = Q_{in} - Q_{out} \text{ dan } W_{nett} = (W_{out} - W_{in})_{other} + W_b$$

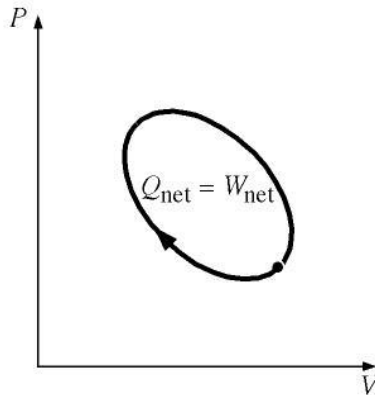
Dari persamaan (2.14) dan (2.15) perubahan energi di dalam sistem dapat dituliskan sebagai:

$$Q_{nett} - W_{nett} = \Delta U + \Delta E_p + \Delta E_k \quad 2.17$$

Dan jika di dalam sistem tidak terjadi perubahan energi kinetik dan energi potensial, maka perubahan energi di dalam sistem juga dapat dituliskan sebagai:

$$Q_{\text{nett}} - W_{\text{nett}} = \Delta U \quad 2.18$$

Siklus termodinamika merupakan serangkaian proses (gabungan dari beberapa proses termodinamika) yang dimulai dan berakhir pada keadaan yang identik. Pada suatu sistem tertutup, sifat dan nilai energi di dalam sistem tidak berubah hingga tingkat keadaan sistem tersebut berubah. Perubahan dalam pada siklus termodinamika sama dengan nol. Dengan kata lain, tidak ada perubahan energi dalam pada suatu sistem selama terjadi proses. Secara matematis dapat dituliskan sebagai:



Gambar 2.14 P-V Diagram Siklus Tertutup [4]

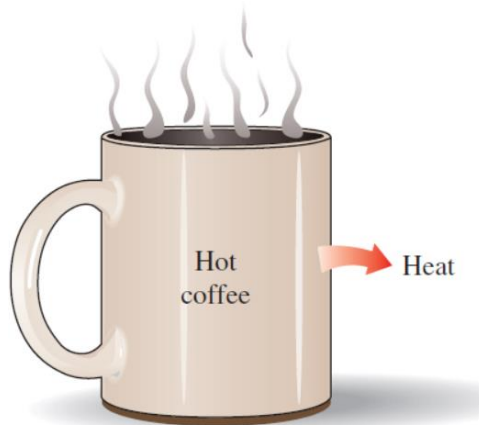
$$Q_{\text{nett}} = W_{\text{nett}} \quad 2.19$$

6. Hukum Kedua Termodinamika

Inti dari hukum pertama termodinamika adalah berkaitan dengan konservasi energi. Meskipun hukum pertama menjadi landasan utama terkait perubahan energi, namun proses yang terjadi tidak mendetailkan arah aliran energi. Sebagai contoh, secangkir kopi panas yang dibiarkan pada ruangan yang lebih dingin lambat laun akan mencapai suhu yang sama dengan ruangan (Gambar. 2.15). Hal ini sesuai dengan hukum pertama dimana energi yang dilepaskan oleh kopi akan sama dengan

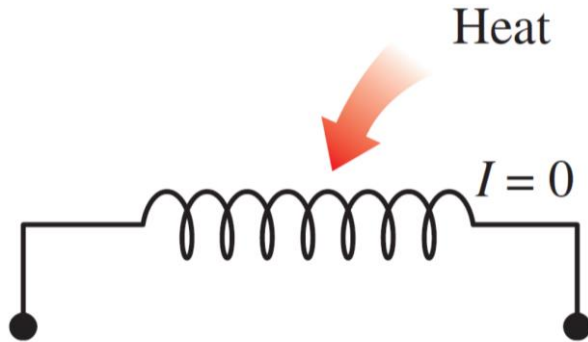
energi yang diterima oleh udara sekitar. Sekarang pada kasus sebaliknya (*reverse process*), “kopi panas semakin panas di ruangan yang lebih dingin karena perpindahan panas dari udara ruangan”. Kita mengetahui bahwa hal ini mustahil. Akan tetapi, dari perspektif hukum pertama termodinamika hal ini mungkin sepanjang “energi yang dilepaskan oleh udara sekitar sama dengan energi yang diterima kopi”.

Contoh lain terkait dengan fenomena arah aliran energi atau proses dapat dilihat pada hubungan antara aliran listrik dan panas (Gambar 2.16). Sebagai fenomena umum, pemanasan menggunakan prinsip resistensi listrik dilakukan dengan mengalirkan listrik ke suatu hambatan sehingga menghasilkan panas resistensi.



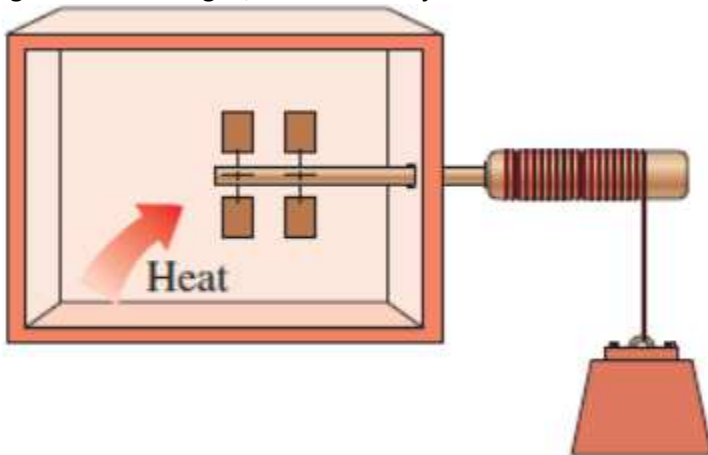
Gambar 2.15 Secangkir kopi panas tidak menjadi lebih panas pada ruangan yang dingin [4]

Hal ini kembali membuktikan hukum pertama yakni energi listrik yang diberikan akan sama dengan jumlah kalor yang diterima udara sekitar pemanas. Sekarang, bagaimana jika proses ini dibalik yakni “*memanaskan udara sekitar pemanas untuk menghasilkan listrik*”. Tentu sudah dapat diprediksi bahwa memberikan beberapa kalor ke kawat tahanan tidak akan menghasilkan energi listrik dengan nilai yang sebanding pada kawat tersebut.



Gambar 2.16 Memanaskan kabel tidak akan menghasilkan listrik [1]

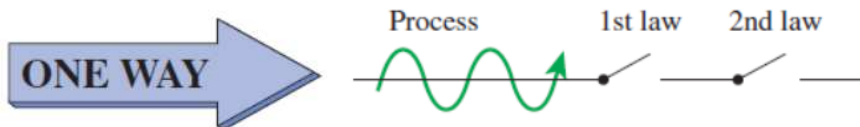
Contoh terakhir untuk menjelaskan fenomena ini agar pemahaman menjadi lebih konkrit adalah melihat hubungan interaksi energi mekanik. Perhatikan sebuah mekanisme ayunan yang bekerja berdasarkan massa yang jatuh (energi potensial menjadi mekanik) pada Gambar 2.17. Ketika massa jatuh maka ayunan akan berputar dan mengaduk fluida di dalam ruangan yang terisolir. Hasilnya adalah energi potensial dari sistem ayunan pada massa berkurang, dan energi dalam (*internal energy*) pada fluida meningkat sejalan dengan prinsip konversi energi. Namun, jika proses dibalik, mengangkat massa yang turun dengan jalan memanaskan fluida pada bagian dalam ruangan, tidak akan terjadi secara alami.



Gambar 2.17 Memanaskan ayunan tidak akan membuatnya untuk berputar [1]

Dari beberapa contoh tersebut jelas dikatakan bahwa proses yang terjadi hanya berlangsung pada arah tertentu dan tidak terjadi pada arah sebaliknya (*reverse*) sebagaimana yang dibuat skema pada Gambar 2.18. Hukum pertama tidak memberikan batasan terkait dengan arah suatu proses, meskipun suatu proses yang terjadi memenuhi hukum pertama, proses tersebut bisa saja tidak terjadi secara nyata. Kekurangan inilah yang menjadi dasar untuk mengenalkan hukum kedua termodinamika. Suatu proses hanya akan terjadi jika memenuhi kaidah Hukum pertama dan kedua. Hubungan ini dapat dengan mudah dipahami dengan mengenalkan *properties* baru, yakni entropi.

Penggunaan Hukum kedua tidak hanya terbatas pada penentuan arah suatu proses. Hukum kedua menyatakan energi memiliki “kualitas” di samping kuantitas. Hukum pertama fokus kepada kuantitas energi dan perubahan bentuk energi dari satu bentuk ke bentuk lain tanpa memperhatikan bagaimana kualitas energi tersebut. Menjaga nilai kualitas energi pada bidang rekayasa merupakan perhatian yang besar dan hukum kedua termodinamika memberikan metode yang dibutuhkan untuk menentukan kualitas dan juga derajat penurunan energi selama proses. Sebagai contoh: *“lebih banyak energi suhu tinggi dapat diubah menjadi kerja, sehingga ini memiliki kualitas energi yang lebih baik dibandingkan jumlah energi yang sama pada temperatur rendah”*.

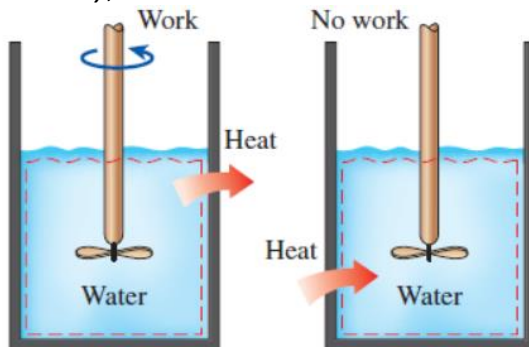


Gambar 2.18 Logika hubungan proses energi dan hukum termodinamika [1]

Hukum kedua termodinamika juga digunakan untuk menentukan batasan teoritis performa dari beberapa sistem *engineering*, seperti mesin kalor dan *refrigerator*, termasuk juga prediksi tingkat penyelesaian dari reaksi kimia. Hukum kedua termodinamika berhubungan dengan konsep “*perfection*”. Nyatanya, hukum kedua menentukan tingkat kesempurnaan dari proses termodinamika. Hal ini dapat digunakan untuk mengukur tingkat kesempurnaan suatu proses.

7. Mesin Kalor

Kerja dapat diubah menjadi bentuk lain energi dengan mudah, namun merubah energi lain menjadi kerja tidaklah mudah. Sebagai contoh, kerja bersih mekanis yang dilakukan oleh poros pada Gambar 2.19 diubah menjadi perubahan energi dalam pada air. Energi ini dapat saja keluar dari air, melewati *boundary*, dalam bentuk kalor.



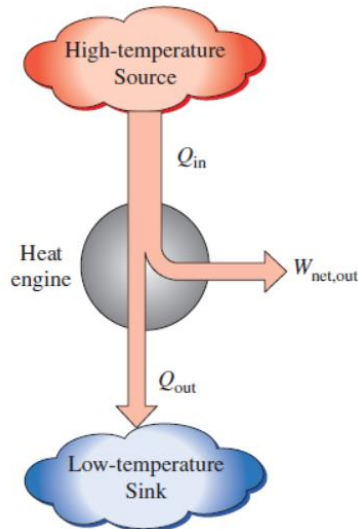
Gambar 2.19 Kiri) Kerja poros menjadi panas, Kanan) memanaskan air tidak akan menghasilkan kerja poros [1]

Dari pengalaman dan uji coba nyata kita mengetahui bahwa usaha sebaliknya (memanaskan air untuk menghasilkan kerja mekanis pada poros) pasti gagal. Berdasarkan hal ini dan observasi sejenis lainnya, dapat disimpulkan bahwa kerja dapat diubah menjadi kalor secara langsung dan menyeluruh, namun merubah kalor menjadi kerja membutuhkan beberapa peralatan khusus. Peralatan inilah yang dikenal dengan **mesin kalor (heat engine)**.

Beragam mesin kalor memiliki beberapa perbedaan antara yang satu dengan yang lain, namun seluruhnya bisa dikarakterisasi berdasarkan konsep berikut (Gambar 2.20):

- Mesin kalor menerima panas dari sumber panas dengan suhu tinggi (energi matahari, ruang bakar, reaktor nuklir, dll)
- Mesin kalor merubah sebagian panas menjadi kerja (biasanya dalam bentuk rotasi poros mekanis)
- Mesin kalor melepaskan sejumlah limbah panas (atau panas sisa) ke *sink* dengan temperatur yang lebih rendah (udara sekitar, sungai, dll)
- Mesin kalor beroperasi menggunakan siklus

Mesin kalor dan peralatan siklik lainnya secara umum melibatkan suatu fluida sebagai media untuk menerima dan melepas panas dalam proses yang berlangsung pada siklus. Fluida ini disebut dengan **fluida kerja**.



Gambar 2.20 Sebagian dari kalor yang diterima oleh mesin kalor diubah menjadi kerja dimana sisanya dilepaskan ke *sink* [4]

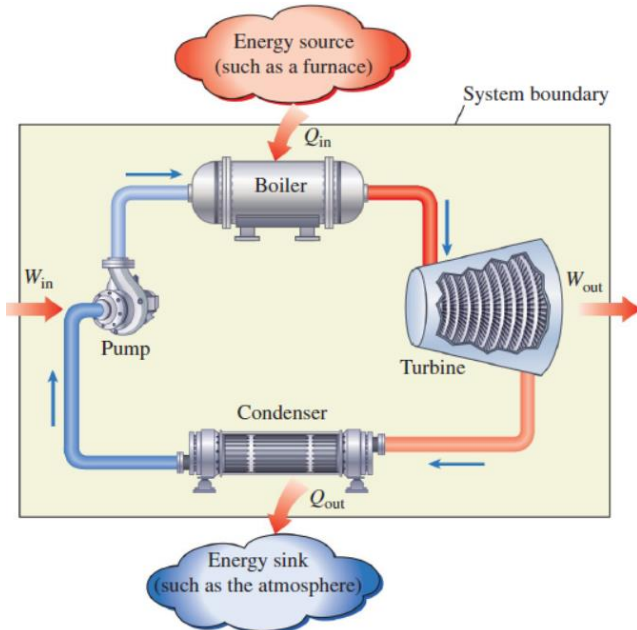
Peralatan yang menghasilkan kerja yang memiliki contoh yang sangat sesuai dengan konsep mesin kalor adalah pembangkit listrik tenaga uap (Gambar 2.21), yang mana sistem ini menggunakan mesin pembakaran luar (*external combustion engine*). Pada pembangkit listrik tenaga uap, pembakaran terjadi di luar mesin, termal energi yang dilepaskan dari pembakaran dipindahkan ke uap sebagai kalor. Nilai-nilai yang ditunjukkan pada Gambar 2.21 adalah:

Q_{in} = banyaknya panas yang diberikan ke uap dari *boiler* sebagai sumber panas temperatur tinggi

Q_{out} = banyaknya panas yang dilepaskan oleh uap ke kondensor untuk ke *sink* temperatur rendah

W_{out} = banyaknya kerja yang diberikan oleh uap akibat ekspansi di turbin

W_{in} = banyaknya kerja yang dibutuhkan untuk menekan air ke tekanan *boiler*



Gambar 2.21 Interaksi kerja dan kalor pada sistem pembangkit tenaga uap [5]

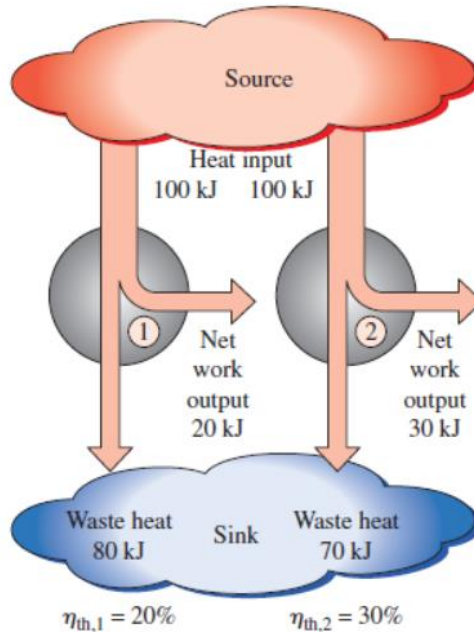
Skema dan notasi pada Gambar 2.21 menunjukkan adanya arah interaksi kerja dan panas yang diindikasikan sebagai “in” dan “out”. Oleh karenanya, ke-empat kuantitas yang disebutkan di atas selalu positif. Total luaran kerja bersih dari pembangkit ini dapat ditentukan dengan mudah berdasarkan perbedaan banyaknya kerja yang dihasilkan (W_{out}) dan kerja yang masuk ke sistem (W_{in}). Penulisan matematisnya adalah:

$$W_{net,out} = W_{out} - W_{in} \text{ (kJ)} \quad 2.20$$

Kerja netto dapat juga ditentukan berdasarkan data perpindahan panas. **Empat komponen** notasi pada pembangkit listrik tenaga uap melibatkan aliran massa masuk dan keluar, sehingga dapat disebut sebagai sistem terbuka. Komponen tersebut, bersama dengan pipa penghubung, pasti memiliki fluida kerja yang sama (tentunya jika tidak bocor). Tidak ada massa yang masuk dan keluar dari keseluruhan sistem. Oleh karenanya, **sistem** ini dianalisis berdasarkan sistem tertutup. Untuk sistem tertutup yang bekerja pada suatu siklus, maka perubahan nilai

internal energi (ΔU) adalah nol, sehingga total kerja netto pada sistem ini akan sama dengan banyaknya panas netto yang diterima oleh sistem. Persamaan matematisnya adalah:

$$W_{net,out} = Q_{in} - Q_{out} \text{ (kJ)} \quad 2.21$$



Gambar 2.22 Perbandingan nilai kalor untuk menentukan efisiensi termal (η_{th}) [5]

Dari persamaan 2.21., dihasilkan istilah baru untuk model analisis yakni efisiensi termal. Nilai Q_{out} menunjukkan besarnya energi yang dibuang agar siklus kerja dapat berlanjut. Nilai Q_{out} tidak akan pernah 0, sehingga nilai kerja netto dari mesin kalor selalu lebih kecil dibandingkan nilai energi panas yang masuk (Q_{in}). Oleh karenanya, hanya sebagian dari energi panas yang masuk ke mesin dapat diubah menjadi kerja. Nilai perbandingan antara kerja netto yang dihasilkan mesin dengan besaran energi panas yang masuk ke mesin digunakan untuk menentukan performa dari kerja mesin dan disebut sebagai efisiensi termal dengan simbol η_{th} (Gambar 2.22).

Untuk mesin kalor, target akhir yang diharapkan adalah kerja netto dari mesin (atau kerja bersih), dan masukan yang diperlukan adalah banyaknya kalor atau panas yang diserap oleh fluida kerja. Sehingga efisiensi termal dari mesin kalor dapat ditulis menjadi:

$$Efisiensi\ Termal = \frac{Total\ kerja\ bersih}{Total\ energi\ panas\ yang\ masuk} \quad 2.22$$

Atau dalam penulisan matematis:

$$\eta_{th} = \frac{W_{net,out}}{Q_{in}} \quad 2.23$$

Dan dapat ditulis menjadi:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \quad 2.24$$

Peralatan yang bekerja dengan siklus yang berulang seperti mesin kalor, *refrigerator*, dan pompa kalor beroperasi diantara media dengan sumber panas tinggi (*reservoir* temperatur tinggi) pada temperatur T_H dan media sumber panas rendah (*reservoir* temperatur rendah) pada temperatur T_L . Untuk memberikan kesamaan pada seluruh peralatan tersebut, dua kuantitas didefinisikan yakni:

Q_H = besarnya perpindahan panas antara fluida kerja dengan sumber panas tinggi (T_H)

Q_L = besarnya perpindahan panas antara fluida kerja dengan sumber panas rendah (T_L)

Sehingga persamaan 2.24. bisa berubah menjadi:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad 2.25$$

Efisiensi termal merupakan suatu ukuran untuk mengetahui seberapa efektif sebuah mesin kalor dalam merubah energi panas menjadi kerja. Mesin kalor dibuat dengan tujuan merubah panas menjadi kerja, dan para insinyur selalu berusaha untuk meningkatkan efisiensi dari peralatan ini karena peningkatan efisiensi berarti konsumsi bahan bakar yang lebih hemat sehingga biaya untuk bahan bakar menjadi lebih rendah dan polusi pun juga ikut turun. Efisiensi termal atau peralatan yang memproduksi

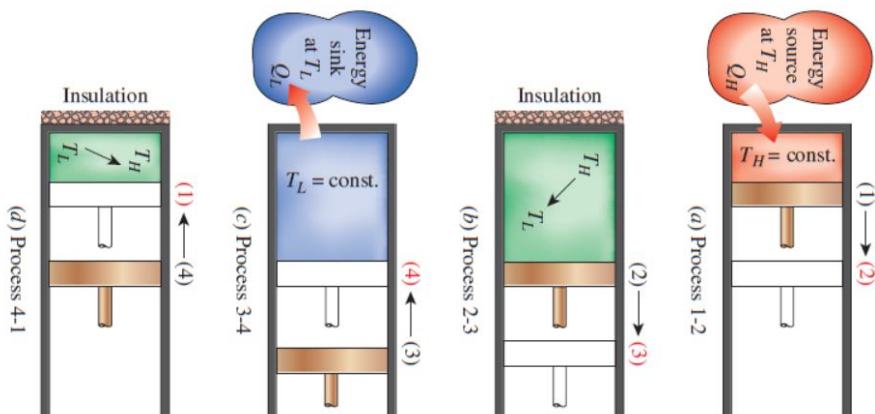
kerja umumnya sangat rendah. Mesin bensin kendaraan ringan standar atau umum memiliki efisiensi termal sekitar 25%. Atas dasar hal tersebut, mesin bensin pada kendaraan hanya merubah energi pada bahan bakar sebanyak 25% untuk menjadi kerja. Nilai ini bisa meningkat menjadi 40% untuk mesin diesel dan pembangkit listrik model turbin gas skala besar dan bisa menjadi 60% untuk sistem kombinasi antara turbin uap-gas.

8. Siklus Carnot

Mesin kalor merupakan peralatan yang bekerja pada suatu siklus dimana fluida kerja dari mesin kalor kembali kepada kondisi (*state*) awal pada akhir dari siklus. Kerja dinyatakan selesai oleh fluida kerja pada satu bagian siklus dan berlanjut ke siklus lain. Perbedaan diantara keduanya adalah kerja bersih yang dihasilkan oleh mesin kalor. Efisiensi dari mesin kalor sangat dipengaruhi oleh bagaimana tiap proses dilakukan. Kerja bersih (*netto*), atau efisiensi, dapat dimaksimalkan dengan menggunakan proses yang membutuhkan sedikit kerja dan menghasilkan kerja bersih yang lebih besar, menggunakan proses mampu balik (*reversible process*). Sehingga, kebanyakan mesin dengan efisiensi yang tinggi adalah siklus mampu balik, yang berarti seluruh siklus dapat mampu balik.

Siklus mampu balik tidak bisa dicapai secara aktual karena berasosiasi dengan ketidakmampuan balik (*irreversibility*) yang ada pada tiap siklus yang tidak bisa dihilangkan. Namun, siklus mampu balik memberikan batasan paling tinggi dari performa mesin dengan siklus sesungguhnya. Mesin kalor dan *refrigerator* yang bekerja dengan siklus mampu balik bertindak sebagai model untuk mesin kalor dan *refrigerator* sesungguhnya untuk perbandingan. Siklus mampu balik bertindak sebagai acuan awal dalam proses pengembangan siklus aktual dan dimodifikasi sesuai dengan kebutuhan.

Siklus mampu balik yang menjadi acuan utama dalam bidang termodinamika adalah siklus Carnot yang dikenalkan oleh insinyur asal Prancis pada tahun 1824 yakni Sadi Carnot. Mesin kalor teoritis yang beroperasi dengan siklus Carnot disebut dengan Mesin Carnot. Siklus Carnot terdiri dari 4 siklus mampu balik, dua kondisi isothermal dan dua kondisi adiabatik, yang bisa dilakukan pada siklus tertutup atau sistem dengan aliran tunak (*steady*).



Gambar 2.23 Proses termodinamika pada Mesin Kalor Carnot[5]

Siklus kerja pada Mesin Kalor Carnot disajikan pada Gambar 2.23. Fluida kerja berada di dalam konfigurasi piston-silinder adiabatik. Insulasi pada kepala silinder dilakukan sedemikian rupa sehingga memungkinkan silinder untuk menerima perpindahan panas dari *reservoir* panas. Oleh karenanya, empat langkah proses pada Mesin Kalor Carnot adalah sebagai berikut:

Proses 1–2 > Ekspansi isothermal mampu balik

Nilai T_H = tetap. Mulanya (kondisi 1) suhu gas adalah T_H dan kepala silinder berhubungan dengan sumber panas pada suhu T_H . Gas berkespansi secara perlahan, melakukan kerja ke sekitar. Ketika gas ekspansi, ada penurunan suhu pada fluida kerja namun karena ada *reservoir* panas maka nilai ini tetap terjaga dan panas yang masuk tidak melebihi panas yang dilepaskan gas akibat ekspansi. Proses ini berlanjut hingga piston mencapai awal kondisi 2. Besarnya panas yang masuk ke gas adalah Q_H .

