

Fisika Dasar I (FI-321)

Topik hari ini

Hukum Termodinamika

- Usaha dan Kalor
- Mesin Kalor
- Mesin Carnot
- Entropi



Hukum Termodinamika



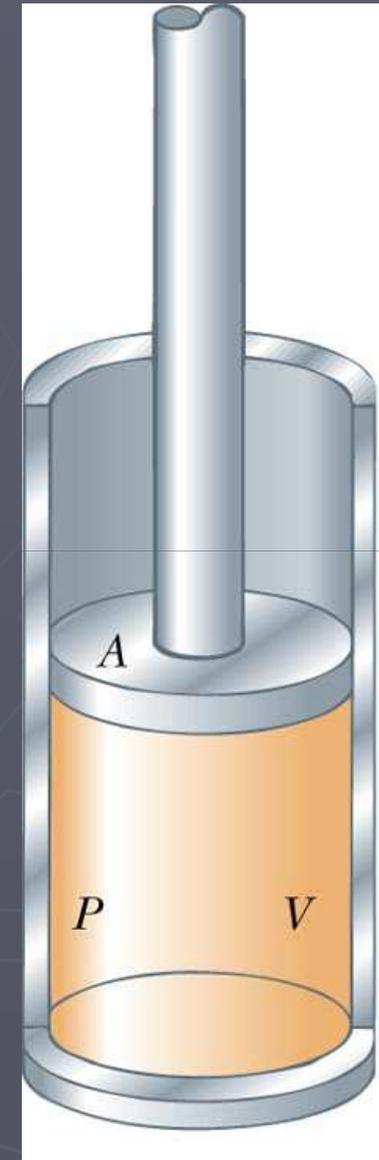
Usaha dalam Proses Termodinamika – Variabel Keadaan

▶ Keadaan Sebuah Sistem

- Gambaran sebuah sistem dinyatakan dengan variabel keadaan yaitu:
 - ▶ Tekanan
 - ▶ Volume
 - ▶ Temperatur
 - ▶ Energi Dalam
- Keadaan makroskopik dalam sistem yang terisolasi dapat dispesifikasi hanya jika sistem dalam keadaan kesetimbangan termal.

USAHA

- ▶ **Usaha** adalah mekanisme perpindahan energi yang penting dalam sistem termodinamika.
- ▶ **Panas** adalah mekanisme perpindahan energi lainnya.
- ▶ Contoh: Gas dalam silinder berpiston
 - Gas mengisi silinder berpiston yang bebas bergerak.
 - Gas memiliki volume V dan tekanan P pada dinding silinder dan pada piston.



Usaha pada Gas dalam Silinder

- ▶ Sebuah Gaya bekerja untuk menekan gas secara perlahan.

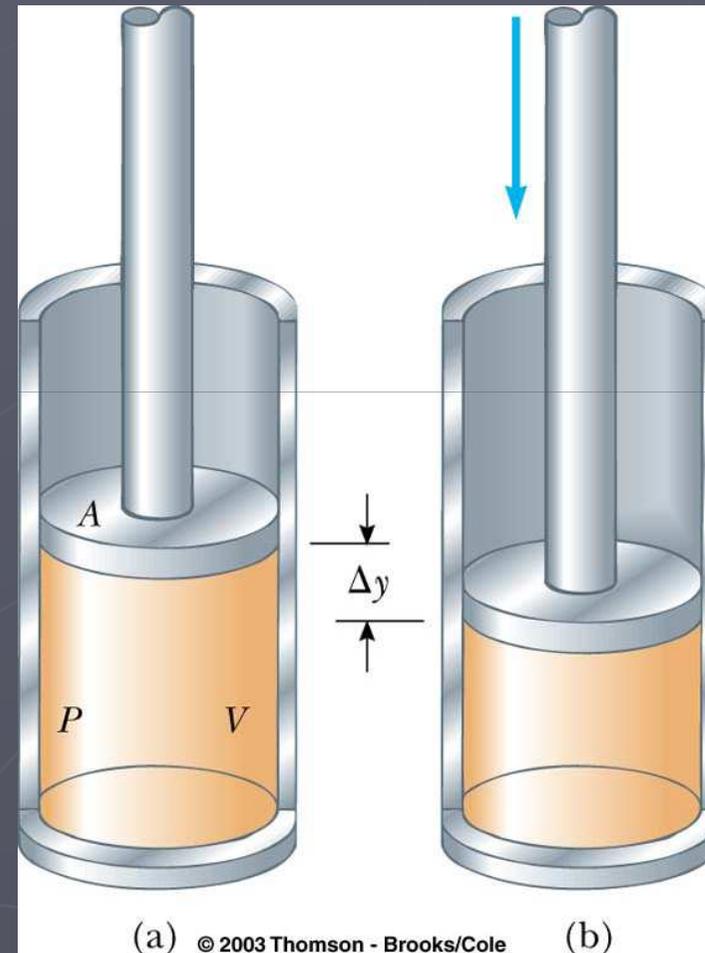
- Tekanan tersebut cukup perlahan sehingga sistem selalu berada dalam keadaan kesetimbangan (**quasi statik**).

