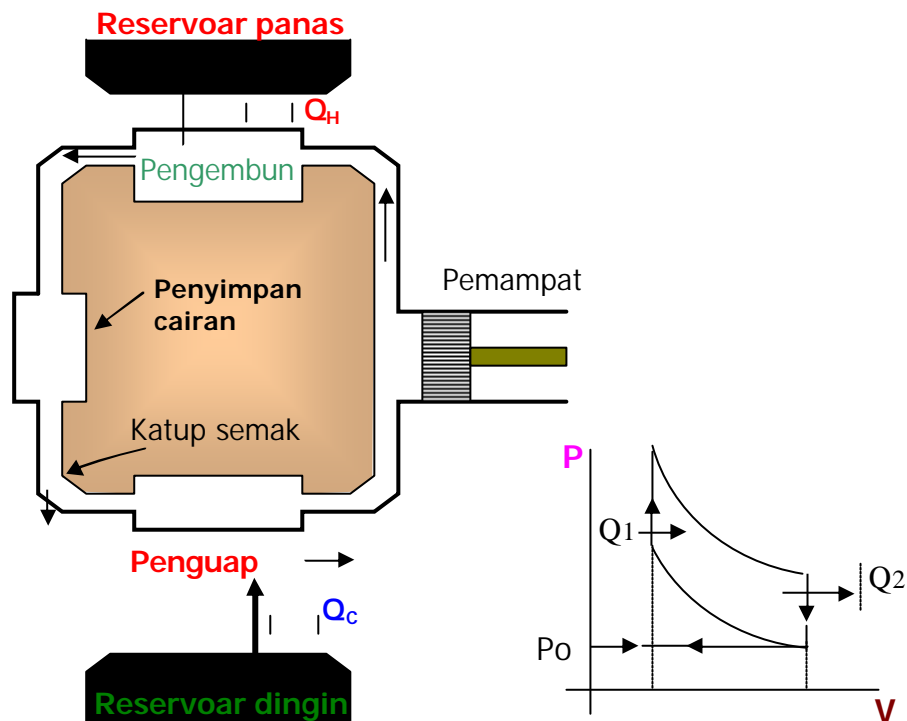


# Termodinamika



Kode FIS.17

# Termodinamika

Penyusun

*Drs. Retno hasanah, MS.*

Editor:

Dr. Budi Jatmiko, M.Pd.

Drs. Munasir, M.Si.

**BAGIAN PROYEK PENGEMBANGAN KURIKULUM  
DIREKTORAT PENDIDIKAN MENENGAH KEJURUAN  
DIREKTORAT JENDERAL PENDIDIKAN DASAR DAN MENENGAH  
DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL**

**2004**

# Kata Pengantar

---

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas karunia dan hidayah-Nya, kami dapat menyusun bahan ajar modul manual untuk SMK Bidang Adaptif, yakni mata-pelajaran Fisika, Kimia dan Matematika. Modul yang disusun ini menggunakan pendekatan pembelajaran berdasarkan kompetensi, sebagai konsekuensi logis dari Kurikulum SMK Edisi 2004 yang menggunakan pendekatan kompetensi (*CBT: Competency Based Training*).

Sumber dan bahan ajar pokok Kurikulum SMK Edisi 2004 adalah modul, baik modul manual maupun interaktif dengan mengacu pada Standar Kompetensi Nasional (SKN) atau standarisasi pada dunia kerja dan industri. Dengan modul ini, diharapkan digunakan sebagai sumber belajar pokok oleh peserta diklat untuk mencapai kompetensi kerja standar yang diharapkan dunia kerja dan industri.

Modul ini disusun melalui beberapa tahapan proses, yakni mulai dari penyiapan materi modul, penyusunan naskah secara tertulis, kemudian disetting dengan bantuan alat-alat komputer, serta divalidasi dan diujicobakan empirik secara terbatas. Validasi dilakukan dengan teknik telaah ahli (*expert-judgment*), sementara ujicoba empirik dilakukan pada beberapa peserta diklat SMK. Harapannya, modul yang telah disusun ini merupakan bahan dan sumber belajar yang berbobot untuk membekali peserta diklat kompetensi kerja yang diharapkan. Namun demikian, karena dinamika perubahan sains dan teknologi di industri begitu cepat terjadi, maka modul ini masih akan selalu dimintakan masukan untuk bahan perbaikan atau direvisi agar supaya selalu relevan dengan kondisi lapangan.

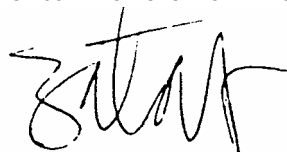
Pekerjaan berat ini dapat terselesaikan, tentu dengan banyaknya dukungan dan bantuan dari berbagai pihak yang perlu diberikan penghargaan dan ucapan terima kasih. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini tidak

berlebihan bilamana disampaikan rasa terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada berbagai pihak, terutama tim penyusun modul (penulis, editor, tenaga komputerisasi modul, tenaga ahli desain grafis) atas dedikasi, pengorbanan waktu, tenaga, dan pikiran untuk menyelesaikan penyusunan modul ini.

Kami mengharapkan saran dan kritik dari para pakar di bidang psikologi, praktisi dunia usaha dan industri, dan pakar akademik sebagai bahan untuk melakukan peningkatan kualitas modul. Diharapkan para pemakai berpegang pada azas keterlaksanaan, kesesuaian dan fleksibilitas, dengan mengacu pada perkembangan IPTEK pada dunia usaha dan industri dan potensi SMK dan dukungan dunia usaha industri dalam rangka membekali kompetensi yang terstandar pada peserta diklat.

Demikian, semoga modul ini dapat bermanfaat bagi kita semua, khususnya peserta diklat SMK Bidang Adaptif untuk mata-pelajaran Matematika, Fisika, Kimia, atau praktisi yang sedang mengembangkan modul pembelajaran untuk SMK.

Jakarta, Desember 2004  
a.n. Direktur Jenderal Pendidikan  
Dasar dan Menengah  
Direktur Pendidikan Menengah Kejuruan,



Dr. Ir. Gatot Hari Priowirjanto, M.Sc.  
NIP 130 675 814

# Daftar Isi

---

✍	Halaman Sampul .....	i
✍	Halaman Francis .....	ii
✍	Kata Pengantar.....	iii
✍	Daftar Isi .....	v
✍	Peta Kedudukan Modul.....	vii
✍	Daftar Judul Modul.....	viii
✍	Glosary .....	ix

## I. PENDAHULUAN

a.	Deskripsi.....	1
b.	Prasarat .....	1
c.	Petunjuk Penggunaan Modul .....	2
d.	Tujuan Akhir.....	3
e.	Kompetensi .....	4
f.	Cek Kemampuan.....	5

## II. PEMELAJARAN

A.	Rencana Belajar Peserta Diklat.....	6
----	-------------------------------------	---

### B. Kegiatan Belajar

1.	<b>Kegiatan Belajar</b> .....	7
a.	Tujuan Kegiatan Pemelajaran.....	7
b.	Uraian Materi .....	8
c.	Rangkuman .....	33
d.	Tugas.....	35
e.	Tes Formatif .....	39
f.	Kunci Jawaban .....	44
g.	Lembar Kerja .....	45
2	<b>Kegiatan Belajar</b> .....	46
a.	Tujuan Kegiatan Pemelajaran.....	46
b.	Uraian Materi .....	46
c.	Rangkuman .....	52
d.	Tugas.....	35
e.	Tes Formatif .....	53
f.	Kunci Jawaban .....	55
g.	Lembar Kerja .....	57

### **III. EVALUASI**

A. Tes Tertulis .....	58
B. Tes Praktik.....	59

### **KUNCI JAWABAN**

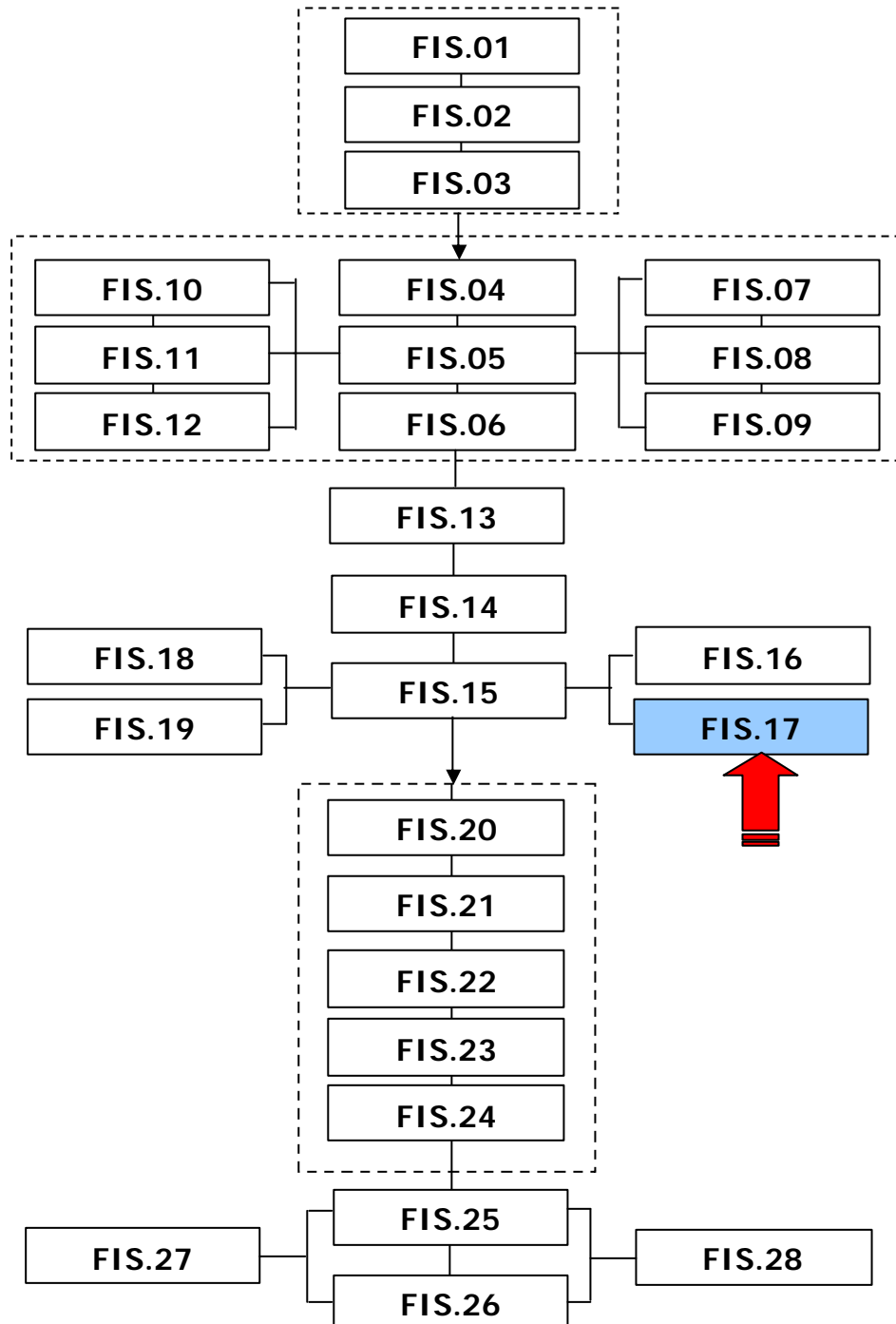
A. Tes Tertulis .....	60
B. Lembar Penilaian Tes Praktik.....	61

<b>IV. PENUTUP</b> .....	63
--------------------------	----

<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	64
-----------------------------	----

# Peta Kedudukan Modul

---



# DAFTAR JUDUL MODUL

No.	Kode Modul	Judul Modul
1	FIS.01	Sistem Satuan dan Pengukuran
2	FIS.02	Pembacaan Masalah Mekanik
3	FIS.03	Pembacaan Besaran Listrik
4	FIS.04	Pengukuran Gaya dan Tekanan
5	FIS.05	Gerak Lurus
6	FIS.06	Gerak Melingkar
7	FIS.07	Hukum Newton
8	FIS.08	Momentum dan Tumbukan
9	FIS.09	Usaha, Energi, dan Daya
10	FIS.10	Energi Kinetik dan Energi Potensial
11	FIS.11	Sifat Mekanik Zat
12	FIS.12	Rotasi dan Kesetimbangan Benda Tegar
13	FIS.13	Fluida Statis
14	FIS.14	Fluida Dinamis
15	FIS.15	Getaran dan Gelombang
16	FIS.16	Suhu dan Kalor
17	FIS.17	Termodinamika
18	FIS.18	Lensa dan Cermin
19	FIS.19	Optik dan Aplikasinya
20	FIS.20	Listrik Statis
21	FIS.21	Listrik Dinamis
22	FIS.22	Arus Bolak-Balik
23	FIS.23	Transformator
24	FIS.24	Kemagnetan dan Induksi Elektromagnetik
25	FIS.25	Semikonduktor
26	FIS.26	Piranti semikonduktor (Dioda dan Transistor)
27	FIS.27	Radioaktif dan Sinar Katoda
28	FIS.28	Pengertian dan Cara Kerja Bahan



# Glossary

ISTILAH	KETERANGAN
Termodinamika	Cabang ilmu fisika yang memusatkan perhatian pada energi (terutama energi panas) dan transformasinya
Proses Kuasistatik	suatu proses yang pada setiap saat atau pada setiap tahap perubahan sistem secara keseluruhan selalu mencapai keadaan kesetimbangan.
Proses non-Kuasistatik	Kebalikan dari proses kuasistatik, sistem termodinamik yang tidak dalam keadaan kesetimbangan termodinamik.
Proses Reversibel	merupakan proses dari suatu keadaan awal ke keadaan tertentu dan dari keadaan akhir tersebut dimungkinkan terjadinya <u>proses balik</u> ke keadaan awal kembali melalui jalan yang sama. Sedemikian rupa dengan mudah jika pada sistem dikenai kondisi tertentu.
Proses Irreversibel	Kebalikan dari proses reversibel, proses yang tidak dapat kembali dari keadaan akhir menuju ke keadaan awal melalui jalan yang sama.
Siklus/Daur	Proses terus-menerus yang merupakan sederetan proses yang terdiri atas beberapa tahapan dari suatu keadaan setimbang ke keadaan setimbang lain, kemudian kembali lagi ke keadaan setimbang semula yang hasilnya adalah pengubahan kalor menjadi kerja atau usaha luar.
Reservoar	Atau tandon kalor adalah benda yang massanya sedemikian besar sehingga benda itu dapat menyerap atau membuang sejumlah kalor yang tak terbatas banyaknya tanpa menimbulkan perubahan temperatur yang berarti atau perubahan koordinat termodinamik lainnya.
Mesin Kalor/Mesin Pemanas	suatu alat atau sistem yang berfungsi untuk mengubah energi kalor atau energi panas menjadi energi usaha atau energi mekanik.

Efisiensi mesin	Perbandingan usaha yang dilakukan terhadap kalor masukan yang diberikan, dinyatakan dengan : $\eta = \frac{W}{Q_1} \times 100 \%$
Mesin Pendingin/Refrigerator	suatu alat atau sistem yang berfungsi untuk secara netto memindahkan kalor dari reservoir dingin ke reservoir panas dengan menggunakan usaha luar. Sebagai contoh adalah lemari es atau refrigerator.
Koefisien Daya Guna	Menyatakan efisiensi yang dimiliki oleh mesin pendingin, yang dinyatakan dengan: $\eta = \frac{\text{kalor yg diambil dari tan don dingin}}{\text{kerja yg dilakukan pada zat pendingin}}$

# BAB I. PENDAHULUAN

---

## A. Deskripsi

Modul Termodinamika merupakan salah satu sumber belajar dan dapat digunakan sebagai acuan kegiatan pembelajaran yang diawali dengan pembahasan konsep konversi kalor menjadi kerja, prinsip kerja mesin, penentuan efisiensi mesin dan koefisien daya guna mesin serta mengenal beberapa proses bersiklus yang ulasan dan pembahasannya memerlukan beberapa pengetahuan dasar seperti termofisika mengenai kesetaraan energi kalor mekanik, percobaan Joule, beberapa proses termodinamika yang dialami sistem gas, hubungan kualitatif antara usaha, tekanan dan perubahan volume, pengenalan beberapa diagram proses termodinamika, pemahaman Hukum Pertama Termodinamika.