Proses 2–3 > Ekspansi adiabatik mampu balik

Terjadi penurunan temperatur dari T_H menjadi T_L . Pada kondisi 2, *reservoir* yang berhubungan dengan kepala silinder dipindahkan menjadi insulasi sehingga proses berlangsung sebagai proses adiabatik. Gas

berkespansi secara perlahan, melakukan kerja ke sekitar hingga mencapai suhu T_L (kondisi 3). Piston diasumsikan tanpa gesekan sehingga keseluruhan sistem bersifat adiabatik.

Proses 3–4 > Kompresi isothermal mampu balik

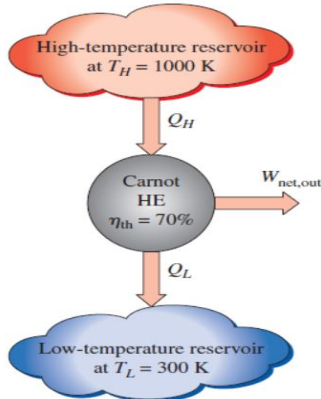
Nilai T_L = tetap. Pada kondisi 3, insulasi pada kepala silinder dipindahkan dan menjadi *reservoir* temperatur rendah atau *sink* pada suhu T_L . Piston bergerak menekan fluida kerja dan melakukan kompresi, yang mana berdampak pada kenaikan suhu di fluida kerja, namun karena adanya *sink* maka nilai temperatur tetap terjaga dan panas yang dilepaskan tidak melebihi panas yang diserap oleh *sink*. Banyaknya panas yang dilepaskan pada proses ini adalah Q_L .

Proses 4–1 > Kompresi adiabatik mampu balik

Terjadi kenaikan temperatur dari T_L menjadi T_H . Pada kondisi 4, *sink* yang berhubungan dengan kepala silinder dipindahkan menjadi insulasi sehingga proses berlangsung sebagai proses adiabatik. Gas terkompresi secara adiabatik dan kondisi gas kembali ke kondisi 1. Suhu gas naik dari T_L menjadi T_H selama proses ini dan ini merupakan akhir dari langkah 4 sehingga siklus selesai dan kembali ke kondisi 1.

9. Mesin Carnot

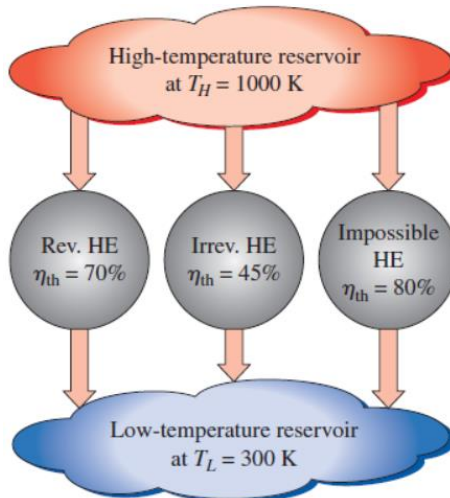
Mesin kalor teoritis yang bekerja dengan siklus Carnot mampu balik disebut dengan Mesin Kalor Carnot (kadang disebut Mesin Carnot). Efisiensi termal dari mesin Kalor manapun, baik mampu balik atau tidak, dapat menggunakan persamaan 2.25. Nilai Q_H adalah panas yang diterima oleh mesin kalor dari *reservoir* temperatur tinggi dengan suhu T_H , Q_L adalah panas yang dibuang oleh mesin kalor ke *sink* temperatur rendah dengan suhu T_L .



Gambar 2.24 Contoh perbedaan temperatur antara dua *reservoir* terkait dengan efisiensi Carnot [5]

Untuk mesin kalor mampu balik, rasio perpindahan panas berdasarkan persamaan 2.25 dapat diganti dengan rasio temperatur mutlak dari kedua *reservoir*, sehingga membentuk persamaan:

$$\eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad 2.26$$



Gambar 2.25 Perbandingan nilai efisiensi dengan batasan dua *reservoir* termal [4]

Persamaan 2.26 sering disebut dengan efisiensi Carnot, karena mesin Carnot merupakan mesin mampu balik terbaik yang diketahui. Gambar 2.24 merupakan batasan efisiensi tertinggi yang mungkin dicapai dari mesin kalor yang bekerja di antara dua sumber *reservoir* panas dengan suhu T_L dan T_H . Seluruh mesin yang tidak mampu balik (mesin aktual) memiliki efisiensi yang lebih rendah. Sebuah mesin kalor aktual tidak bisa mencapai nilai maksimal efisiensi teoritis tersebut karena tidak mungkin untuk mengeliminasi seluruh faktor *irreversible* dari mesin dengan siklus aktual (contoh gaya gesek yang tidak mungkin *reversible*). Sebagai catatan: ***Persamaan 2.26 menggunakan temperatur absolut, penggunaan temperatur seperti °C atau °F dapat menyebabkan kesalahan analisis yang cukup signifikan.***

Gambar 2.2.5 memberikan perbandingan antara efisiensi termal mesin aktual dan mesin *irreversible* yang bekerja pada temperatur yang sama, dengan Bahasa matematis sebagai berikut:

$$\eta_{th} \begin{cases} < \eta_{th,rev} & \text{Mesin kalor irreversible} \\ = \eta_{th,rev} & \text{Mesin kalor mampu balik} \\ > \eta_{th,rev} & \text{Mesin kalor yang tidak mungkin} \end{cases}$$

Kebanyakan mesin yang menghasilkan kerja (dalam hal ini mesin Kalor) pada era sekarang beroperasi dengan efisiensi di bawah 40%, yang mungkin terlihat sangat rendah jika diperhitungkan dari titik 100%. Akan tetapi, ketika performa dari mesin kalor aktual diasses, efisiensi tersebut jangan dibandingkan dengan nilai 100%; namun, nilai tersebut harus dibandingkan dengan efisiensi dari mesin kalor mampu balik (*irreversible*) yang bekerja pada batasan temperatur yang sama karena nilai ini merupakan batasan teoritis yang tepat untuk menentukan nilai efisiensi, bukannya nilai 100%. Dari Gambar 2.25 dapat dibuat analogi seperti ini. Sebuah pembangkit tenaga uap bekerja pada batasan temperatur $T_H = 1000\text{K}$ dan $T_L = 300\text{ K}$, maka efisiensi maksimumnya adalah 70% ($1 - 300/1000$). Dibandingkan dengan hal tersebut, maka efisiensi dari mesin kalor aktual sebesar 40% tidaklah terlalu rendah, meskipun tetap masih perlu banyak upaya untuk peningkatan efisiensi aktual tersebut.

C. LATIHAN BAGIAN II

1. Air dipanaskan pada wadah tertutup dengan tetap diaduk menggunakan *paddle wheel*. Selama proses, energi panas dimasukkan ke air sebesar 30 kJ, dimana 5 kJ panas dilepaskan ke lingkungan sebagai kerugian panas. Kerja *paddle work* sebesar 500 N.m. Tentukan besarnya energi akhir dari sistem jika energi awalnya 10 kJ.
2. Penyejuk udara dengan kapasitas pendinginan sebesar 5 kW digunakan pada ruangan kelas dengan jumlah siswa sebanyak 40 orang. Seseorang pada kondisi diam diasumsikan melepas panas sebesar 360 kJ/jam. Terdapat 10 lampu dengan daya 100 W. Laju perpindahan panas dari lingkungan ke dalam kelas melalui dinding dan jendela diasumsikan sebesar 15,000 kJ/jam. Jika suhu udara di dalam kelas diatur pada suhu tetap sebesar 21 °C, tentukan banyaknya pendingin udara yang dibutuhkan.
3. Sebuah universitas memiliki 200 ruang kelas dan 400 ruang kantor. Ruang kelas dilengkapi dengan 12 lampu (*fluorescent tube*) dengan konsumsi daya 110 W. Untuk ruang kantor, jumlah lampu yang digunakan secara rerata adalah setengahnya. Universitas tersebut buka selama 240 hari/tahun. Ruang kelas dan kantor dalam sehari tidak ditempati selama 4 jam saja, namun lampunya tetap bekerja. Jika rerata biaya listrik sebesar Rp. 1,200/kWh, tentukan berapa besar penghematan yang dapat dilakukan kampus dalam 1 tahun jika lampu tersebut dimatikan selama tidak ditempati.



PENGANTAR MOTOR BAKAR

A. TUJUAN PEMBAHASAN PENGANTAR MOTOR BAKAR

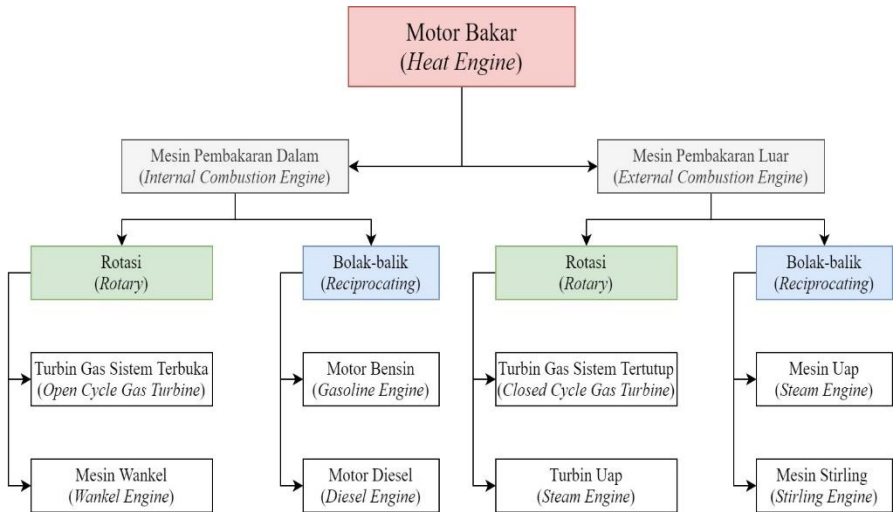
Bagian III dari modul ini membahas tentang pengantar motor bakar terkait dengan desain dan informasi mendasar pada suatu motor bakar. Melalui pembahasan ini, mahasiswa diharapkan mampu:

1. Menjabarkan aplikasi dan desain mesin dasar pada motor bakar
2. Mengklasifikasikan tipe-tipe motor bakar berdasarkan konstruksinya
3. Menyeleksi jenis motor bakar berdasarkan siklus kerja motor bakar

B. MATERI AJAR

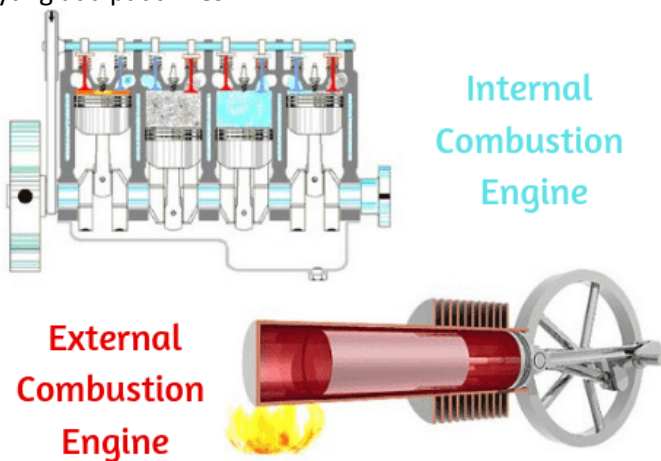
1. Klasifikasi Motor Bakar

Motor bakar atau *combustion engine* (kadang disebut juga *heat engine*) merupakan salah satu mesin konversi energi yang paling banyak digunakan. Motor bakar sebagai mesin konversi energi merubah energi kimia yang dikandung oleh bahan bakar menjadi energi panas dan gerak melalui proses pembakaran (*combustion*). Sebagai teknologi yang paling berkembang, terdapat banyak versi dari motor bakar sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Klasifikasi Motor Bakar [5]

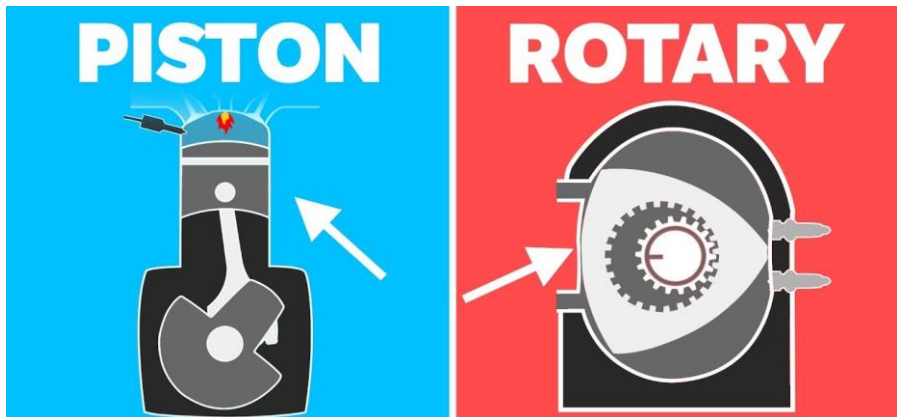
Terdapat dua kategori besar pada motor bakar yakni berdasarkan di mana terjadinya proses pembakaran. Pada mesin pembakaran dalam, proses pembakaran terjadi di dalam ruang bakar di dalam sistem mekanis. Mesin pembakaran luar menggunakan sumber panas dari luar sistem mekanis yang ada pada mesin.



Gambar 3.2 Contoh proses pembakaran pada *internal* dan *external combustion engine* [5]

Gambar 3.2. menunjukkan perbandingan antara *internal* dan *external combustion engine*. Terlihat pada contoh *external combustion engine* (dalam hal ini Mesin *Stirling*) sumber panas berasal dari luar sistem mekanis mesin (piston dan silinder) sedangkan pada *internal combustion engine* (Mesin Bensin) pembakaran terjadi di dalam sistem mekanis mesin.

Berdasarkan Gambar 3.1., klasifikasi di kedua kategori mesin (*internal* dan *external*) adalah sama yakni ada tipe mesin bolak-balik dan rotasi. Mesin bolak-balik merupakan mesin yang menggunakan piston, silinder dan poros engkol yang berfungsi merubah gerak translasi menjadi gerak rotasi. Mesin rotasi secara langsung menghasilkan gerakan putar dengan bantuan rotor. Gambar 3.3. menunjukkan contoh mesin bolak-balik dan mesin rotasi.



Gambar 3.3 Contoh mesin bolak-balik dan mesin rotasi [5]

Selain berdasarkan metode pembakaran yang terjadi pada mesin, klasifikasi lebih detail pada motor bakar dapat dilihat pada berbagai aspek teknis dan parameter operasinya. Berikut ini merupakan klasifikasi motor bakar yang ada:

1. Berdasarkan jenis bahan bakar yang digunakan.
 - a. Mesin Bensin
 - b. Mesin Gas
 - c. Mesin Disel

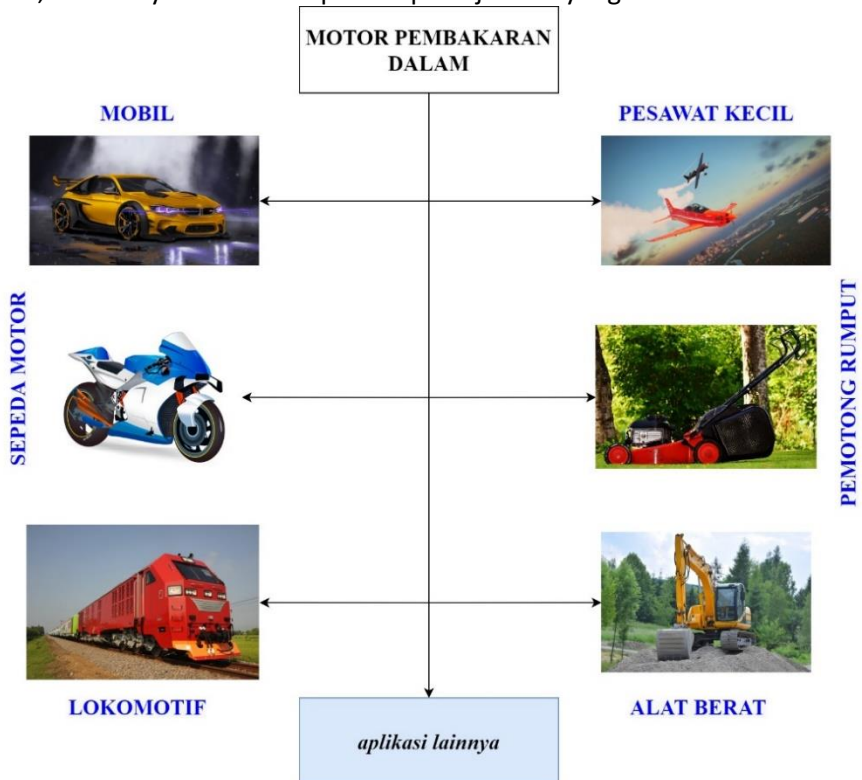
2. Berdasarkan inisiasi proses pembakaran bahan bakar
 - a. Mesin dengan loncatan api listrik (*spark ignition-SI*)
 - b. Mesin Pembakaran Kompresi (*compression ignition-CI*)
3. Berdasarkan langkah kerja
 - a. Mesin Empat Langkah (*Four Stroke*)
 - b. Mesin Dua Langkah (*Two Stroke*)
4. Berdasarkan siklus kerja.
 - a. Mesin siklus Otto (*Otto Cycle*)
 - b. Mesin siklus Diesel (*Diesel Cycle*)
 - c. Mesin siklus dual/gabungan Otto dan Diesel (*Dual Cycle*)
5. Berdasarkan kecepatan mesin.
 - a. Mesin kecepatan rendah
 - b. Mesin kecepatan sedang
 - c. Mesin kecepatan tinggi
6. Berdasarkan sistem pendingin
 - a. Mesin berpendinginan udara
 - b. Mesin berpendingin air
 - c. Mesin dengan pendinginan penguapan
7. Berdasarkan metode injeksi bahan bakar
 - a. Mesin karburator
 - b. Mesin injeksi udara
 - c. Mesin injeksi tanpa udara atau injeksi padat
8. Berdasarkan pengaturan silinder
 - a. Mesin vertikal.
 - b. Mesin horizontal.
 - c. Mesin radial.

2. Aplikasi Motor Bakar

Motor bakar atau “mesin” merupakan salah satu penemuan terpenting setelah penemuan roda karena digunakan pada banyak bidang transportasi. Fokus pada motor pembakaran dalam, motor tipe ini yang paling banyak digunakan pada bidang transportasi untuk skala kecil. Gambar 3.4. memperlihatkan berbagai aplikasi umum dari motor pembakaran dalam. Mobil dan sepeda motor merupakan contoh transportasi yang paling banyak digunakan. Berdasarkan data Badan Pusat

Statistik Indonesia, pada tahun 2019 tercatat ada 112,771,136 unit sepeda motor dan 20,845,876 unit mobil (baik mobil pribadi, bus dan mobil barang). Hal ini menunjukkan penggunaan dari motor pembakaran dalam yang sangat tinggi.

Gambar 3.4. memperlihatkan adanya aplikasi untuk pesawat kecil dikarenakan pesawat tipe ini menggunakan motor pembakaran dalam. Berbeda dengan pesawat besar yang menggunakan mesin pembakaran luar (*jet engine*). Kapal laut tidak termasuk pada contoh motor pembakaran dalam karena ada dua jenis mesin yang umum digunakan yakni mesin diesel dan turbin gas (*marine gas turbine*). Dari dua contoh ini terlihat bahwa umumnya mesin pembakaran luar digunakan untuk penggunaan skala besar dan tidak cocok diterapkan untuk mesin skala kecil, khususnya untuk transportasi pada jumlah yang terbatas.



Gambar 3.4 Aplikasi dari motor pembakaran dalam [5]

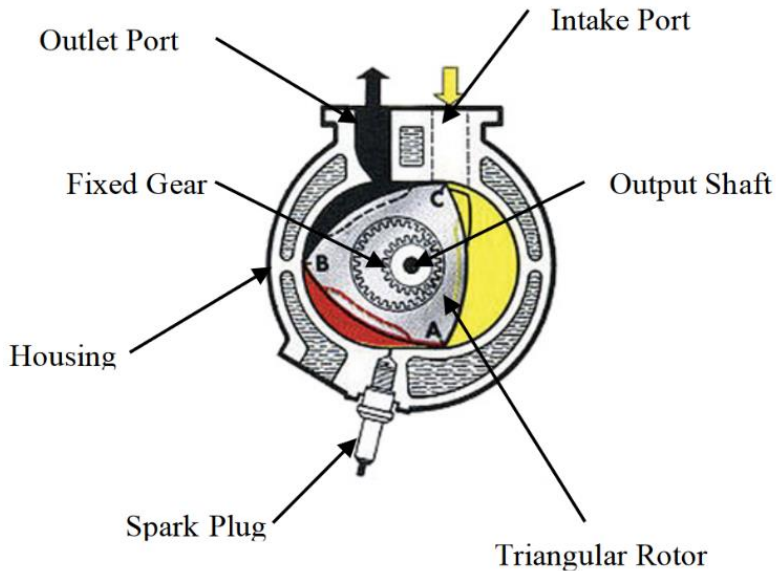
3. Desain Mesin Dasar pada Motor Bakar Dalam

a. Mesin Rotasi-Motor Wankel

Motor Wankel merupakan mesin pembakaran dalam yang menggunakan empat langkah (*four stroke*) siklus Otto untuk menghasilkan energi kinetik. Energi kinetik yang dihasilkan dalam gerakan rotasi dihubungkan ke sistem perpindahan tenaga pada kendaraan. Perusahaan Mazda mengadopsi motor Wankel untuk mobil yang menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar. Penggunaan hidrogen sebagai bahan bakar pada motor Wankel menjadi keuntungan tersendiri karena hidrogen mudah terbakar dan letak saluran masuk bahan bakar berlawanan dengan sisi mesin sehingga menghindari kemungkinan pembakaran dini dari blok mesin yang panas.

Motor Wankel didesain oleh Felix Wankel insinyur asal Jerman untuk NSU Motorenwerke AG (sebuah perusahaan manufaktur mobil) pada tahun 1951. Komponen dasar pada motor Wankel diperlihatkan di Gambar 3.5. Detail dari tiap bagian dasar pada motor Wankel adalah:

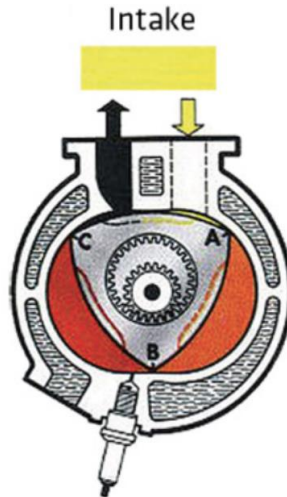
- 1) Saluran Masuk (*Intake Port*): saluran masuk gas/bahan bakar ke dalam mesin
- 2) Poros Keluar (*Output Shaft*): saluran keluar daya putar dari mesin ke sistem pemindah tenaga
- 3) *Triangular Rotor*: membagi ruangan menjadi tiga bagian yakni *intake area* (masukan), area kompresi dan area pembakaran
- 4) Busi (*Spark Plug*): menghasilkan percikan bunga api untuk pembakaran
- 5) *Housing*: sebagai ruang tempat gerak *triangular rotor* dan proses mesin
- 6) *Fixed Gear*: mengatur gerakan rotor sesuai dengan proses kerja
- 7) *Outlet Port*: saluran keluar gas buang



Gambar 3.5 Bagian dasar motor Wankel [5]

Motor Wankel bekerja dengan empat langkah yakni *Intake* (langkah pemasukan), *Compression* (kompresi), *Ignition* (pembakaran) dan *Exhaust* (pembuangan). Selama proses tersebut berlangsung, mesin merubah energi pada bahan bakar menjadi energi gerak untuk menggerakkan kendaraan. Empat proses tersebut secara prinsip disebut langkah (*stroke*) sehingga motor Wankel juga tergolong ke dalam mesin empat langkah, mirip dengan model yang banyak digunakan pada mesin piston. Meskipun memiliki kesamaan pada langkah atau proses, motor Wankel berbeda dengan kebanyakan mesin piston terkait dengan prosesnya.