- $dW = - F dy = - P dV$
 $W = - P \Delta V$

W adalah usaha yang dilakukan **pada gas oleh lingkungan**.

- Usaha yang dilakukan oleh gas adalah **sebaliknya**

$$W_{\text{oleh gas}} = P \Delta V$$



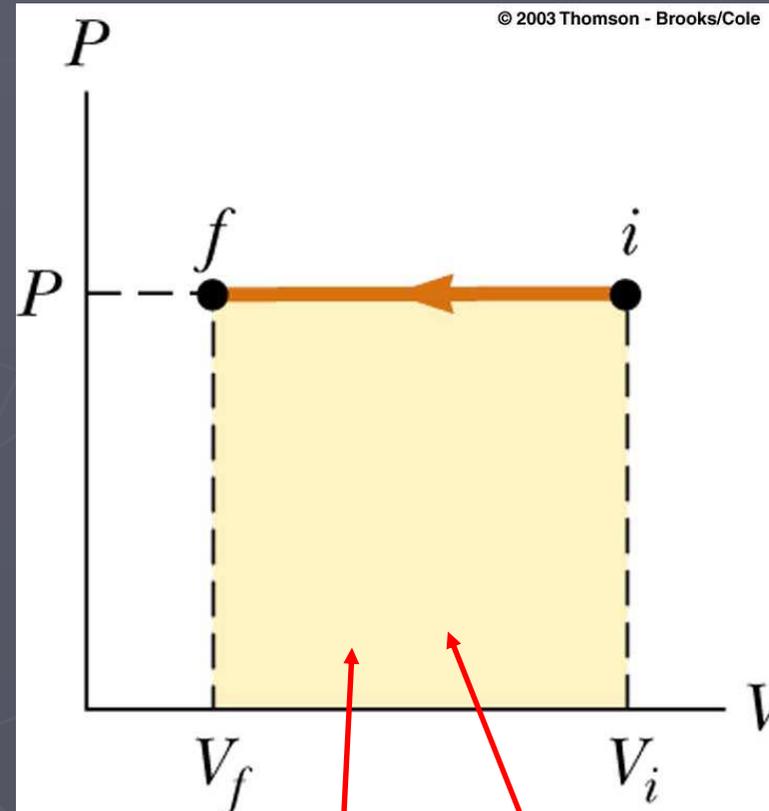
Usaha pada Gas dalam Silinder

$$W = - P \Delta V$$

- ▶ Jika gas dikompres/ditekan
 - ΔV berharga negatif
 - Usaha yang dilakukan **pada gas** adalah **positif**
- ▶ Jika gas mengembang/memuai
 - ΔV berharga positif
 - Usaha yang dilakukan **pada gas** adalah **negatif**
- ▶ Jika volume gas konstan
 - Tidak ada usaha yang dilakukan pada gas

Persamaan Usaha

- ▶ Jika tekanan dijaga konstan selama ekspansi atau kompresi, maka proses ini dinamakan proses *isobarik*
- ▶ Jika tekanan berubah, tekanan rata-rata dapat digunakan untuk memperkiraan usaha yang dilakukan



$$W = - P \Delta V$$

Usaha yang bekerja pada gas

Usaha = luas area dalam kurva

DIAGRAM PV

- ▶ Digunakan jika tekanan dan volume diketahui setiap tahapan proses.
- ▶ Usaha yang dilakukan **pada** gas dari keadaan awal ke keadaan akhir adalah **negatif** dan besarnya sama dengan luas di bawah kurva diagram PV.