Untuk menghindari kesulitan yang dialami, peserta diklat disarankan mengingat dan jika diperlukan membaca referensi serta modul lain yang berkaitan.

Kegiatan Belajar dengan modul Termodinamika dilanjutkan dengan pembahasan serta penelaahan Hukum Kedua Termodinamika alternatif Kevin-Planck dan Claussius.

Perlu dikomunikasikan bahwa di bagian akhir kegiatan belajar dilengkapi dengan beberapa contoh dan latihan soal dengan tujuan untuk lebih memperdalam pemahaman konsep dan menambah wacana bagi para peserta diklat yang mempelajari modul Termodinamika.

## B. B. Prasyarat

Para peserta diklat dapat mempelajari modul Termodinamika ini dengan baik, apabila prasyarat pengetahuan dasar sudah dipahami antara lain mengerti dan paham konsep kesetaraan energi kalor mekanik dan percobaan Joule, beberapa proses termodinamika yang dialami

sistem gas, hubungan kualitatif antara usaha-kerja, tekanan, perubahan volume dan temperatur.

Bagi peserta diklat dipersyaratkan juga memahami analisis dasar matematika, pengoperasian diferensial dan integral untuk lebih memahami konsep materi modul Termodinamika.

Dipersyaratkan pula bagi peserta diklat untuk mempelajari percobaan-percobaan dengan seksama, teliti sehingga dapat ditemukan konsep yang benar.

### **C. Petunjuk Penggunaan Modul**

- ✍ Baca dengan seksama dan pelajari daftar isi serta peta keberadaan modul.
- ✍ Lakukan dengan seksama langkah-langkah pembelajaran menuju pemahaman konsep dengan benar.
- ✍ Pelajari dengan seksama uraian materi, contoh, latihan soal sehingga peserta diklat dapat memperdalam wacana menuju pemahaman konsep yang benar.
- ✍ Andaikan peserta diklat mengalami kesulitan dalam menyelesaikan soal-soal test disarankan berkonsultasi dengan instruktur yang ditunjuk.
- ✍ Setiap kesulitan catatlah untuk dikaji dan dibahas dalam kegiatan tatap muka. Untuk menambah wawasan peserta diklat diharapkan dapat membaca referensi lain yang berhubungan materi modul Termodinamika.

## D. Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari modul TERMODINAMIKA diharapkan peserta diklat dapat:

- ☞ Menjelaskan kesetaraan energi kalor mekanik dan percobaan Joule.
- ☞ Menjelaskan konversi kalor menjadi kerja dan sebaliknya.
- ☞ Menjelaskan proses siklus dengan benar.
- ☞ Menjelaskan dan memberikan contoh perubahan besaran kalor secara keseluruhan menjadi kerja dan sebaliknya.
- ☞ Menjelaskan prinsip kerja mesin kalor atau mesin pemanas.
- ☞ Menentukan efisiensi mesin kalor/mesin pemanas.
- ☞ Menjelaskan prinsip kerja mesin pendingin.
- ☞ Menentukan koefisien daya guna mesin pendingin.
- ☞ Menjelaskan prinsip kerja Siklus Otto dan menentukan efisiensi siklus Otto.
- ☞ Menjelaskan prinsip kerja Siklus Diesel dan menentukan efisiensi siklus Diesel.
- ☞ Menentukan koefisien daya guna mesin/pesawat pendingin.

## E. Kompetensi

Kompetensi : TERMODINAMIKA  
 Program Keahlian : Program Adaptif  
 Mata Diklat-Kode : FISIKA-FIS.17  
 Durasi Pembelajaran : 14 jam @ 45 menit

SUB KOMPETENSI	KRITERIA KERJA	LINGKUP BELAJAR	MATERI POKOK PEMBELAJARAN		
			SIKAP	PENGETAHUAN	KETERAMPILAN
? Menerapkan Hukum Termodinamika	? Kesetaraan energi kalor mekanik dan percobaan Joule ? Sistem Gas yang mengalami proses-proses termodinamika ? Kajian dan Penelaahan Hukum Pertama Termodinamika ? Efisiensi mesin berdasarkan siklus Carnot	Materi Kompetensi ini membahas mengenai: hubungan kualitatif usaha trik kerja, tekanan, tempertur dan perubahan volume Diagram proses termodinamika Penerapan Hukum Termodinamika pada mesin Carnot, mesin diesel dan mesin pendingin	Teliti dan seksama dalam menelaah dan menerapkan prinsip termodinamika	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hubungan kualitatif tekanan, volume dan temperatur dengan usaha sistem</li> <li>- Hukum Pertama Termodinamika dan Hukum Kedua Termodinamika</li> <li>- Siklus mesin</li> <li>- Efisiensi mesin</li> </ul>	Menerapkan prinsip-prinsip Hukum Termodinamika pada pekerjaan engine

## F. Cek Kemampuan

- ✍ Berikan penjelasan mengenai sistem termodinamika.
- ✍ Berikan penjelasan mengenai proses termodinamika.
- ✍ Berikan penjelasan apakah pengubahan kalor seluruhnya menjadi usaha dapat terjadi?
- ✍ Berikan penjelasan mengenai daur atau siklus.
- ✍ Berikan penjelasan mengenai mesin kalor dilengkapi dengan contoh.
- ✍ Berikan penjelasan mengenai mesin pendingin dilengkapi dengan contoh.
- ✍ Tuliskan dan nyatakan parameter penting pada mesin panas atau mesin kalor dan pada mesin pendingin
- ✍ Gambarkan diagram P-V pendekatan mesin Otto dan kemudian tunjukkan bahwa:

Efisiensi Siklus Otto adalah:  $\eta = \frac{1}{1 - R^{\gamma-1}}$

dengan:

R adalah nisbah kompresi mesin

$$R = V_2/V_1$$

- ✍ Berikan penjelasan apakah dasar kerja mesin pendingin/refrigerator (almari es) bertentangan dengan pernyataan Claussius.
- ✍ Berikan penjelasan apakah mesin panas ideal itu? Lengkapi jawaban dengan gambar diagram.
- ✍ Memberikan penjelasan apakah mesin pendingin ideal itu? Lengkapi jawaban dengan gambar diagram Suatu mesin yang efisien dibuat oleh industri mesin. Mesin ini beroperasi diantara suhu 430°C dan 1870°C. Dalam 1 jam mesin ini memerlukan panas sejumlah  $6,89 \times 10^9$  kalori dan menghasilkan energi mekanik yang bermanfaat sebesar  $1,30 \times 10^{16}$  Joule.

# BAB II. PEMBELAJARAN

---

## A. Rencana Belajar Peserta Diklat

Kompetensi : Termodinamika  
Sub Kompetensi : Menerapkan Hukum Termodinamika

Jenis Kegiatan	Tanggal	Waktu	Tempat Belajar	Alasan Perubahan	Tanda Tangan Guru



## B. Kegiatan Belajar

### 1. Kegiatan Belajar 1

#### Konversi Kalor Menjadi Kerja, Proses Siklus dan Efisiensi Mesin

##### a. Tujuan kegiatan pembelajaran

Setelah menyelesaikan kegiatan pembelajaran diharapkan peserta diklat dapat:

- ✍ Menjelaskan dan memberikan minimal 1 contoh proses kuasistatik.
- ✍ Memberikan penjelasan mengenai proses berbalik (reversibel).
- ✍ Menjelaskan dua persyaratan agar proses dikatakan berbalik (reversibel).
- ✍ Menjelaskan konversi kalor menjadi kerja dan sebaliknya.
- ✍ Menjelaskan proses siklus dengan benar.
- ✍ Menjelaskan dan memberikan contoh pengubahan besaran kalor secara keseluruhan menjadi kerja dan sebaliknya.
- ✍ Menjelaskan prinsip kerja mesin kalor atau mesin pemanas.
- ✍ Menentukan efisiensi mesin kalor/mesin pemanas.
- ✍ Menjelaskan prinsip kerja mesin pendingin.
- ✍ Menentukan koefisien daya guna mesin pendingin.
- ✍ Menjelaskan prinsip kerja Siklus Otto dan menentukan efisiensi Siklus Otto.
- ✍ Menjelaskan prinsip kerja Siklus Diesel dan menentukan efisiensi Siklus Diesel.
- ✍ Menentukan koefisien daya guna mesin/pesawat pendingin.

## **b. Uraian Materi**

### **a) Pengantar**

Apabila dalam Hukum Pertama Termodinamika Pertama dinyatakan bahwa terjadi kesetimbangan energi dalam suatu proses, maka Hukum Kedua Termodinamika akan dirumuskan dan ditunjukkan arah yang mungkin bagi proses tersebut.

Tinjau suatu sistem yang pada awalnya tidak dalam kesetimbangan, katakanlah hal ini disebabkan akibat adanya perbedaan temperatur atau perbedaan tekanan atau juga dapat karena akibat perbedaan konsentrasi. Maka sistem tersebut akan mengalami perubahan terus menerus menuju ke arah keadaan kesetimbangan.

Untuk memperjelas pengertian proses akan digunakan pembatasan-pembatasan. Proses reversibel merupakan proses perubahan dari suatu keadaan awal ke keadaan tertentu, dan dari keadaan akhir tersebut dimungkinkan terjadinya proses berbalik ke keadaan awal semula dengan mudah bila pada sistem dikenai kondisi tertentu.

Suatu proses dikatakan terbalikkan (reversibel), apabila juga memenuhi persyaratan:

- a. proses tersebut merupakan proses kuasistatik
- b. dalam proses tersebut tidak terjadi efek-efek disipasi

Sedangkan proses kuasistatik didefinisikan sebagai suatu proses yang pada setiap tahap perubahan sistem secara berturutan selalu mencapai keadaan kesetimbangan. Ini berarti bahwa persamaan keadaan sistem pada setiap tahapan proses tetap dapat dituliskan. Tentu saja pendefinisian tersebut hanya merupakan idealisasi keadaan nyatanya. Karena pada umumnya proses alam/natural process selalu tidak terbalikkan (*irreversibel*).

Sebagai contoh, kalor itu sendiri tidak dapat mengalir dari benda yang lebih dingin ke benda yang lebih panas. Walaupun dalam proses tersebut memenuhi Hukum Pertama Termodinamika, tetapi proses tersebut tidak pernah dapat terjadi bila tanpa ada perubahan lain.

Demikian pula Hukum Pertama Termodinamika tidak memberikan persyaratan terhadap proses perubahan kerja menjadi kalor dan atau sebaliknya proses perubahan kalor menjadi kerja; walaupun memang benar bahwa dalam proses tersebut terpenuhi Hukum Kekekalan Energi.

Dalam praktek mudah diperlihatkan pengubahan kerja secara keseluruhan menjadi kalor, sebagai contoh pada proses ekspansi volume sistem gas ideal secara isothermal. Demikian pula dalam percobaan Joule dapat diperlihatkan bahwa kerja dapat diusahakan secara keseluruhan diubah menjadi kalor, namun proses tersebut berlangsung hanya satu tahap saja.

Untuk mengulangi proses tersebut secara terus menerus diperlukan pembalikan proses, yang tentunya diperlukan sejumlah kerja. Dalam praktek sering kali diusahakan agar kerja yang dihasilkan sistem lebih besar dibandingkan dengan kerja pada pembalikan proses.

Suatu proses yang terdiri atas beberapa tahapan dari suatu keadaan setimbang ke suatu keadaan setimbang lain, kemudian kembali ke keadaan setimbang semula disebut daur atau siklus.

## **b) Konversi Kalor Menjadi Kerja**

Pada pembahasan mengenai Kalor dan Hukum Pertama Termodinamika telah kita pelajari bahwa apabila kita berikan kalor kepada suatu sistem, maka kalor tersebut dapat dipakai untuk melakukan perubahan tenaga internal dan kerja luar. Pernyataan ini dirumuskan didalam Hukum Pertama Termodinamika.

Andaikan temperatur sistem tetap, maka kalor yang diberikan kepada sistem mungkin dipakai untuk kerja atau usaha luar. Sebagai contoh, gas yang melakukan proses isothermal dan menyerap kalor. Andaikata volume sistem tetap, maka kalor yang diberikan kepada sistem akan dipakai untuk menaikkan temperatur sistem, sehingga energi dalam sistem bertambah.

Pada contoh tersebut di atas, kalor yang diberikan kepada suatu sistem telah dipakai untuk melakukan kerja maupun dipakai untuk mengubah energi dalam sistem. Namun, didalam pengubahan kalor menjadi kerja, proses hanya

berlangsung satu arah artinya setelah perubahan kalor menjadi kerja berlangsung, maka proses berhenti, jadi proses hanya berlangsung satu tahap saja. Gas yang dipanasi secara isothermal akan memuai hingga seluruh kalor dipakai untuk kerja. Namun, pemanasan itu terhenti setelah tekanan gas sama dengan tekanan udara luar. Dalam proses satu arah semacam itu, tidak ada masalah kalor yang diubah secara keseluruhan menjadi kerja atau sebaliknya.

Apabila diinginkan suatu proses yang secara terus menerus mengubah kalor menjadi kerja, maka sistem harus dikembalikan dari keadaan akhir ke keadaan awal. Jadi, yang diperlukan adalah suatu proses keliling, daur atau proses siklus. Suatu daur atau proses siklus terdiri atas sederetan proses yang memungkinkan aliran kalor dari atau kepada sistem.

### c) **Proses Siklus**

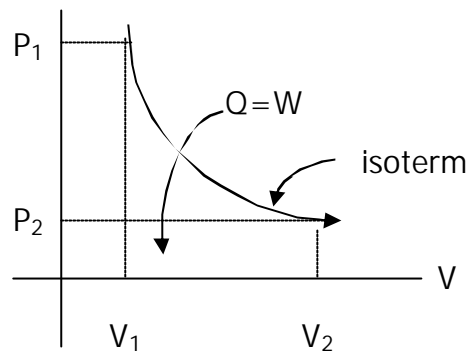
Dari pengalaman atau eksperimen diketahui bahwa usaha dapat diubah menjadi kalor seluruhnya. Sebagai contoh, jika dua benda digosokkan yang satu terhadap yang lain didalam suatu sistem (fluida), maka usaha yang dilakukan akan dikonversikan dan timbul sebagai kalor di dalam sistem.

Selanjutnya ingin diketahui, apakah proses kebalikannya juga dapat terjadi?. Dapatkah kalor diubah menjadi usaha seluruhnya, hal ini sangat penting untuk kehidupan kita sehari-hari, karena konversi ini merupakan dasar kerja dari semua mesin bakar atau mesin kalor dan kalor ini dikonversikan menjadi usaha mekanis.

Pengubahan kalor seluruhnya menjadi usaha dalam satu tahap saja dapat terjadi. Sebagai contoh dapat dipelajari dalam uraian mengenai proses isotermik. Jadi, apabila diperhatikan pada suatu proses ekspansi isothermal sistem gas ideal adalah suatu proses dimana energi dalam tidak berubah ( $U=0$ , karena temperatur sistem tetap) maka  $Q = -W$ .