Motor Wankel berbeda dari mesin piston tradisional karena desainnya yang unik akibat adanya *housing* dan *rotor*. Kebalikan dari kebanyakan mesin piston dengan bentuk kepala (*head*) yang datar, *rotor* pada motor Wankel memiliki tiga sisi yang memungkinkan untuk proses pembakaran terjadi dalam satu kali rotasi *rotor*. Proses berikut menjabarkan aliran kerja dari bahan bakar yang masuk ke mesin secara bertahap. Sebagai catatan penting, seluruh proses terjadi secara simultan.



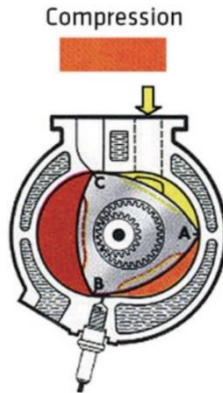
Gambar 3.6 Proses *intake* [5]

Intake

Langkah masuk merupakan langkah pertama pada siklus. Pada fase ini, terjadi penurunan tekanan di dalam *housing* sehingga menghisap campuran udara dan bahan bakar masuk ke ruang mesin (Gambar 3.6.). Campuran udara dan bahan bakar tersebar di dalam *housing* dan dipaksa oleh putaran rotor untuk pindah ke ruang berikutnya di dalam mesin untuk proses selanjutnya. Untuk memastikan tidak ada sisa gas buang dari proses sebelumnya masuk ke ruang *intake*, bentuk *housing* didesain secara khusus dan presisi untuk menutup saluran ke luar dan lingkungan khusus pada rotor mengarahkan campuran udara dan bahan bakar masuk ke ruangan berikutnya.

Kompresi

Kompresi merupakan langkah berikutnya dari proses pada motor Wankel. Pada fase ini, *rotor* memaksa campuran udara dan bahan bakar ke ruangan yang lebih sempit pada sisi *housing*, sehingga campuran udara dan bahan bakar termampatkan (tekanan naik) sebagai mana yang ditunjukkan pada Gambar 3.7. Kriteria khusus mengharuskan bahan bakar dan udara mencapai tekanan dan temperatur tertentu agar dapat dibakar pada proses berikutnya.



Gambar 3.7 Proses kompresi [5]

Proses Pembakaran

Campuran udara dan bahan bakar yang telah dikompresi pada langkah sebelumnya diproses pada proses pembakaran. Busi memercikan bunga api sehingga terjadi proses pembakaran dan menghasilkan tenaga untuk menggerakkan kendaraan (Gambar 3.8.). Akibat adanya desain unik pada bentuk rotor dan konfigurasinya dengan *housing*, penempatan busi harus pada titik yang tepat dan dibuat secara presisi melalui perhitungan yang mendetail untuk memastikan campuran udara dan bahan bakar terbakar secara merata. Proses ini merupakan hal terpenting pada motor Wankel karena berkaitan dengan besarnya daya keluaran yang dihasilkan oleh mesin.



Gambar 3.8 Proses pembakaran [5]

Proses Pembuangan

Langkah ke-empat dan terakhir adalah langkah pembuangan. Sisa pembakaran dalam bentuk gas diarahkan ke luar melalui *exhaust port* (Gambar 3.9.). Proses pembakaran menghasilkan daya sehingga rotor dapat berputar kembali ke posisinya untuk memulai proses awal yakni pemasukan.

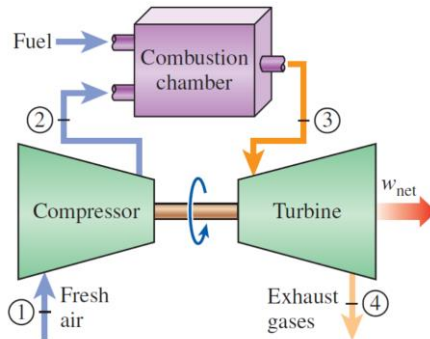


Gambar 3.9 Proses pembuangan [5]

Secara prinsip, motor Wankel memiliki keunggulan utama yakni membutuhkan komponen yang lebih sedikit dibandingkan dengan mesin piston pada umumnya. Terlebih, hanya rotor yang bergerak di dalam mesin. Masih ada beberapa kelebihan lain untuk motor Wankel, namun hal yang membuat perkembangannya jauh lebih lambat dibandingkan mesin piston adalah bahan bakar pada motor Wankel relatif lebih boros karena rasio kompresi yang rendah sehingga efisiensi termal dan ekonomisnya menjadi lebih rendah.

b. Mesin Rotasi-Turbin Gas Sistem Terbuka

Turbin gas sistem terbuka dapat dicontohkan dengan siklus Brayton. George Brayton menemukan mesin ini pada tahun 1870. Pada masa sekarang, mesin ini digunakan untuk turbin gas dimana proses kompresi dan ekspansi terjadi pada mesin rotasi. Gambar 3.10 menunjukkan skema umum dari turbin gas sistem terbuka dengan siklus Brayton.

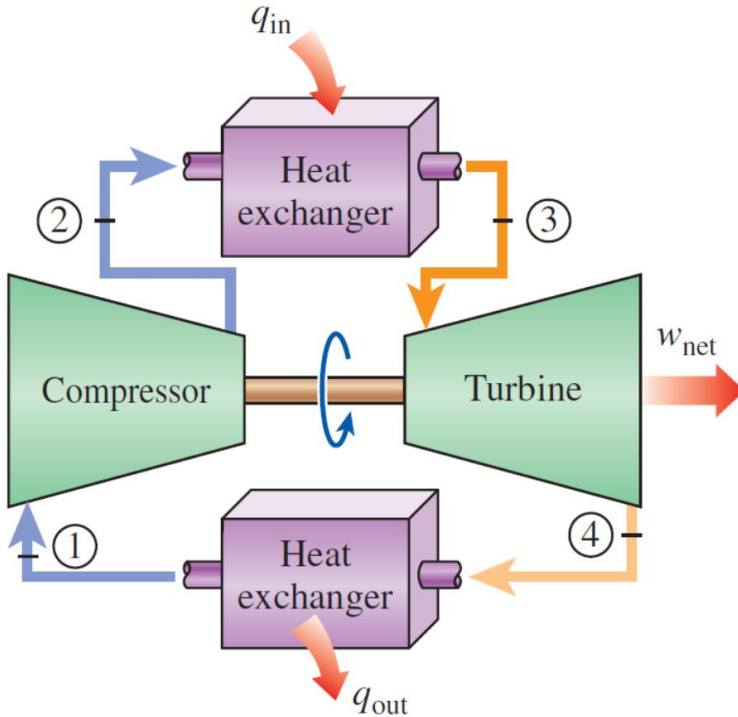


Gambar 3.10 Skema siklus Brayton pada turbin gas sistem terbuka [1]

Proses yang terjadi secara umum ada 4, yakni pemasukan udara segar masuk ke kompresor (1), lalu ditekan oleh kompresor sehingga tekanan dan temperatur naik (2). Udara bertekanan masuk ke ruang bakar dan bahan bakar juga masuk, lalu terjadi pembakaran pada tekanan tetap di area ini sehingga suhu dan tekanan udara naik (3). Gas bertekanan dan temperatur tinggi masuk ke turbin dan mengembang ke tekanan atmosfer sehingga sebagian energinya terserap oleh turbin untuk melakukan kerja mekanis (4). Gas buang yang dilepaskan oleh turbin langsung dikeluarkan dan tidak dimasukkan lagi, sehingga sistem ini disebut dengan turbin gas sistem terbuka.

Sistem gas turbin terbuka dapat dimodelkan sebagai sistem dengan “*siklus tertutup*”, sebagaimana yang diperlihatkan pada Gambar 3.11, dengan menggunakan asumsi udara standar. Pada model ini, proses kompresi dan ekspansi tetap sama, namun proses pembakaran diganti dengan istilah proses pemasukan panas pada tekanan tetap dari luar sistem, dan sistem pembuangan digantikan dengan pelepasan panas pada tekanan tetap ke luar sistem. Siklus ideal dimana fluida kerja mengalami proses pada siklus tertutup untuk turbin gas terbuka disebut dengan “Siklus Brayton”, yang terdiri dari 4 proses internal mampu balik (*reversible*):

- 1 – 2: Kompresi isentropik (di dalam kompresor)
- 2 – 3: Pemasukan panas pada tekanan tetap
- 3 – 4: Ekspansi isentropik (di dalam turbin)
- 4 – 1: Pelepasan panas pada tekanan tetap



Gambar 3.11 Siklus tertutup pada sistem turbin gas [1]

Diagram T-s dan P-v dari siklus Brayton ideal ditunjukkan pada Gambar 3.12. Keempat proses pada siklus Brayton terjadi pada sistem aliran tunak (*steady-flow*), oleh karenanya, proses tersebut harus dianalisis menggunakan proses aliran tunak. Perubahan energi kinetik dan potensial diabaikan, keseimbangan energi (*energy balance*) untuk proses aliran tunak dapat ditulis sebagai berikut:

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = h_{exit} - h_{inlet} \quad (3.1)$$

Berdasarkan hal tersebut, maka proses perpindahan panas dari dan ke fluida kerja:

$$q_{in} = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2) \quad (3.2)$$

dan

$$q_{out} = h_4 - h_1 = c_p(T_4 - T_1) \quad (3.3)$$

Lalu, efisiensi termal dari siklus Brayton ideal pada asumsi udara dingin menjadi:

$$\eta_{th,Brayton} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)} \quad (3.4)$$

Proses 1–2 dan 3–4 adalah isentropik, dan $P_2 = P_3$, $P_4 = P_1$, maka:

$$\frac{T_2}{T_3} = \left(\frac{P_2}{P_3}\right)^{(k-1)/k} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(k-1)/k} = \frac{T_3}{T_4} \quad (3.5)$$

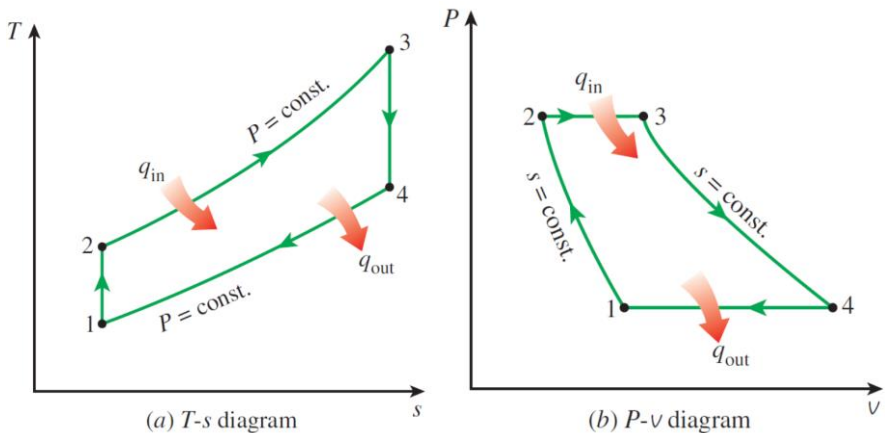
Seluruh persamaan diubah ke dalam hubungan termal efisiensi, maka:

$$\eta_{th,Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \quad (3.6)$$

Dimana:

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} \quad (3.7)$$

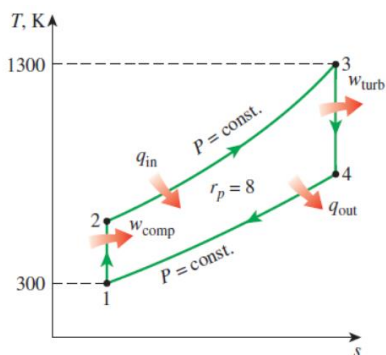
Dari persamaan terakhir, diketahui bahwa r_p adalah perbandingan tekanan dan k adalah rasio panas spesifik dari fluida kerja. Dari persamaan 3.6 terlihat bahwa pada kondisi asumsi udara dingin, efisiensi termal dari siklus Brayton ideal bergantung pada rasio tekanan di gas turbin dan rasio panas spesifik dari fluida kerja.



Gambar 3.12 Diagram T-s dan P-v siklus Brayton Ideal [1]

Contoh Kasus Siklus Brayton Ideal Sederhana

Sebuah pembangkit listrik gas turbin bekerja dengan menggunakan siklus Brayton ideal dengan rasio tekanan 8. Suhu gas di saluran masuk kompresor adalah 300 K dan 1300 K pada sisi masuk turbin. Dengan menggunakan asumsi udara standar, tentukan: (a) suhu gas pada saluran keluar kompresor dan turbin, (b) rasio kerja balik (*back work ratio*), (c) efisiensi termal.



Proses Pengerjaan

Dalam tiap analisis termodinamika untuk sistem *engineering*, maka diperlukan asumsi untuk memberikan batasan kerja yang lebih terarah. Asumsi untuk kasus di atas adalah:

- Kondisi operasi yang tunak (*steady*)
- Menggunakan asumsi udara standar
- Perubahan energi kinetik dan potensial diabaikan
- Variasi dari panas spesifik diperhitungkan

Analisis

Diagram T-s disajikan pada contoh kasus tersebut, dan sebagaimana terlihat bahwa komponen yang digunakan pada siklus Brayton adalah peralatan aliran tunak.

- (a) Suhu udara pada sisi keluaran kompresor dan turbin dapat diperoleh melalui hubungan isentropik:

Proses 1–2 (*kompresi isentropik dari gas ideal*)

$T_1 = 300 \text{ K} \rightarrow h_1 = 300.19 \text{ kJ/kg}$ dan $P_{r1} = 1.386$ (diperoleh dari tabel *properties* udara)

$P_{r2} = \frac{P_2}{P_1} P_{r1} = 11.09 \rightarrow T_2 = 540 \text{ K}$ dan $h_2 = 544.35 \text{ kJ/kg}$

Proses 3–4 (*ekspansi isentropik dari gas ideal*)

$T_3 = 1300 \text{ K} \rightarrow h_3 = 1395.97 \text{ kJ/kg}$ dan $P_{r3} = 330.9$

$P_{r4} = \frac{P_4}{P_3} P_{r3} = \left(\frac{1}{8}\right) 330.9 = 41.36 \rightarrow T_4 = 770 \text{ K}$ (pada sisi keluaran turbin) dan $h_4 = 789.37 \text{ kJ/kg}$

- (b) Untuk menemukan *back work ratio*, nilai dari besarnya kerja masuk ke kompresor dan kerja yang dihasilkan turbin harus diperoleh, yakni:

$$w_{comp,in} = h_2 - h_1 = 544.35 - 300.19 = 244.16 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{turb,out} = h_3 - h_4 = 1395.97 - 789.37 = 606.60 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Sehingga: } r_{bw} = \frac{w_{comp,in}}{w_{turb,out}} = \frac{244.16 \text{ kJ/kg}}{606.60 \text{ kJ/kg}} = 0.403$$

Artinya, 40.3% dari kerja yang dihasilkan turbin digunakan untuk menggerakkan kompresor

- (c) Efisiensi termal dari siklus adalah rasio antara total kerja bersih terhadap besarnya panas yang masuk

$$q_{in} = h_3 - h_2 = 1395.97 - 544.35 = 851.62 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{net} = w_{out} - w_{in} = 606.60 - 244.16 = 362.4 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Sehingga: } \eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = \frac{362.4 \text{ kJ/kg}}{851.62 \text{ kJ/kg}} = 0.426 \text{ atau } 42.6\%$$

Efisiensi termal juga dapat diperoleh dari persamaan: $\eta_{th} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}$

Dimana $q_{out} = h_4 - h_1 = 789.37 - 300.19 = 489.2 \text{ kJ/kg}$, sehingga hasil akhirnya juga sama yakni 0.42556 atau 42.6%.

Catatan:

Berdasarkan asumsi udara standar, (nilai panas spesifik yang konstan pada suhu ruang), efisiensi termalnya adalah:

$$\eta_{th,Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} = 1 - \frac{1}{8^{(1.4-1)/1.4}} = 0.448 \text{ atau } 44.8\%, \text{ yang}$$

mana cukup mendekati dengan hasil analisis berdasarkan variasi panas spesifik terhadap temperatur.

c. Mesin Bolak-Balik-Motor Bensin dan Diesel

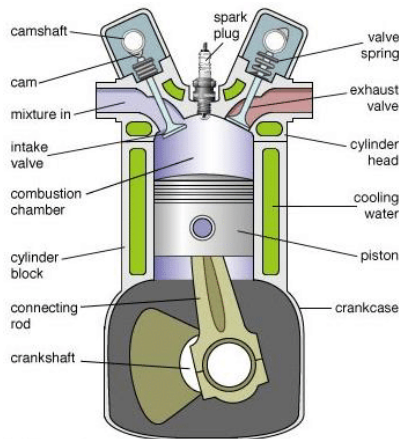
Mesin pembakaran dalam tipe bolak-balik merupakan jenis mesin yang paling banyak digunakan untuk transportasi, khususnya kendaraan ringan. Seluruh mesin ini pada prinsipnya bekerja berdasarkan dua siklus utama yakni siklus Otto dan siklus Diesel. Siklus Otto merupakan representasi siklus ideal untuk motor bensin sedangkan Siklus Diesel

merupakan representasi ideal untuk motor diesel. Kedua jenis siklus ini akan dibahas lebih detail pada Bab V.

4. Konfigurasi Umum Mesin Bolak-Balik

Mesin bolak-balik untuk motor bensin dan diesel pada prinsipnya merupakan mesin dengan konfigurasi piston dan silinder. Proses pembakaran terjadi di dalam silinder dan piston yang menjadi media perpindahan kerja dari proses pembakaran bahan bakar di dalam silinder. Terdapat dua kategori utama dari mesin ini yang ditentukan berdasarkan banyaknya silinder. Kategori pertama merupakan mesin silinder tunggal dimana mesin hanya memiliki satu silinder dan satu piston. Umumnya mesin ini digunakan untuk motor kecil dan pesawat kerja kecil.

- a. Tipe silinder tunggal: konfigurasi sederhana yang terdiri dari satu silinder dan satu piston yang terhubung ke *crankshaft* (poros engkol).



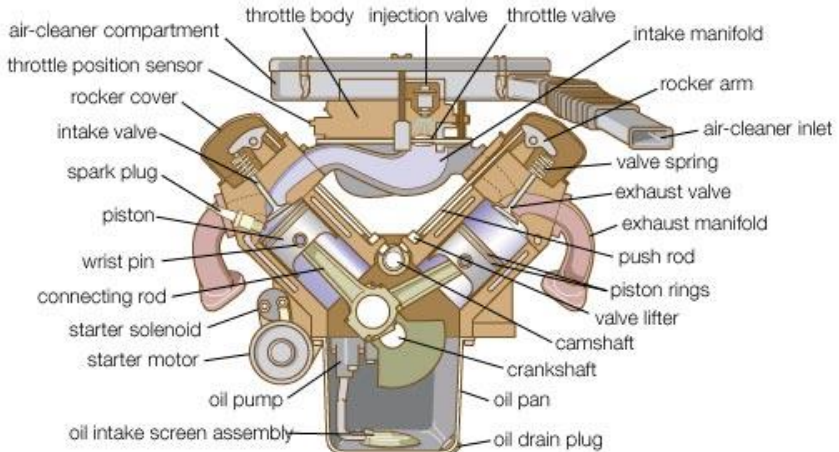
Gambar 3.13 Contoh mesin dengan silinder tunggal [5]

- b. Tipe multi silinder: mesin yang terdiri dari beberapa piston dan silinder yang biasanya terhubung dengan satu *crankshaft* yang sama. Model mesin ini antara lain:
 - 1) **Susunan sejajar (*in-line*)**. Silinder disusun pada posisi sejajar sepanjang *crankshaft*. Susunan sejajar dengan jumlah silinder sebanyak 4 (empat) sangat umum digunakan pada aplikasi kendaraan.



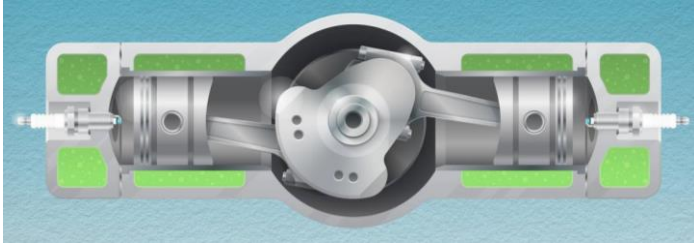
Gambar 3.14 Mesin dengan susunan *inline* [5]

- 2) **Susunan V (*V-engine*)**. Silinder disusun pada dua tepi berbeda dengan nilai sudut tertentu sepanjang poros *crankshaft* dan membentuk huruf V. Sudut antar susunan silinder berkisar antara 15° hingga 120° yang mana umumnya menggunakan sudut antara 60° - 90° . Mesin V memiliki jumlah silinder genap dan berkisar antara 2-20 silinder. Untuk mobil, biasanya yang digunakan adalah 6 dan 8 silinder (V6 dan V8). Secara histori ada mesin hingga 12 dan 16 untuk aplikasi khusus, yakni kendaraan mewah dan kendaraan *high performance*.



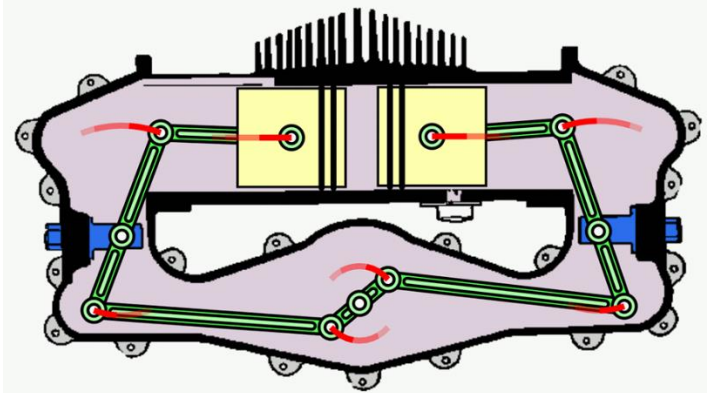
Gambar 3.15 Mesin dengan susunan V [5]

- 3) **Susunan silinder berlawanan (*flat engine* atau *boxer engine*)**. Dua sisi silinder disusun secara berlawanan yang terhubung dengan satu poros *crankshaft*. Secara prinsip, mesin ini bisa disebut dengan mesin V yang menggunakan sudut 180° .



Gambar 3.16 Mesin dengan susunan silinder berlawanan [5]

- 4) **Susunan piston berlawanan**. Dua piston pada sisi silinder yang sama dengan letak ruang bakar (*combustion chamber*) pada sisi tengah. Proses pembakaran terjadi dan mendorong kedua piston untuk melakukan kerja. Pada beberapa aspek, mesin ini memiliki efisiensi yang baik. Namun, tingkat kerumitan yang tinggi khususnya untuk *power output*, *intake* dan *exhaust stroke* menyebabkan jenis ini hanya digunakan pada aplikasi khusus.

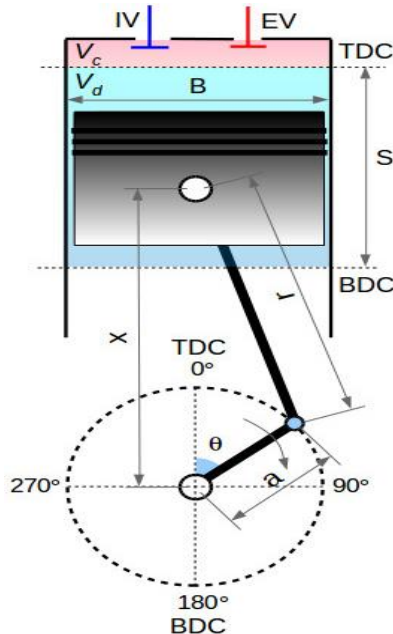


Gambar 3.17 Mesin dengan susunan silinder berlawanan [5]

5. Geometri Piston dan Silinder

Susunan piston dan silinder membentuk geometri khusus yang digunakan untuk menentukan parameter dari mesin. Gambar 3.18 menunjukkan geometri umum susunan piston dan silinder dengan detail sebagai berikut:

- IV : *Intake valve* (katup masuk)
- EV : *Exhaust valve* (katup buang)
- V_c : *Clearance volume* (volume bebas saat piston di TDC)
- V_d : *Displacement volume* (volume kerja piston antara BDC-TDC)
- B : *Bore* (diameter silinder)
- S : *Stroke* (panjang langkah piston, yakni antara BDC-TDC)
- TDC : *Top Dead Center* atau TDC (Titik Mati Atas atau TMA)
- BDC : *Bottom Dead Center* atau BDC (Titik Mati Bawah atau TMB)
- r : Panjang *connecting rod*
- X : Posisi piston
- θ : *Crank angle* (sudut *crank*)
- a : *Crank offset*



Gambar 3.18 Geometri umum dari piston dan silinder pada mesin [5]

Panjang langkah S adalah:

$$S = 2a \quad (3.8)$$

Kecepatan rerata piston adalah:

$$Up = 2SN \quad (3.9)$$

Kecepatan rerata piston Up dalam satuan m/detik dengan nilai N sebagai kecepatan mesin. Rasio antara diameter silinder (B) dengan langkah (S) biasanya antara 0.8 sampai 1.2. Mesin dengan ukuran diameter silinder dan panjang langkah yang sama disebut dengan *square engine*. Volume perpindahan (V_d) dapat diperoleh dari:

$$V_d = V_{BDC} - V_{TDC} \quad (3.10)$$

Volume perpindahan untuk satu mesin adalah:

$$V_d = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot B^2 \cdot S \cdot N_c \quad (3.11)$$

Dimana N_c adalah banyaknya silinder. Nilai volume perpindahan inilah yang dikenal dengan kapasitas mesin dan di Indonesia biasa disebut dengan “cc”. Misalnya, motor 125 cc, 200 cc, atau mobil 1300 cc.