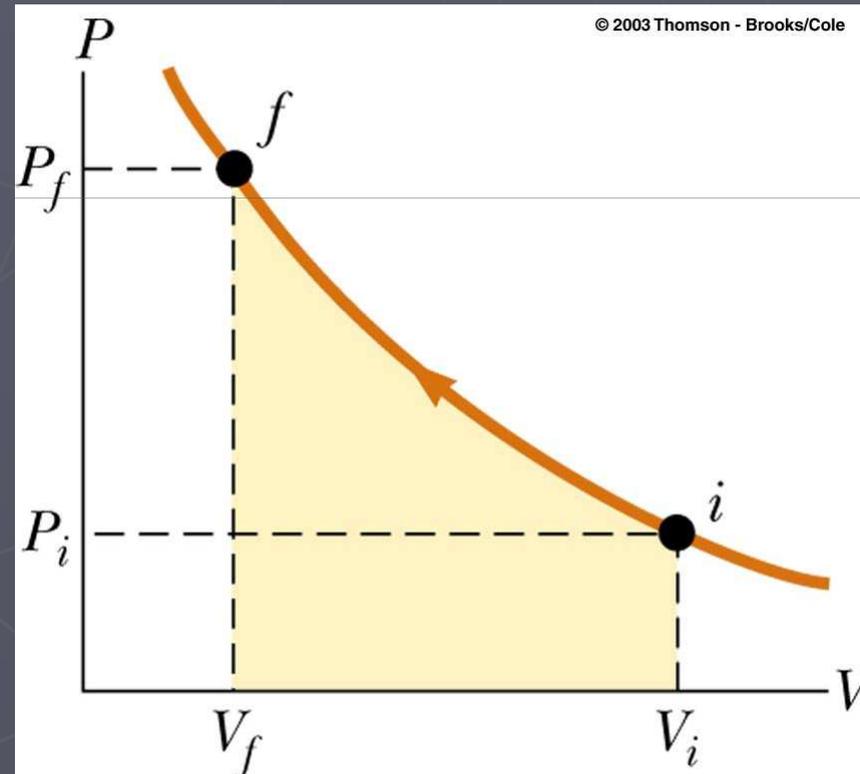
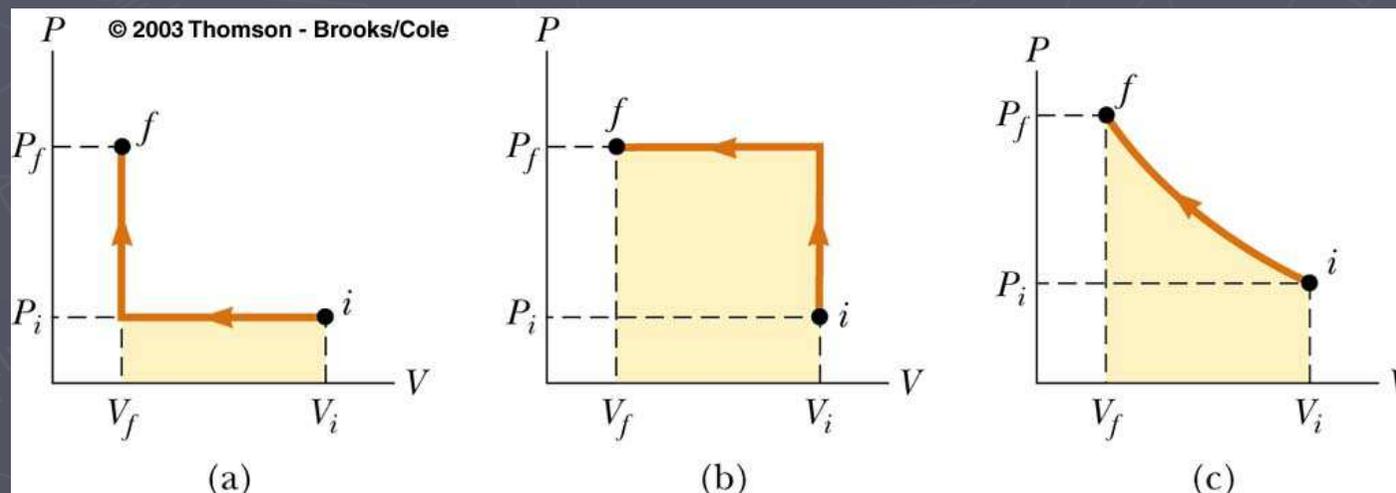