Akan ditinjau contoh itu dengan memperhatikan gambar 1 berikut

Misalkan gas ideal banyaknya tertentu mula-mula bervolume  $V_1$ , tekanan  $P_1$  dan temperaturnya  $T_1$ . Karena temperatur tetap, maka  $\Delta U=0$  ;  $dQ=dW$

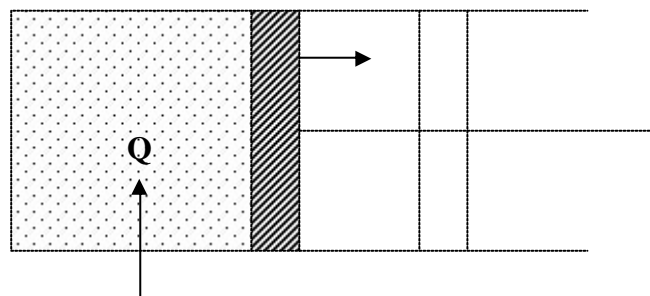


Gambar 1. Proses isotermik

Setelah volume sistem menjadi  $V_2$ , maka usaha yang dilakukan sistem adalah:

$$W = nRT \ln V_2/V_1$$

Berarti kalor yang diserapnya juga sama sebesar itu. Jelaslah bahwa seluruh kalor itu diubah menjadi usaha luar. Keadaan ini dapat pula diilustrasikan sebagai berikut:



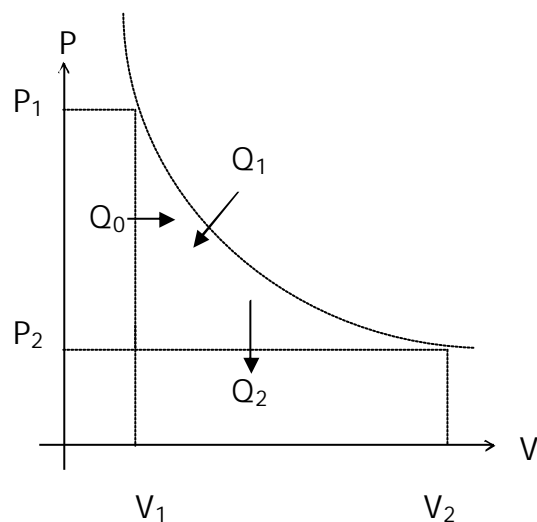
Gambar 2. Kalor diubah seluruhnya menjadi usaha luar

Namun apabila ditinjau dari segi praktiknya, proses yang demikian itu tidak dapat diambil manfaatnya. Sebab, kita menghendaki perubahan kalor menjadi usaha luar tanpa henti. Selama siklus diberi kalor, sistem diharapkan dapat menghasilkan usaha. Didalam proses ekspansi isotermal ini berarti bahwa piston harus bergeser terus, maka sistem harus mempunyai volume yang tidak

terbatas. Tetapi karena volume sistem itu ada batasnya, pada suatu saat proses itu harus berhenti, yaitu ketika volume mencapai harga maksimum. Agar dapat mengubah kalor menjadi usaha lagi, sistem itu harus dikembalikan ke keadaan semula. Dapatkah digunakan proses kebalikannya? Yaitu isotermik lagi sampai keadaannya sama dengan keadaan awalnya?. Kalau hal ini dilakukan, maka pada sistem dilakukan usaha sebesar  $W$  dan sistem melepaskan kalor sebesar  $Q$  juga.

Agar secara praktis dapat berguna, konversi harus dapat berjalan tanpa henti, tanpa memerlukan volume yang tak terhingga.

Suatu jalan keluar yang dapat dilakukan adalah dengan menggunakan rangkaian proses, tidak hanya satu proses tunggal saja, atau proses satu tahap saja. Rangkaian proses yang dimaksud adalah siklus, yaitu rangkaian proses sedemikian rupa sehingga keadaan sistem pada akhir proses sama dengan keadaan awalnya, sehingga proses dapat diulang. Proses siklus terlukis seperti dalam gambar 3 berikut ini.



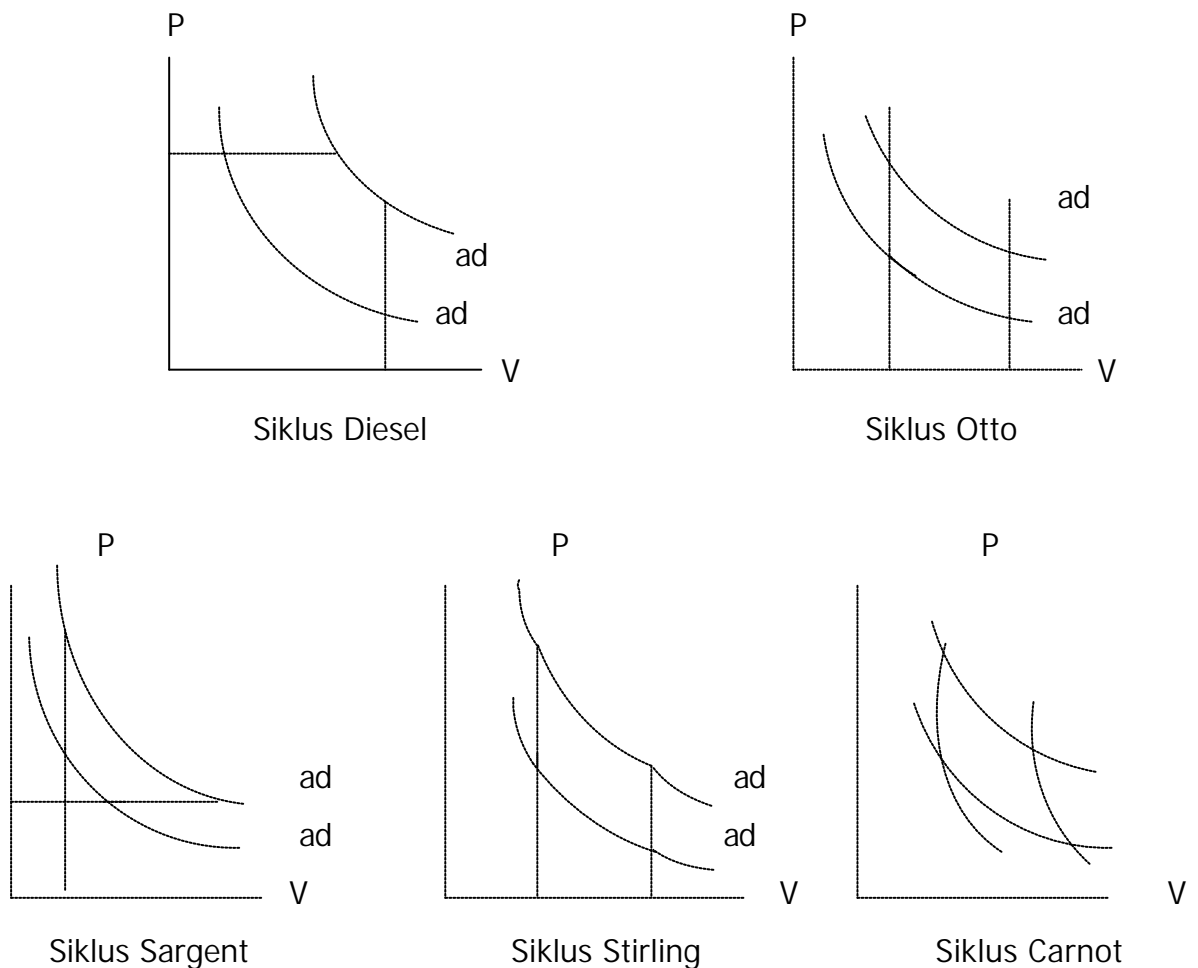
Gambar 3. Proses Siklus

Perhatikan dengan seksama Gambar 3,

Mulai dari  $P_1V_1$  sistem gas mengalami proses isotermik sampai  $P_2V_2$ . Kemudian proses isobarik mengubah sistem sampai  $P_2V_1$  dan akhirnya proses isokhorik membuat sistem kembali ke  $P_1V_1$ . Netto usaha yang dilakukan sistem dinyatakan oleh luas bagian yang diarsir pada diagram itu.

Pada akhir proses keadaan sistem kembali ke keadaan semula. Dengan demikian pada akhir siklus energi dalam sistem sama dengan semula.

Dapatlah sekarang disimpulkan bahwa agar dapat melakukan usaha terus menerus, sistem itu harus bekerja dalam suatu siklus. Pada diagram siklus tergambar sebagai kurva tertutup. Perhatikan gambar dibawah ini beberapa ilustrasi diagram proses bersiklus.



Gambar 4. Diagram Siklus

Perhatikan bahwa pada siklus-siklus tersebut berlaku 3 (tiga) hal sebagai berikut:

1. Nampak bahwa keadaan sistem akhir siklus sama dengan keadaan awal. Mengingat bahwa energi dalam  $U$  adalah fungsi keadaan, maka dapat dinyatakan:

$$U_f = U_i$$

Atau

?  $dU = 0$ , sehingga Hukum pertama Termodinamika dapat dinyatakan :

$$Q = -W$$

2. Jelas pula bahwa selama satu siklus sistem melakukan sejumlah usaha dan sejumlah usaha lain diadakan pada sistem.

🔊 Apabila siklus dijalani searah dengan jarum jam (*clock wise*), maka mesin akan menghasilkan usaha  $[W = -W]$

Mesin yang demikian disebut mesin kalor.

🔊 Apabila siklus yang akan dijalani berlawanan dengan arah gerak jarum jam (*counter clock-wise*), maka mesin memerlukan usaha luar:  $W = W$

Namun tetap berlaku: ?  $dU = 0$

Mesin yang demikian disebut mesin pendingin.

3. Ternyata pula bahwa pada suatu siklus terdapat cabang dimana sistem menyerap kalor tetapi selalu terdapat pada cabang yang lain sistem melepas kalor.

Dari hampir semua hasil eksperimen menyatakan bahwa tidak mungkin mesin kalor dalam suatu siklus hanya menyerap kalor saja selain menghasilkan sejumlah usaha. Selalu akan ada bagian tertentu dari siklus dimana mesin melepas sejumlah kalor pada lingkungan.

Dengan pernyataan lain mesin kalor tidak mungkin mengkonversikan seluruh kalor yang diserap menjadi usaha.

Ketidakmungkinan ini kemudian dinyatakan sebagai Hukum Kedua Termodinamika. Perumusan Hukum Kedua Termodinamika dapat juga



ditentukan dari Hukum Pertama Termodinamika sebagai berikut:

$$dQ = dU - dW$$

Apabila diintegrasikan, untuk satu siklus mesin kalor, maka akan didapat:

$$\oint dQ = \oint dU - \oint dW$$

atau:

$$Q = -W$$

Dengan  $|Q|$  adalah kalor yang dikonversikan menjadi usaha.

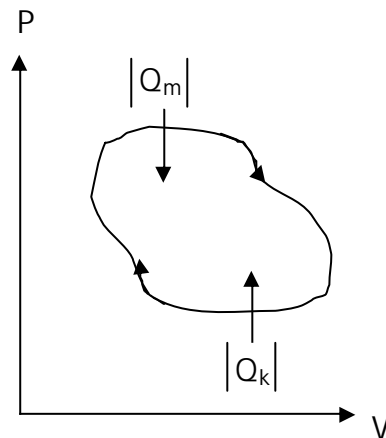
Jadi,

$$|Q| = |Q_m| - |Q_k|$$

dan  $|W|$  adalah usaha yang dihasilkan mesin kalor dalam siklus

dimana  $|W|$  adalah luas siklus pada diagram P-V

Agar lebih jelas perhatikan ilustrasi gambar 5 berikut ini.



Gambar 5.  $W =$  Luas Siklus Pada Diagram P-V

Catatan: Dalam menentukan  $Q$  dan  $W$  selama satu siklus, sebaiknya digunakan harga-harga mutlak.

#### **d) Efisiensi Mesin Kalor dan Mesin Pendingin**

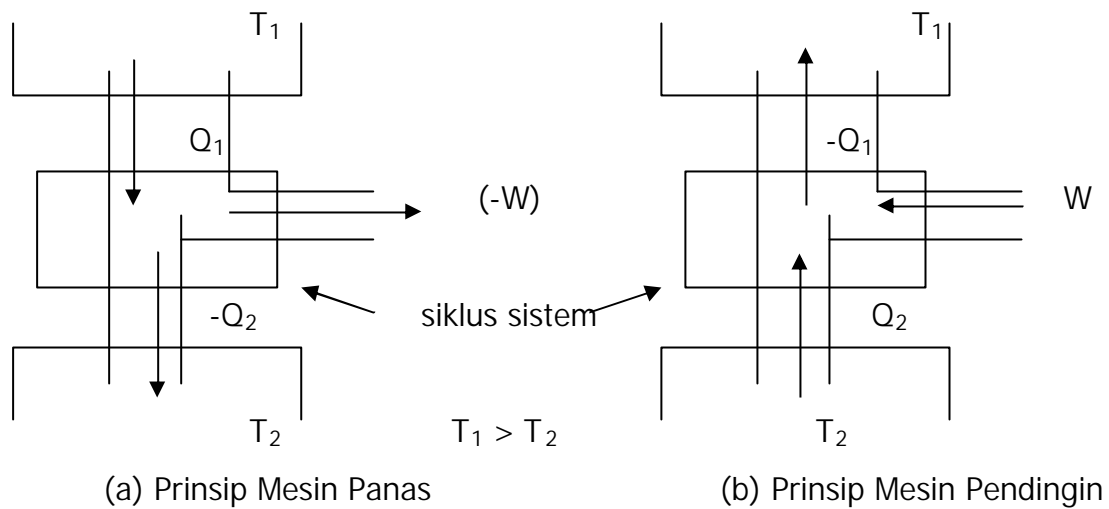
Ada banyak cara untuk mengungkapkan Hukum Kedua Termodinamika. Dalam uraian ini dipilih cara yang dekat dengan segi pemanfaatannya. Jadi perumusan yang akan kita kemukakan adalah seperti perumusan awal, yaitu perumusan yang berkaitan dengan kegunaan yang menjadi titik tolak ditemukan Hukum Kedua Termodinamika. Dalam hal ini kita memerlukan pengertian mengenai konsep mesin kalor dan mesin pendingin.

Mesin kalor, sebagai contoh seperti motor bakar atau mesin letup pada mobil, adalah suatu alat/sistem yang berfungsi untuk mengubah energi kalor/energi panas menjadi energi usaha/energi mekanik.

Sedangkan mesin pendingin, sebagai contoh lemari es/refrigerator adalah suatu alat/sistem yang berfungsi yang berfungsi untuk secara netto memindahkan kalor dari reservoir dingin ke reservoir panas dengan menggunakan usaha yang dimasukkan dari luar. Ciri utama mesin kalor atau mesin panas adalah sebagai berikut:

- a. berlangsung secara berulang (siklus),
- b. hasil yang diharapkan dari siklus mesin ini adalah usaha mekanik,
- c. usaha ini merupakan hasil konversi dari kalor yang diserap dari reservoir panas,
- d. tidak semua kalor yang keluar dan diambil dari reservoir panas dapat dikonversikan menjadi usaha mekanik. Ada yang dibuang ke reservoir dingin dalam bentuk kalor pada suhu rendah.

Sifat-sifat tadi secara skematik dikemukakan dalam diagram gambar 6(a), jika kemudian arah-arahnya dibalik, seperti pada diagram gambar 6(b) akan diperoleh skema kerja mesin pendingin. Agar lebih jelas perhatikan dengan seksama Gambar berikut ini.



Gambar 6. Prinsip Kerja Mesin Panas (a) dan Mesin Pendingin (b)

Perhatikan pada gambar 6(a),  $Q_1$  adalah total kalor yang diambil dari reservoir panas selama satu siklus, bertanda positif karena kalor masuk ke dalam sistem (siklus). Sedangkan  $W$  adalah usaha yang dilakukan oleh sistem selama satu siklus, bertanda negatif karena sistem melakukan usaha terhadap lingkungan. Selanjutnya kalor  $Q_2$  adalah kalor yang mengalir dari sistem ke reservoir dingin.

Untuk mesin pendingin, prinsip kerjanya adalah merupakan kebalikan dari mesin pemanas, seperti ditunjukkan pada gambar 6(b). Tanda  $Q_1$ ,  $Q_2$  dan  $W$  pada gambar ini adalah kebalikan dari gambar 6(a).

Pada mesin pendingin hasil yang diharapkan adalah pengambilan pada suhu rendah (yaitu dari benda-benda yang didinginkan). Perlu diperhatikan, bahwa untuk memindahkan kalor sebesar  $Q_2$  dari reservoir dingin ke reservoir panas dalam satu siklus diperlukan adanya usaha dari luar sebesar  $+W$  (tanda positif karena usaha dilakukan terhadap sistem). Usaha sebesar  $W$  ini pada akhirnya akan masuk bersama-sama dengan kalor  $Q_2$  ke reservoir panas sebagai kalor dengan jumlah total  $Q_1$ .