SIKLUS 2 DAN 4 TAK

A. TUJUAN PEMBAHASAN SIKLUS 2 DAN 4 TAK

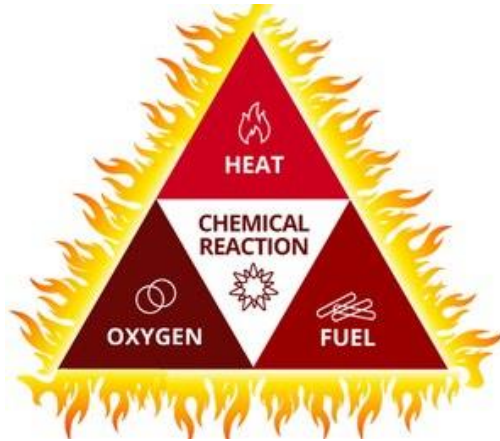
Bagian IV dari modul ini membahas tentang siklus mekanis pada motor bakar yang terdiri dari siklus 2 dan 4 tak, serta informasi pendukung terkait dengan bagian utama dari motor bakar. Melalui pembahasan ini, mahasiswa diharapkan mampu:

1. Menentukan bagian-bagian dari mesin motor bakar
2. Mendeteksi jenis langkah kerja pada motor bakar
3. Memproyeksikan siklus kerja motor bakar berdasarkan gerak langkahnya

B. MATERI AJAR

1. Konsep Motor Bakar

Pembahasan ini ditunjukkan untuk motor pembakaran dalam tipe silinder. Motor bakar tipe silinder menggunakan siklus tertutup yang berarti adanya interaksi energi masuk dan keluar sistem dengan jumlah massa yang tetap. Volume sebagai variabel diatur oleh gerakan piston (antara TDC dan BDC). Prinsip utama dari motor bakar adalah mengubah energi kimia yang terkandung pada bahan bakar menjadi energi panas untuk menggerakkan piston. Proses perubahan energi tersebut terjadi dengan skema pembakaran. Syarat terjadinya pembakaran dikenal dengan istilah *triangle of fire* atau segitiga api.

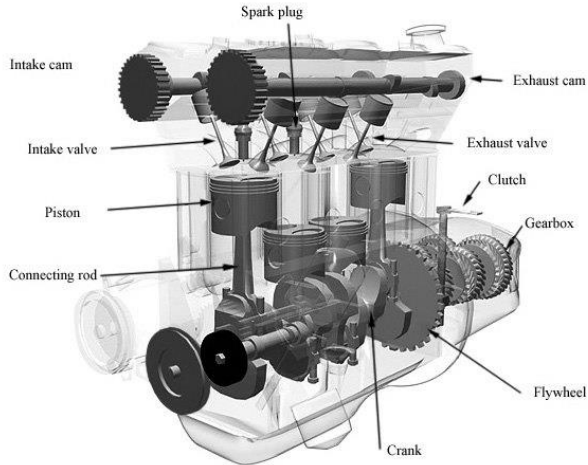


Gambar 4.1 Segitiga Api [6]

Dari Gambar 4.1. terlihat bahwa syarat terjadinya pembakaran (sebagai reaksi kimia) adalah adanya panas, bahan bakar dan oksigen. Ketiga syarat ini mutlak harus ada pada kerja motor bakar. Oleh karenanya, dibutuhkan suatu sistem khusus untuk menghadirkan ketiga aspek tersebut ke dalam mesin. Permasalahan berikutnya adalah bagaimana untuk menjamin proses pembakaran dapat diatur dan terjadi secara berulang. Berarti, dibutuhkan konsep khusus untuk memungkinkan bahan bakar masuk ke dalam ruang bakar secara dan sisa pembakarannya dikeluarkan. Proses ini dikenal dengan istilah siklus. Siklus paling mendasar adalah menjamin adanya proses termodinamika yang berulang di dalam mesin. Proses termodinamika ini kemudian diturunkan menjadi proses mekanis terkait dengan interaksi mesin dengan perlengkapannya.

2. Kelengkapan Komponen Motor Bakar Tipe Silinder

Motor bakar merupakan karya rekayasa (*engineering*) teknologi yang sangat luar biasa. Pada motor bakar tipe silinder, terdapat banyak komponen yang ada di dalam mesin. Pembahasan ini fokus pada kelengkapan utama yang terkait dengan proses konversi energi.



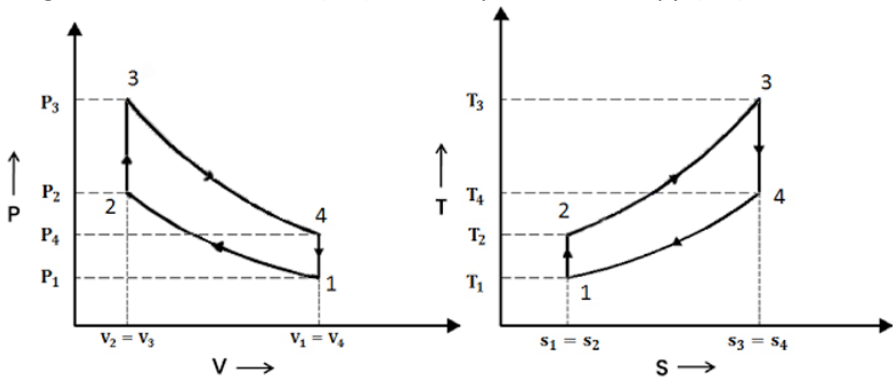
Gambar 4.2 Komponen umum pada motor bakar tipe silinder [5]

Gambar 4.2. menyajikan komponen yang “umum” digunakan pada motor bakar tipe silinder. Terkait dengan proses termodinamika, terdapat 3 (tiga) komponen utama yang terlibat yakni katup (*valve*), piston (termasuk *connecting rod*) dan *crank* atau engkol. Katup berfungsi mengatur aliran bahan bakar dan udara yang masuk dan keluar dari dalam mesin, piston sebagai kontrol proses termodinamika untuk merubah tekanan dan volume di dalam mesin dan *crank* untuk mengatur gerakan piston.

Katup, piston dan *crank* bekerja secara simultan dan berhubungan untuk menjamin proses termodinamika yang efektif dan stabil. Hal ini berarti dibutuhkan komponen pendukung yang berfungsi untuk mengatur seluruh hubungan ini, misalnya *timing gear* (atau *belt*). Namun, hal tersebut lebih ke arah sistem mekanisme kendaraan yang bisa saja bervariasi antar kendaraan. Berarti, proses termodinamika di mesin pada prinsipnya hanya berhubungan dengan tiga aspek komponen tersebut yakni katup, piston dan *crank*.

3. Proses Termodinamika pada Motor Bakar

Kajian pada BAB II menunjukkan adanya proses Isobarik (tekanan tetap), Isotermal (suhu tetap) dan Isokhorik (Volume tetap). Proses ini terjadi pada kerja mesin motor bakar. Sebagai tambahan, ada satu proses lagi yakni isentropik dimana entropi gas atau fluida tetap konstan. Keempat proses tersebut terjadi secara berulang saat mesin bekerja dan umumnya dibuat ke dalam suatu hubungan diagram yang dikenal dengan diagram *Pressure-Volume* (P-v) dan *Temperature-Entropy* (T-s).



Gambar 4.3 Diagram Pv dan Ts dari siklus Otto

Gambar 4.3. menyajikan contoh dari diagram Pv dan Ts dari siklus Otto. Angka di dalam masing-masing diagram menunjukkan proses. Contoh sederhana adalah proses 1→2 menyebabkan kenaikan tekanan dan penurunan volume berdasarkan diagram Pv dan berdasarkan diagram Ts proses tersebut menyebabkan kenaikan temperatur pada entropi yang sama (Isentropik). Dikatakan sebagai satu siklus berarti proses dari 1→2→3→4→1 dilakukan secara berulang. Terdapat 4 proses pada tiap siklus yang direpresentasikan sebagai langkah (*stroke*) pada motor bakar tipe silinder yakni langkah hisap, langkah kompresi, langkah usaha dan langkah buang.

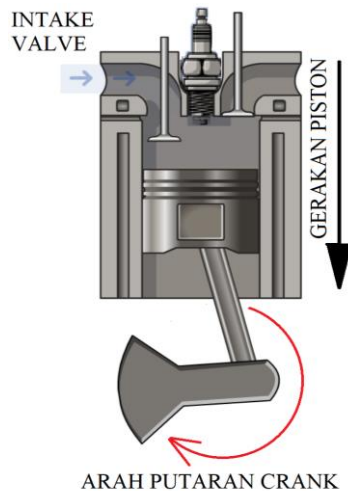
4. Langkah pada Motor Bakar

Terdapat 4 (empat) langkah utama dalam kerja motor bakar yakni hisap, kompresi, usaha dan buang. Masing-masing langkah memiliki fungsi tersendiri dan mempengaruhi bentuk diagram Pv dan Ts. Untuk

memberikan gambaran yang lebih jelas, ke-empat langkah tersebut akan dibahas secara mendasar tanpa melihat dari siklus mekanis yang digunakan (4 maupun 2 tak) dan siklus kerja mesin (Otto maupun diesel atau gabungan). Namun, untuk memberikan representasi yang lebih baik, contoh gambar yang diambil adalah berdasarkan siklus 4 Tak untuk mesin Otto (bensin).

a. Langkah Hisap

Hubungan antara katup masuk, gerakan piston dan arah putaran *crank* pada langkah hisap diperlihatkan pada Gambar 4.4. Pada proses ini, piston turun dari TMA (Titik Mati Atas) ke TMB (Titik Mati Bawah), menyebabkan adanya kevakuman di dalam silinder. Katup masuk membuka memungkinkan fluida kerja (campuran udara dan bahan bakar untuk mesin bensin konvensional atau udara saja untuk mesin diesel dan GDI). Proses ini terjadi diasumsikan pada tekanan tetap, menyebabkan kenaikan volume.

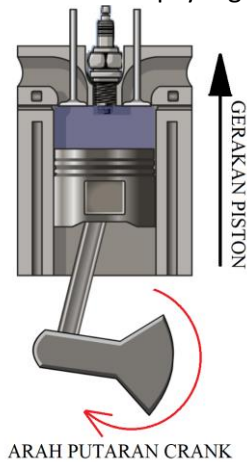


Gambar 4.4 Gerakan piston, *crank* dan katup pada langkah hisap [5]

b. Langkah Kompresi

Hubungan antara katup, gerakan piston dan arah putaran *crank* pada langkah kompresi diperlihatkan pada Gambar 4.5. Pada proses ini, piston naik dari TMB (Titik Mati Bawah) ke TMA (Titik Mati Atas), menyebabkan

kenaikan tekanan dan temperatur di dalam ruang bakar karena kedua katup tertutup. Proses kompresi menyebabkan kenaikan tekanan, temperatur dan volume pada nilai entropi yang tetap (isentropik).

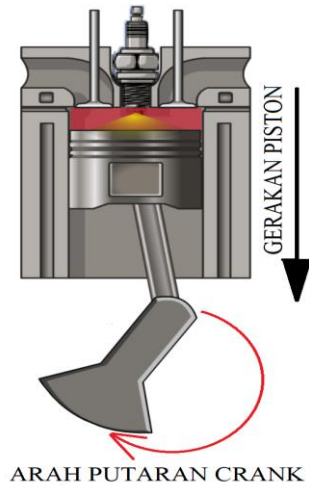


Gambar 4.5 Gerakan piston, *crank* dan katup pada langkah kompresi [5]

c. Langkah Usaha

Beberapa derajat sebelum piston mencapai TMA, busi (untuk mesin bensin konvensional) memercikan bunga api (Gambar 4.6). Hal ini mengakibatkan terjadinya reaksi pembakaran sehingga terjadi pelepasan energi dari bahan bakar dalam bentuk ekspansi gas dan panas, mendorong piston ke bawah (karena kedua katup masih tertutup). Terkait dengan aspek proses termodinamika, pada langkah usaha terbagi menjadi dua bagian berbeda yakni:

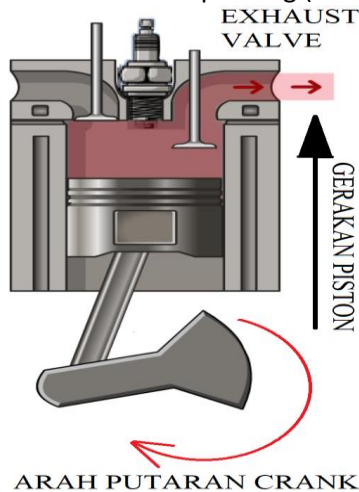
- Constant volume heat addition* atau pemasukan panas pada volume tetap (proses 2→3 pada Gambar 4.3). Pada bagian ini, terjadi kenaikan tekanan, temperatur dan entropi pada volume yang tetap.
- Isentropic expansion* atau ekspansi isentropik (proses 3→4 pada Gambar 4.3). Pada Bagian ini, terjadi penurunan temperatur, volume dan tekanan pada entropi yang sama.



Gambar 4.6 Gerakan piston, *crank* dan katup pada langkah usaha [5]

d. Langkah Buang

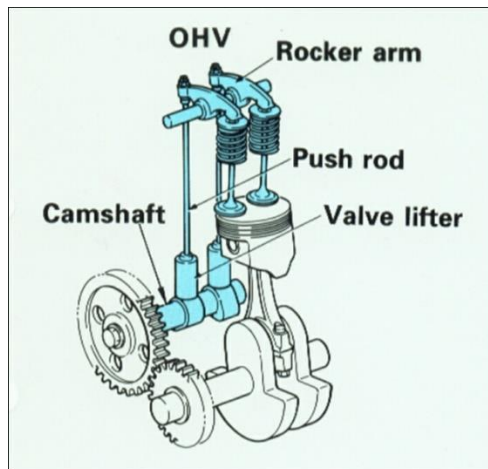
Sisa pembakaran di dalam silinder harus dikeluarkan agar proses dapat berlanjut. Akibat dari efek inersia dan energi mekanis yang disimpan oleh *flywheel*, piston terdorong ke atas untuk menekan sisa pembakaran ke luar dari dalam silinder melalui katup buang (Gambar 4.7.).



Gambar 4.7 Gerakan piston, *crank* dan katup pada langkah buang [5]

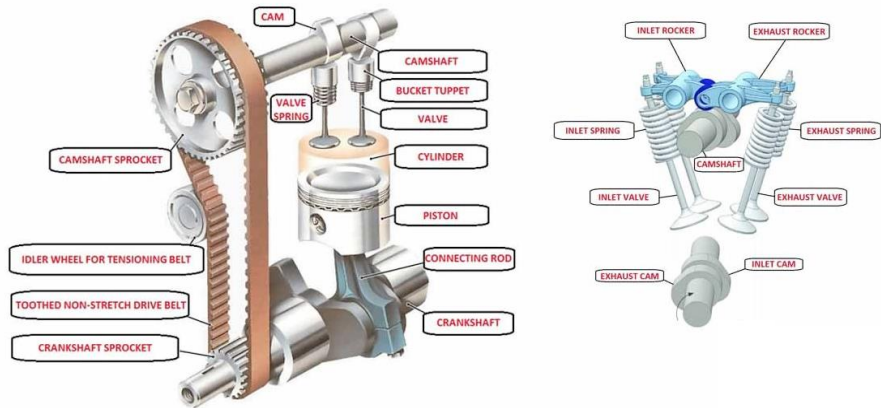
5. Mekanisme Katup

Proses yang terjadi menunjukkan adanya interaksi gerakan piston, *crank* dan katup. Sebagai contoh, katup masuk hanya terbuka pada saat langkah hisap dan katup buang hanya terbuka saat langkah buang. Kedua katup menutup pada langkah kompresi dan usaha. Untuk memungkinkan pengaturan tersebut, maka dibutuhkan suatu mekanisme tertentu yakni mekanisme katup. Mekanisme katup adalah mekanisme yang mengatur kerja katup (membuka/menutup) dengan berdasarkan gerakan piston. Berdasarkan mekanisme utamanya, terdapat 3 (tiga) jenis yakni OHV, OHC dan DOHC.



Gambar 4.8 Mekanisme katup OHV (*Over Head Valve*) [2]

Mekanisme katup OHV menempatkan katup di atas silinder dengan penggerakannya berada di bawah. Pada Gambar 4.8, terlihat bahwa *camshaft* terhubung dengan *timing gear*. *Timing gear* berfungsi mengatur gerakan *camshaft* sesuai dengan posisi *crankshaft*. Saat sedang terkait, *timing gear* dari *crankshaft* akan menggerakkan *gear* dari *camshaft*, menyebabkan *camshaft* berputar. Putaran *camshaft* pada titik tertentu akan mendorong *valve lifter* dan *push rod* ke atas untuk menekan *rocker arm*. *Rocker arm* yang terdorong akan menekan *valve* sehingga *valve* terbuka. Agar kembali ke posisi semula, maka katup dilengkapi dengan pegas.



Gambar 4.9 Mekanisme katup OHC (*Over Head Cam*) dengan satu *cam* (kiri-*Single Over Head Cam* atau SOHC) dan dua *cam* (kanan-*Dual Over Head Cam* atau DOHC) [5]

Mekanisme katup OHC dibuat menjadi lebih sederhana dan memungkinkan untuk performa jangka panjang yang lebih baik tanpa harus melakukan penyetelan *valve clearance* secara berkala seperti pada mekanisme OHV. Pada mekanisme katup OHC, *drive belt* atau *timing belt* digunakan untuk mengatur gerakan *camshaft* berdasarkan putaran *crankshaft*. Penempatan *cam* disesuaikan dengan posisi katup dan juga *timing* yang telah diatur secara presisi. Dikarenakan *cam* menekan langsung *valve* tanpa menggunakan media lain (*rocker arm* misalnya), maka nyaris tidak dibutuhkan perawatan untuk penyetelan katup secara berkala. Mekanisme ini juga memungkinkan untuk penggunaan katup yang lebih banyak sehingga dikenal dengan istilah DOHC dimana 1 silinder dapat memiliki 4 katup (2 *in* dan 2 *ex*).

6. Siklus 4 dan 2 Tak

Langkah kerja mesin yang terdiri dari 4 proses yakni hisap, kompresi, usaha dan buang dapat diselesaikan dalam dua model siklus mekanis yang dikenal dengan istilah siklus 4 dan 2 tak atau mesin 4 dan 2 langkah (*stroke*). Pada mesin 4 langkah, 4 proses kerja mesin diselesaikan dalam 4 langkah piston sedangkan pada mesin 2 langkah, 4 proses kerja mesin

diselesaikan dalam 2 langkah gerak piston. Gambar 4.10 menunjukkan perbandingan cara kerja mesin pada siklus 4 dan 2 tak.



Gambar 4.10 Perbandingan siklus 4 dan 2 langkah tak [5]

Tabel 4.1 Perbandingan kerja siklus 4 dan 2 tak

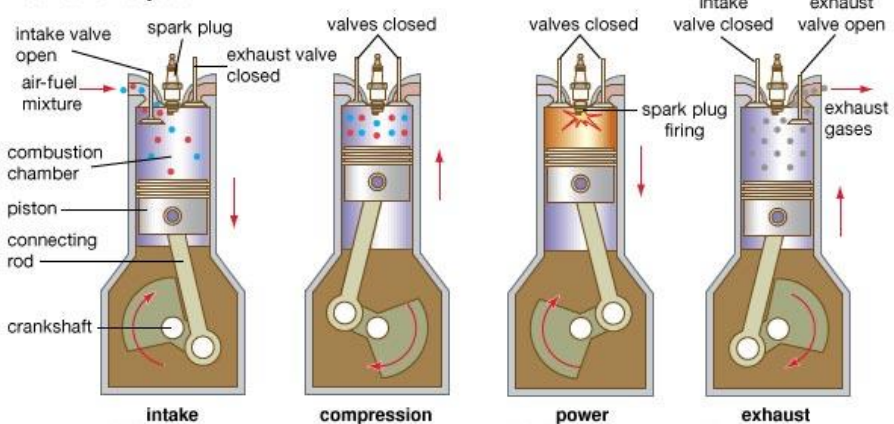
	Banyak Langkah Piston	Putaran <i>Crankshaft</i>
4 Tak	4	720°
2 Tak	2	360 °

Siklus 2 tak memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan siklus 4 tak, yakni respon kerja mesin yang lebih baik karena dalam 360° mesin sudah menghasilkan kerja, dan komponen yang lebih sederhana karena tidak memerlukan katup. Akan tetapi, mesin ini tidak memungkinkan untuk menggunakan pelumasan tetap sehingga diperlukan pelumas khusus untuk ikut dibakar oleh mesin, sehingga mesin ini memiliki polusi udara yang sangat tinggi dan juga efisiensi yang lebih rendah sehingga konsumsi bahan bakar lebih boros.

a. Proses Kerja Siklus 4 Tak

Gambar 4.11. menyajikan diagram kerja siklus 4 tak yang dimulai dari langkah pemasukan (*intake*), kompresi (*compression*), usaha (*power*) dan buang (*exhaust*). Pada langkah hisap, piston turun dari TMA ke TMB, katup masuk membuka dan katup buang menutup, *crank* berputar 180°. Langkah kompresi dimulai ketika piston naik dari TMB ke TMA, kedua katup menutup, *crank* berputar 180°. Langkah usaha dimulai ketika busi memercikan bunga api (untuk mesin bensin) atau injeksi bahan bakar (untuk mesin diesel dan GDI), kedua katup masih menutup, piston turun dari TMA ke TMB. Langkah buang dimulai ketika katup buang membuka, piston naik ke atas. Total panjang *crank angle* untuk satu siklus 4 tak adalah 720°.

Four-stroke cycle

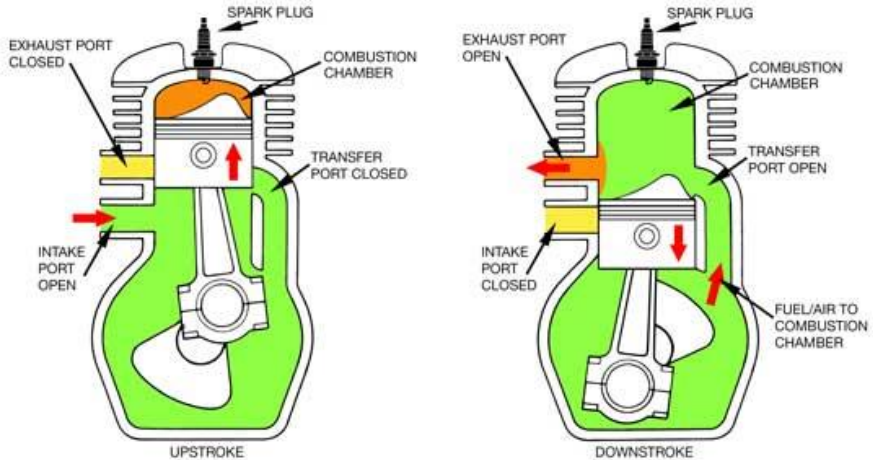


Gambar 4.11 Proses kerja siklus 4 Tak [5]

b. Proses Kerja Siklus 2 Tak

Gambar 4.12. menyajikan diagram kerja siklus 2 tak dan terlihat hanya ada 2 proses utama saja pada siklus ini. Saat langkah naik (*upstroke*), piston menekan campuran udara dan bahan bakar (termasuk pelumas) di ruang bakar. Pada saat yang sama, campuran udara, bahan bakar dan pelumas masuk melalui *intake port*. Pada saat akhir langkah ini, busi memercikan bunga api sehingga terjadi pembakaran yang menyebabkan piston terdorong ke bawah (*downstroke*). Saat piston mendekati titik mati bawah, *exhaust port* terbuka sehingga sisa pembakaran mulai terdorong

ke luar. Pada saat yang sama, saluran bilas (*transfer port*) terbuka, campuran udara dan bahan bakar (termasuk pelumas) terdorong ke silinder. Bentuk piston yang khusus memungkinkan untuk mengatur arah aliran dari campuran udara dan bahan bakar yang terkompresi.