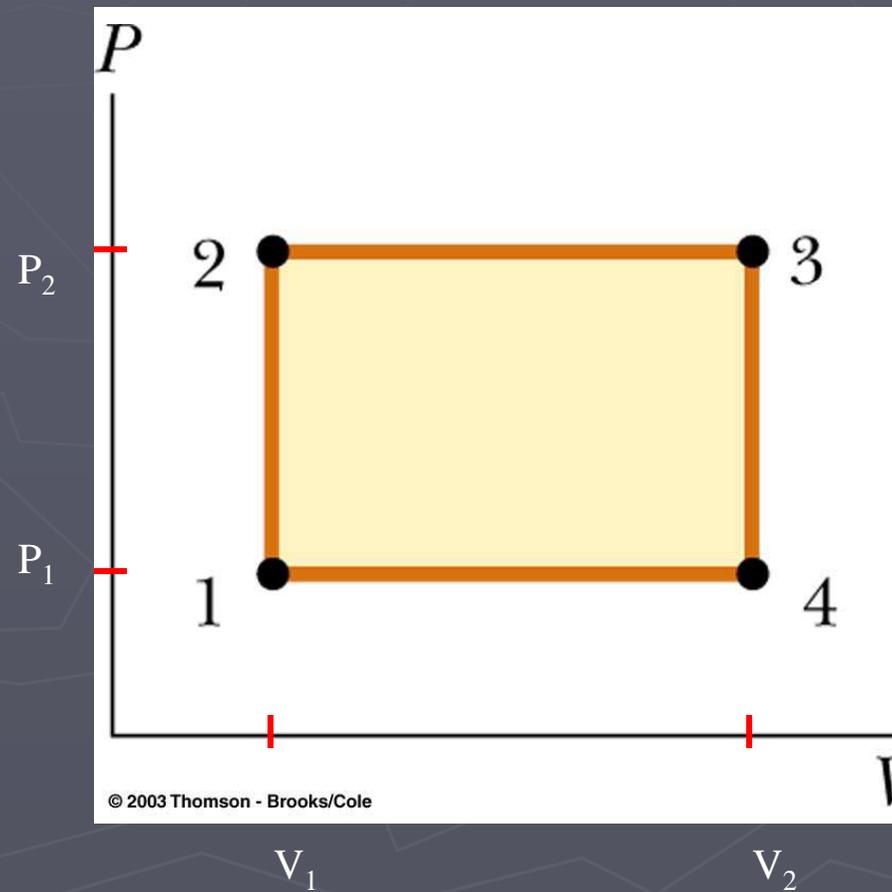
Diagram PV

- ▶ Kurva pada diagram PV adalah lintasan dari keadaan awal dan keadaan akhir.
- ▶ Usaha yang dilakukan tergantung dari bagian lintasan.
 - Keadaan awal dan akhir yang sama, dapat menghasilkan jumlah usaha yang berbeda-beda.



Pertanyaan

Carilah usaha yang dilakukan oleh gas dalam siklus di bawah ini.



Proses-proses Lainnya

▶ *Isovolum*

- Volume konstan
- Pada diagram PV berupa garis vertikal

▶ *Isotermal*

- Temperatur sama

▶ *Adiabatik*

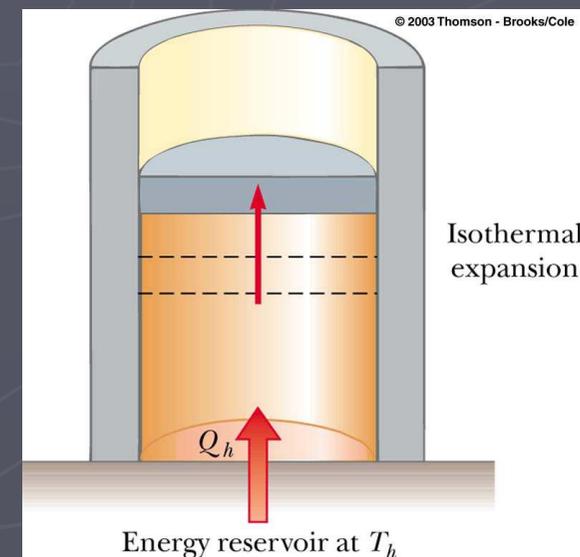
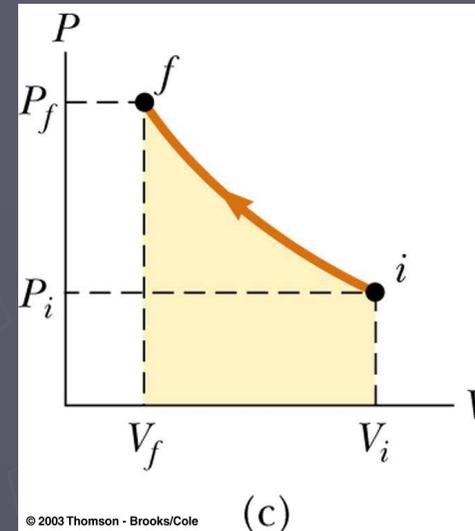
- Tidak ada panas yang berpindah ke lingkungan.

Proses Isovolume

- ▶ Tidak terjadi perubahan volume, sehingga tidak ada usaha yang bekerja.
- ▶ Peningkatan energi ke dalam sistem menyebabkan energi dalam naik. Dan temperatur akan naik.

Proses Isotermal

- ▶ Isotermal berarti temperatur konstan
- ▶ Silinder dan Gas berada kontak termal dengan sumber energi yang besar.
- ▶ Menungkinkan transfer energi ke dalam gas (oleh kalor).
- ▶ Untuk mempertahankan temperatur tetap konstan, gas berekspansi dan tekanan turun.
- ▶ Usaha yang dilakukan adalah negatif seiring dengan bertambahnya panas.



Animasi 13.2

Proses Adiabatik

- ▶ Pertukaran energi yang diakibatkan oleh panas sama dengan nol.
- ▶ Usaha yang dilakukan sama dengan perubahan energi dalam sistem.
- ▶ Jika suatu proses tidak ada pertukaran panas akan terjadi sangat cepat
- ▶ Di dalam suatu ekspansi adiabatik, usaha yang dilakukan adalah negatif dan energi dalam akan berkurang

Usaha yang Dilakukan Gas dalam Berbagai Proses



Example:

Calculate work done by expanding gas of 1 mole if initial pressure is 4000 Pa, initial volume is 0.2 m^3 , and initial temperature is 96.2 K. Assume a two processes: (1) *isobaric* expansion to 0.3 m^3 , $T_f=144.3 \text{ K}$ (2) *isothermal* expansion to 0.3 m^3 .

Example: Calculate work done by expanding gas of 1 mole if initial pressure is 4000 Pa, initial volume is 0.2 m^3 , and initial temperature is 96.2 K. Assume a two processes: (1) *isobaric* expansion to 0.3 m^3 , $T_f=144.3 \text{ K}$ (2) *isothermal* expansion to 0.3 m^3 .