Parameter penting pada kedua macam alat itu adalah "efisiensi" yang dinyatakan dengan notasi ( $\eta$ ) bagi mesin panas dan "koefisien daya guna"

yang dinyatakan dengan (?) bagi mesin pendingin. Atau dapat didefinisikan besaran efisiensi mesin untuk menggambarkan atau membandingkan kinerja dari mesin-mesin tersebut. Secara umum dapat dinyatakan bahwa:

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{Hasil yang diinginkan}}{\text{Yang harus disediakan}}$$

Jadi,

- untuk mesin panas/mesin kalor dapat didefinisikan atau dinyatakan bahwa:  
Efisiensi  $\rightarrow ? = - \frac{W}{Q_1}$

Dan

- untuk mesin pendingin dapat dinyatakan atau didefinisikan bahwa:

$$\text{Koefisien Daya Guna: } ? = \frac{Q_2}{W}$$

Besarnya koefisien ini bergantung pada keadaan detail dan masing-masing proses yang membentuk siklus atau daur. Dengan mengingat proses yang dijalani sistem adalah proses lingkaran, sehingga dapat dinyatakan  $\oint U = 0$ , sebab itu  $W = -Q = -(Q_1 + Q_2)$  pada kedua hal, maka diperoleh:

- Efisiensi untuk mesin panas adalah  $? = \frac{-W}{Q_1}$

atau

$$? = \frac{-(Q_1 + Q_2)}{Q_1} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}$$

sehingga

$$? = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$$

- Koefisien Daya Guna mesin pendingin adalah  $? = \frac{Q_2}{W}$

atau

$$? = \frac{Q_2}{-Q_1 - Q_2}$$

sehingga

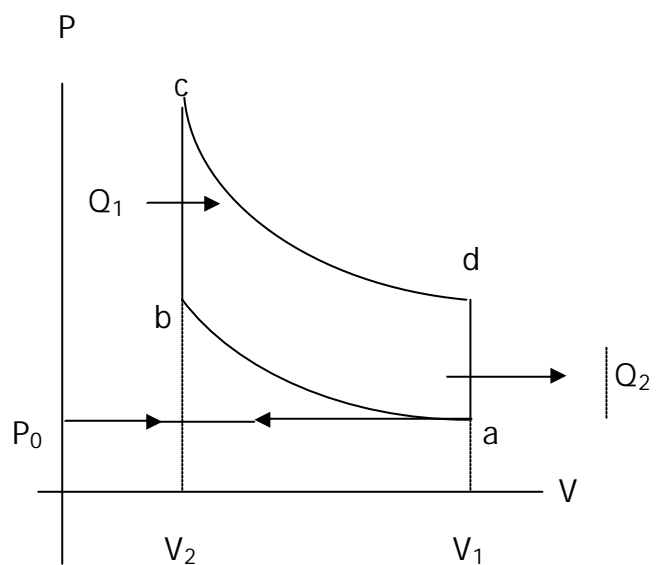
$$? = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2}$$

Parameter-parameter itu besarnya tentu bergantung pada jenis proses yang dialami sistem. Proses yang terjadi umumnya tidak kuasistatik karena berlangsung cepat dan dengan suhu yang tidak serba sama/uniform pada bagian-bagian sistem. Namun kita dapat mangaproksimasikannya dengan suatu proses kuasistatik tertentu. Untuk itu berikut akan kita bahas beberapa contoh proses bersiklus.

## Beberapa Contoh Proses Bersiklus

### 1. Siklus Otto

Pada siklus Otto yang dianggap sistem adalah campuran udara dan bensin didalam silinder motor. Motor letup mobil adalah seperti tergambar dibawah ini dinamakan siklus Otto, bentuknya pada diagram P-V ditunjukkan pada gambar 7 berikut ini.



Gambar 7. Siklus Otto

Siklus kita mulai dari titik a, ketika silinder mesin berada pada volume maksimum  $V_2$ . Pada saat itu silinder mesin telah diisi campuran udara dengan bensin. Dengan motor mesin berputar, volume ini diperkecil sampai volume minimum  $V_1$ . Terlihat pada gambar diagram P-V, yaitu pada proses a-b, sistem

mengalami kompresi. Pemampatan campuran udara dan bensin pada tahap a-b yang dianggap berjalan secara adiabatik, karena terjadi pada waktu yang sangat singkat dibandingkan waktu untuk terjadinya perpindahan kalor antara sistem dengan lingkungan.

Pada titik b campuran bensin-udara di silinder mesin dinyalakan, dan letupan yang terjadi meningkatkan suhu sistem secara mendadak demikian pula tekanannya. Karena terjadi pada waktu yang sangat singkat, maka volume sistem dapat dianggap masih pada keadaan minimum  $V_1$ . Terlihat pada gambar diagram P-V yaitu pada proses b-c yang isokhorik.

Selanjutnya terjadi proses ekspansi c-d yang dianggap terjadi secara adiabatik. Pada keadaan d campuran hasil pembakaran dibuang, silinder mesin diisi campuran bahan bakar dan udara yang baru. Sejauh mengenai pertukaran energinya, tahap ini dapat dianggap berjalan secara isokhorik. Pada tahap ini ekuivalen dengan menganggap campuran itu dikembalikan pada keadaan asalnya yaitu keadaan dititik a. Pertukaran kalor berlaku pada tahap b-c yaitu penyerapan  $Q_1$  dan pada d-a terjadi pelepasan kalor sebesar  $-Q_2$ , sedangkan usaha oleh sistem adalah selama c-d, yaitu sebesar  $-W_2$  dan selama a-b adalah sebesar  $+W_1$

### Ilustrasi:

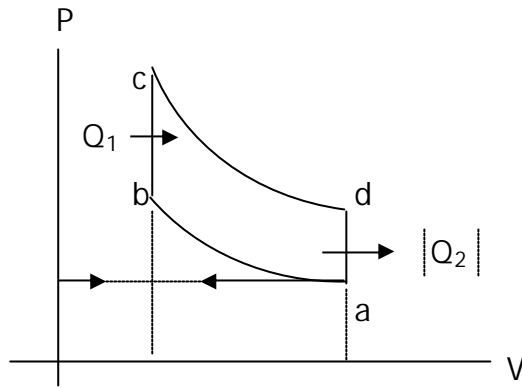
Buktikan untuk sistem yang berupa gas ideal, pada siklus Otto berlaku perumusan efisiensi sistem sebagai berikut:

$$\eta = 1 - \frac{1}{R^{\gamma-1}}$$

Dengan  $R = V_2/V_1$  adalah nisbah kompresi mesin tersebut, dan untuk sistem Otto harganya berkisar di seputar 8.

### Penyelesaian

Perhatikan kembali diagram P-V untuk siklus Otto berikut ini.



Proses yang sebenarnya terjadi sungguh amat rumit. Untuk menyederhanakan dibuat sebuah siklus yang mirip dan bernama siklus Otto, dengan mengabaikan banyak hal, seperti:

- Gesekan;
- Reaksi antara bensin dengan udara;
- Penyimpangan kesetimbangan mekanik maupun kesetimbangan termal.

Perhatikan kembali dengan seksama gambar diagram P-V untuk siklus Otto, dapat dinyatakan sebagai berikut:

1. Pada proses o-a , memasukkan gas kedalam sistem dan dianggap sistem mempunyai tekanan tetap, tiada gesekan serta kuasistatik sehingga berlaku:

$$P_0 V_1 = nRT_a$$

2. Pada proses a-b, pemampatan gas secara adiabatik, sehingga berlaku hubungan:

$$T_a V_a^{\gamma-1} = T_b V_b^{\gamma-1}$$

$$\left(\frac{V_a}{V_b}\right)^{\gamma-1} = \frac{T_b}{T_a} \quad \text{atau} \quad \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} = \frac{T_b}{T_a}$$

3. Pada proses b-c, berlangsung proses isokhorik, dimana pada proses ini gas menyerap kalor sebesar:

$$Q_1 = \int_{T_b}^{T_c} C_v dT$$

Karena  $C_v$  dianggap konstan, maka

$$Q_1 = C_v (T_c - T_b)$$

4. Pada proses c-d, gas mengembang atau berekspansi secara adiabatik, maka berlaku hubungan:

$$T_c V_c^{\gamma-1} = T_d V_d^{\gamma-1} \rightarrow \left( \frac{V_d}{V_c} \right)^{\gamma-1} = \frac{T_c}{T_d}$$

atau:  $\left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1} = \frac{T_c}{T_d}$

5. Pada proses d-a, berlangsung proses isokhorik, gas melepas kalor, maka berlaku hubungan:

$$Q_2 = \int_{T_d}^{T_a} C_v dT$$

atau:  $Q_2 = C_v (T_a - T_d)$

6. Pada proses a-o, gas dikeluarkan dari silinder diganti gas yang baru. Karena siklus Otto adalah merupakan sebuah contoh dari mesin kalor atau mesin panas, maka efisiensinya dapat dinyatakan:

$\eta = -W/Q_1$ , dengan  $W$  adalah usaha netto yang dihasilkan sistem, sedangkan  $Q_1$  adalah kalor yang diserap sistem.



Dalam hal lain;

$$W = Q_1 - |Q_2|, \text{ dengan } Q_2 \text{ adalah kalor yang dilepas sistem}$$

Sehingga:

$$\eta = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$$

Untuk siklus Otto:

$$\eta = 1 - \frac{C_v (T_a - T_d)}{C_v (T_c - T_b)} = 1 - \left( \frac{T_a}{T_b} \right)^{\gamma} \left( \frac{T_d/T_a - 1}{T_c/T_b - 1} \right)$$

atau

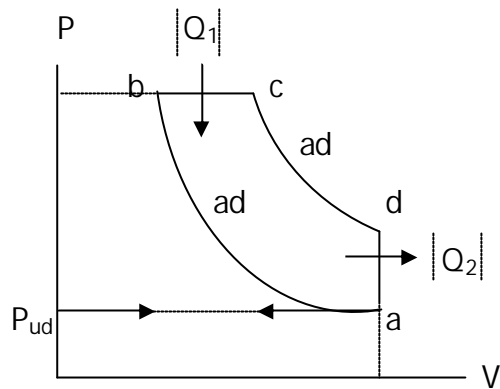
$$\eta = 1 - \frac{T_a}{T_b} = 1 - \frac{1}{(V_2/V_1)^{\gamma-1}} = 1 - \frac{1}{R^{\gamma-1}}$$

Jadi, terbukti bahwa efisiensi sistem adalah  $\eta = \frac{1}{R^{\gamma-1}}$

Tampak bahwa harga efisiensi siklus sistem akan lebih baik bila nilai R diperbesar. Tetapi memperbesar R dapat menimbulkan resiko meletupnya bahan bakar secara spontan sebelum mencapai titik b. Hal ini justru akan menurunkan efisiensi. Memperbesar R dimungkinkan bila digunakan bahan bakar dengan nilai oktan yang lebih tinggi.

## 2. Siklus Diesel

Pada mesin diesel ini, pembakaran terjadi karena gas bakar dimampatkan pada tekanan tertentu. Disini bahan bakar tidak dimasukkan pada keadaan a, tetapi disemprotkan pada kondisi b yang menyebabkan motor meletup dengan sendirinya. Proses peletupan dianggap berjalan pada tekanan yang sama. Jadi b-c adalah proses isobaris. Hal ini terlihat pada Gambar Siklus diagram pendekatan mesin diesel seperti ditunjukkan oleh Gambar 8 berikut ini.



Gambar 8. Siklus Diesel

Perhatikan dengan seksama Gambar diagram P-V pendekatan mesin Diesel dapat dinyatakan sebagai berikut:

1. Pada proses a-b, berlangsung proses kompresi adiabatik, T naik.

Sehingga untuk gas ideal berlaku:

$$T_a V_a^{\gamma-1} = T_b V_b^{\gamma-1}$$

2. Pada proses b-c, gas berekspansi isobarik, pada proses ini gas menyerap kalor sebesar:

$$Q_1 = \int_b^c dQ = \int_b^c C_p dT$$

atau

$$Q_1 = C_p (T_c - T_b)$$

$$\text{dapat ditulis: } |Q_1| = |Q_m|$$

3. Pada proses c-d, gas berekspansi adiabatik, temperatur T turun sehingga berlaku:

$$T_c V_c^{\gamma-1} = T_d V_d^{\gamma-1} = T_a V_a^{\gamma-1}$$

4. Pada proses d-a, berlangsung pendinginan isokhorik, pada proses ini gas mengeluarkan kalor:

$$Q_2 = \int_a^d \gamma dR$$

atau:  $T_a$

$$Q_2 = \int_a^d C_v dT$$

$$T_d$$

$$Q_2 = C_v (T_d - T_a)$$

$$|Q_2| = C_v (T_d - T_a)$$

dapat ditulis:  $|Q_2| = |Q_k|$

Selanjutnya dapat ditentukan:

$$\eta_{\text{diesel}} = 1 - \frac{|Q_k|}{|Q_{1n}|}$$

$$\eta_{\text{diesel}} = 1 - \frac{C_v (T_d - T_a)}{C_p (T_c - T_b)}$$

Efisiensi Siklus Diesel dapat juga ditulis:

$$\eta_{\text{diesel}} = 1 - \frac{\frac{1}{r_e^\gamma} - \frac{1}{r_k^\gamma}}{\gamma \left( \frac{1}{r_e} - \frac{1}{r_k} \right)}$$

Dengan:  $r_e$  adalah nisbah ekspansi  $= V_a/V_c$

$r_k$  adalah nisbah kompresi  $= V_a/V_b$

Efisiensi siklus-iklus ini mengandung factor  $C_p$ ,  $C_v$  dan  $\gamma$ . Besaran-besaran ini menyatakan karakteristik untuk zat (bahan bakar), sebab itu efisiensi siklus bergantung pada zat yang dipakai. Salah satu siklus dengan efisiensi ( $\eta$ ) yang tidak bergantung pada bahan bakar adalah Siklus Carnot.

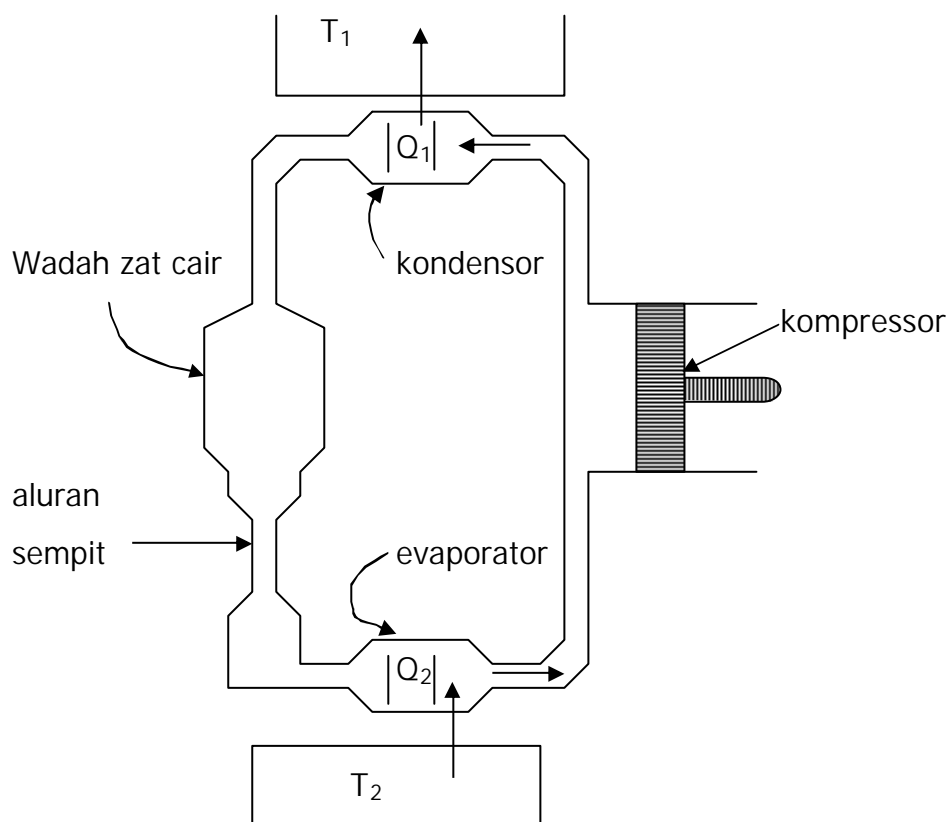
### 3. Siklus Mesin Pendingin

Untuk mempelajari mesin pendingin dan diagram siklus pesawat pendingin kita simak terlebih dahulu perumusan Clausius mengenai Hukum Kedua Termodinamika sebagai berikut:

“Tidak mungkin membuat pesawat yang kerjanya hanya menyerap kalor dari reservoir bertemperatur rendah dan memindahkan kalor ini ke reservoir bertemperatur tinggi tanpa disertai perubahan lain.”

Memindahkan kalor dari reservoir bersuhu rendah ke reservoir bersuhu tinggi, jika berlangsung terus-menerus akan membuat reservoir dingin menjadi lebih dingin dan reservoir bersuhu tinggi menjadi lebih panas lagi.

Bukankah pesawat pendingin itu bertujuan untuk membuat benda menjadi dingin sekali? Tidakkah hal ini bertentangan dengan perumusan Clausius? Untuk itu marilah kita tinjau terlebih dahulu prinsip kerja mesin pendingin (lemari es) yang bagannya terlihat pada gambar 9 berikut ini.