Gambar 4.12 Proses kerja siklus 2 Tak [5]

C. LATIHAN

1. Suatu mesin beroperasi dengan detail spesifikasi pembukaan katup dan *timing* pengapian sebagai berikut:
 - a. *Intake valve opens* (IVO): 5° bTDC
 - b. *Intake valve closes* (IVC): 25° aBDC
 - c. *Ignition starts*: 30° bTDC
 - d. *Exhaust valve opens* (EVO): 45° bBDC
 - e. *Exhaust valve closes* (EVC): 15° aTDC
 Tentukan:
 - a. Gambar *valve timing diagram*
 - b. Panjang masing-masing langkah dalam satuan derajat ($^{\circ}$)
 - c. Besarnya sudut *overlap*
2. Berdasarkan data pada soal No. 1, jika panjang *stroke* pada mesin tersebut = 72 mm, tentukan panjang masing-masing langkah dalam satuan mm.

3. Suatu mesin bensin 4 tak dengan silinder tunggal menggunakan pengapian busi dan beroperasi pada kecepatan 3840 RPM. Tentukan banyaknya pengapian yang dilakukan busi dalam waktu 90 detik.
4. Suatu mesin bensin 4 tak 4 silinder memiliki urutan pengapian atau *firing order* sebagai berikut: 1–3–4–2. Buatlah urutan kerja mesin atau *table sequence* berdasarkan data tersebut (asumsi tanpa ada sudut *overlap*).



SIKLUS OTTO DAN DIESEL

A. TUJUAN PEMBAHASAN SIKLUS OTTO DAN DIESEL

Bagian V dari modul ini membahas tentang siklus Otto dan Diesel berdasarkan karakteristik proses konversi energi pada kedua mesin tersebut. Melalui pembahasan ini, mahasiswa diharapkan mampu:

1. Memproses dasar indikator kerja siklus Otto dan Diesel
2. Mendiagnosis diagram kerja siklus Otto dan Diesel
3. Merumuskan nilai kinerja mesin siklus Otto dan Diesel berdasarkan data P_v dan T_s diagram

B. MATERI AJAR

1. Parameter Kerja Mesin

Kapasitas mesin (dalam cc) merupakan dasar dari analisis kerja mesin, disamping terkait dengan proses pembakaran dan hal lain yang berhubungan dengan energi mekanis dari piston. Bagian 3.5. menunjukkan perumusan tentang geometri piston dan berlanjut lebih detail pada bagian ini. Pada nilai volume perpindahan tetap, langkah yang lebih panjang memungkinkan untuk ukuran diameter silinder yang lebih kecil (*under square*), menghasilkan lebih sedikit area permukaan di ruang bakar sehingga meminimalisir kerugian panas.

Penggunaan *under square* mesin dapat meningkatkan efisiensi termal di area ruang bakar. Akan tetapi, langkah yang lebih panjang mengharuskan piston bekerja pada kecepatan tinggi sehingga

menyebabkan kerugian akibat gesekan yang lebih tinggi, berdampak pada daya keluaran yang lebih kecil. Sebaliknya, jika langkah piston dibuat lebih pendek, maka diameter silinder harus lebih besar yang disebut dengan istilah *over square*. Model ini memungkinkan kerugian gesek yang lebih sedikit namun meningkatkan kerugian panas. Mesin modern umumnya menggunakan model yang mendekati *square engine*, dengan sedikit perbedaan yang dapat dikategorikan sebagai *over* atau *under square*.

Volume silinder terkecil terjadi saat piston berada di posisi TDC, diistilahkan dengan volume bebas atau *clearance volume* (V_c).

$$V_c = V_{TDC} \quad (5.1)$$

$$V_{BDC} = V_c + V_d \quad (5.2)$$

Rasio kompresi (r_c) dari mesin didefinisikan sebagai berikut:

$$r_c = \frac{V_{TDC}}{V_{BDC}} = \frac{V_c + V_d}{V_c} \quad (5.3)$$

Mesin modern dengan siklus Otto (dikenal juga dengan istilah mesin *Spark Ignition* atau *SI engine*) memiliki rasio kompresi antara 8-11, sedangkan mesin dengan siklus Diesel (dikenal juga dengan istilah mesin *Compression Ignition* atau *CI engine*) memiliki rasio kompresi yang tinggi antara 12–24. Volume silinder pada sudut *crank* tertentu adalah:

$$V = V_c + \left(\frac{\pi B^2}{4}\right)(r + a - s) \quad (5.4)$$

Nilai tersebut dapat diubah menjadi satuan *non*-dimensi dengan membagi V_c , substitusi dengan r , a dan s , dan menggunakan R ($R = r/a$):

$$\frac{V}{V_c} = 1 + \frac{1}{2}(r_c - 1)[R + 1 - \cos\theta - \sqrt{R^2 - \sin^2\theta}] \quad (5.5)$$

Luas penampang dari silinder dan luas permukaan dari piston (model datar) adalah:

$$A_p = \left(\frac{\pi}{4}\right)B^2 \quad (5.6)$$

Luas permukaan dari ruang bakar:

$$A = A_{ch} + A_p + \pi B(r + a - s) \quad (5.7)$$

Dimana A_{ch} adalah luas area kepala silinder, yang sedikit lebih besar dibandingkan dengan A_p . Jika definisi dari r , a , s dan R digunakan, maka persamaan 5.7 berubah menjadi:

$$A = A_{ch} + A_p + \left(\frac{\pi BS}{2}\right)[R + 1 - \cos\theta - \sqrt{R^2 - \sin^2\theta}] \quad (5.8)$$

Contoh Kasus

Sebuah mobil silinder 6 tipe V (V6) dengan siklus 4 tak memiliki kapasitas 3,000 cc beroperasi pada kecepatan 3,600 RPM. Mobil ini memiliki rasio kompresi sebesar 9.5, panjang dari *connecting rod* 16.6 cm, dengan model mesin *square*. Pada kecepatan ini, proses pembakaran selesai pada sudut 20° setelah TDC (aTDC). Tentukan:

- Diameter silinder dan panjang langkah
- Rerata kecepatan piston
- Volume bebas dari satu silinder
- Kecepatan piston pada akhir pembakaran
- Jarak yang piston tempuh dari TDC pada akhir proses pembakaran
- Volume di ruang bakar pada akhir proses pembakaran

Penyelesaian:

- Diameter silinder dan panjang langkah untuk kasus model *square* ($B = S$)

$$V_d = \frac{V_{total}}{6} = \frac{3,000 \text{ cc}}{6} = 0.0005 \text{ m}^3 = \left(\frac{\pi}{4}\right) B^2 S = \left(\frac{\pi}{4}\right) B^3$$

$$B = 0.0860 \text{ m} = 8.6 \text{ cm} = S$$

- Rerata kecepatan piston:

$$\bar{U}_p = 2SN = \left(2 \frac{\text{langkah}}{\text{putaran}}\right) \left(0.086 \frac{\text{m}}{\text{langkah}}\right) \left(\frac{3600 \text{ putaran}}{60 \text{ detik}}\right) = 10.32 \text{ m/detik}$$

- Volume bebas untuk satu silinder

$$r_c = 9.5 = (V_d + V_c)/V_c = (0.0005 + V_c)/V_c$$

$$V_c = 0.000059 \text{ m}^3 = 59 \text{ cm}^3$$

- Crank offset* adalah $a = S/2 = 0.043 \text{ m} = 4.3 \text{ cm}$

$$R = r/a = 16.6 \text{ cm}/4.3 \text{ cm} = 3.86$$

Kecepatan piston pada akhir pembakaran:

$$\frac{U_p}{\bar{U}_p} = \left(\frac{\pi}{2}\right) \sin\theta [1 + (\cos\theta)/\sqrt{R^2 - \sin^2\theta}]$$

$$\frac{U_p}{\bar{U}_p} = \left(\frac{\pi}{2}\right) \sin 20^\circ [1 + (\cos 20^\circ)/\sqrt{(3.86)^2 - \sin^2(20^\circ)}] = 0.668$$

$$U_p = 0.668\bar{U}_p = (0.668)(10.32 \text{ m/detik}) = 6.89 \text{ m/detik}$$

e. Posisi piston:

$$X = a \cos \theta + \sqrt{r^2 - a^2 \sin^2 \theta} = (0.043 \text{ m})(\cos 20^\circ) + \sqrt{(0.166 \text{ m})^2 - (0.043 \text{ m})^2 \sin^2(20^\circ)}$$

$$X = 0.206 \text{ m}$$

Jarak dari TDC:

$$\hat{x} = r + a - X = (0.166 \text{ m}) + (0.043 \text{ m}) - (0.206 \text{ m}) = 0.003 \text{ m} = 0.3 \text{ cm}$$

f. Volume di ruang bakar pada akhir pembakaran:

$$\frac{V}{V_c} = 1 + \frac{1}{2}(r_c - 1)[R + 1 - \cos \theta - \sqrt{R^2 - \sin^2 \theta}]$$

$$\frac{V}{V_c} = 1 + \frac{1}{2}(9.5 - 1)[3.86 + 1 - \cos(20^\circ) - \sqrt{(3.86)^2 - \sin^2(20^\circ)}] = 1.32$$

$$V = 1.32V_c = (1.32)(59 \text{ cm}^3) = 77.9 \text{ cm}^3 = 0.0000779 \text{ m}^3$$

Nilai tersebut menunjukkan bahwa selama proses pembakaran, volume di ruang bakar hanya meningkat sedikit dan membuktikan bahwa proses pembakaran di mesin bensin terjadi pada volume yang hampir konstan di TDC.

2. Kerja (Work)

Kerja merupakan luaran dari mesin kalor, dan pada mesin pembakaran dalam bolak-balik, kerja dihasilkan oleh gas di ruang bakar di dalam silinder. Kerja merupakan hasil dari gaya yang bekerja pada suatu jarak perpindahan. Gaya yang dihasilkan oleh tekanan gas dari piston yang bergerak menghasilkan kerja di siklus mesin pembakaran dalam.

$$W = \int F \cdot dx = \int P \cdot A_p \cdot dx \quad (5.9)$$

Dengan nilai P adalah tekanan di ruang bakar, A_p adalah area dimana tekanan terjadi (permukaan atas piston), dan x adalah jarak perpindahan piston. Lalu:

$$A_p \cdot dx = dV \quad (5.10)$$

dV merupakan perubahan volume akibat gerakan piston, sehingga kerja selesai (*work done*) dapat ditulis:

$$W = \int P \cdot dV \quad (5.11)$$

Umumnya mesin terdiri lebih dari 1 (satu) silinder, oleh karenanya analisis lebih baik dilakukan berdasarkan siklus mesin tiap unit massa dari gas (m) di dalam silinder. Untuk melakukan hal tersebut, volume (V) diganti dengan spesifik volume (v) dan kerja diganti dengan kerja spesifik (w):

$$w = W/m \quad v = V/m \quad (5.12)$$

$$w = \int P \cdot dv \quad (5.13)$$

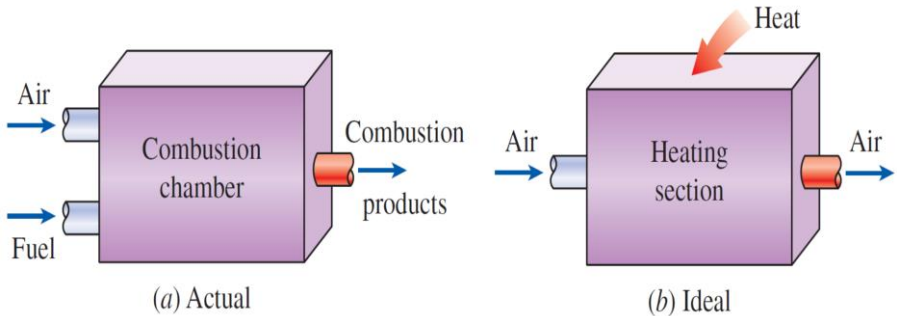
3. Asumsi Udara Standar & MEP

Pada *gas power cycle*, fluida kerja tetap dalam wujud gas dalam seluruh proses kerja mesin. Mesin bensin, mesin diesel dan turbin gas konvensional menggunakan prinsip ini. Pada seluruh mesin tersebut, energi dihasilkan dengan membakar bahan bakar di dalam batasan sistem. Oleh karenanya, mesin ini dikategorikan sebagai mesin pembakaran dalam. Karena adanya proses pembakaran, komposisi dari fluida kerja berubah dari campuran udara dan bahan bakar menjadi produk hasil pembakaran selama siklus berlangsung. Namun, mempertimbangkan bahwa udara didominasi oleh nitrogen (N_2) yang memiliki sifat sulit untuk bereaksi di ruang bakar, maka fluida kerja diasumsikan selalu sebagai udara.

Meskipun mesin pembakaran dalam bekerja dalam siklus mekanis (Piston kembali ke posisi awalnya pada tiap akhir putaran), fluida kerja bagaimanapun tidak mengalami satu siklus termodinamika yang sempurna. Hal ini dapat diamati berdasarkan karakteristik operasi dimana pada satu titik selama proses berlangsung (langkah buang), fluida justru dibuang sebagai gas buang ketimbang digunakan kembali untuk proses berikutnya. Hal ini yang menyebabkan pada aspek tersebut, seluruh motor pembakaran dalam bekerja dengan mengacu kepada prinsip siklus terbuka. Siklus *gas power* yang sesungguhnya cukup rumit. Untuk mengurangi kerumitan tersebut pada satu tingkatan yang mungkin dilakukan tanpa mengubah esensi proses analisis, maka pendekatan ini digunakan. Pendekatan yang dimaksud adalah asumsi udara standar atau *air-standard assumptions*, yakni:

- a. Fluida kerja yang digunakan adalah udara, yang mana secara kontinu bersirkulasi secara tertutup dan berperilaku seperti ideal gas

- b. Seluruh proses yang terjadi pada siklus adalah proses mampu balik internal
- c. Proses pembakaran digantikan dengan pemasukan panas (*heat addition*) (Gambar 5.1) dari luar sistem
- d. Proses pembuangan digantikan dengan proses pelepasan panas (*heat rejection*) yang mengembalikan fluida kerja ke kondisi awal

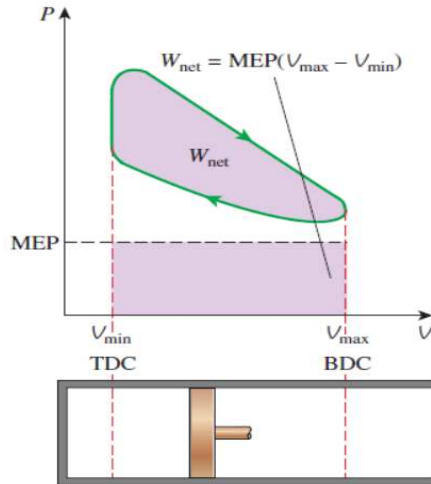


Gambar 5.1 Proses pembakaran digantikan dengan proses pemasukan kalor pada siklus ideal [5]

Asumsi lain yang digunakan untuk lebih memudahkan adalah udara memiliki panas spesifik yang konstan pada suhu ruang (25 °C). Ketika asumsi ini digunakan, asumsi udara standar disebut menjadi asumsi udara standar dingin. Sebuah siklus yang menggunakan asumsi udara standar sering disebut dengan siklus udara standar. Model penyederhanaan ini memungkinkan kita untuk mempelajari secara kualitatif terkait pengaruh dari parameter utama dari sebuah mesin (Gambar 5.2). Sehingga:

$$W_{net} = MEP \cdot \text{Luas permukaan piston} \cdot \text{langkah} = MEP \cdot \text{Volume perpindahan}$$

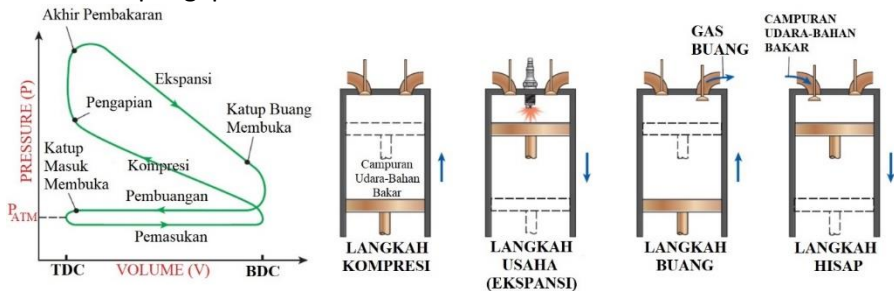
$$MEP = \frac{W_{net}}{V_{max} - V_{min}} = \frac{w_{net}}{v_{max} - v_{min}} \text{ (kPa)} \quad (5.14)$$



Gambar 5.2 Kerja bersih dari satu siklus setara dengan nilai dari MEP dan perpindahan volume [1]

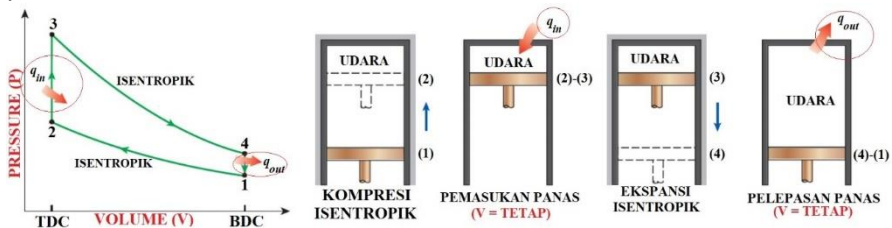
4. Siklus Otto

Siklus Otto merupakan representasi siklus ideal dari mesin dengan pengapian busi (SI Engine). Penamaan siklus Otto diperoleh dari penemunya yakni Nikolaus A. Otto, yang sukses membuat mesin 4 langkah pada tahun 1876 di Jerman dengan menggunakan siklus yang dipelopori oleh ilmuwan Prancis yakni Beau de Rochas di Tahun 1862. Pada mesin pengapian busi, piston melakukan 4 langkah (2 siklus mekanis) di dalam silinder, *crankshaft* mengalami 2 kali putaran untuk tiap siklus termodinamik. Gambar 5.3. menunjukkan diagram Pv dan proses kerja dari mesin pengapian busi.



Gambar 5.3 Diagram Pv dari siklus aktual untuk mesin pengapian busi [1]

Awalnya, piston berada di posisi BDC, lalu bergerak ke atas (TDC) untuk menekan campuran udara dan bahan bakar. Kedua katup menutup, menyebabkan tekanan naik dan volume turun (dapat dilihat pada diagram Pv). Beberapa saat sebelum TDC, proses pengapian dimulai dengan cara busi memercikan bunga api. Terjadi kenaikan tekanan pada volume tetap sampai akhir proses pembakaran, kemudian piston turun akibat ekspansi, pada kondisi ini tekanan turun dan volume naik.



Gambar 5.4 Diagram Pv dari siklus ideal untuk mesin pengapian busi [1]

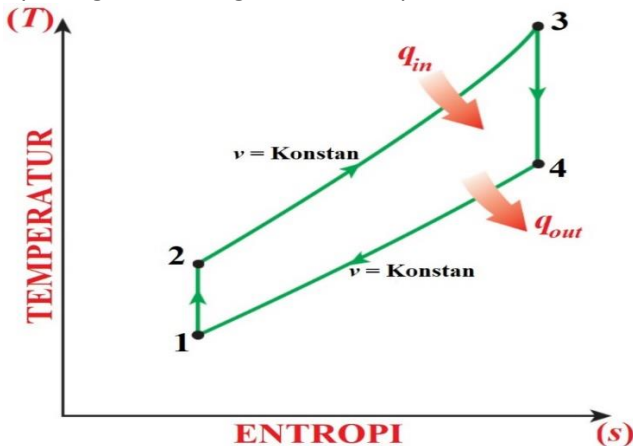
Menjelang BDC, katup buang mulai membuka, sebagian gas sisa pembakaran mulai keluar. Piston naik ke atas untuk menekan sisa pembakaran, terjadi penurunan volume pada tekanan tetap (sedikit di atas atmosfer). Beberapa saat sebelum TDC, katup masuk mulai membuka, piston turun ke BDC, menyebabkan adanya kevakuman, sehingga campuran udara dan bahan bakar masuk ke ruang bakar. Proses berikutnya berlanjut dari langkah kompresi.

Gambar 5.4 memberikan siklus ideal berdasarkan gerakan piston dan Diagram Pv untuk mesin pengapian busi. Proses 1→2 adalah kompresi isentropik, piston naik ke atas, volume turun dan tekanan naik. Proses pemasukan panas yakni 2→3 dilakukan pada volume tetap, menyebabkan kenaikan tekanan. Proses ekspansi isentropik (3→4) akibat pembakaran terjadi menyebabkan penurunan tekanan dan kenaikan volume. Terakhir adalah proses pelepasan panas yang dilakukan pada volume tetap (4→1).

Analisis termodinamik dari mesin Otto 4 langkah (dan 2 langkah) bukan pekerjaan mudah. Namun, penggunaan asumsi udara standar paling tidak dapat memberikan kemudahan dalam proses analisis dengan penyimpangan yang sedikit dari kondisi aktualnya. Hasil dari penyederhanaan ini, yang identik dengan operasi aktualnya, disebut dengan siklus Otto ideal. Siklus ini terdiri dari 4 proses mampu balik, yakni:

- Kompresi isentropik ($1 \rightarrow 2$)
- Pemasukan kalor pada volume tetap ($2 \rightarrow 3$)
- Ekspansi isentropik ($3 \rightarrow 4$)
- Pelepasan panas pada volume tetap ($4 \rightarrow 1$)

Gambar 5.5. menyajikan diagram Ts dari siklus Otto ideal yang merupakan pasangan dari Diagram Pv ideal pada Gambar 5.4.

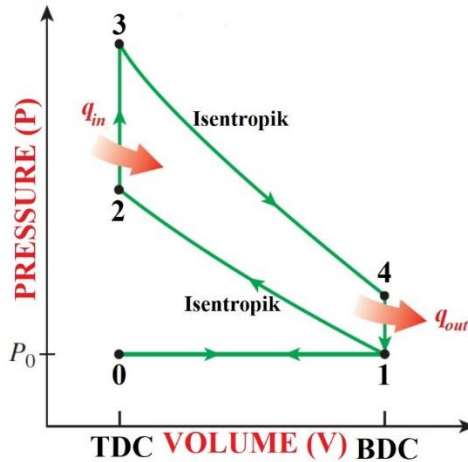


Gambar 5.5 Diagram Ts dari siklus Otto ideal [1]

Siklus Otto ideal pada Gambar 5.4. dengan indikator diagram Pv secara prinsip hanya menunjukkan satu siklus mekanis dengan satu putaran *crankshaft* (kompresi dan usaha). Operasi mesin aktual membutuhkan 4 langkah seperti Gambar 5.3., sehingga perlu dilakukan penyesuaian pada diagram Pv dari siklus Otto ideal dengan cara memasukkan langkah pemasukan dan pembuangan. Gambar 5.6. menyajikan diagram Pv siklus Otto ideal dengan langkah pemasukan dan pembuangan.

Berdasarkan Gambar 5.6., campuran udara dan bahan bakar masuk ke dalam silinder melalui katup masuk pada tekanan atmosfer P_0 selama proses $0 \rightarrow 1$ ketika piston bergerak dari TDC ke BDC (menyebabkan kenaikan volume). Katup masuk menutup pada kondisi 1 dan udara dikompresikan secara *isentropic* hingga mencapai kondisi 2. Kalor ditransfer pada volume tetap ($2 \rightarrow 3$); menyebabkan terjadinya ekspansi secara *isentropic* hingga mencapai kondisi 4; lalu kalor dilepaskan pada

volume tetap (4→1). Gas buang (diasumsikan sebagai udara) dikeluarkan melalui katup buang (1→0) pada tekanan tetap (P_0).



Gambar 5.6 Diagram Pv dari siklus Otto ideal dengan langkah pemasukan dan pembuangan [1]

Siklus Otto ideal sesuai dengan Gambar 5.6. dilakukan pada prinsip siklus terbuka selama proses pemasukan dan pembuangan; dan berlangsung pada siklus tertutup pada proses berikutnya. Hal penting yang harus diperhatikan adalah pemasukan kalor pada volume tetap (2→3) pada siklus Otto ideal digantikan dengan proses pembakaran pada mesin aktual dimana pelepasan kalor pada volume tetap (4→1) diganti dengan *exhaust blowdown*. Interaksi kerja selama proses pemasukan pada tekanan tetap (0→1) dan proses pembuangan pada tekanan tetap (0→1) dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$W_{out,0-1} = P_0(v_1 - v_0)$$

$$W_{in,1-0} = P_0(v_1 - v_0)$$

Kedua proses tersebut saling menghilangkan dengan pertimbangan kerja keluar selama proses pemasukan sama dengan kerja masuk selama proses pembuangan. Sehingga, siklus dapat dibuat menjadi lebih sederhana sebagaimana Gambar 5.4. Sehingga, penyertaan proses

pemasukan dan pembuangan tidak mempengaruhi kerja bersih yang dihasilkan dari satu siklus.