Given:

$n = 1 \text{ mole}$
 $T_i = 96.2 \text{ K}$
 $T_f = 144.3 \text{ K}$
 $V_i = 0.2 \text{ m}^3$
 $V_f = 0.3 \text{ m}^3$
 $P = \text{const}$

Find:

$W = ?$

1. Isobaric expansion:

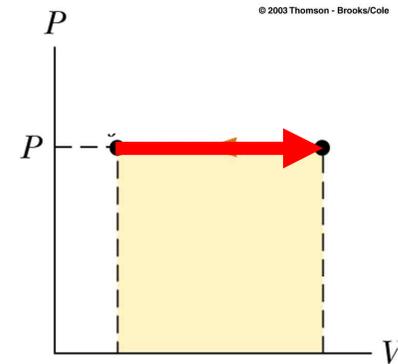
$$W = P\Delta V = P(V_f - V_i) = 4000 \text{ Pa}(0.3 \text{ m}^3 - 0.2 \text{ m}^3) = 400 \text{ J}$$



Also:

$$\frac{T_f}{T_i} = \frac{P_f V_f / nR}{P_i V_i / nR} = \frac{V_f}{V_i} = \frac{0.3 \text{ m}^3}{0.2 \text{ m}^3} = 1.5$$

A 50% increase in temperature!



Example: Calculate work done by expanding gas of 1 mole if initial pressure is 4000 Pa, initial volume is 0.2 m³, and initial temperature is 96.2 K. Assume a two processes: (1) *isobaric* expansion to 0.3 m³, T_f=144.3 K (2) *isothermal* expansion to 0.3 m³.

Given:

n = 1 mole
 T_i = 96.2 K
 V_i = 0.2 m³
 V_f = 0.3 m³
 T = const

Find:

W = ?

2. Isothermal expansion:

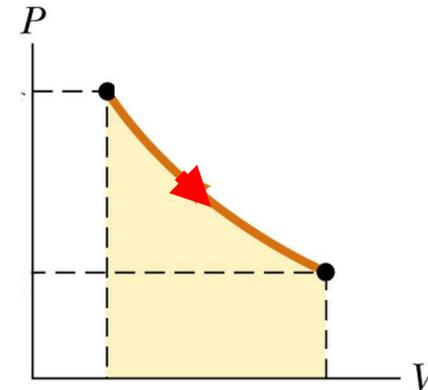
$$W = nRT \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) = P_i V_i \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)$$

$$= (4000 \text{ Pa})(0.2 \text{ m}^3) \ln \frac{0.3 \text{ m}^3}{0.2 \text{ m}^3} = 324 \text{ J}$$



Also:

$$P_f = P_i \frac{V_i}{V_f} = 4000 \text{ Pa} \frac{0.2 \text{ m}^3}{0.3 \text{ m}^3} = 2667 \text{ Pa}$$



A ~67% decrease in pressure!

Kombinasi Proses

- ▶ Dari keadaan awal ke keadaan akhir dalam diagram PV dapat lebih dari satu proses
- ▶ Proses dari keadaan awal ke keadaan akhir dapat menghasilkan jumlah usaha yang berbeda-beda, bergantung lintasan yang ditempuh

Animasi 13.4

Pertanyaan

Bagaimana proses-proses isobarik, isovolum, isotermal, dan adiabatik digambarkan dalam diagram P-T dan V-T ?

Proses perpindahan Energi

▶ Oleh usaha

- Perlu adanya perpindahan secara makroskopik

▶ Oleh panas

- Terjadi karena tumbukan molekuler secara acak.

▶ Hasil keduanya

- Perubahan energi dalam sistem.
- Biasanya diikuti oleh variabel makroskopik terukur
 - ▶ Tekanan
 - ▶ Temperatur
 - ▶ Volume

Hukum Pertama Termodinamika

- ▶ Berdasarkan **Kekekalan Energi** dalam proses termal, maka:

- **Q**

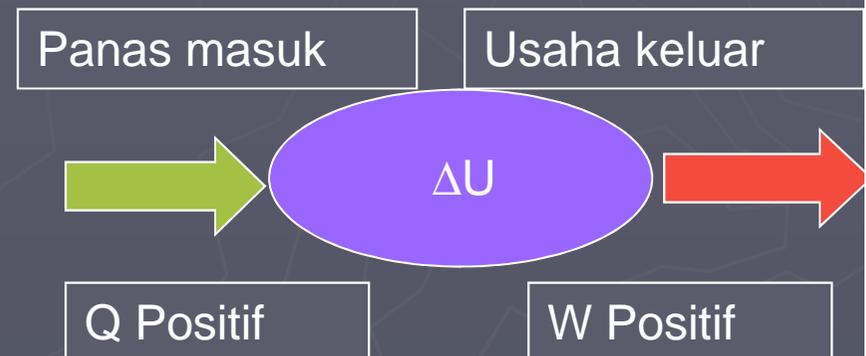
- ▶ panas
- ▶ **Positif** jika energi berpindah **ke dalam** sistem

- **W**

- ▶ Usaha
- ▶ **Positif** jika usaha yang dilakukan **oleh** sistem pada sekitarnya/lingkungan.