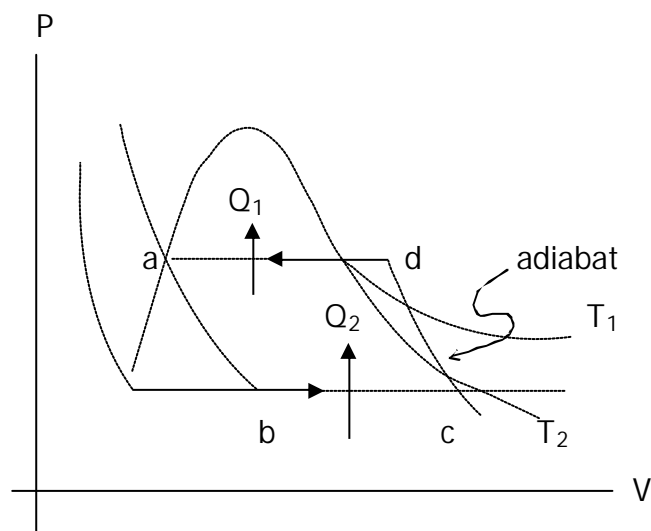


Gambar 9. Bagan Gambar Pesawat Pendingin

Proses yang terjadi pada pesawat pendingin tersebut adalah sebagai berikut:

1. Zat cair pada tekanan tinggi harus melalui saluran sempit menuju saluran evaporator. Proses ini dinamakan Proses Joule-Kelvin.
2. Setelah tiba di ruang evaporator zat cair mengalami pengurangan tekanan dan suhu, sehingga terjadi evaporasi atau penguapan. Untuk menguap diperlukan kalor dan kalor ini diambil atau diserap dari reservoir  $T_2$ , yaitu ruangan tempat benda-benda yang akan didinginkan.
3. Uap pada tekanan rendah ini kemudian masuk ke dalam kompresor yaitu ketika piston bergerak ke kanan. Katup  $K_1$  terbuka sedangkan katup  $K_2$  tertutup. Ketika piston bergerak ke kiri uap di dalam kompresor termampatkan sehingga tekanan dan suhunya naik dan suhu uap ini lebih tinggi dari pada reservoir  $T_1$  dan  $T_1$  lebih besar dari pada  $T_2$ . Katup  $K_2$  terbuka dan uap masuk ke ruang kondensor.
4. Sampai di ruang kondensor uap ini menyerahkan atau melepas kalor pada reservoir  $T_1$ . Di sini sistem gas mengalami pengembunan atau kondensasi, sehingga dilepaskan kalor sebesar  $Q_1$ .

Proses yang sebenarnya berlangsung sangat rumit sekali. Dengan mengabaikan banyak hal dapat diilustrasikan siklus yang mirip Siklus ini dinamakan siklus Pesawat Pendingin, yang bekerja berdasarkan arah balik dari pada siklus Rankine, yang akan dijelaskan pada sub pasal 4. Diagram siklus pesawat pendingin diperlihatkan pada gambar 10 berikut ini.



Gambar 10. Siklus Pesawat Pendingin

Gambar 10 adalah gambar siklus Pesawat Pendingin yang dibuat untuk memudahkan analisa sistem Pesawat Pendingin melalui pendekatan diagram P-V, dengan keterangan sebagai berikut:

1. Proses a-b, adalah proses Joule-Kelvin (pada diagram P-V, diperlihatkan dengan lengkung kurva putus-putus dari A sampai B). Selama proses berlangsung, keadaan sistem bukanlah keadaan setimbang, karena harga P dan V dari saat yang satu ke saat yang lain tidak dapat diketahui. Hanya keadaan awal (keadaan a) dan keadaan akhir (keadaan b) yang merupakan keadaan setimbang dengan harga P dan V yang tertentu. Karena itu keadaan yang sebenarnya sistem selama proses tidak dapat diilustrasikan. Pada Gambar 10 proses ini dinyatakan oleh kurva putus-putus a-b.
2. Proses b-c, pada proses ini berlangsung proses evaporasi (penguapan) pada tekanan dan temperatur tetap dengan disertai penyerapan kalor sebesar  $Q_2$ .
3. Proses c-d, pada proses ini berlangsung proses kompresi (pemampatan) secara adiabatik, sampai temperatur uap melebihi harga  $T_1$ .
4. Proses d-a, adalah proses pendinginan secara isobarik sampai temperatur uap mencapai harga  $T_1$ , yang dilanjutkan dengan pengembunan (kondensasi) pada tekanan dan temperatur tetap. Usaha yang dilakukan dinyatakan oleh luas daerah yang diarsir.

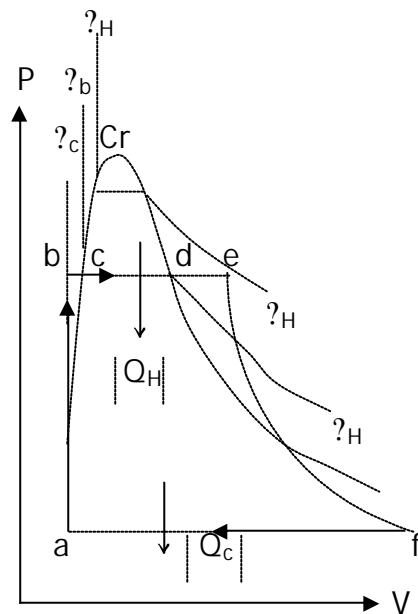
Kita kembali pada pertanyaan pada awal pembahasan yaitu tidakkah azas kerja pesawat pendingin ini bertentangan dengan perumusan Claussius?

- dapat kita pelajari bahwa azas pesawat pendingin tidak bertentangan dengan perumusan Claussius, sebab pada sistem pesawat pendingin harus dilakukan usaha dari luar sebesar  $W$  yang dinyatakan oleh luas bagian daerah yang diarsir dan dibatas kurva abcd. Dari Hukum Pertama Termodinamika telah dipelajari bahwa  $|Q_1| = Q_2 + W$

Dengan demikian dapat dinyatakan bahwa selain pemindahan kalor dari reservoir dingin  $T_2$  ke reservoir panas  $T_1$  terjadi pula perubahan usaha menjadi kalor yang ikut dilepas ke reservoir  $T_1$ .

#### 4. Siklus Rankine

Diagram yang diperlihatkan pada Gambar 11 adalah merupakan pendekatan diagram P-V yang menggambarkan proses kerja mesin uap menurut siklus Rankine yang sama dengan siklus pesawat pendingin, tetapi dengan arah terbalik.



Gambar 11. Siklus Rankine

Ikhtisar proses kerja siklus Rankine adalah sebagai berikut:

- proses a-b, adalah proses adiabatik, air pada tekanan rendah sampai b pada temperatur didihnya
- proses b-c, proses isobarik
- proses c-d, adalah proses perubahan fase cair ke fase uap
- proses e-f, berlangsung proses adiabatik
- proses f-a, pendinginan ke fase cair atau proses kondensasi.

## **Contoh-Contoh Soal**

### Contoh 1

Berikan penjelasan mengenai proses kuasistatik

Jawab:

Proses kuasistatik adalah suatu proses yang pada setiap saat atau pada setiap tahap perubahan sistem secara keseluruhan selalu mencapai keadaan kesetimbangan. Hal ini berarti bahwa sistem pada setiap tahapan proses, tetap dapat dituliskan persamaan keadaannya.

Dapat dinyatakan juga bahwa proses kuasistatik adalah proses yang merupakan rentetan keadaan setimbang tak terhingga banyak; setiap saat keadaan setimbang itu hanya menyimpang sedikit dari keadaan setimbang sebelumnya.

### Contoh 2

Berikan penjelasan dan tuliskan komentar untuk pernyataan berikut ini: Sebuah silinder yang dilenmgkapi dengan piston berisi sejumlah gas. Di atas piston diletakkan 2 (dua) anak timbangan masing-masing dengan massa 1 kg, jika satu anak timbangan diambil maka tekanan dan volume sistem gas akan berubah.

Bagaimana pendapat anda, contoh ini merupakan proses kuasistatik atau proses nonkuasistatik?

Jawab:

Jelas sistem ini mengalami proses nonkuasistatik, sebab bukan merupakan rentetan keadaan setimbang tak terhingga banyak, melainkan hanya dua keadaan setimbang yaitu setimbang awal dan setimbang akhir.

### Contoh 3

Bagaimana agar supaya proses yang dijalani pada contoh 2 menjadi proses kuasistatik?



Jawab:

Agar proses yang dijalani sistem pada ontok 2 menjadi proses kuasistatik, maka salah satu anak timbangan itu harus diganti sejuta pemberat kecil-kecil anak timbangan dengan massa total 1 kg dan satu per satu pemberat kecil-kecil itu diambil, sehingga proses yang dijalani sistem adalah proses kuasistatik.

#### Contoh 4

Berikan dan tuliskan penjelasan mengenai proses reversibel.

Jawab:

Proses reversibel adalah merupakan proses dari suatu keadaan awal ke keadaan tertentu dan dari keadaan akhir tersebut dimungkinkan terjadinya proses balik ke keadaan awal kembali melalui jalan yang sama. Sedemikian rupa dengan mudah jika pada sistem dikenai kondisi tertentu.

#### Contoh 5

Tuliskan 2 (dua) persyaratan agar proses dikatakan berbalik (reversibel)

Jawab:

- a. proses tersebut merupakan proses kuasistatik
- b. dalam proses tersebut tidak terjadi efek-efek disipasi

#### Contoh 6

Berikan dan tuliskan penjelasan mengenai daur atau siklus.

Jawab:

Daur atau siklus adalah proses terus menerus yang merupakan sederetan proses yang terdiri atas beberapa tahapan dari suatu keadaan setimbang ke keadaan setimbang lain kemudian kembali keadaan setimbang semula yang hasilnya adalah pengubahan kalor menjadi kerja atau usaha luar.

### Contoh 7

Apakah pengubahan kalor seluruhnya menjadi usaha dapat terjadi.

Jawab:

Pengubahan kalor seluruhnya menjadi tenaga/usaha dalam satu tahap saja dapat terjadi; yaitu pada proses ekspansi isothermal sistem gas ideal.

- pelajari lebih lanjut, apakah proses yang demikian dapat diambil manfaatnya? (bacalah kembali uraian dengan seksama dan kembangkan wawasan dan penalaran anda).

### Contoh 8

Berikan penjelasan mengenai mesin kalor atau mesin pemanas, lengkapi dengan contoh

Jawab:

Mesin kalor/mesin pemanas adalah suatu alat atau sistem yang berfungsi untuk mengubah energi kalor atau energi panas menjadi energi usaha atau energi mekanik. Sebagai contoh adalah motor bakar atau motor letup.

(Lengkapi jawaban anda dengan membaca kembali dan memahami:

- 4 ciri mesin kalor/mesin pemanas
- Gambar skematis prinsip mesin kalor atau mesin pemanas).

### Contoh 9

Berilah penjelasan mengenai mesin pendingin, lengkapi penjelasan dengan contoh.

Jawab:

Mesin pendingin adalah suatu alat atau sistem yang berfungsi untuk secara netto memindahkan kalor dari reservoir dingin ke reservoir panas dengan menggunakan usaha luar. Sebagai contoh adalah lemari es atau refrigerator.

### c. Rangkuman

1. Proses kuasistatik adalah suatu proses yang pada setiap saat atau pada setiap tahap perubahan sistem secara keseluruhan selalu mencapai keadaan kesetimbangan. Hal ini berarti bahwa sistem pada setiap tahapan proses, tetap dapat dinyatakan persamaan keadaannya.
2. proses reversibel adalah merupakan proses dari suatu keadaan awal ke keadaan tertentu dan dari keadaan akhir tersebut dimungkinkan terjadinya proses balik ke keadaan awal kembali melalui jalan yang sama. Sedemikian rupa dengan mudah jika pada sistem dikenai kondisi tertentu.
3. Ada 2 (dua) persyaratan, agar proses dikatakan berbalik atau reversibel, yaitu:
  - a. proses tersebut merupakan proses kuasistatik
  - b. dalam proses tersebut tidak terjadi efek-efek disipasi.
4. Mesin kalor atau mesin pemanas adalah suatu alat atau sistem yang berfungsi untuk mengubah energi kalor atau energi panas menjadi energi usaha atau energi mekanik.

Ciri utama mesin kalor atau mesin pemanas adalah sebagai berikut:

  - a. berlangsung secara berulang (siklus)
  - b. hasil yang diharapkan dari siklus mesin ini adalah usaha mekanik
  - c. usaha ini merupakan hasil konversi kalor yang diserap dari reservoir panas
  - d. tidak semua kalor yang keluar dan terambil dari reservoir panas dapat dikonversikan menjadi usaha mekanik. Ada energi yang dibuang ke reservoir dingin dalam bentuk kalor pada suhu rendah.
5. Mesin pendingin adalah suatu alat atau sistem yang berfungsi untuk secara netto memindahkan kalor dari reservoir dingin ke reservoir panas dengan menggunakan usaha luar.
6. Daur atau siklus adalah proses terus-menerus yang merupakan sederetan proses yang terdiri atas beberapa tahapan dari suatu keadaan setimbang ke keadaan setimbang lain, kemudian kembali lagi ke keadaan setimbang

semula yang hasilnya adalah perubahan kalor menjadi kerja atau usaha luar.

7. Beberapa contoh proses bersiklus adalah sebagai berikut:

a. Siklus Otto, dengan efisiensi:

$$\eta_{\text{otto}} = 1 - \frac{1}{R^{\gamma-1}}$$

dengan  $R = V_2/V_1$ , adalah nisbah kompresi mesin.

b. Siklus Diesel, dengan efisiensi

$$\eta_{\text{diesel}} = 1 - \frac{\frac{1}{r_e^{\gamma}} - \frac{1}{r_k^{\gamma}}}{\gamma \left( \frac{1}{r_e} - \frac{1}{r_k} \right)}$$

dengan:  $r_e$  adalah nisbah ekspansi =  $V_a/V_c$

$r_k$  adalah nisbah kompresi =  $V_a/V_b$

c. Siklus Mesin Pendingin, dengan efisiensi:

$$\eta_{\text{mesin pendingin}} = 1 - \left( \frac{P_b}{P_a} \right)^{1/\gamma - 1}$$

#### d. Tugas 1

1. Tuliskan dan nyatakan parameter penting pada mesin pemanas atau mesin kalor dan pada mesin pendingin
2. Gambarkan diagram P-V pendekatan mesin Otto dan kemudian tunjukkan bahwa: efisiensi Siklus Otto adalah:

$$\eta = 1 - \frac{1}{R^{\gamma-1}}$$

dengan R adalah nisbah kompresi mesin tersebut

$$R = V_2/V_1$$

3. Apakah dasar kerja dari mesin pendingin (refrigerator/lemari es) bertentangan dengan pernyataan Claussius.
4. Gambarkan diagram P-V pendekatan mesin pendingin dan kemudian tunjukkan bahwa efisiensi mesin pendingin adalah:

$$\eta = 1 - \left[ \frac{P_b}{P_a} \right]^{\gamma-1}$$

5. Dua macam gas mengalami campuran dengan jalan difusi, jelaskan prosesnya berbalik atau tidak?
6. Suatu sistem menghisap panas dan diubah menjadi kerja, jelaskan apakah proses sistem tersebut dapat berbalik atau tidak?
7. Jelaskan, bagaimana cara mengalirkan panas dari reservoir dingin dengan suhu  $T_1$  ke reservoir panas dengan suhu  $T_2$ , ( $T_1 < T_2$ )

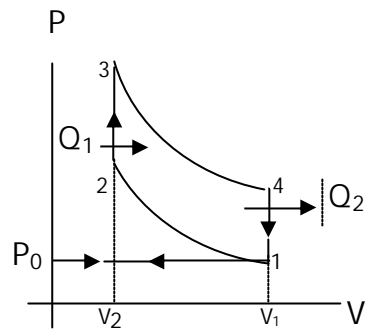
#### Kunci Jawaban Tugas 1

1. 2 (dua) parameter yang dimaksud adalah sebagai berikut:

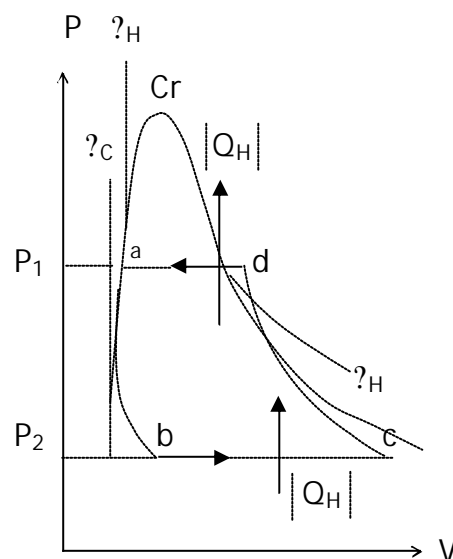
a. efisiensi untuk mesin panas, yaitu:  $\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$

b. koefisien daya guna mesin pendingin, yaitu:  $\eta = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2}$

2. Gambar diagram P-V pendekatan mesin Otto, dapat diilustrasikan sebagai berikut:



3. Dasar kerja mesin pendingin atau refrigerator (lemari es) adalah mengambil panas dari reservoir dingin dan dengan bantuan mesin memberikan panas atau kalor ke reservoir panas. Jadi proses ini sesuai dan tidak bertentangan dengan pernyataan Clausius.
4. Gambar diagram P-V pendekatan mesin pendingin atau refrigerator dapat diilustrasikan sebagai berikut:



Perhatikan: ab dan cd adalah proses adiabatik

bc dan da adalah proses isobarik

Untuk mendapatkan efisiensi mesin pendingin, akan ditinjau rumusan pada setiap tahap sebagai berikut:

2. proses a-b, adalah proses adiabatik dari tekanan  $P_a$  ke  $P_b$ , sehingga berlaku perumusan:

$$T_a P_a^{1/\gamma - 1} = T_b P_b^{1/\gamma - 1} \text{ dan } Q_{ab} = 0$$

3. proses b-c, adalah proses isobarik dari temperatur  $T_b$  ke  $T_c$ , dan berlaku perumusan:

$$Q_{bc} = \int_{T_b}^{T_c} C_P dT = C_P (T_c - T_b)$$

dan

$$W_{bc} = \int_{V_b}^{V_c} P dV = P_b (V_c - V_b)$$

Karena  $T_c > T_b$ , maka  $Q_{bc}$  positif sehingga  $Q_{bc}$  adalah jumlah kalor yang masuk sistem.