Siklus Otto dilakukan pada siklus tertutup, dan dengan mengabaikan perubahan energi kinetik dan potensial, kesetimbangan energi dari tiap proses dapat dituliskan berdasarkan satuan massa berdasarkan persamaan berikut:

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = \Delta u \text{ (kJ/kg)} \quad (5.15)$$

Tidak ada kerja yang terlibat selama proses pemasukan kalor karena proses ini terjadi pada volume tetap. Sehingga, proses pemasukan dan pelepasan kalor dari dan ke fluida kerja dapat dituliskan berdasarkan persamaan:

$$q_{in} = u_3 - u_2 = c_v(T_3 - T_2) \text{ (kJ/kg)} \quad (5.16)$$

dan

$$q_{out} = u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1) \text{ (kJ/kg)} \quad (5.17)$$

Sehingga efisiensi termal dari siklus Otto ideal berdasarkan asumsi udara dingin adalah:

$$\eta_{th,Otto} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

Proses 1→2 dan 3→4 adalah isentropik, dan $v_2 = v_3$ dan $v_4 = v_1$. Maka:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k-1} = \frac{T_4}{T_3} \quad (5.18)$$

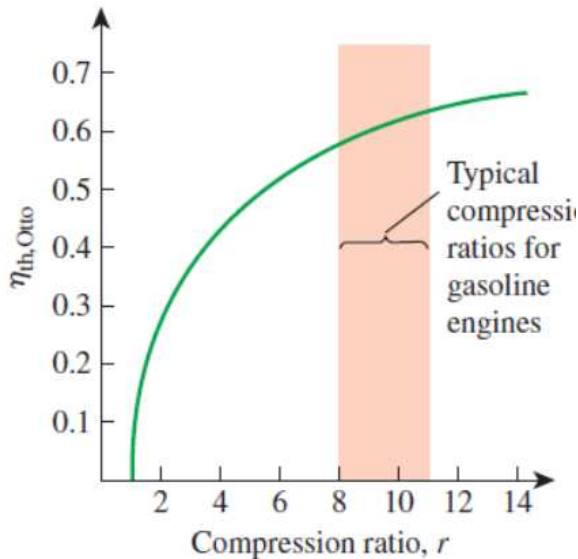
Substitusi persamaan tersebut ke dalam hubungan persamaan efisiensi termal dan disederhanakan sehingga menjadi:

$$\eta_{th,Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \quad (5.19)$$

dimana:

$$r = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (5.20)$$

Adalah rasio kompresi dan k adalah rasio panas spesifik (c_p/c_v).

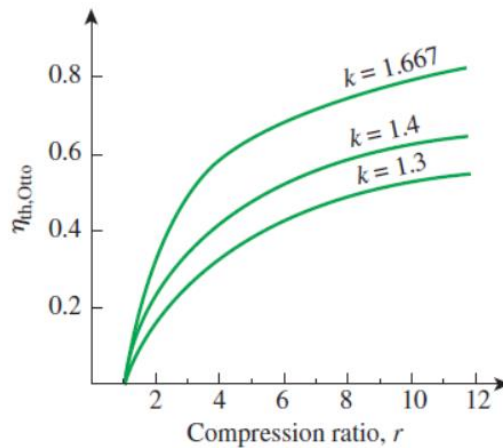


Gambar 5.7 Efisiensi termal dari siklus Otto ideal berdasarkan fungsi rasio kompresi

Persamaan 5.19 menunjukkan bahwa pada asumsi standar udara dingin, efisiensi termal dari siklus Otto ideal bergantung kepada rasio kompresi dan rasio panas spesifik dari fluida kerja. Efisiensi termal siklus Otto ideal meningkat seiring kenaikan nilai rasio kompresi dan rasio panas spesifik. Hal ini juga sesuai dengan mesin pengapian busi aktual. Gambar 5.7 menyajikan kurva efisiensi termal terhadap rasio kompresi dengan nilai $k = 1.4$, yang mana merupakan nilai rasio panas spesifik pada suhu ruang. Pada nilai kompresi tertentu, efisiensi termal dari mesin pengapian busi aktual lebih kecil dibandingkan dengan siklus Otto ideal karena adanya faktor tidak mampu balik, seperti gesekan, dan faktor lain seperti pembakaran tidak sempurna.

Dari Gambar 5.7 diamati bahwa kurva efisiensi termal meningkat secara bertahap pada rasio kompresi rendah dan meningkat secara perlahan setelah mencapai nilai rasio kompresi 8. Sehingga, layak untuk disebutkan bahwa meningkatnya efisiensi termal dengan rasio kompresi tidak selamanya berhubungan dengan rasio kompresi tinggi. Selain itu, pada penggunaan rasio kompresi yang tinggi, suhu dari campuran udara

dan bahan bakar meningkat tajam hingga melewati temperatur nyala sendiri dari bahan bakar (temperatur dimana bahan bakar dapat terbakar sendiri tanpa percikan busi) selama proses pembakaran, menyebabkan penyalan lebih awal dan cepat. Pengapian prematur ini disebut dengan **autoignition**, menyebabkan mesin menjadi lebih berisik, yang disebut dengan **knocking**. *Autoignition* pada mesin bensin tidak diperbolehkan sama sekali karena dapat merusak mesin dan menurunkan performa secara tajam. Hal ini menjadi batasan dari penentuan nilai rasio kompresi pada mesin bensin.



Gambar 5.8 Efisiensi termal dari siklus Otto ideal berdasarkan nilai rasio panas spesifik (k)

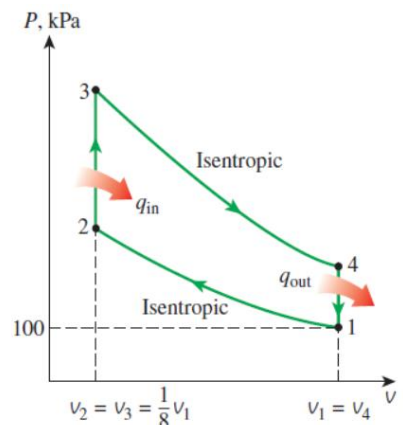
Meningkatkan efisiensi termal dari mesin bensin dengan menggunakan rasio kompresi yang tinggi (di atas 12) tanpa mengalami *knocking* pada prinsipnya mungkin dilakukan dengan menggunakan bahan bakar yang bersifat *antiknock*, seperti mencampur bensin dengan *tetraethyl lead* (tetra etil timbal, lebih umum disebut timbal di Indonesia). *Tetraethyl lead* dicampur dengan bensin sejak tahun 1920 karena metode ini cukup murah untuk menaikkan nilai oktan bahan bakar. Akan tetapi, dampak samping dari bensin timbal adalah polusi yang berbahaya dan berdampak langsung pada kesehatan manusia. Sehingga, mulai tahun 1970an penggunaan bensin timbal dilarang. Kebanyakan kendaraan yang dibuat setelah tahun 1975 didesain untuk tidak menggunakan bensin

timbang sehingga memiliki rasio kompresi yang lebih kecil. Beberapa tahun kemudian, bensin tanpa timbal dengan nilai oktan tinggi berhasil dikembangkan sehingga kendaraan kembali dapat menggunakan rasio kompresi yang relatif lebih tinggi. Di sisi lain, adanya peningkatan pada aspek lain seperti pengurangan berat kendaraan, perbaikan desain aerodinamis, dll, memungkinkan untuk penghematan bahan bakar yang lebih baik. Hal ini menjadi bukti bahwa proses rekayasa ditentukan pada banyak aspek, dan efisiensi mesin hanya bagian kecil dari aspek yang dipertimbangkan.

Parameter berikutnya yang mempengaruhi nilai efisiensi terma dari siklus Otto ideal adalah rasio panas spesifik atau k . Pada nilai kompresi yang diberikan, siklus Otto ideal menggunakan gas monatomik seperti argon dan helium dengan nilai $k = 1.667$ sebagai fluida kerja sehingga mampu mencapai efisiensi termal terbaik. Nilai rasio panas spesifik k , dan nilai efisiensi termal dari siklus Otto ideal menurun ketika molekul fluida kerja yang digunakan lebih besar (Gambar 5.8). Nilai panas spesifik udara pada suhu ruang adalah 1.4, 1.3 untuk *carbon* dioksida, dan 1.2 untuk etana. Pada mesin aktual, fluida kerja memiliki molekul yang lebih besar seperti karbon dioksida, dan rasio panas spesifik semakin menurun seiring dengan kenaikan temperatur. Faktor tersebut yang juga berkontribusi terhadap penurunan efisiensi termal dari mesin aktual dibandingkan siklus Otto ideal. Untuk mesin bensin aktual, nilai efisiensi termalnya berkisar antara 25-30 %.

Contoh Kasus Siklus Otto Ideal

Siklus Otto ideal memiliki rasio kompresi 8. Awal proses kompresi, suhu dan tekanan udara adalah 17 °C dan 100 kPa, lalu panas sebesar 800 kJ/kg ditransfer ke udara selama proses pemasukan panas pada volume tetap. Pertimbangkan variasi dari panas spesifik dari udara terhadap temperatur, tentukan:



- Suhu dan tekanan maksimal selama proses
- Total kerja bersih
- Efisiensi termal, d) MEP dari siklus tersebut, e) Tentukan daya keluaran dari siklus (dalam satuan kW) pada kecepatan mesin 4,000 RPM. Asumsikan siklus ini digunakan pada kendaraan 4 silinder 4 langkah dengan kapasitas mesin 1,600 cc.

Proses Pengerjaan

Dalam tiap analisis termodinamika untuk sistem *engineering*, maka diperlukan asumsi untuk memberikan batasan kerja yang lebih terarah. Asumsi untuk kasus di atas adalah:

- Menggunakan asumsi udara standar
- Perubahan energi kinetik dan potensial diabaikan
- Variasi dari panas spesifik diperhitungkan

Analisis

Diagram Pv disajikan pada contoh kasus tersebut. Udara yang ada di dalam silinder ditetapkan sebagai siklus tertutup.

- Suhu dan tekanan maksimal pada siklus Otto terjadi pada kondisi 3 (pemasukan panas pada volume tetap). Namun, kita harus mengetahui terlebih dahulu tekanan dan temperatur dari udara di akhir langkah kompresi isentropik (kondisi 2), yakni:

$T_1 = 290 \text{ K} \rightarrow u_1 = 206.91 \text{ kJ/kg}$ dan $v_{r1} = 676.1$ (diperoleh dari tabel *properties* udara)

Proses 1→2 (kompresi isentropik dari gas ideal)

$$\frac{v_{r2}}{v_{r1}} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{r} \rightarrow v_{r2} = \frac{v_{r1}}{r} = \frac{676.1}{8} = 84.51 \rightarrow T_2 = 652.4 \text{ K dan } u_2 = 475.11 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{P_2 v_2}{T_2} = \frac{P_1 v_1}{T_1} \rightarrow P_2 = P_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \left(\frac{v_2}{v_1} \right) = 100 \text{ kPa} \left(\frac{652.4 \text{ K}}{290 \text{ K}} \right) (8) = 1799.7 \text{ kPa}$$

Proses 2→3 (pemasukan panas pada volume tetap)

$$q_{in} = u_3 - u_2$$

$$800 \text{ kJ/kg} = u_3 - 475.11 \text{ kJ/kg}$$

$$u_3 = 1275.11 \text{ kJ/kg} \rightarrow T_3 = 1575.1 \text{ K dan } v_{r3} = 6.108$$

$$\frac{P_3 v_3}{T_3} = \frac{P_2 v_2}{T_2} \rightarrow P_3 = P_2 \left(\frac{T_3}{T_2} \right) \left(\frac{v_2}{v_3} \right) = 1.7997 \text{ MPa} \left(\frac{1575.1 \text{ K}}{652.4 \text{ K}} \right) (1) = 4.345 \text{ MPa}$$

- (b) Total kerja bersih dari tiap siklus dapat ditentukan dengan menemukan batasan sistem ($P \cdot dV$) kerja yang digunakan pada tiap proses atau dengan menemukan total perpindahan kalor bersih yang nilainya ekuivalen dengan total kerja selesai selama siklus terjadi. Berdasarkan data yang diberikan, maka pendekatan kedua yang mungkin dilakukan. Oleh karenanya, nilai energi dalam dari udara pada kondisi 4 harus ditemukan.

Proses 3→4 (ekspansi isentropik dari gas ideal)

$$\frac{v_{r4}}{v_{r3}} = \frac{v_4}{v_3} = r \rightarrow v_{r4} = r \cdot v_{r3} = 8 \cdot 6.108 = 48.864 \rightarrow T_4 = 795.6 \text{ K} \text{ \& } u_4 = 588.74 \text{ kJ/kg}$$

Proses 4→1 (Pelepasan panas pada volume tetap)

$$-q_{out} = u_1 - u_4 \rightarrow q_{out} = u_4 - u_1 = 588.74 - 206.9 = 381.83 \text{ kJ/kg}$$

Sehingga:

$$w_{net} = q_{net} = q_{in} - q_{out} = 800 - 381.83 = 418.17 \text{ kJ/kg}$$

- (c) Efisiensi termal

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = \frac{418.17 \text{ kJ/kg}}{800 \text{ kJ/kg}} = 0.523 \text{ atau } 52.3\%$$

Dengan menggunakan asumsi udara dingin standar (nilai panas spesifik udara dianggap pada suhu ruang), termal efisiensi menjadi:

$$\eta_{th, Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} = 1 - r^{1-k} = 1 - 8^{1-1.4} = 0.565 \text{ atau } 56.5\%$$

Terdapat deviasi nilai 4.2% yang mana cukup tinggi karena berkaitan dengan efisiensi, sehingga analisis menggunakan asumsi udara dingin standar perlu dilakukan secara seksama.

- (d) *Mean Effective Pressure* (MEP)

$$MEP = \frac{W_{net}}{V_{max} - V_{min}} = \frac{w_{net}}{v_1 - v_1/r} = \frac{w_{net}}{v_1(1-1/r)}$$

Dimana:

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{(0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K})(290 \text{ K})}{100 \text{ kPa}} = 0.8323 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Maka:

$$MEP = \frac{418.17 \text{ kJ/kg}}{(0.8323 \text{ m}^3/\text{kg})(1-1/8)} \left(\frac{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3}{1 \text{ kJ}} \right) = 574 \text{ kPa}$$

- (e) Total massa udara yang digunakan oleh 4 silinder adalah

$$m = \frac{v_d}{v_1} = \frac{0.0016 \text{ m}^3}{0.8323 \text{ m}^3/\text{kg}} = 0.001922 \text{ kg}$$

Kerja bersih yang dihasilkan oleh siklus adalah:

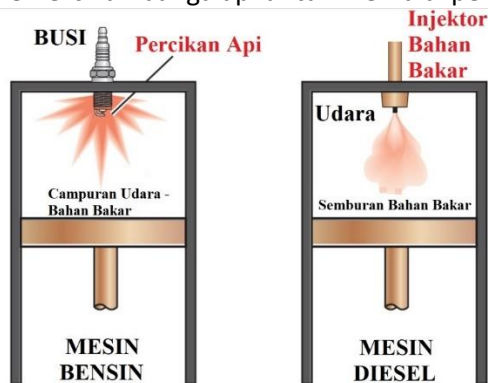
$$W_{net} = mw_{net} = (0.00192 \text{ kg})(418.17 \text{ kJ/kg}) = 0.8037 \text{ kJ/kg}$$

Nilai tersebut menandakan total kerja bersih yang dihasilkan tiap siklus termodinamik yakni 0.8037 kJ/siklus. Terdapat dua putaran untuk tiap siklus termodinamik ($n_{rev} = 2$ revolusi/siklus) untuk mesin 4 langkah, maka daya yang dihasilkan mesin adalah:

$$\dot{W}_{net} = \frac{W_{net}\dot{n}}{n_{rev}} = \frac{(0.8037 \text{ kJ/siklus})(4000 \text{ rev/menit})}{2 \text{ rev/siklus}} \left(\frac{1 \text{ menit}}{60 \text{ detik}} \right) = 26.8 \text{ kW}$$

5. Siklus Diesel

Siklus Diesel merupakan siklus ideal untuk mesin pengapian kompresi (*compression ignition* atau *CI engine*). Mesin ini pertama kali diperkenalkan oleh Rudolph Diesel pada tahun 1890, mesin ini mirip dengan mesin pengapian busi, perbedaan utamanya adalah metode penyalan untuk memulai pembakaran. Pada mesin pengapian busi atau mesin bensin, campuran udara dan bahan bakar dikompresikan hingga mencapai temperatur tertentu di bawah temperatur *autoignition*, kemudian busi memercikan bunga api untuk memulai pembakaran.

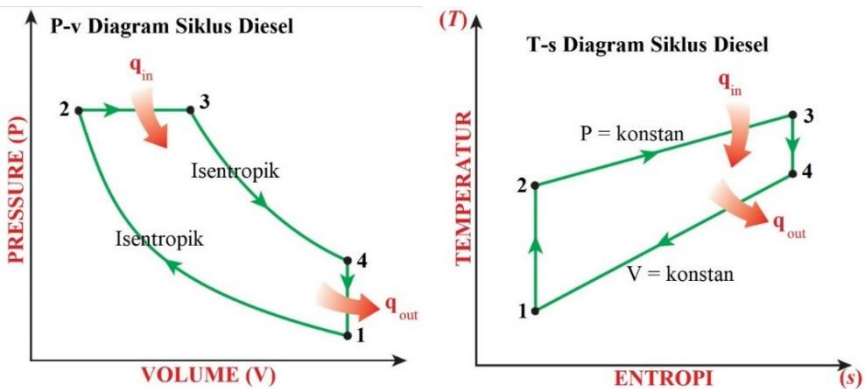


Gambar 5.9 Perbandingan metode penyalan mesin diesel dan bensin

Pada mesin pengapian kompresi atau mesin Diesel, udara dikompresikan hingga mencapai titik di atas temperatur *autoignition* dari bahan bakar, pembakaran dimulai ketika injektor menyemprotkan bahan

bakar. Oleh karenanya, pada mesin Diesel, busi digantikan dengan injektor dan selama proses pemasukan, hanya udara saja yang dikompresikan.

Pada mesin bensin, campuran udara dan bahan bakar dikompresikan selama langkah kompresi, nilai kompresi rasio dibatasi oleh temperatur *autoignition* dari bahan bakar maupun efek dari *engine knock*. Pada mesin Diesel, hanya udara saja yang dikompresikan, sehingga batasan untuk *autoignition* dapat dihindari. Sehingga, mesin Diesel dapat didesain dengan rasio kompresi yang lebih tinggi yakni antara 12 sampai 24. Kondisi ini memberikan banyak keuntungan, yakni penggunaan bahan bakar yang tidak harus sempurna bensin dapat dimanfaatkan, sehingga biayanya lebih murah.



Gambar 5.10 Diagram Pv dan Ts siklus Diesel

Injeksi bahan bakar dimulai ketika piston mendekati TDC dan berlanjut terus pada masa awal langkah usaha. Sehingga, proses pembakaran di mesin terjadi pada interval yang lebih panjang. Karena hal ini, maka pada siklus Diesel proses pemasukan panas dilakukan pada tekanan tetap. Hanya hal ini yang menjadi pembeda antara siklus Diesel dan Otto. Keseluruhan proses tetap sama. Gambar 5.10 menyajikan diagram Pv dan Ts siklus Diesel. Proses 1→2 adalah kompresi isentropik, proses 2→3 adalah pemasukan panas pada tekanan konstan, proses 3→4 adalah ekspansi isentropik dan terakhir proses 4→1 pelepasan panas pada volume tetap.

Siklus Diesel terjadi dengan skema piston silinder, berarti dianggap sebagai sistem tertutup. Maka, banyaknya panas yang diberikan ke fluida kerja pada tekanan tetap dan panas yang dilepaskan pada volume tetap dapat dituliskan sebagai persamaan berikut:

$$q_{in} - w_{b,out} = u_3 - u_2 \rightarrow q_{in} = P_2(v_3 - v_2) + (u_3 - u_2) = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2) \quad (5.21)$$

Dan:

$$-q_{out} = u_1 - u_4 \rightarrow q_{out} = u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1) \quad (5.22)$$

Maka efisiensi termal dari siklus Diesel dengan asumsi udara dingin standar adalah:

$$\eta_{th,Diesel} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{kT_2(T_3/T_2 - 1)} \quad (5.23)$$

Untuk siklus diesel, terdapat istilah *cutoff ratio* (r_c), yakni rasio antara volume silinder sesudah dan sebelum pembakaran:

$$r_c = \frac{V_3}{V_2} = \frac{v_3}{v_2} \quad (5.24)$$

Dengan menggunakan persamaan tersebut dan hubungan gas ideal isentropik untuk proses 1→2 dan 3→4, maka efisiensi termal menjadi:

$$\eta_{th,Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right] \quad (5.25)$$

Dimana nilai r adalah rasio kompresi.

Nilai efisiensi siklus Diesel umumnya lebih tinggi dibandingkan dengan mesin bensin. Faktor utama yang berkontribusi tentunya adalah rasio kompresi yang lebih tinggi. Mesin diesel juga membakar bahan bakar lebih komplik karena umumnya mesin ini bekerja pada putaran yang relatif lebih rendah dibandingkan mesin bensin. Efisiensi termal dari mesin diesel ukuran besar bervariasi antara 35-40%. Efisiensi yang lebih tinggi dan biaya bahan bakar yang lebih murah membuat mesin Diesel lebih atraktif untuk digunakan pada aplikasi yang membutuhkan daya besar seperti lokomotif, pembangkit darurat (kadang disebut *genset*), kapal besar, dan truk berat. Sebagai contoh mesin diesel ukuran besar, Fiat membuat sebuah mesin diesel dengan 12 silinder yang memiliki daya keluaran

hingga 18.8 MW yang beroperasi pada putaran 122 rpm dengan ukuran diameter silinder 90 cm dan panjang langkah 91 cm.

Contoh Kasus Siklus Diesel Ideal

Sebuah siklus Diesel ideal dengan udara sebagai fluida kerjanya memiliki rasio kompresi 18 dengan *cutoff ratio* 2. Pada awal proses kompresi, suhu udara adalah 300 K dan tekanan 0.1 MPa. Tentukan:

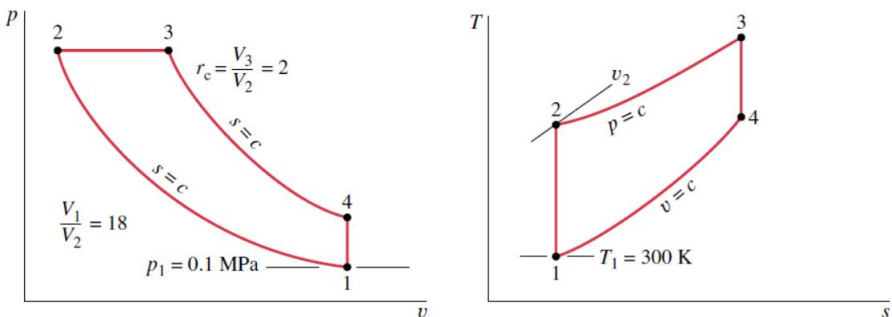
- Suhu dan tekanan tiap proses
- Efisiensi termal

Proses Pengerjaan

Dalam tiap analisis termodinamika untuk sistem *engineering*, maka diperlukan asumsi untuk memberikan batasan kerja yang lebih terarah. Asumsi untuk kasus di atas adalah:

- Udara yang ada di dalam silinder ditetapkan sebagai siklus tertutup.
- Proses kompresi dan ekspansi diasumsikan sebagai isentropik
- Seluruh proses mampu balik
- Udara diasumsikan sebagai gas ideal
- Perubahan energi potensial dan kinetik diabaikan

Analisis



- Analisis dimulai dengan menentukan *properties* pada tiap kondisi atau *state*.