- **U**

- ▶ Energi dalam
- ▶ Positif jika temperatur naik.



$$\Delta U = Q - W$$

$$Q = \Delta U + W$$

Hukum Pertama Termodinamika

- ▶ Hubungan antara U , W , dan Q dapat dinyatakan sebagai berikut

$$\Delta U = U_f - U_i = Q + (-W)$$
$$Q = \Delta U + W$$

- ▶ Kalor yang ditambahkan pada suatu sistem sama dengan perubahan energi dalam sistem ditambah usaha yang dilakukan oleh sistem.

Aplikasi hukum Pertama Termodinamika

1. Sistem Terisolasi

- ▶ Sebuah **sistem terisolasi** tidak dapat berinteraksi dengan lingkungannya.
- ▶ Tidak ada perpindahan energi yang terjadi dan tidak ada usaha yang dilakukan.
- ▶ Oleh karena itu energi dalam pada sistem terisolasi menjadi **konstan**.

Contoh:

Jika panas ditambahkan pada gas ideal sebesar 500 J, sehingga gas mengalami pemuaian dari 0.2 m³ menjadi 0.3 m³ pada tekanan konstan 4000 Pa, Berapakah perubahan energi dalam yang terjadi?

Diketahui:

$$\begin{aligned}n &= 1 \text{ mol} \\V_i &= 0.2 \text{ m}^3 \\V_f &= 0.3 \text{ m}^3 \\P &= \text{konstan} \\Q &= 500 \text{ J}\end{aligned}$$

Ditanyakan:

$$\Delta U = ?$$

Ekspansi Isobarik:

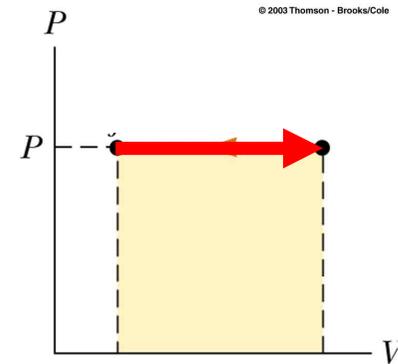
$$\begin{aligned}W &= P\Delta V = P(V_f - V_i) = 4000 \text{ Pa}(0.3\text{m}^3 - 0.2\text{m}^3) \\&= 400 \text{ J}\end{aligned}$$

Gunakan Hukum Pertama Termodinamika:

$$Q = \Delta U + W$$

$$\Delta U = Q - W = 500 \text{ J} - 400 \text{ J} = \underline{100 \text{ J}} \quad \checkmark$$

Jika volume konstan bagaimanakah perubahan energi dalam yang terjadi?



Aplikasi Hukum Pertama Termodinamika

2. Proses Siklus

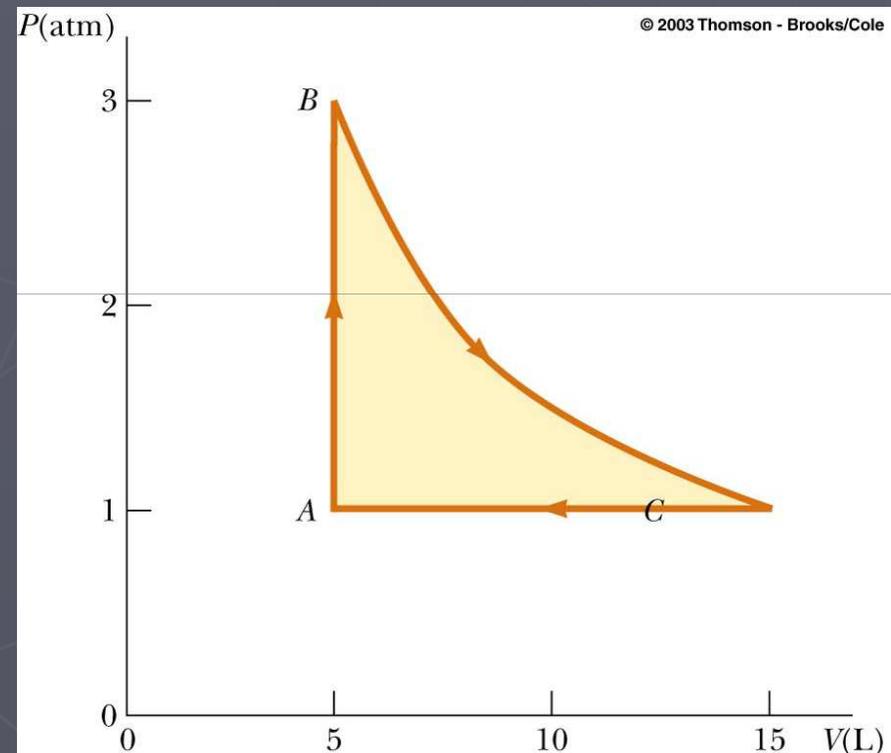
- ▶ Proses siklus adalah suatu proses dimana keadaan awal dan keadaan akhir sama.

$$U_f = U_i \text{ dan } Q = -W$$

- ▶ Jumlah usaha yang dikerjakan oleh gas pada setiap siklus sama dengan luas di bawah kurva tertutup yang digambarkan pada diagram PV.