4. proses c-d, adalah proses adiabatik dari temperatur  $T_c$  ke  $T_d$  dan berlaku:

$$T_c P_c^{(1/\gamma - 1)} = T_d P_d^{(1/\gamma - 1)} \text{ dan } Q_{cd} = 0$$

5. proses d-a, adalah proses isobarik dari temperatur  $T_d$  ke  $T_a$  dan berlaku:

$$Q_{da} = \int_{T_d}^{T_a} C_P dT = C_P (T_a - T_d)$$

dan

$$W_{da} = \int_{V_d}^{V_a} P dV = P (V_a - V_d)$$

Karena  $T_d < T_a$ , maka  $Q_{da}$  negatif, sehingga  $Q_{da}$  adalah jumlah kalor yang keluar sistem selama proses isobarik d-a.

Hukum Pertama Termodinamika untuk satu siklus abcd adalah:

$$Q_{\text{siklus}} = \Delta U_{\text{siklus}} + W_{\text{siklus}}$$

Dengan

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{siklus}} &= Q_{\text{siklus}} = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{cd} + Q_{da} \\ &= C_P (T_c - T_b) + C_P (T_a - T_d) \end{aligned}$$

Efisiensi mesin pendingin adalah:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{W_{\text{siklus}}}{Q_{\text{masuk}}} = \frac{Q_{bc} + Q_{da}}{Q_{bc}} = 1 + \frac{Q_{da}}{Q_{bc}} \\ \eta &= 1 - \frac{(T_d - T_a)}{(T_c - T_b)} \end{aligned}$$

Untuk menyatakan efisiensi sebagai fungsi dari tekanan, maka digunakan hubungan sebagai berikut:

$$T_d = T_b \left( \frac{P_a}{P_d} \right)^{1/\gamma - 1}$$

$$T_a = T_c \left( \frac{P_c}{P_a} \right)^{1/\gamma - 1}$$

Apabila diperkurangkan, dengan  $P_b = P_c$  dan  $P_d = P_a$ ; maka akan diperoleh:

$$\begin{aligned} T_d - T_a &= (T_b - T_c) \left( \frac{P_b}{P_a} \right)^{1/\gamma - 1} \\ \frac{T_d - T_a}{T_b - T_c} &= \left( \frac{P_b}{P_a} \right)^{1/\gamma - 1} \end{aligned}$$



Sehingga efisiensi mesin pendingin dapat ditulis:

$$\eta = 1 - \left( \frac{P_b}{P_a} \right)^{1/\gamma - 1}$$

6. Dua macam jenis gas yang mengalami campuran dan berdefusi, tidak akan dapat kembali lagi seperti semula dengan sendirinya. Karena itu prosesnya tidak berbalik.
7. Suatu sistem menghisap panas dan diubah menjadi kerja, kemudian dibalik, sistem tersebut dikenai kerja. Proses tersebut menimbulkan kenaikan suhu. Dan apabila dihubungkan dengan reservoir panas, maka panas akan diberikan pada reservoir tersebut. Jadi proses pada sistem tersebut berbalik.
8. Agar supaya panas dapat mengalir dari reservoir dingin suhu rendah  $T_1$  ke reservoir panas dengan suhu tinggi  $T_2$ , maka perlu dipergunakan mesin yang dasar kerjanya merupakan daur atau siklus.

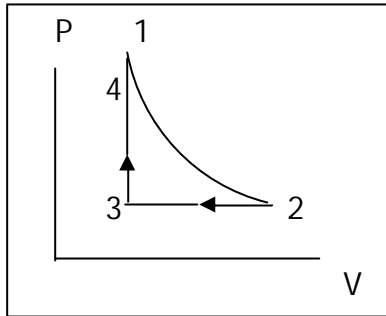
### e. Tes Formatif 1

1. Sebuah silinder yang dilengkapi dengan piston berisi sejumlah gas. Di atas piston letakkan 2 (dua) buah anak timbangan masing-masing dengan massa 1 kg. Jika satu anak timbangan diambil, maka tekanan dan volume gas akan berubah. Proses yang dialami sistem pada contoh di atas adalah...
  - a. proses kuasistatik
  - b. proses non-kuasistatik
  - c. proses reversibel (berbalik)
  - d. proses non-reversibel (tidak berbalik)
  - e. proses setimbang mekanik.

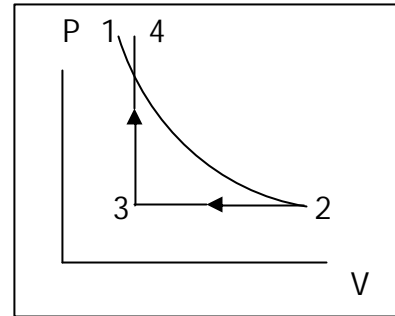
2. Salah satu persyaratan agar proses dinyatakan sebagai proses berbalik, atau reversibel adalah...
  - a. proses reversibel harus setimbang mekanik
  - b. proses reversibel adalah suatu proses perubahan sistem
  - c. proses reversibel merupakan proses kuasistatik
  - d. proses reversibel merupakan proses non-kuasistatik
  - e. proses reversibel harus setimbang kimia
3. Suatu proses yang dialami sistem-gas dikatakan berbalik atau reversibel jika keadaan akhir proses...
  - a. berlangsung secara perlahan
  - b. tekanan dan volume kembali ke keadaan semula
  - c. tekanan dan suhu kembali ke keadaan semula
  - d. suhu dan volume kembali ke keadaan semula
  - e. tekanan, volume dan suhu kembali ke keadaan semula
4. Suatu proses yang dialami sistem-gas dikatakan tidak berbalik atau "irreversibel", jika keadaan akhir sistem-gas dicapai dengan melalui proses...
  - a. berlangsung cepat
  - b. tidak sama seperti keadaan semula
  - c. dengan bantuan mesin Carnot untuk dapat kembali lagi seperti semula
  - d. dengan bantuan mesin refrigerator untuk dapat kembali lagi ke keadaan semula
  - e. kembali ke keadaan semula.

5. Dari poses-proses yang dialami sistem gas yang ditunjukkan dengan diagram dan menunjukkan proses berbalik adalah...

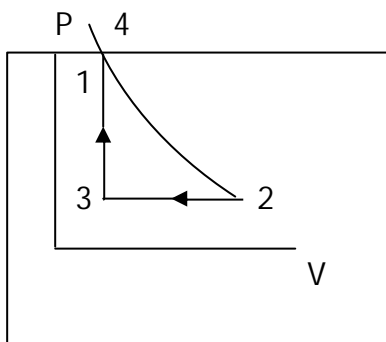
A.



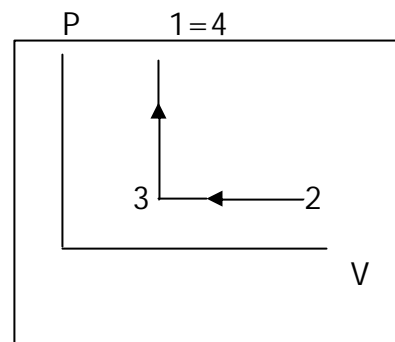
B.



C.



D.

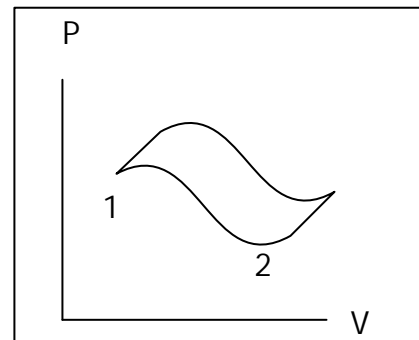


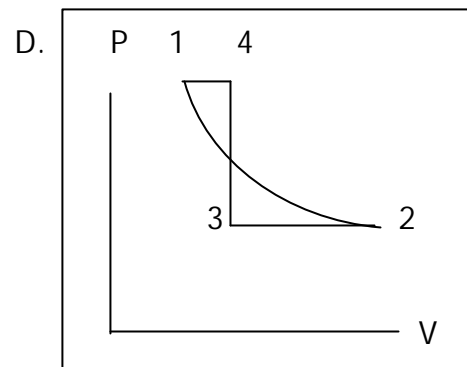
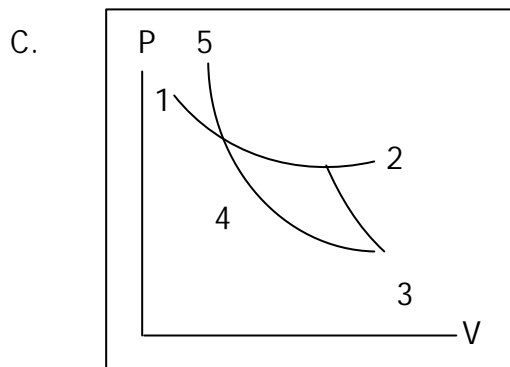
6. Dari proses-proses yang dialami sistem gas yang ditunjukkan dengan diagram dan menunjukkan proses tidak berbalik adalah...

A.



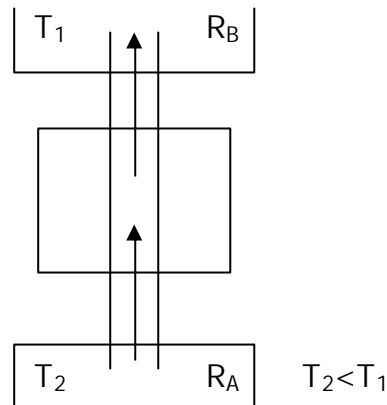
B.





7. Proses-proses yang disebutkan dibawah ini yang berbalik atau reversibel adalah...
- proses percobaan Joule dengan ekspansi gas ke ruang hampa
  - proses percobaan Joule dengan menjatuhkan beban agar baling-baling di calorimeter berputar sehingga timbul konversi energi
  - proses pelepasan peluru ke sasaran
  - proses pembakaran sebatang kayu
  - proses penguapan air
8. Untuk merubah panas yang diserap suatu sistem dan diubah seluruhnya menjadi kerja...
- diperlukan bantuan mesin pendingin
  - diperlukan bantuan mesin Carnot
  - diperlukan 2 (dua) reservoir panas
  - diperlukan perbedaan suhu antara sistem dengan reservoir panas dimana panas diserap
  - tidak ada mesin yang dapat dibuat untuk melaksanakan hal tersebut diatas
9. Untuk mengalirkan panas dari sebuah reservoir dingin ke reservoir panas...
- diperlukan bantuan mesin refrigerator
  - Diperlukan bantuan mesin Otto
  - Diperlukan bantuan mesin Carnot
  - Tidak ada mesin yang dapat dibuat untuk melakukan hal di atas
  - Tidak diperlukan bantuan mesin.

10. Panas sebesar  $Q$  tidak mungkin mengalir dari reservoir A ke temperatur rendah ke reservoir B bertemperatur tinggi. Pernyataan ini sesuai dengan pernyataan dari...



- a. kelvin
- b. Planck
- c. Kelvin-planck
- d. Claussius
- e. Kelvin-Planck-Claussius

11. Efisiensi sistem siklus Otto dinyatakan dengan:

$$\eta_{\text{otto}} = 1 - \frac{1}{R^\gamma - 1}$$

Tampak bahwa harga efisiensi siklus sistem akan lebih baik, bila...

- a. nilai atau harga  $R$  diperbesar
  - b. nilai atau harga  $R$  diperkecil
  - c. nilai atau harga  $R$  dibuat tetap
  - d. nilai atau harga  $R$  diubah-ubah
  - e. digunakan bahan bakar dengan nilai oktan yang lebih tinggi
12. Salah satu siklus dengan nilai efisiensi ( $\eta$ ) yang tidak bergantung pada bahan bakar adalah...
- a. Siklus Stirling
  - b. Siklus Otto
  - c. Siklus Diesel
  - d. Saiklus Carnot
  - e. Siklus Rankine

## **Umpan Balik dan Tindak Lanjut**

Cocokkan hasil jawaban Anda dengan kunci jawaban Tes Formatif 1 yang ada dibagian belakang modul ini. Hitunglah jumlah jawaban Anda yang benar. Kemudian gunakan rumus dibawah ini untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi kegiatan belajar 1.

Rumus:

$$\text{Tingkat Penguasaan} = \frac{\text{Jumlah jawaban yang benar}}{15} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan Anda capai adalah:

90% - 100% = baik sekali

80% - 90% = baik

70% - 80% = cukup

- 69% = kurang

Kalau anda mencapai tingkat penguasaan 80% keatas, anda dapat meneruskan ke modul berikutnya, bagus! , tetapi, jika tingkat penguasaan anda masih dibawah 80%, anda harus mengulangi kegiatan belajar 1, terutama pada bagian yang belum anda kuasai.

### **f. Kunci Jawaban Tes Formatif 1**

1. B. Berdasarkan penjelasan mengenai proses kuasistatik
2. C. Berdasarkan penjelasan mengenai persyaratan yang harus dipenuhi proses reversibel
3. E. Berdasarkan penjelasan mengenai proses reversibel (berbalik)
4. B. Berdasarkan penjelasan mengenai poses tidak berbalik (irreversibel)
5. C. Berdasarkan penjelasan mengenai diagram siklus proses berbalik
6. D. Berdasarkan penjelasan mengenai diagram siklus proses tidak berbalik
7. E. Berdasarkan sifat proses berbalik
8. E. Berdasarkan pernyataan Kelvin-Planck
9. A. Berdasarkan sifat refrigerator
10. D. Berdasarkan pernyataan Claussius
11. E. Berdasarkan sifat mesin Otto
12. D. Berdasarkan sifat mesin Carnot

## g. Lembar Kerja

### ✍ Tujuan

**Mengamati cara kerja mesin pendingin:**

*Bagaimana menjawab pertanyaan apakah benar kipas angin tidak hanya mendinginkan udara , tapi juga memanaskan udara ?*

### ✍ Alat dan Bahan :

- ☞ Sebuah kipas angin
- ☞ Sebuah kulkas
- ☞ Termometer

### ✍ Langkah kerja :

#### *Pengamatan 1*

1. Menghidupkan kipas angin, dengan mencolokkan kabel sumber dayanya pada stop kontak listrik.
2. Atur kecepatan putar kipas angin .
3. Coba anda berdiri didepan dan dibelakang bergantian, rasakan perbedaannya (beri komentar).
4. Ulangi langkah 3 minimal 3 kali, untuk kecepatan putar kipas angin yang berbeda.
5. Masukkan data kedalam tabel pengamatan

Pengamatan Ke-	Posisi Berdiri didepan kipas	Posisi Berdiri dibelakang kipas
1		
2		
3		

6. Buat analisis dari pengamatan anda, dan buat kesimpulan dikaitkan dengan konsep termodinamika yang anda pahami.

## 2. Kegiatan Belajar 2

### Perumusan-Perumusan Hukum Kedua Termodinamika

#### a. Tujuan kegiatan pembelajaran

- ☞ Menentukan efisiensi mesin kalor/mesin pemanas.
- ☞ Menjelaskan prinsip kerja mesin pendingin.
- ☞ Menentukan koefisien daya guna mesin pendingin.
- ☞ Menjelaskan prinsip kerja Siklus Otto dan menentukan efisiensi Siklus Otto.
- ☞ Menjelaskan prinsip kerja Siklus Diesel dan menentukan efisiensi Siklus Diesel.
- ☞ Menentukan koefisien daya guna mesin/pesawat pendingin.