$T_1 = 300 \text{ K} \rightarrow u_1 = 214.07 \text{ kJ/kg}$ dan $v_{r1} = 621.2$ (diperoleh dari tabel *properties* udara)

Proses 1→2 (kompresi isentropik dari gas ideal)

$$v_{r2} = \frac{v_{r1}}{r} = \frac{621.2}{18} = 34.51 \rightarrow T_2 = 898.3 \text{ K dan } h_2 = 930.98 \text{ kJ/kg}$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \left(\frac{v_2}{v_1} \right) = 0.1 \text{ MPa} \left(\frac{898.3 \text{ K}}{300 \text{ K}} \right) (18) = 5.39 \text{ MPa}$$

Proses 2→3 (pemasukan panas pada tekanan tetap)

Tekanan pada kondisi 2 dapat dievaluasi dengan menggunakan hubungan isentropik:

$p_2 = p_1(p_{r2}/p_{r1})$. Karena proses 2→3 terjadi pada tekanan tetap, maka:

$$T_3 = \frac{V_3}{V_2} T_2 \rightarrow \text{gunakan nilai } \textit{cutoff ratio}: r_c = \frac{V_3}{V_2}$$

$$T_3 = r_c T_2 = 2(898.3) = 1796.6 \text{ K} \rightarrow h_3 = 1999.1 \text{ kJ/kg dan } v_{r3} = 3.97$$

Proses 3→4 (ekspansi isentropik)

$$v_{r4} = \frac{V_4}{V_3} v_{r3} = \frac{V_4}{V_2} \frac{V_2}{V_3} v_{r3}$$

Nilai $V_4 = V_1$, dengan nilai rasio kompresi dan *cutoff ratio* yang sudah diketahui, maka:

$$v_{r4} = \frac{r}{r_c} v_{r3} = \frac{18}{2} (3.97) = 35.73 \rightarrow u_4 = 664.3 \text{ kJ/kg dan } T_4 = 887.7 \text{ K.}$$

Tekanan pada kondisi 4 dapat diketahui dengan menggunakan hubungan isentropik, yakni:

$p_4 = p_3(p_{r4}/p_{r1})$, dengan nilai $V_4 = V_1$, maka:

$$p_4 = \frac{T_4}{T_1} p_1 = \frac{(887.7 \text{ K})}{(300 \text{ K})} (0.1 \text{ MPa}) = 0.3 \text{ MPa}$$

(b) Nilai efisiensi termal

$$\eta = 1 - \frac{u_4 - u_1}{h_3 - h_2} = 1 - \frac{664.3 - 214.07}{1999.1 - 930.98} = 0.578 \text{ atau } 57.8\%$$

C. LATIHAN

1. Sebuah generator pembangkit listrik dengan penggerak mesin Diesel memiliki model mesin *square* dengan bentuk *flat piston head*. Kapasitas mesin yang diklaim adalah 2,600 cc dan beroperasi pada mode kecepatan rendah (900 RPM) dan kecepatan tinggi (3,000 RPM). Mesin memiliki 4 silinder dan bekerja menggunakan siklus 4 tak. Rasio kompresi yang digunakan adalah 14 dan panjang *connecting rod* 15.8 cm. Pada kecepatan rendah, pembakaran selesai pada 8° aTDC dan 28° aTDC pada kecepatan tinggi. Tentukan:

- a. Diameter silinder dan panjang langkah
 - b. Rerata kecepatan piston pada masing-masing kecepatan
 - c. Volume bebas dari satu silinder
 - d. Kecepatan piston pada akhir pembakaran pada masing-masing kecepatan
 - e. Jarak yang piston tempuh dari TDC pada akhir proses pembakaran pada masing-masing kecepatan
 - f. Volume di ruang bakar pada akhir proses pembakaran pada masing-masing kecepatan
2. Lakukan analisis terkait hasil dari jawaban no.1 dengan pertanyaan kunci sebagai berikut:
- a. Mengapa pertanyaan 1a dan 1d tidak dipengaruhi oleh kecepatan mesin?
 - b. Mengapa terjadi perubahan nilai akibat kecepatan mesin untuk pertanyaan 1b, 1d, 1e dan 1f?
 - c. Mengapa nilai waktu selesainya pembakaran memberikan perubahan terhadap jarak yang piston tempuh pada akhir pembakaran? Jelaskan hubungan tersebut berdasarkan nilai parameter dan hasil perhitungan.
3. Suatu mesin menggunakan siklus Otto ideal dengan rasio kompresi 8.5. Awal proses kompresi, suhu dan tekanan udara adalah 72 °F dan 15.95 Psi, lalu panas sebesar 850 kJ/kg ditransfer ke udara selama proses pemasukan panas pada volume tetap. Pertimbangkan variasi dari panas spesifik dari udara terhadap temperatur, tentukan:
- a. Suhu dan tekanan maksimal selama proses
 - b. Total kerja bersih
 - c. Efisiensi termal
 - d. MEP dari siklus tersebut
 - e. Tentukan daya keluaran dari siklus (dalam satuan kW) pada kecepatan mesin 3,800 RPM. Asumsikan siklus ini digunakan pada kendaraan 4 silinder 4 langkah dengan kapasitas mesin 1,800 cc.

4. Untuk membuktikan batasan rasio kompresi pada mesin Otto, maka lakukan analisis dengan detail yang sama pada soal No. 3 di mana nilai rasio kompresi yang digunakan adalah 17. Lakukan pembuktian bahwa nilai kompresi ini tidak bisa digunakan pada siklus Otto.
5. Sebuah siklus Diesel ideal dengan udara sebagai fluida kerjanya memiliki rasio kompresi 19 dengan *cutoff ratio* 2.1. Pada awal proses kompresi, suhu udara adalah 290 K dan tekanan 0.11 MPa. Tentukan:
 - a. Suhu dan tekanan tiap proses
 - b. Efisiensi termal

REFERENSI

1. Thermodynamic: an Engineering Approach, Yunus A. Cengel & Michael A. Boles McGraw Hill Education, 2015
2. Internal Combustion Engines, Made EASY publications, 2018
3. Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, Willard W. Pulkrabek Prentice Hall, 2008
4. Internal Combustion Engine Fundamentals, John B. Heywood McGraw-Hill. Inc, 1988
5. Pengantar Termodinamika untuk Siklus Tenaga, Darwin Rio Budi Syaka & Riyadi UNJ Press, 2020
6. Energy Storage System: Teori dan Konsep Dasar Sistem Penyimpanan Energi, Reza Abdu Rahman, et. al, Widina, 2021

KUNCI JAWABAN

KUNCI JAWABAN BAB I

1. Sebuah pemanas tipe tahanan listrik dengan daya sebesar 4 kW digunakan untuk memanaskan air hingga mencapai target temperatur yang diinginkan dengan durasi 3 jam. Tentukan besarnya energi yang digunakan dalam satuan kWh dan kJ.

Data yang diketahui: Daya sebesar 4 kW digunakan selama 3 jam.

Pertanyaan: Konsumsi energi dalam kWh dan kJ

Jawab:

Total energi = Energi per unit waktu $\times$ durasi

Total energi = 4 kW $\times$ 3 jam

Total energi = 12 kWjam atau dikenal dengan 4 kWh

Pada kasus dalam unit kJ

1 kWh = 1 kJ/detik $\times$ 3600 detik = 3,600 kJ

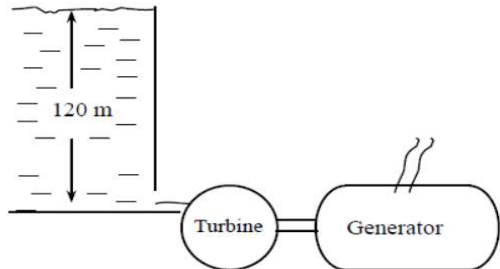
Total energi = 12 kWh $\times$ 3,600 kJ/kWh

Total energi = 43,200 kJ

2. Pembangkit listrik tenaga air memiliki penampung pada ketinggian (*head*) 120 m dengan kemampuan laju suplai air sebesar 2400 kg/detik. Tentukan daya potensial yang dapat dibangkitkan.

Asumsi:

- a. Ketinggian dianggap konstan
- b. Energi mekanis dari air pada sisi keluaran turbin diabaikan



Analisis:

$$e_{\text{mechanical}} = pe = gz = (9.81 \text{ m/s}^2)(120 \text{ m}) \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = 1.177 \text{ kJ/kg}$$

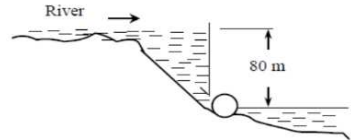
Oleh karenanya, potensi daya yang dibangkitkan menjadi:

$$\dot{W}_{\text{max}} = \dot{e}_{\text{mechanical}} = \dot{m}e_{\text{mechanical}} = (2400 \text{ kg/detik})(1.177 \text{ kJ/kg}) \left(\frac{1 \text{ kW}}{1 \text{ kJ/detik}} \right) = 2825 \text{ kW}$$

3. Sebuah sungai mengalir dengan laju $175 \text{ m}^3/\text{s}$ dipertimbangkan untuk pembangkit listrik tenaga air. Tim ahli mempertimbangkan untuk membangun bendungan dengan ketinggian 80 m . Tentukan daya yang dapat dibangkitkan dari air sungai tersebut ketika bendungan sudah diisi penuh.

Asumsi:

- Tinggi merupakan ketinggian bebas dari permukaan sungai
- Energi mekanis dari air pada sisi keluaran turbin diabaikan
- Densitas air atau $\rho = 1,000 \text{ kg/m}^3$



Analisis:

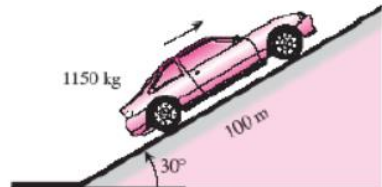
$$e_{\text{mechanical}} = pe = gz = (9.81 \text{ m/s}^2)(80 \text{ m}) \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = 0.7848 \text{ kJ/kg}$$

Oleh karenanya, potensi daya yang dibangkitkan menjadi:

$$\dot{W}_{\text{max}} = \dot{e}_{\text{mechanical}} = \dot{m}e_{\text{mechanical}} = (175000 \text{ kg/detik})(0.7848 \text{ kJ/kg}) \left(\frac{1 \text{ MW}}{1000 \text{ kJ/detik}} \right) = 137 \text{ MW}$$

4. Tentukan daya yang dibutuhkan oleh mobil dengan massa 1150 kg untuk menanjak sejauh 100 m dengan kemiringan 30° dalam waktu 12 detik. Tentukan:

- Daya pada kecepatan tetap
- Dari kondisi diam hingga kecepatan 30 m/s
- Dari kecepatan 35 m/s hingga kecepatan 5 m/s



Asumsi: Abaikan gesekan, tahanan udara dan rolling resistance.

Analisis: Total daya pada tiap kasus merupakan total dari laju perubahan energi kinetik dan potensial, yakni:

$$\dot{W}_{\text{total}} = \dot{W}_a + \dot{W}_g$$

a) Daya pada kecepatan tetap:

$\dot{W}_a = 0$ karena pada kecepatan tetap, lalu kenaikan ketinggian $h = (100 \text{ m})(\sin 30^\circ) = 50 \text{ m}$, maka:

$$\dot{W}_g = \frac{mz(z_2 - z_1)}{\Delta t} = (1150 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2)(50 \text{ m}) \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2} \right) / (12 \text{ s}) = 47.0 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{total} = \dot{W}_a + \dot{W}_g = 0 + 47.0kW = 47.0kW$$

b) Daya yang dibutuhkan untuk akselerasi:

$$\dot{W}_a = \frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2)/\Delta T = \frac{1}{2}(1150kg)((30m/s)^2 - (0m/s)^2)(\frac{1kJ}{1000kg \cdot m^2/s^2})/(12s) = 43.1kW$$

$$\dot{W}_{total} = \dot{W}_a + \dot{W}_g = 43.1 + 47.0kW = 90.1kW$$

c) Daya yang dibutuhkan untuk deselerasi:

$$\dot{W}_a = \frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2)/\Delta T = \frac{1}{2}(1150kg)((5m/s)^2 - (35m/s)^2)(\frac{1kJ}{1000kg \cdot m^2/s^2})/(12s) = -57.5kW$$

$$\dot{W}_{total} = \dot{W}_a + \dot{W}_g = -57.5 + 47.0kW = -10.5kW \text{ (daya pengereman)}$$

KUNCI JAWABAN BAB II

1. Air dipanaskan pada wadah tertutup dengan tetap diaduk menggunakan *paddle wheel*. Selama proses, energi panas dimasukkan ke air sebesar 30 kJ, dimana 5 kJ panas dilepaskan ke lingkungan sebagai kerugian panas. Kerja *paddle work* sebesar 500 N.m. Tentukan besarnya energi akhir dari sistem jika energi awalnya 10 kJ.

Asumsi: wadah dianggap *stationary*, maka perubahan energi kinetik dan potensial dapat diabaikan.

Analisis:

Air di dalam wadah dianggap sebagai suatu sistem. Oleh karena tidak ada massa yang masuk atau ke luar, maka dianggap sebagai sistem tertutup. Terapkan kesetimbangan energi pada sistem tersebut:

(total perpindahan energi bersih oleh panas, kerja dan massa) = $E_{in} - E_{out}$

Perubahan energi kinetik, energi potensi dan energi dalam = ΔE_{system}

Maka:

$$Q_{in} + W_{sh,in} - Q_{out} = \Delta U = U_2 - U_1$$

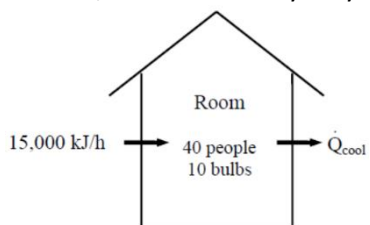
$$30kJ + 0.5kJ - 5kJ = U_2 - 10kJ$$

$$U_2 = 35.5kJ$$

Energi akhir pada sistem adalah 35.5 kJ.

2. Penyejuk udara dengan kapasitas pendinginan sebesar 5 kW digunakan pada ruangan kelas dengan jumlah siswa sebanyak 40 orang. Seseorang pada kondisi diam diasumsikan melepas panas sebesar 360 kJ/jam. Terdapat 10 lampu dengan daya 100 W. Laju perpindahan panas dari lingkungan ke dalam kelas melalui dinding dan jendela diasumsikan sebesar 15,000 kJ/jam. Jika suhu udara di dalam kelas diatur pada suhu tetap sebesar 21 °C, tentukan banyaknya pendingin udara yang dibutuhkan.

Asumsi: tidak ada perlengkapan lain yang melepaskan panas di dalam ruangan tersebut (misalnya TV, computer, dll)



Analisis:

Beban pendinginan (*cooling load*) pada ruangan tersebut adalah:

$$\dot{Q}_{cooling} = \dot{Q}_{lampu} + \dot{Q}_{orang} + \dot{Q}_{panas masuk}$$

Dimana:

$$\dot{Q}_{lampu} = 10 \times 100W = 1 kW$$

$$\dot{Q}_{orang} = 40 \times 360kJ/jam = 4 kW$$

$$\dot{Q}_{panas masuk} = 15,000 kJ/jam = 4.17 kW$$

Maka:

$$\dot{Q}_{cooling} = 1 + 4 + 4.17 = 9.17 kW$$

Sehingga banyaknya penyejuk udara yang dibutuhkan:

$$\frac{9.17 kW}{5 kW/unit} = 1.83 \rightarrow 2 unit$$

- Sebuah universitas memiliki 200 ruang kelas dan 400 ruang kantor. Ruang kelas dilengkapi dengan 12 lampu (*fluorescent tube*) dengan konsumsi daya 110 W. Untuk ruang kantor, jumlah lampu yang digunakan secara rerata adalah setengahnya. Universitas tersebut buka selama 240 hari/tahun. Ruang kelas dan kantor dalam sehari tidak ditempati selama 4 jam saja, namun lampunya tetap bekerja. Jika rerata biaya listrik sebesar Rp. 1,200/kWh, tentukan berapa besar penghematan yang dapat dilakukan kampus dalam 1 tahun jika lampu tersebut dimatikan selama tidak ditempati.

Analisis:

Total daya listrik yang dikonsumsi oleh lampu di ruang kelas dan kantor:

$$\dot{E}_{lampu ruang kelas} = (daya tiap lampu) \times (jumlah lampu) = (200 \times 12 \times 110W) = 264 kW$$

$$\dot{E}_{lampu ruang kantor} = (daya tiap lampu) \times (jumlah lampu) = (400 \times 6 \times 110W) = 264 kW$$

$$\dot{E}_{lampu, total} = \dot{E}_{lampu ruang kelas} + \dot{E}_{lampu ruang kantor} = 264 + 264 = 528 kW$$

Kampus beroperasi selama 240 hari/tahun, maka waktu ruangan tidak digunakan selama setahun:

$$Waktu tidak digunakan = 4 jam/hari \times 240 hari/tahun = 960 jam/tahun$$

Besarnya energi yang dikonsumsi selama ruangan tidak digunakan:

$$\text{Besaran konsumsi energi} = (\dot{E}_{\text{lampu, total}})(\text{waktu tidak digunakan}) = (528 \text{ kW})(960 \text{ jam/tahun}) = 506,880 \text{ kWh}$$

Biaya penghematan jika lampu dimatikan selama tidak digunakan:

$$\text{Biaya} = \text{Besaran konsumsi energi} \times \text{biaya energi} = (506,880 \text{ kWh})(\text{Rp. } 1,200/\text{kWh}) = \text{Rp. } 608,256,000$$

Dari hitungan sederhana ini diketahui bahwa biaya yang harus dibuang karena tidak mematikan lampu selama tidak digunakan adalah Rp. 608,256,000 (**Enam Ratus Juta Dua Ratus Lima Puluh Enam Ribu Rupiah**). Melalui perhitungan sederhana ini, dapat diketahui peluang penghematan energi dengan hal yang sederhana yakni mematikan lampu ketika lampu tidak digunakan.

KUNCI JAWABAN BAB IV

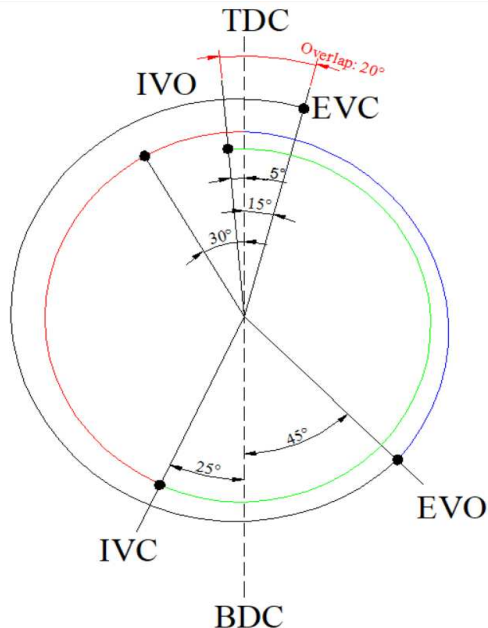
1. Suatu mesin beroperasi dengan detail spesifikasi pembukaan katup dan *timing* pengapian sebagai berikut:
 - a. *Intake valve opens* (IVO): 5° bTDC
 - b. *Intake valve closes* (IVC): 25° aBDC
 - c. *Ignition starts*: 30° bTDC
 - d. *Exhaust valve opens* (EVO): 45° bBDC
 - e. *Exhaust valve closes* (EVC): 15° aTDC

Tentukan:

- a. Gambar *valve timing* diagram
- b. Panjang masing-masing langkah dalam satuan derajat ($^{\circ}$)
- c. Besarnya sudut *overlap*

Jawaban:

- a. Gambar *valve timing* diagram



- b. Panjang masing-masing langkah:
 - a) Langkah hisap: $IVO + 180^\circ + IVC = 5^\circ + 180^\circ + 25^\circ = 210^\circ$
 - b) Langkah kompresi: $180^\circ - IVC = 180^\circ - 25^\circ = 155^\circ$
 - c) Langkah usaha: $180^\circ - EVO = 180^\circ - 45^\circ = 135^\circ$
 - d) Langkah buang: $EVO + 180^\circ + EVC = 45^\circ + 180^\circ + 15^\circ = 240^\circ$
 - c. *Overlap* merupakan saat terbukanya katup buang dan katup masuk secara bersamaan, dari *valve timing* diagram maka diperoleh nilai sudut *overlap* sebesar: 20°
2. Berdasarkan data pada soal No. 1, jika panjang *stroke* pada mesin tersebut = 72 mm, tentukan panjang masing-masing langkah dalam satuan mm.

Jawaban:

Panjang *stroke* piston = 72 mm = $\pi = 180^\circ$

Maka, rasio panjang *stroke* terhadap derajat adalah: $72\text{mm}/180^\circ = 0.4 \text{ mm}/^\circ$

- a) Langkah hisap = 210° , maka $= 0.4 \text{ mm}/^\circ \times 210^\circ = 84 \text{ mm}$
 - b) Langkah kompresi = 155° , maka $= 0.4 \text{ mm}/^\circ \times 155^\circ = 62 \text{ mm}$
 - c) Langkah usaha = 135° , maka $= 0.4 \text{ mm}/^\circ \times 135^\circ = 54 \text{ mm}$
 - d) Langkah buang = 240° , maka $= 0.4 \text{ mm}/^\circ \times 135^\circ = 96 \text{ mm}$
3. Suatu mesin bensin 4 tak dengan silinder tunggal menggunakan pengapian busi dan beroperasi pada kecepatan 3840 RPM. Tentukan banyaknya pengapian yang dilakukan busi dalam waktu 90 detik.

Jawaban:

- Busi menyala 1 kali dalam tiap siklus.
- Mesin 4 tak melakukan 2 putaran untuk tiap siklus
- Maka dengan kecepatan 3840 RPM, terjadi 1900 siklus dalam waktu 1 menit, sehingga dalam waktu 1 detik maka terjadi 32 siklus sehingga proses pengapian terjadi sebanyak 32 kali dalam waktu 1 detik.
- Total pengapian dalam waktu 90 detik adalah 2880 kali pengapian.

4. Suatu mesin bensin 4 tak 4 silinder memiliki urutan pengapian atau *firing order* sebagai berikut: 1–3–4–2. Buatlah urutan kerja mesin atau tabel *sequence* berdasarkan data tersebut (asumsi tanpa ada sudut *overlap*).

Jawaban:

- Panjang tiap langkah untuk mesin 4 tak adalah 180°
- Jarak antar langkah antar silinder adalah: $720^\circ / \text{jumlah silinder} = 180^\circ$

Diagram urutan kerja mesin:

Silinder	0°	180°	Langkah 360°	540°	720°
I	Hisap	Kompresi	Usaha	Buang	
II	Kompresi	Usaha	Buang	Hisap	
III	Buang	Hisap	Kompresi	Usaha	
IV	Usaha	Buang	Hisap	Kompresi	

KUNCI JAWABAN BAB V

1. Sebuah generator memiliki model mesin *square* dengan bentuk *flat piston head*. Kapasitas mesin yang diklaim adalah 2,600 cc dan beroperasi pada mode kecepatan rendah (900 RPM) dan kecepatan tinggi (3,000 RPM). Mesin memiliki 4 silinder dan bekerja menggunakan siklus 4 tak. Rasio kompresi yang digunakan adalah 14 dan panjang *connecting rod* 15.8 cm. pada kecepatan rendah, pembakaran selesai pada 8° aTDC dan 28° aTDC pada kecepatan tinggi. Tentukan:
 - a. Diameter silinder dan panjang langkah
 - b. Rerata kecepatan piston pada masing-masing kecepatan
 - c. Volume bebas dari satu silinder
 - d. Kecepatan piston pada akhir pembakaran pada masing-masing kecepatan
 - e. Jarak yang piston tempuh dari TDC pada akhir proses pembakaran pada masing-masing kecepatan
 - f. Volume di ruang bakar pada akhir proses pembakaran pada masing-masing kecepatan

Solusi:

a. Diameter Silinder:

$$V_d = \frac{V_{total}}{4} = \frac{2,600 \text{ cc}}{4} = 0.00065 \text{ m}^3 = \left(\frac{\pi}{4}\right) B^2 S = \left(\frac{\pi}{4}\right) B^3 = 9.39 \text{ cm} \approx 9.4 \text{ cm}$$

b. Rerata kecepatan piston

Kecepatan rendah:

$$\bar{U}_p = 2SN = \left(2 \frac{\text{langkah}}{\text{putaran}}\right) \left(0.094 \frac{\text{m}}{\text{langkah}}\right) \left(\frac{900 \text{ putaran}}{60 \text{ detik}}\right) = 1.41 \text{ m/detik}$$

Kecepatan tinggi:

$$\bar{U}_p = 2SN = \left(2 \frac{\text{langkah}}{\text{putaran}}\right) \left(0.094 \frac{\text{m}}{\text{langkah}}\right) \left(\frac{3000 \text{ putaran}}{60 \text{ detik}}\right) = 4.7 \text{ m/detik}$$

c. Volume bebas untuk satu silinder

$$r_c = 14 = (V_d + V_c)/V_c = (0.00065 + V_c)/V_c$$
$$V_c = 0.00005 \text{ m}^3 = 50 \text{ cm}^3$$

- d. **Crank offset** adalah $a = S/2 = 0.047 \text{ m} = 4.7 \text{ cm}$

$$R = r/a = 15.8 \text{ cm}/4.7 \text{ cm} = 3.76$$

Kecepatan piston pada akhir pembakaran (Kecepatan rendah):

$$\frac{U_p}{\bar{U}_p} = \left(\frac{\pi}{2}\right) \sin \theta [1 + (\cos \theta) / \sqrt{R^2 - \sin^2 \theta}]$$

$$\frac{U_p}{\bar{U}_p} = \left(\frac{\pi}{2}\right) \sin 8^\circ [1 + (\cos 8^\circ) / \sqrt{(3.76)^2 - \sin^2(8^\circ)}] = 0.276$$

$$U_p = 0.276 \bar{U}_p = (0.276)(10.32 \text{ m/detik}) = 0.389 \text{ m/detik}$$

Kecepatan piston pada akhir pembakaran (Kecepatan tinggi):

$$\frac{U_p}{\bar{U}_p} = \left(\frac{\pi}{2}\right) \sin \theta [1 + (\cos \theta) / \sqrt{R^2 - \sin^2 \theta}]$$

$$\frac{U_p}{\bar{U}_p} = \left(\frac{\pi}{2}\right) \sin 28^\circ [1 + (\cos 28^\circ) / \sqrt{(3.76)^2 - \sin^2(28^\circ)}] = 0.911$$

$$U_p = 0.911 \bar{U}_p = (0.911)(4.7 \text{ m/detik}) = 4.28 \text{ m/detik}$$

- e. **Posisi piston saat kecepatan rendah:**

$$X = a \cos \theta + \sqrt{r^2 - a^2 \sin^2 \theta} = (0.047 \text{ m})(\cos 8^\circ) + \sqrt{(0.158 \text{ m})^2 - (0.047 \text{ m})^2 \sin^2(8^\circ)}$$

$$X = 0.204$$

Jarak dari TDC:

$$\hat{x} = r + a - X = (0.158 \text{ m}) + (0.047 \text{ m}) - (0.204 \text{ m}) = 0.001 \text{ m} = 0.1 \text{ cm}$$

Posisi piston saat kecepatan tinggi:

$$X = a \cos \theta + \sqrt{r^2 - a^2 \sin^2 \theta} = (0.047 \text{ m})(\cos 28^\circ) + \sqrt{(0.158 \text{ m})^2 - (0.047 \text{ m})^2 \sin^2(28^\circ)}$$

$$X = 0.197$$

Jarak dari TDC:

$$\hat{x} = r + a - X = (0.158 \text{ m}) + (0.047 \text{ m}) - (0.204 \text{ m}) = 0.001 \text{ m} = 0.7 \text{ cm}$$

- f. **Volume di ruang bakar pada akhir pembakaran (Kecepatan Rendah):**

$$\frac{V}{V_c} = 1 + \frac{1}{2}(r_c - 1)[R + 1 - \cos \theta - \sqrt{R^2 - \sin^2 \theta}]$$

$$\frac{V}{V_c} = 1 + \frac{1}{2}(14 - 1)[3.76 + 1 - \cos(8^\circ) - \sqrt{(3.76)^2 - \sin^2(8^\circ)}] = 1.08$$

$$V = 1.08 V_c = (1.08)(50 \text{ cm}^3) = 54 \text{ cm}^3 = 0.000054 \text{ m}^3$$

Volume di ruang bakar pada akhir pembakaran (Kecepatan Tinggi):

$$\frac{V}{V_c} = 1 + \frac{1}{2}(r_c - 1)[R + 1 - \cos \theta - \sqrt{R^2 - \sin^2 \theta}]$$

$$\frac{V}{V_c} = 1 + \frac{1}{2}(14 - 1)[3.76 + 1 - \cos(28^\circ) - \sqrt{(3.76)^2 - \sin^2(28^\circ)}] = 1.08$$

$$V = 1.95 V_c = (1.95)(50 \text{ cm}^3) = 97.5 \text{ cm}^3 = 0.0000975 \text{ m}^3$$

2. Lakukan analisis terkait hasil dari jawaban no.1 dengan pertanyaan kunci sebagai berikut:

(Redaksi jawaban bersifat relatif, namun konten utama dari jawaban memuat hal berikut)

- a. ***Mengapa pertanyaan 1a dan 1d tidak dipengaruhi oleh kecepatan mesin?***

Diameter silinder, panjang langkah dan volume bebas dari silinder merupakan parameter tetap yang tidak dipengaruhi oleh kecepatan mesin dikarenakan bagian ini tidak mengalami perubahan akibat dari kecepatan piston. Nilai parameter tersebut merupakan geometri tetap dan bukan fungsi dari kecepatan mesin.