Proses Siklus dalam Diagram PV

- ▶ Suatu gas ideal monatomik berada dalam suatu silinder dengan piston yang dapat digerakkan.
- ▶ A-B adalah suatu proses **isovolum**.
- ▶ B-C adalah suatu ekspansi **isotermal**.
- ▶ C-A adalah suatu proses **isobarik**
- ▶ Gas kembali ke keadaan awal pada titik A



Hukum Pertama dan Metabolisme Tubuh Manusia

- ▶ Hukum pertama termodinamika dapat diaplikasikan pada makhluk hidup.
- ▶ Energi dalam yang disimpan tubuh manusia diubah bentuknya sesuai dengan kebutuhan organ tubuh, usaha dan kalor.
- ▶ *Laju metabolisme* ($\Delta U / \Delta T$) adalah berbanding lurus laju pengonsumsi oksigen terhadap volume.
 - Tingkat laju metabolisme (untuk memelihara dan menjalankan organ) adalah sekitar 80 W.

Variasi Laju Metabolisme

TABLE 12.1 Oxygen Consumption and Metabolic Rates for Various Activities for a 65-kg Male^a

Activity	O ₂ use rate (mL/min · kg)	Metabolic rate (kcal/h)	Metabolic rate (W)
Sleeping	3.5	70	80
Light activity (dressing, slow walking, desk work)	10	200	230
Moderate activity (walking briskly)	20	400	465
Heavy activity (basketball, fast breast stroke)	30	600	700
Extreme activity (bicycle racing)	70	1 400	1 600

^a Source: *A Companion to Medical Studies*, 2/e, R. Passmore, Philadelphia, F. A. Davis, 1968.

© 2003 Thomson - Brooks/Cole

Fig. T12.1, p. 369

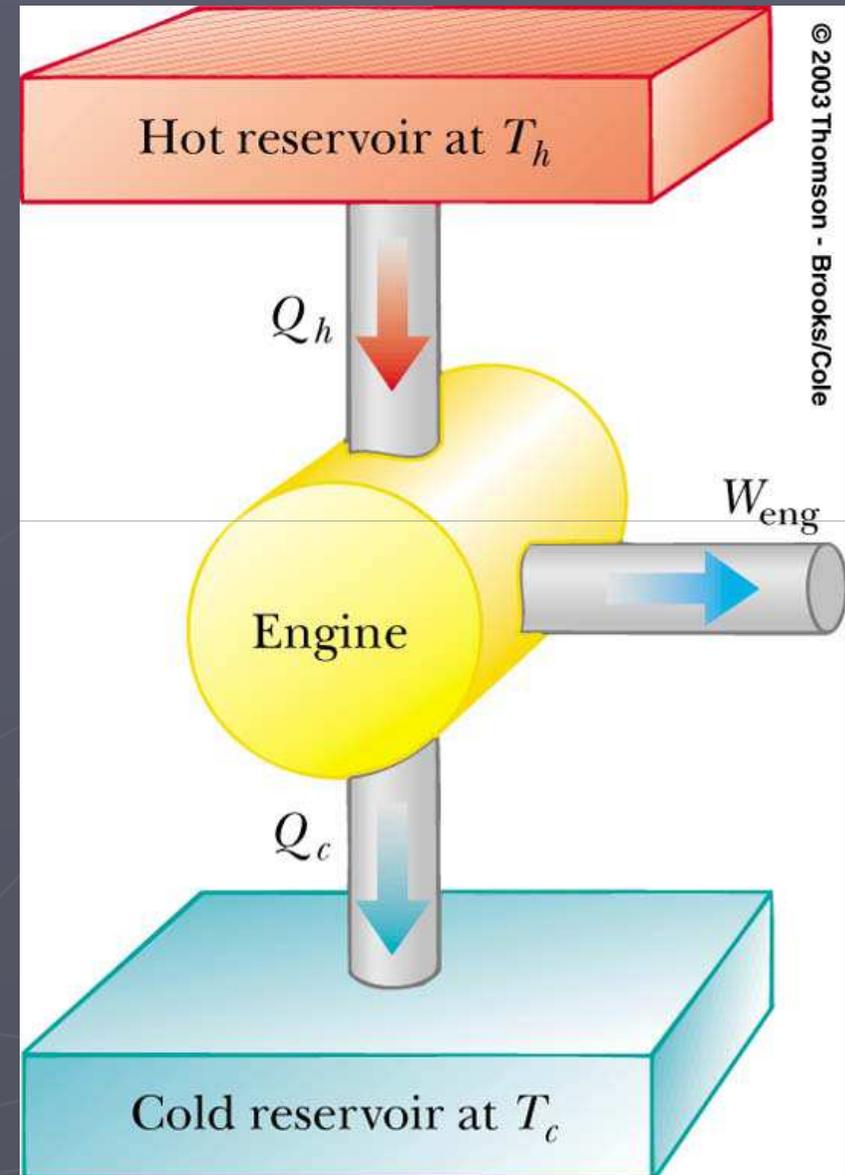
Slide 11

MESIN PANAS

- ▶ **Mesin panas adalah suatu alat** yang mengkonversi energi internal menjadi bentuk lain yang bermanfaat, seperti listrik atau mekanis.
- ▶ Suatu mesin panas memerlukan suatu bahan/zat untuk bekerja melalui suatu proses siklus.