#### b. Uraian Materi

##### a) Tinjauan Pernyataan Kelvin-Planck

Dalam kegiatan belajar 1, telah kita bahas proses pengubahan kalor menjadi kerja melalui dua reservoir panas atau lebih. Panas diserap dari reservoir panas bertemperatur tinggi, diubah menjadi kerja oleh mesin kalor atau mesin pemanas dan kemudian sisa panas dilepas ke reservoir yang bertemperatur lebih rendah. Hasil pembahasan menunjukkan bahwa pada pengubahan kalor menjadi kerja, selalu dihasilkan sisa kalor yang dilepas atau dibuang. Jadi tidak pernah ada, mesin yang dapat mengubah seluruh kalor yang diserap menjadi kerja.

Ungkapan diatas telah pula dinyatakan oleh Kelvin dan Planck sebagai berikut:

*"Tidak ada suatu proses yang dapat berlangsung terus-menerus dan hasilnya adalah penyerapan kalor dari suatu reservoir kalor dan mengubah seluruhnya menjadi kerja."*



Pernyataan ini dikenal sebagai rumusan Hukum Kedua Termodinamika dari **Kelvin-Planck**.

Pernyataan Kelvin-Planck tersebut tidak bertentangan dengan Hukum Pertama Termodinamika. Kalau Hukum Pertama Termodinamika mengulas sifat kekekalan tenaga, maka Hukum Kedua Termodinamika mengulas mengenai pemakaian tenaga dalam bentuk khusus, yaitu dari konversi bentuk kalor menjadi bentuk kerja. Hukum Pertama Termodinamika menolak adanya penciptaan tenaga, sedangkan Hukum Kedua Termodinamika menolak pemakaian tenaga dalam bentuk khusus.

### **b) Tinjauan Mengenai Pernyataan Claussius**

Pada pesawat pendingin, kita menemui hal yang mirip dengan kejadian pada mesin kalor yaitu bahwa untuk membawa kalor dari reservoir dingin yang bertemperatur tinggi, selalu diperlukan kerja dari luar. Claussius menyatakan hal ini dengan pernyataan sebagai berikut:

*“Tidak ada panas yang mungkin berlangsung yang hanya memindahkan kalor dari reservoir dingin ke reservoir panas tanpa memerlukan usaha luar.”*

Pernyataan ini juga dikenal sebagai rumusan Hukum Kedua Termodinamika dari **Claussius**.

Untuk menunjukkan bahwa kedua pernyataan, yaitu pernyataan Kelvin-Planck dan pernyataan Claussius, setara, kita dapat memikirkan hubungan kebenaran antara dua pernyataan tersebut. Apabila pernyataan Kelvin-Planck salah, maka salah pula pernyataan dari Claussius. Demikian sebaliknya, bila pernyataan Kelvin-Planck benar, maka benar pula pernyataan dari Claussius. Dan apabila hubungan pernyataan tersebut tidak memenuhi hubungan tersebut, maka jelas bahwa pernyataan Kelvin-Planck dan pernyataan Claussius adalah dua pernyataan yang saling tak gayut satu sama lain.

Selanjutnya, kita tinjau mesin pendingin dengan kerja dari luar nol. Jelas bahwa mesin pendingin ini menyalahi pernyataan Claussius. Kemudian bila kita buat mesin kalor dengan daur serupa dengan mesin pendingin

tersebut, maka hal ini akan berakibat pada mesin kalor, yaitu bahwa kedua reservoir bertemperatur sama. Demikian pula jika kita tinjau mesin kalor yang mengubah seluruh kalor menjadi kerja, jelas bahwa mesin menyalahi pernyataan Kelvin-Planck. Hal ini dapat berarti pula bahwa mesin pendingin yang berdaur seperti mesin kalor tadi akan memindahkan kalor dari temperatur rendah ke reservoir dengan temperatur yang lebih tinggi tanpa kerja dari luar. Keadaan ini sama saja artinya dengan menyatakan bahwa kalor dapat mengalir dari tempat yang bertemperatur rendah ke tempat yang bertemperatur yang lebih tinggi. Dengan sendirinya jelas ini adalah pernyataan yang salah. Jadi kita dapat berkesimpulan bahwa pernyataan Kelvin-Planck dan pernyataan Clausius haruslah ekuivalen dan tidak saling bertentangan.

### **Pernyataan-Pernyataan Alternatif Hukum Kedua Termodinamika**

Yang diinginkan pada mesin kalor atau mesin pemanas adalah mesin yang dapat mengubah sebanyak mungkin panas yang diserap menjadi usaha. Sedangkan mesin pendingin yang baik dapat menyerap sebanyak mungkin panas dengan usaha yang sedikit. Atau dengan suatu rumus, dapat dinyatakan bahwa efisiensi mesin pemanas ( $\eta$ ) dan koefisien daya guna mesin pendingin ( $\beta$ ) haruslah sebesar mungkin. Jadi dapat ditulis:

Untuk mesin pemanas  $\longrightarrow \eta = W/Q_1$ , dan

Untuk mesin pendingin  $\longrightarrow \beta = Q_2/W$

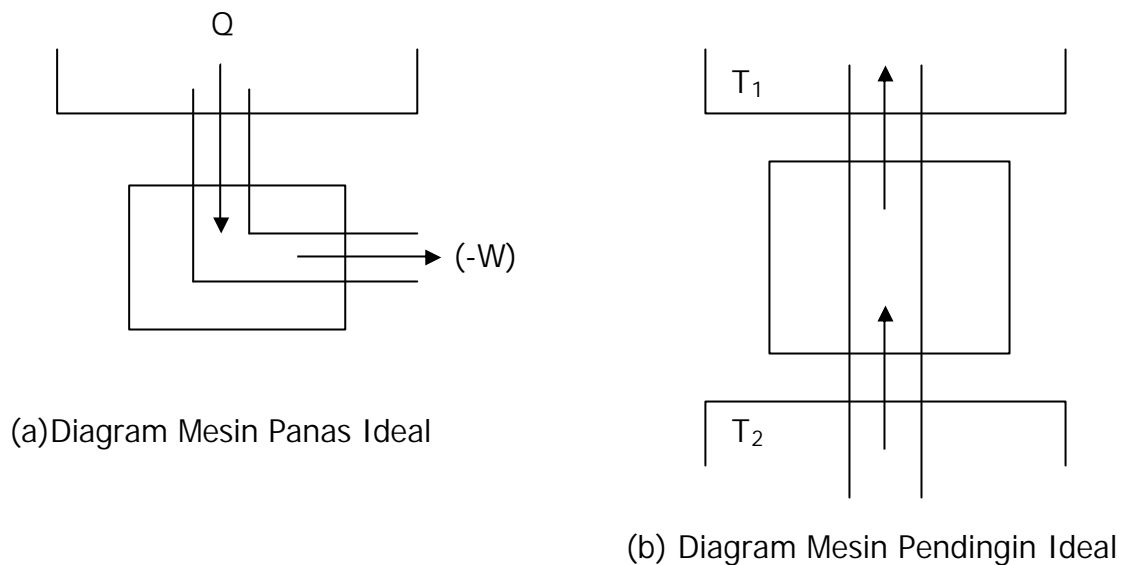
Dengan demikian dapat dinyatakan pula bahwa:

- untuk mesin panas, jika  $W = Q_1$ , maka diperoleh efisiensi besar yaitu  $\eta = 1$ . Hal ini berarti bahwa pada mesin panas tidak ada limbah kalor  $-Q_1$
- untuk mesin dingin, jika  $W = 0$ , maka diperoleh pula koefisien daya guna mesin pendingin adalah maksimum, yaitu  $\beta = \infty$

Dalam hal ini berarti yang didambakan adalah mesin-mesin ideal dengan:

$$\eta_{\text{ideal}} = 1 \text{ dan } \beta_{\text{ideal}} = \infty$$

Diagram mesin-mesin ideal ini diilustrasikan pada gambar 12 berikut ini.



(a) Diagram Mesin Panas Ideal

(b) Diagram Mesin Pendingin Ideal

Gambar 12. Diagram Mesin-Mesin Ideal

Namun Hukum Kedua Termodinamika, menyatakan bahwa pada mesin panas tidak mungkin  $W = -Q_1$  atau tak wujudnya mesin panas ideal (pernyataan Kelvin-Planck) demikian pula pada mesin pendingin tidak mungkin  $W = 0$  atau tak wujudnya mesin pendingin ideal (pernyataan Clausius). Tepatnya perumusan-perumusan yang ekuivalen adalah sebagai berikut:

Pernyataan Kelvin-Planck:

*"Tidak akan ada proses yang hasil akhirnya berupa pengambilan sejumlah kalor dari suatu reservoir kalor dan pengkonversian seluruhnya menjadi usaha mekanik."*

Pernyataan Clausius:

*"Tidak akan ada proses yang hasil akhirnya berupa pengambilan atau penyerapan kalor dari suatu reservoir kalor bersuhu rendah dan pelepasan kalor dalam jumlah yang sama ke suatu reservoir yang bersuhu lebih tinggi."*

Kedua pernyataan ini merupakan perumusan alternatif dari Hukum Kedua Termodinamika. Keduanya ekuivalen dan setara, berarti pernyataan yang satu mengimplikasikan pernyataan yang lain, juga merupakan perumusan alternatif dari Hukum Kedua Termodinamika.

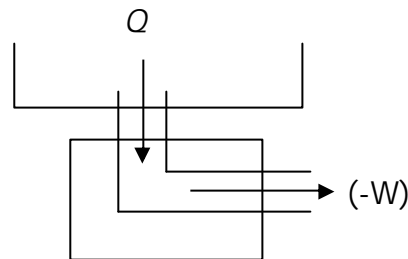
### Contoh Soal

1. Pengambilan panas sejumlah  $Q$  dari reservoir panas A dan dikonversikan seluruhnya menjadi kerja atau usaha mekanik. Bagaimana pendapat Anda dengan pernyataan di atas? Lengkapi jawaban dan penjelasan dengan sketsa gambar.

Jawab:

Pernyataan di atas tidak sesuai dengan pernyataan Kelvin-Planck berikut:

*"Tidak akan ada proses yang hasil akhirnya berupa pengambilan sejumlah kalor dari suatu reservoir kalor dan pengkonversian seluruhnya menjadi usaha mekanik."*

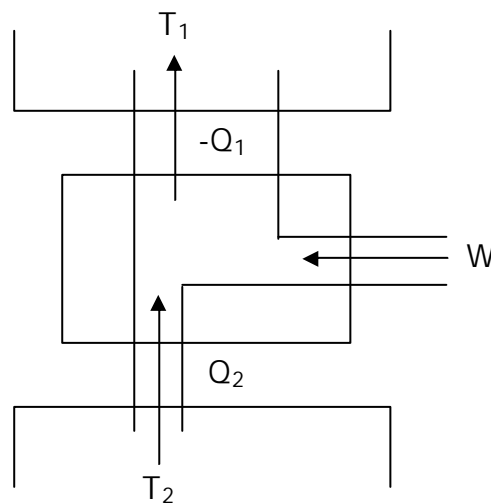


2. Suatu alat/sistem yang berfungsi untuk secara netto memindahkan kalor dari reservoir dingin ke reservoir panas dengan menggunakan usaha yang dimasukkan dari luar, disebut...

Buatlah bagan gambarnya

Jawab:

Mesin Pendingin, dengan bagan gambar sebagai berikut:



3. Perhatikan pernyataan berikut:

Tidak ada proses yang hasil akhirnya berupa pengambilan kalor dari suatu reservoir kalor bersuhu rendah dan pembuangan kalor dalam jumlah yang sama kepada suatu reservoir yang bersuhu lebih tinggi.

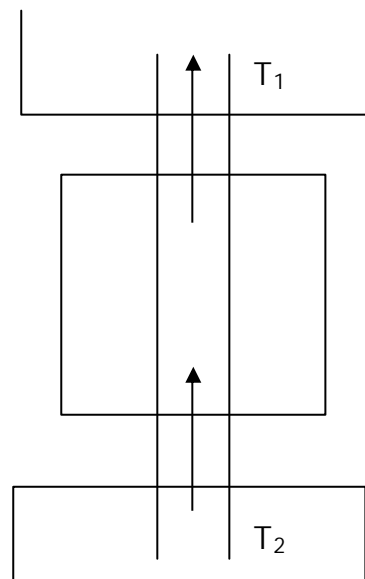
Pernyataan diatas adalah perumusan...yang merupakan alternatif Hukum Kedua Termodinamika.

Untuk memperjelas jawaban Anda, buatlah bagan Gambarnya.

Jawab:

Perumusan Claussius.

Bagan gambarnya sebagai berikut



### c. Rangkuman

1. Pernyataan Kelvin-Planck

Tidak akan ada proses yang hasil akhirnya hanya pengambilan sejumlah kalor dari suatu reservoir kalor dan dikonversikan seluruhnya menjadi kerja atau usaha mekanik.

2. Pernyataan Clausius

Tidak akan ada proses yang hasil akhirnya berupa pengambilan kalor dari suatu reservoir kalor bersuhu rendah dan pembuangan kalor dalam jumlah yang sama kepada reservoir bersuhu lebih tinggi.

3. Efisiensi mesin panas, dapat dinyatakan dengan perumusan sebagai berikut:

$\eta = -W/Q_1$  karena proses yang dijalankan sistem adalah proses siklus, maka:

$$\Delta U = 0$$

sehingga

$$W = -Q = -(Q_1 + Q_2)$$

Jadi

$$\eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}$$

4. Koefisien daya guna mesin pendingin dapat dinyatakan dengan perumusan sebagai berikut:

$$\eta_2 = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{-Q_1 - Q_2}$$

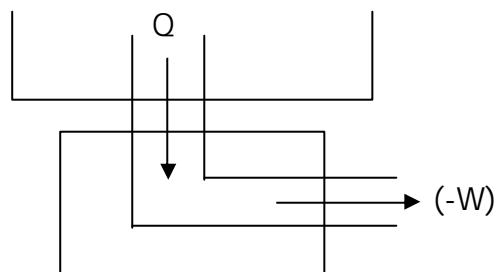
#### d. Tugas 2

1. Apakah mesin panas ideal itu? Lengkapi jawaban yang diberikan dengan gambar diagram
2. Apakah mesin pendingin ideal itu? Lengkapi jawaban yang diberikan dengan gambar diagram
3. Suatu mesin yang efisien dibuat oleh industri mesin. Mesin ini beroperasi diantara suhu  $430^{\circ}\text{C}$  dan  $1870^{\circ}\text{C}$ . Dalam 1 jam mesin ini memerlukan panas sejumlah  $6,85 \times 10^9$  kalori dan menghasilkan energi mekanik (usaha) yang bermanfaat sebesar  $1,20 \times 10^{16}$  Joule. Tentukan efisiensi mesin tersebut.

#### Kunci Jawaban Tugas 2

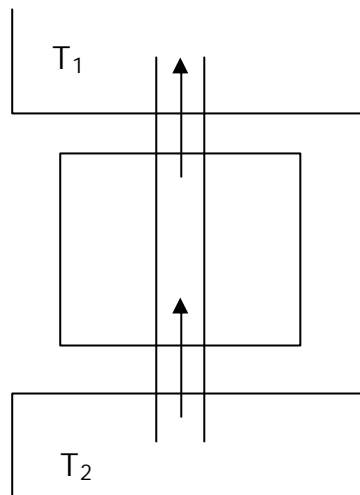
1. Mesin Panas Ideal adalah mesin panas yang mempunyai nilai efisiensi sebesar mungkin, yaitu  $\eta_{\text{ideal}} = 1$ . Ini berarti pada mesin panas ideal itu tidak ada limbah kalor.