- b. ***Mengapa terjadi perubahan nilai untuk pertanyaan 1b, 1d, 1e dan 1f?***

Rerata kecepatan piston dan kecepatannya, volume ruang bakar saat proses pembakaran dan jarak tempuh piston merupakan fungsi dari kecepatan. Perubahan pada kecepatan akan memberikan perubahan nilai pada 4 hal tersebut dan hal ini dapat dilihat dari persamaan matematis untuk menentukan ke-empat hal tersebut.

- c. ***Mengapa nilai waktu selesainya pembakaran memberikan perubahan terhadap jarak yang piston tempuh pada akhir pembakaran? Jelaskan hubungan tersebut berdasarkan nilai parameter dan hasil perhitungan.***

Pada kasus kecepatan rendah, pembakaran selesai pada 8° aTDC dan jarak tempuh piston adalah 0.1 cm, sedangkan pada kecepatan tinggi pembakaran selesai pada 28° aTDC dengan jarak tempuh piston 0.7 cm. Semakin tinggi nilai derajat akhir pembakaran (dengan acuan TDC), maka membuat jarak tempuh piston semakin tinggi karena proses pembakaran yang lebih panjang menyebabkan piston menempuh jarak yang lebih jauh, semakin mendekati BDC. Selain itu, dibutuhkan waktu yang lebih lama untuk menyelesaikan pembakaran pada kecepatan yang lebih tinggi dan efek inersia piston pada kecepatan tinggi sehingga jarak tempuhnya semakin jauh dan mendekati BDC.

3. Suatu mesin menggunakan siklus Otto ideal dengan rasio kompresi 8.5. Awal proses kompresi, suhu dan tekanan udara adalah 72 °F dan 15.95 Psi, lalu panas sebesar 850 kJ/kg ditransfer ke udara selama proses pemasukan panas pada volume tetap. Pertimbangkan variasi dari panas spesifik dari udara terhadap temperatur, tentukan:
- Suhu dan tekanan maksimal selama proses
 - Total kerja bersih
 - Efisiensi termal
 - MEP dari siklus tersebut
 - Tentukan daya keluaran dari siklus (dalam satuan kW) pada kecepatan mesin 3,800 RPM. Asumsikan siklus ini digunakan pada kendaraan 4 silinder 4 langkah dengan kapasitas mesin 1,800 cc.

Proses Pengerjaan

Dalam tiap analisis termodinamika untuk sistem *engineering*, maka diperlukan asumsi untuk memberikan batasan kerja yang lebih terarah. Asumsi untuk kasus di atas adalah:

- Menggunakan asumsi udara standar
- Perubahan energi kinetik dan potensial diabaikan
- Variasi dari panas spesifik diperhitungkan

Analisis

Udara yang ada di dalam silinder ditetapkan sebagai siklus tertutup.

- a. Suhu dan tekanan maksimal pada siklus Otto terjadi pada kondisi 3 (pemasukan panas pada volume tetap). Namun, kita harus mengetahui terlebih dahulu tekanan dan temperatur dari udara di akhir langkah kompresi isentropik (kondisi 2), yakni:

$$T_1 = 72^\circ\text{F} = 295\text{ K} \rightarrow u_1 = 210.49\text{ kJ/kg dan } v_{r1} = 647.9$$

Proses 1→2 (kompresi isentropik dari gas ideal)

$$\frac{v_{r2}}{v_{r1}} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{r} \rightarrow v_{r2} = \frac{v_{r1}}{r} = \frac{647.9}{8.5} = 76.22 \rightarrow T_2 = 677.7\text{ K dan } u_2 = 494.28\text{ kJ/kg}$$

$$\frac{P_2 v_2}{T_2} = \frac{P_1 v_1}{T_1} \rightarrow P_2 = P_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \left(\frac{v_2}{v_1} \right) = 110\text{ kPa} \left(\frac{677.7\text{ K}}{295\text{ K}} \right) (8.5) = 2147.96\text{ kPa}$$

Proses 2→3 (pemasukan panas pada volume tetap)

$$q_{in} = u_3 - u_2$$

$$850\text{ kJ/kg} = u_3 - 494.28\text{ kJ/kg}$$

$$u_3 = 1344.28\text{ kJ/kg} \rightarrow T_3 = 1649.1\text{ K dan } v_{r3} = 5.26$$

$$\frac{P_3 v_3}{T_3} = \frac{P_2 v_2}{T_2} \rightarrow P_2 \left(\frac{T_3}{T_2} \right) \left(\frac{v_2}{v_3} \right) = 2.14796 \text{ MPA} \left(\frac{1649.1 \text{ K}}{677.7 \text{ K}} \right) (1) = \mathbf{5.227 \text{ MPA}}$$

- b. Total kerja bersih dari tiap siklus dapat ditentukan dengan menemukan batasan sistem ($P \cdot dV$) kerja yang digunakan pada tiap proses atau dengan menemukan total perpindahan kalor bersih yang nilainya ekuivalen dengan total kerja selesai selama siklus terjadi. Berdasarkan data yang diberikan, maka pendekatan kedua yang mungkin dilakukan. Oleh karenanya, nilai energi dalam dari udara pada kondisi 4 harus ditemukan.

Proses 3→4 (ekspansi isentropik dari gas ideal)

$$\frac{v_{r4}}{v_{r3}} = \frac{v_4}{v_3} = r \rightarrow v_{r4} = r \cdot v_{r3} = 8.5 \cdot 5.26 = 44.71 \rightarrow T_4 = 820.9 \text{ K} \text{ \& } u_4 = 609.3 \text{ kJ/kg}$$

Proses 4→1 (Pelepasan panas pada volume tetap)

$$-q_{out} = u_1 - u_4 \rightarrow q_{out} = u_4 - u_1 = 609.3 - 210.49 = 398.81 \text{ kJ/kg}$$

Sehingga:

$$w_{net} = q_{net} = q_{in} - q_{out} = 850 - 398.81 = 451.17 \text{ kJ/kg}$$

- c. Efisiensi termal

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = \frac{451.17 \text{ kJ/kg}}{850 \text{ kJ/kg}} = 0.5308 \text{ atau } 53.1\%$$

Dengan menggunakan asumsi udara dingin standar (nilai panas spesifik udara dianggap pada suhu ruang), termal efisiensi menjadi:

$$\eta_{th, Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} = 1 - r^{1-k} = 1 - 8.5^{1-1.4} = 0.575 \text{ atau } 57.5\%$$

Terdapat deviasi nilai 4.4% yang mana cukup tinggi karena berkaitan dengan efisiensi, sehingga analisis menggunakan asumsi udara dingin standar perlu dilakukan secara seksama.

- d. *Mean Effective Pressure* (MEP)

$$MEP = \frac{W_{net}}{V_{max} - V_{min}} = \frac{w_{net}}{v_1 - v_1/r} = \frac{w_{net}}{v_1(1-1/r)}$$

Dimana:

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{(0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K})(295 \text{ K})}{110 \text{ kPa}} = 0.7697 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Maka:

$$MEP = \frac{451.17 \text{ kJ/kg}}{(0.7697 \text{ m}^3/\text{kg})(1-1/8.5)} \left(\frac{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3}{1 \text{ kJ}} \right) = 664.33 \text{ kPa}$$

- e. Total massa udara yang digunakan oleh 4 silinder adalah

$$m = \frac{v_d}{v_1} = \frac{0.0018 \text{ m}^3}{0.7697 \text{ m}^3/\text{kg}} = 0.002338 \text{ kg}$$

Kerja bersih yang dihasilkan oleh siklus adalah:

$$W_{net} = m w_{net} = (0.002338 \text{ kg})(451.17 \text{ kJ/kg}) = 1.0551 \text{ kJ/kg}$$

Nilai tersebut menandakan total kerja bersih yang dihasilkan tiap siklus termodinamik yakni 1.0551 kJ/siklus. Terdapat dua putaran untuk tiap siklus termodinamik ($n_{rev} = 2$ revolusi/siklus) untuk mesin 4 langkah, maka daya yang dihasilkan mesin adalah:

$$\dot{W}_{net} = \frac{W_{net} \dot{n}}{n_{rev}} = \frac{(1.0551 \text{ kJ/siklus})(3800 \text{ rev/menit}) \left(\frac{1 \text{ menit}}{60 \text{ detik}} \right)}{2 \text{ rev/siklus}} = 33.41 \text{ Kw}$$

4. Untuk membuktikan batasan rasio kompresi pada mesin Otto, maka lakukan analisis dengan detail yang sama pada soal No. 3 di mana nilai rasio kompresi yang digunakan adalah 17. Lakukan pembuktian bahwa nilai kompresi ini tidak bisa digunakan pada siklus Otto.

Permasalahan

Pembuktian batasan operasi terkait dengan rasio kompresi pada mesin dengan Siklus Otto.

Analisis

Udara yang ada di dalam silinder ditetapkan sebagai siklus tertutup.

- (a) Suhu dan tekanan maksimal pada siklus Otto terjadi pada kondisi 3 (pemasukan panas pada volume tetap). Namun, kita harus mengetahui terlebih dahulu tekanan dan temperatur dari udara di akhir langkah kompresi isentropik (kondisi 2), yakni:

$$T_1 = 72^\circ \text{F} = 295 \text{ K} \rightarrow u_1 = 210.49 \text{ kJ/kg dan } v_{r1} = 647.9$$

Proses 1→2 (kompresi isentropik dari gas ideal)

$$\frac{v_{r2}}{v_{r1}} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{r} \rightarrow v_{r2} = \frac{v_{r1}}{r} = \frac{647.9}{17} = 38.11 \rightarrow T_2 = 868.05 \text{ K}$$

Dari hasil perhitungan estimasi temperatur pada akhir langkah kompresi, maka didapat nilai akhir temperatur campuran udara dan bahan bakar di dalam silinder yakni 868.05 K. Nilai ini melebihi ambang batas temperatur *autoignition* dari bahan bakar yang digunakan yakni $\pm 823.15 \text{ K}$. Berarti akan terjadi *engine knocking* dan pembakaran dini sehingga kerja mesin ideal tidak bisa diperoleh.

5. Sebuah siklus Diesel ideal dengan udara sebagai fluida kerjanya memiliki rasio kompresi 19 dengan *cutoff ratio* 2.1. Pada awal proses kompresi, suhu udara adalah 290 K dan tekanan 0.11 MPa. Tentukan:
- Suhu dan tekanan tiap proses
 - Efisiensi termal

Proses Pengerjaan

Dalam tiap analisis termodinamika untuk sistem *engineering*, maka diperlukan asumsi untuk memberikan batasan kerja yang lebih terarah. Asumsi untuk kasus di atas adalah:

- Udara yang ada di dalam silinder ditetapkan sebagai siklus tertutup.
- Proses kompresi dan ekspansi diasumsikan sebagai isentropik
- Seluruh proses mampu balik
- Udara diasumsikan sebagai gas ideal
- Perubahan energi potensial dan kinetik diabaikan

Analisis

- a. Analisis dimulai dengan menentukan *properties* pada tiap kondisi atau *state*.

$$T_1 = 290 \text{ K} \rightarrow u_1 = 206.91 \text{ kJ/kg dan } v_{r1} = 676.1$$

Proses 1→2 (kompresi isentropik dari gas ideal)

$$v_{r2} = \frac{v_{r1}}{r} = \frac{676.1}{19} = 35.58 \rightarrow T_2 = 888.9 \text{ K dan } h_2 = 920.58 \text{ kJ/kg}$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \left(\frac{v_2}{v_1} \right) = 0.11 \text{ MPa} \left(\frac{889.3 \text{ K}}{290 \text{ K}} \right) (19) = 6.41 \text{ MPa}$$

Proses 2→3 (pemasukan panas pada tekanan tetap)

Tekanan pada kondisi 2 dapat dievaluasi dengan menggunakan hubungan isentropik:

$p_2 = p_1 (p_{r2}/p_{r1})$. Karena proses 2→3 terjadi pada tekanan tetap, maka:

$$T_3 = \frac{V_3}{V_2} T_2 \rightarrow \text{gunakan nilai } \textit{cutoff ratio}: r_c = \frac{V_3}{V_2}$$

$$T_3 = r_c T_2 = 2.1 (888.9) = 1866.7 \text{ K} \rightarrow h_3 = 2086 \text{ kJ/kg dan } v_{r3} = 3.5$$

Proses 3→4 (ekspansi isentropik)

$$v_{r4} = \frac{V_4}{V_3} v_{r3} = \frac{V_4}{V_2} \frac{V_2}{V_3} v_{r3}$$

Nilai $V_4 = V_1$, dengan nilai rasio kompresi dan *cutoff ratio* yang sudah diketahui, maka:

$$v_{r4} = \frac{r}{r_c} v_{r3} = \frac{19}{2.1} (3.5) = 31.67 \rightarrow u_4 = 695.6 \text{ kJ/kg dan } T_4 = 925.2 \text{ K.}$$

Tekanan pada kondisi 4 dapat diketahui dengan menggunakan hubungan isentropik, yakni:

$p_4 = p_3 (p_{r4}/p_{r1})$, dengan nilai $V_4 = V_1$, maka:

$$p_4 = \frac{T_4}{T_1} p_1 = \frac{(925.2 \text{ K})}{(290 \text{ K})} (0.11 \text{ MPa}) = 0.351 \text{ Mpa}$$

b. Nilai efisiensi termal

$$\eta = 1 - \frac{u_4 - u_1}{h_3 - h_2} = 1 - \frac{695.6 - 206.91}{2086 - 920.58} = 0.5806 \text{ atau } 58.1\%$$

PROFIL PENULIS

Rovida C. Hartantrie, S.T., M.T.



Penulis pernah berkeinginan untuk merancang pesawat terbang sehingga setelah lulus SMA tahun 2006 melanjutkan kuliah S1 jurusan Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Pada saat kuliah, tertarik pada bidang energi terutama *thermal energy* dan bergabung dengan lab Perpindahan Panas. Lulus S1 tahun 2011 kemudian bekerja pada perusahaan *manufacturing* pembuatan *Pressure Vessel* dan *Heat Exchanger* hingga tahun 2014. Penulis melanjutkan pendidikan S2 pada tahun 2014 di Jurusan Teknik Mesin Universitas Indonesia dan lulus pada tahun 2016. Sejak awal 2017, penulis menjadi Dosen di Universitas Pancasila.

I Gede Eka Lesmana, S.T., M.T.



Penulis menyelesaikan pendidikan S-1 Teknik Mesin di Universitas Pancasila tahun 1999 di bidang Perancangan Teknik, setelah lulus S-1 bergabung sebagai Dosen Teknik Mesin Universitas Pancasila dari tahun 2000 sampai dengan sekarang sambil melanjutkan studi S-2 di Universitas Indonesia di bidang Konversi Energi dan menyelesaikan pendidikan S-2 pada tahun 2003, dalam amanatnya penulis ditugaskan untuk melaksanakan tugas tambahan sebagai Sekprodi Mesin D3 dari tahun 2019 sd 2021 dan Kaprodi Mesin D3 dan S1 dari tahun 2021 sd sekarang, Selain Publikasi di seminar dan Jurnal nasional maupun internasional, Penulis beserta tim juga menghasilkan beberapa HaKi sebagai berikut: Tungku Reaktor Pirolisis yang ditingkatkan (2020), Sistem *Organic Rankine Cycle* yang ditingkatkan (2020), Suatu Pelat Komposit Matriks Aluminium

Berperkuat Alumina Sebagai Material Tahan Peluru (2015), Alat Bakar Untuk Industri (2010)

Arif Riyadi TK, S.T., M.T.



Penulis menyelesaikan Pendidikan sarjana Jurusan Teknik Mesin S1 di Institut Teknologi Nasional Malang pada tahun 1999. Setelah menyelesaikan pendidikan sarjana tersebut pernah bekerja di beberapa perusahaan. Adapun perusahaan yang pernah menjadi tempat berkarier diantaranya adalah: PT. Wonokoyo sebagai kasubbag. *Repair & Maintenance*, PT. Gemanting Aditya *Engineering* sebagai *Engineering & Marketing Support*, PT. Binangun Teknika Aditya sebagai *Engineering & Marketing Support*, PT. Tekno Sukses Mandiri sebagai *Marketing*, CV. Giri Arta Teka sebagai *Manager Marketing*, PT. Greendulu sebagai *Manager*. Selain aktif di industri, juga aktif mengajar di dunia akademik. Beberapa aktivitas di dunia akademik diantaranya: SMK Walisongo Gempol-Pasuruan sebagai Wakasek Kurikulum dan guru, Institut Teknologi Nasional Malang sebagai asisten dosen dan staf laboran, Sekolah Tinggi Teknik Gempol sebagai Dosen, Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Darat-Lembaga Pengkajian Teknologi TNI AD RI sebagai Guru Militer, UNISMA Bekasi sebagai Dosen, Politeknik Meta sebagai Dosen, Univ. Mercu Buana sebagai Dosen, Univ. Pancasila sebagai Dosen & Sekretaris Program Studi sampai saat ini. Pendidikan Program Magister Teknik Mesin diselesaikan di Universitas Brawijaya pada tahun 2006, dengan konsentrasi keilmuan di bidang Konversi Energi. Pada tahun 2016 mulai bergabung dengan Universitas Pancasila sebagai Dosen Tetap Yayasan sampai saat ini, masih aktif di dunia *industry* sebagai konsultan *engineering* dan *marketing*.

Reza Abdu Rahman, S.Pd., M.T.



Pendidikan vokasi Teknik Otomotif berhasil diselesaikan pada Tahun 2008, kemudian melanjutkan program Strata-I di Universitas Negeri Jakarta dan lulus pada tahun 2014 untuk program studi pendidikan teknik mesin. Penulis aktif pada bidang pendidikan. Penulis aktif di Pendidikan Vokasi mulai tahun 2013-2019 di SMKN 10 Kota Bekasi dan menjabat sebagai Kepala Program Keahlian Teknik Otomotif. Penulis melanjutkan pendidikan S2 di Magister Teknik Mesin Universitas Pancasila dan lulus pada tahun 2020. Mulai tahun 2019, penulis aktif pada bidang STEM dengan fokus pada *Engineering Program for High School*, dan menjadi Guru tamu di *HighScope* Indonesia Institute serta mulai aktif menjadi Dosen di Universitas Pancasila Sejak Tahun 2021. Fokus penelitian penulis adalah bidang penyimpanan energi dan hibridisasi sistem *renewable energy*, khususnya *solar thermal system*.

Agung Nugroho, S.T., Ph.D.



Pendidikan program Strata-I Teknik Kimia berhasil diselesaikan pada Tahun 2007, kemudian melanjutkan program *integrative* S2 dan S3 di *University of Science and Technology* di Korea Selatan pada *Departemen of Clean Energy and Chemical Engineering* pada 2013. Setelah lulus program *doctoral*, penulis melanjutkan penelitiannya sebagai *visiting scientist* di *Korea Institute of Science and Technology* sampai tahun 2014. Penulis aktif pada bidang pendidikan sebagai pengajar di Program Studi Teknik Kimia di Universitas Pertamina mulai tahun 2017 sampai sekarang. Fokus penelitian adalah sintesis material untuk aplikasi penyimpanan energi.

MOTOR BAKAR

Pada Mesin Konversi Energi

Termodinamika merupakan pemahaman paling mendasar terkait dengan interaksi energi yang ada pada bidang mekanika maupun kimia. Proses, batasan sistem dan juga perubahan sifat fluida kerja menjadi kunci penting untuk kebutuhan analisis sistem energi yang melibatkan siklus termodinamika. Termodinamika sendiri menjadi syarat pada mata kuliah lanjutan seperti mesin konversi energi. Mesin konversi energi membahas tentang pemanfaatan proses termodinamika yang melibatkan adanya perubahan energi, khususnya dari energi kimia pada bahan bakar yang dikonversi melalui proses pembakaran yang bersifat eksotermis.

Memperhatikan hal tersebut, buku ini secara spesifik didesain sebagai buku ajar pegangan untuk kajian motor bakar pada mesin konversi energi. Motor bakar yang dianalisis meliputi adanya siklus Otto dan Diesel, serta bagaimana hubungan kedua siklus tersebut pada prinsip mekanika (kerja mekanis) dan prinsip kimia terkait dengan perubahan energi. Pembahasan yang lebih spesifik diharapkan dapat memberikan acuan yang lebih jelas sebagai bahan ajar tambahan untuk motor bakar pada mesin konversi energi, termasuk juga pada contoh kasus untuk bahan ajar teknik kimia terapan terkait dengan proses perubahan energi melalui peristiwa pembakaran yang bersifat eksotermis.

Buku ini disusun secara deduktif yang dimulai dengan pengantar konversi energi dan termodinamika sebagai fondasi pemahaman utama. Selanjutnya pembahasan fokus pada prinsip kerja motor bakar yang menggabungkan dua aspek penting terkait dengan mekanika dan juga reaksi kimia pembakaran. Setelah menguasai dua aspek fundamental dan satu aspek spesifik, maka dua bab berikutnya fokus pada contoh model siklus motor bakar yang paling umum digunakan yakni siklus Otto dan Diesel. Diharapkan melalui kehadiran buku ini, pembahasan terkait dengan motor bakar pada mesin konversi energi menjadi lebih menarik dan memiliki kedalaman keilmuan yang lebih kuat guna mencapai luaran pembelajaran yang lebih tinggi.