Gambar diagram mesin panas ideal dapat diilustrasikan sebagai berikut.



2. Mesin Pendingin Ideal adalah Mesin Pendingin yang mempunyai nilai koefisien daya guna sebesar mungkin, yaitu  $\eta_{\text{ideal}} = \infty$ . Hal ini berarti pada mesin pendingin itu tidak diperlukan usaha  $W$  untuk menjalankan mesin ( $W = 0$ ).

Gambar diagram mesin pendingin ideal (seandainya ada) dapat diilustrasikan sebagai berikut:



3. Dari soal ditentukan:  $T_1 = 1870^\circ\text{C} = 2143^\circ\text{K}$

$$T_2 = 430^\circ\text{C} = 703^\circ\text{K}$$

Dalam 1 jam mesin memerlukan sejumlah panas

$$Q = 6,85 \times 10^9 \text{ kal}$$

$$Q = 6,85 \times 10^9 \text{ kal} \times 4,18 \text{ (J/kal)}$$

Energi mekanik yang dihasilkan

$$W = 1,20 \times 10^{10} \text{ (J)}$$

Ditanyakan: efisiensi mesin

Jawab:

$$\text{Efisiensi mesin (?) = } W/Q$$

$$\text{atau: } \frac{1,20 \times 10^{10} \text{ (J)}}{6,85 \times 10^9 \text{ kal} \times 4,18 \text{ (J/kal)}}$$

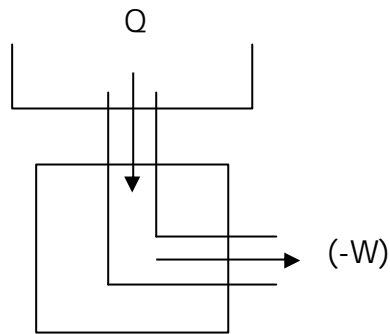
$$? = \frac{1,20 \times 10^{10} \text{ (J)}}{6,85 \times 10^9 \text{ kal} \times 4,18 \text{ (J/kal)}}$$

$$? = 42\%$$



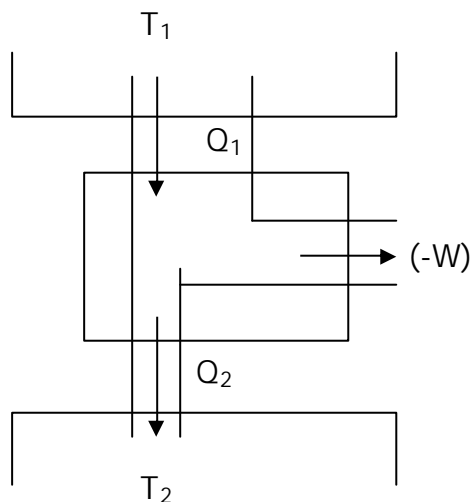
### e. Tes Formatif 2

1. Sebuah mesin menghisap panas sejumlah  $Q$  dari reservoir panas A dan dikonversikan seluruhnya menjadi kerja atau usaha mekanik. Hal ini bertentangan dengan pernyataan...



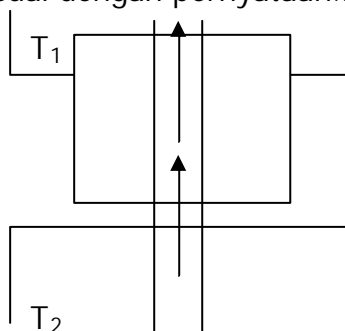
- A. Kelvin-Planck
- B. Kelvin
- C. Planck
- D. Clausius
- E. Kelvin-Clausius

2. Sebuah mesin menghisap panas  $Q_1$  dari reservoir panas A dan diubah menjadi kerja  $W$  dan panas  $Q_2$  yang diberikan kepada reservoir panas B. Hal ini sesuai dengan pernyataan...



- A. Kelvin
- B. Kelvin-Planck
- C. Clausius
- D. Planck
- E. Clausius-Planck

3. Panas akan mengalir dari reservoir panas A ke reservoir panas B dengan bantuan mesin yang beroperasi dalam satu siklus. Hal ini dapat terjadi sesuai dengan pernyataan...



- A. Kelvin
- B. Planck
- C. Clausius
- D. Kelvin-Planck
- E. Carnot

4. Suatu mesin menerima 200 kalori dari sebuah reservoir bersuhu  $400^{\circ}\text{K}$  melepaskan 175 kalori ke reservoir lain yang bersuhu  $320^{\circ}\text{K}$ ; maka efisiensi mesin itu adalah...
- 87,5%
  - 25%
  - 20%
  - 14,5%
  - 12,5%
5. Manakah pernyataan yang benar?
- Selalu mungkin membuat mesin yang dapat mengubah energi kalor menjadi usaha seluruhnya
  - Mengubah usaha menjadi kalor dapat dilakukan terus menerus
  - Mengubah energi kalor menjadi usaha dapat dilakukan terus menerus
  - Tidak ada proses pengambilan sejumlah kalor dari reservoir panas dan dikonversikan seluruhnya menjadi usaha mekanik
  - Dalam proses adiabatik terjadi perpindahan kalor dari luar ke dalam sistem.

### **Umpan Balik dan Tindak Lanjut**

Cocokkan hasil jawaban Anda dengan kunci jawaban Tes Formatif 2 yang ada dibagian belakang modul ini. Hitunglah jumlah jawaban Anda yang benar. Kemudian gunakan rumus dibawah ini untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi kegiatan belajar 2.

Rumus:

$$\text{Tingkat Penguasaan} = \frac{\text{Jumlah jawaban yang benar}}{5} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan Anda capai adalah:

- 90% - 100% = baik sekali
- 80% - 90% = baik
- 70% - 80% = cukup
- 69% = kurang

Kalau Anda mencapai tingkat penguasaan 80% keatas, Anda dapat meneruskan ke modul berikutnya, Bagus! , tetapi, jika tingkat penguasaan Anda masih dibawah 80%, Anda harus mengulangi kegiatan belajar 2, terutama pada bagian yang belum Anda kuasai.

## f. Kunci Jawaban Tes Formatif

1. A. Berdasarkan pernyataan Kelvin-Planck
2. B. Berdasarkan pernyataan Kelvin-Planck
3. C. Berdasarkan pernyataan Clausius
4. E. berdasarkan perumusan efisiensi mesin
5. D. Berdasarkan pernyataan Kelvin-Planck

## g. Lembar Kerja 2

### ***Mengamati perubahan tekanan air pada volume tetap dengan suhu dinaikan terus***

Bagaimana menjawab pertanyaan: apakah mungkin jika volume air dipertahankan tetap, maka tekanannya akan *naik terus tanpa batas* bila temperaturnya dinaikan terus ? (*seandainya bisa dibuat sistem seperti itu*)

Gunakan hubungan berikut ini :

$$\left(\frac{dP}{dT}\right)_V = \frac{\beta}{\alpha} \quad (*)$$

(dimana :  $\alpha$  adalah kemuaian volume air, dan  $\beta$  adalah ketertampatan isoterm air).

Tabel data eksperimen

T(°C)	0	50	100	150	200	250	300
$\beta$ ( $\times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ )	-0,07	0,46	0,75	1,02	1,35	1,80	2,90
$\alpha$ ( $\times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ )	0,51	0,44	0,49	0,62	0,85	1,50	3,05

Langkah Kerja :

1. Lengkapi tabel diatas dengan nilai perubahan tekanan terhadap temperatur pada volume konstan (persamaan \*)
2. Buatlah grafik hubungna antara  $\left(\frac{dP}{dT}\right)_V$  terhadap T
3. Jawablah pertanyaan diatas, BETUL atau TIDAK beri komentar anda.
4. Buatlah kesimpulan secara singkat dari hasil analisis anda.

# BAB III. EVALUASI

---

## A. Tes Tertulis


1. Sebuah mesin menghisap panas sejumlah  $Q$  dari reservoir panas A dan dikonversikan seluruhnya menjadi kerja atau usaha mekanik. Hal ini bertentangan dengan pernyataan...?
2. Suatu mesin menerima 200 kalori dari sebuah reservoir bersuhu  $400^{\circ}\text{K}$  melepaskan 175 kalori ke reservoir lain yang bersuhu  $320^{\circ}\text{K}$ ; maka efisiensi mesin itu adalah...
3. Sebuah mesin menghisap panas  $Q_1$  dari reservoir panas A dan diubah menjadi kerja  $W$  dan panas  $Q_2$  yang diberikan kepada reservoir panas B. Hal ini sesuai dengan pernyataan...
4. Sebuah silinder yang dilengkapi dengan piston berisi sejumlah gas. Di atas piston diletakkan 2 (dua) buah anak timbangan masing-masing dengan massa 1 kg. Jika satu anak timbangan diambil, maka tekanan dan volume gas akan berubah. Proses yang dialami sistem pada contoh di atas adalah...
5. Salah satu persyaratan agar proses dinyatakan sebagai proses berbalik, atau reversibel adalah...
6. Suatu proses yang dialami sistem-gas dikatakan berbalik atau reversibel jika keadaan akhir proses...
7. Suatu proses yang dialami sistem-gas dikatakan tidak berbalik atau "irreversibel", jika keadaan akhir sistem-gas dicapai dengan melalui proses...

## B. Tes Praktek

### Mengamati cara kerja mesin pendingin

*Bagaimana menjawab pertanyaan : dapatkah anda menghitung koefisien daya dari kulkas ?*

#### A. Alat dan Bahan :

 Sebuah kulkas

 Termometer

#### B. Langkah kerja :

1. Menghidupkan kulkas, dengan mencolokkan kabel sumber dayanya pada stop kontak listrik.
2. Tunggu ruang kulkas sampai dingin, kurang lebih 30 menit .
3. Pasang termometer pada ruang kulkas dan dibelakang kulkas.
4. Setelah 10 menit anda catat temperatur ruang kulkas dan temperatur dibelakang kulkas.
5. Masukkan data kedalam tabel pengamatan

Pengamatan Ke-	Temperatur ruang kulkas (°C)	Temperatur diluar Kulkas (°C)
1		
2		
3		

6. Masukkan data kedalam tabel pengamatan
7. Buat analisis dari pengamatan anda, dan buat kesimpulan dikaitkan dengan konsep termodinamika yang anda pahami.
8. Dan dapatkah anda menghitung koefisien daya dari kulkas tersebut.

# Kunci Jawaban

---

## A. TES TERTULIS

1. Berdasarkan pernyataan Kelvin-Planck
2. Berdasarkan pernyataan Kelvin-Planck
3. Berdasarkan pernyataan Claussius
4. Berdasarkan penjelasan mengenai proses kuasistatik
5. Berdasarkan penjelasan mengenai persyaratan yang harus dipenuhi proses reversibel
6. Berdasarkan penjelasan mengenai proses reversibel (berbalik)
7. Berdasarkan penjelasan mengenai poses tidak berbalik (irreversibel)

## LEMBAR PENILAIAN TES PESERTA DIKLAT

Nama Peserta :  
 No. Induk :  
 Program Keahlian :  
 Nama Jenis Pekerjaan:

### PEDOMAN PENILAIAN

No.	Aspek Penilaian	Skor Maks.	Skor Perolehan	Keterangan
1	2	3	4	5
<b>I</b>	<b>Perencanaan</b>			
	1.1.Persiapan alat dan bahan	2		
	1.2.Analisis model susunan	3		
	<b>Sub total</b>	5		
<b>II</b>	<b>Model Susunan</b>			
	2.1.penyiapan model susunan	3		
	2.2.Penentuan data instruksi pada model	2		
	<b>Sub total</b>	5		
<b>III</b>	<b>Proses (Sistematika &amp; Cara kerja)</b>			
	3.1.Prosedur pengambilan data	10		
	3.2.Cara mengukur variabel bebas	8		
	3.3.Cara menyusun tabel pengamatan	10		
	3.4.Cara melakukan perhitungan data	7		
	<b>Sub total</b>	35		
<b>IV</b>	<b>Kualitas Produk Kerja</b>			
	4.1.Hasil perhitungan data	5		
	4.2.Hasil grafik dari data perhitungan	10		
	4.3.Hasil analisis	10		
	4.4.Hasil menyimpulkan	10		
	<b>Sub total</b>	35		
<b>V</b>	<b>Sikap / Etos Kerja</b>			
	5.1.Tanggung jawab	3		
	5.2.Ketelitian	2		
	5.3.Inisiatif	3		
	5.4.Kemadirian	2		
	<b>Sub total</b>	10		
<b>VI</b>	<b>Laporan</b>			
	6.1.Sistematika penyusunan laporan	6		
	6.2.Kelengkapan bukti fisik	4		
	<b>Sub total</b>	10		
	<b>Total</b>	100		

## **KRITERIA PENILAIAN**

<b>No.</b>	<b>Aspek Penilaian</b>	<b>Kriteria penilaian</b>	<b>Skor</b>
1	2	3	4
<b>I</b>	<b>Perencanaan</b> 1.1.Persiapan alat dan bahan	? Alat dan bahan disiapkan sesuai kebutuhan	2
	1.2.Analisis model susunan	? Merencanakan menyusun model	3
<b>II</b>	<b>Model Susunan</b> 2.1.Penyiapan model susunan	? Model disiapkan sesuai dengan ketentuan	3
	2.2.Penentuan data instruksi pada model	? Model susunan dilengkapi dengan instruksi penyusunan	2
<b>III</b>	<b>Proses (Sistematika &amp; Cara kerja)</b> 3.1.Prosedur pengambilan data	? Mengukur temperatur ? Melengkapi data pengamatan dan pengukuran dalam tabel	10 8
	3.2.Cara mengukur variabel bebas	? Langkah menghitung perubahan tekanan terhadap suhu	
	3.3.Cara menyusun tabel pengamatan		10
	3.4.Cara melakukan perhitungan data		7
<b>IV</b>	<b>Kualitas Produk Kerja</b> 4.1.Hasil perhitungan data	? Perhitungan dilakukan dengan cermat sesuai prosedur	5
	4.2.Hasil grafik dari data perhitungan	? Pemuatan skala dalam grafik dilakukan dengan benar	5
	4.3.Hasil analisis	? Analisis perhitungan langsung dengan metode grafik sesuai/saling mendukung	10
	4.4.Hasil menyimpulkan	? Kesimpulan sesuai dengan konsep teori	10
	4.5. Ketepatan waktu	? Pekerjaan diselesaikan tepat waktu	5



<b>V</b>	<b>Sikap / Etos Kerja</b>		
	5.1.Tanggung jawab	? Membereskan kembali alat dan bahan setelah digunakan	3
	5.2.Ketelitian	? Tidak banyak melakukan kesalahan	2
	5.3.Inisiatif	? Memiliki inisiatif bekerja yang baik	3
	5.4.Kemadirian	? Bekerja tidak banyak diperintah	2
<b>VI</b>	<b>Laporan</b>		
	6.1.Sistematika penyusunan laporan	? Laporan disusun sesuai dengan sistematika yang telah ditentukan	6
	6.2.Kelengkapan bukti fisik	? Melampirkan bukti fisik	4

# Daftar Pustaka

---

- Francis Weston Sears, 1953. *An Introduction To Thermodynamics The Kinetik Theory Of Gases, and Statistical Mechanics*, Addison Wesley Pu.Co Inc.
- Darmawan, B. 1990. *Termodinamika*. Bandung: Jurusan Fisika FMIPA - ITB
- Halliday & Resnick, 1978. *Physics 3<sup>rd</sup> edition*, John Willey Sons Inc.
- Retno Hasanah Hw., 2001. *Thermofisika*. Surabaya: UNESA-University Press.
- Weber-White-Meannings, 1969. *College Physics 3<sup>rd</sup>*. Mc.Grawhill Kogakusha
- Zemansky, MW and Dittman, RH, 1981. *Heat And Thermodynamics*. Tokyo: Mc-Graw Hill International Bosh Co.
- Zitzewitz, P. Weding, K, 1995. *Reteaching Merrill Physics Principles and Problems*. New York: Glencoe Macmilan/Mc. Graw Hill.