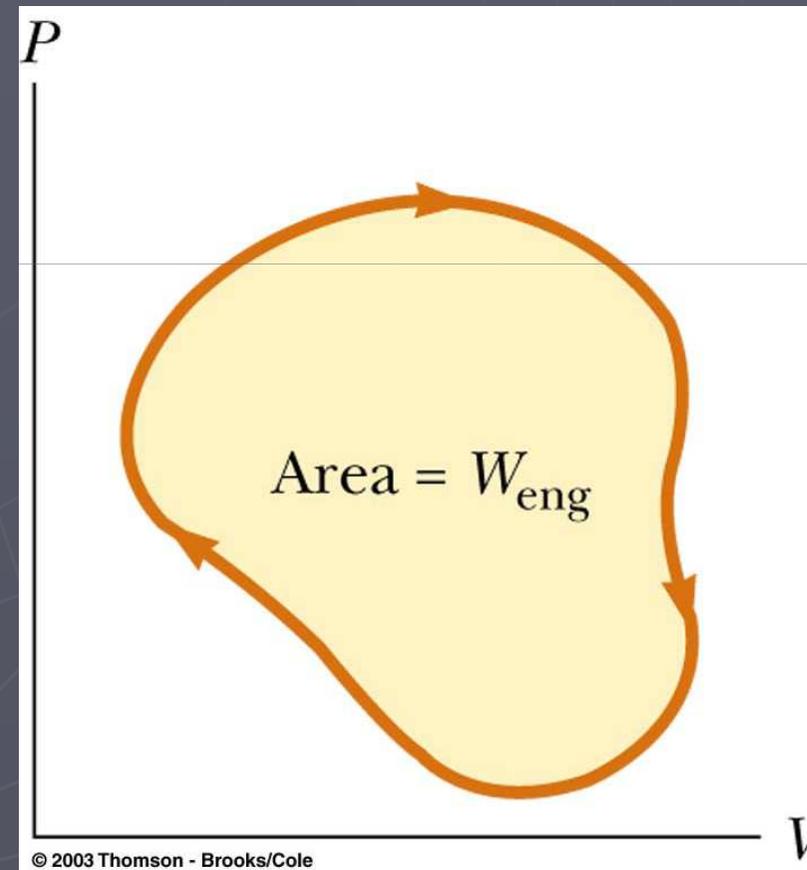
Mesin Panas

- ▶ Energi ditransfer dari suatu sumber (reservoir) pada temperatur tinggi (Q_h)
- ▶ Usaha dilaksanakan oleh mesin tersebut (W_{eng})
- ▶ Energi dibuang ke sumber lain (reservoir) yang temperaturnya lebih rendah (Q_c)



Mesin Panas

- ▶ Selama prosesnya berupa siklus, maka $\Delta U = 0$
 - Energi dalam awal sama dengan energi dalam akhir.
- ▶ Maka, $Q_{\text{net}} = W_{\text{eng}}$
- ▶ Usaha yang dilakukan oleh mesin kalor sama dengan jumlah energi yang diserap oleh mesin.
- ▶ Usaha adalah sama dengan luas di dalam kurva tertutup pada diagram PV.



Efisiensi Termal pada sebuah Mesin Panas

- ▶ **Efisiensi termal** didefinisikan sebagai rasio antara kerja yang dilakukan oleh mesin terhadap energi yang diserap oleh mesin pada temperatur tinggi.

$$e = \frac{W_{eng}}{|Q_h|} = \frac{|Q_h| - |Q_c|}{|Q_h|} = 1 - \frac{|Q_c|}{|Q_h|}$$

- ▶ $e (\eta) = 1$ (efisiensi 100%) hanya jika $Q_c = 0$
 - Tidak ada energi yang dibuang ke reservoir dingin.

Hukum Kedua Termodinamika

- ▶ Tidak mungkin bagi sebuah mesin panas yang bekerja secara siklis untuk tidak menghasilkan efek lain selain menyerap panas dari suatu tandon dan melakukan sejumlah usaha yang ekuivalen.
 - Artinya Q_c tidak sama dengan nol
 - ▶ Sebagian Q_c harus dibuang ke lingkungan.
 - Dengan demikian η tidak sama dengan 100%

Pompa Panas dan Lemari Es

- ▶ Mesin panas dapat bekerja kebalikannya
 - Masukkan energi
 - Energi disadap dari reservoir yang dingin
 - Energi ditransfer ke reservoir yang panas
- ▶ Proses mesin panas ini bekerja sebagai pompa panas.
 - Lemari es merupakan salah satu contoh pompa panas
 - Contoh lainnya adalah alat pendingin (AC)

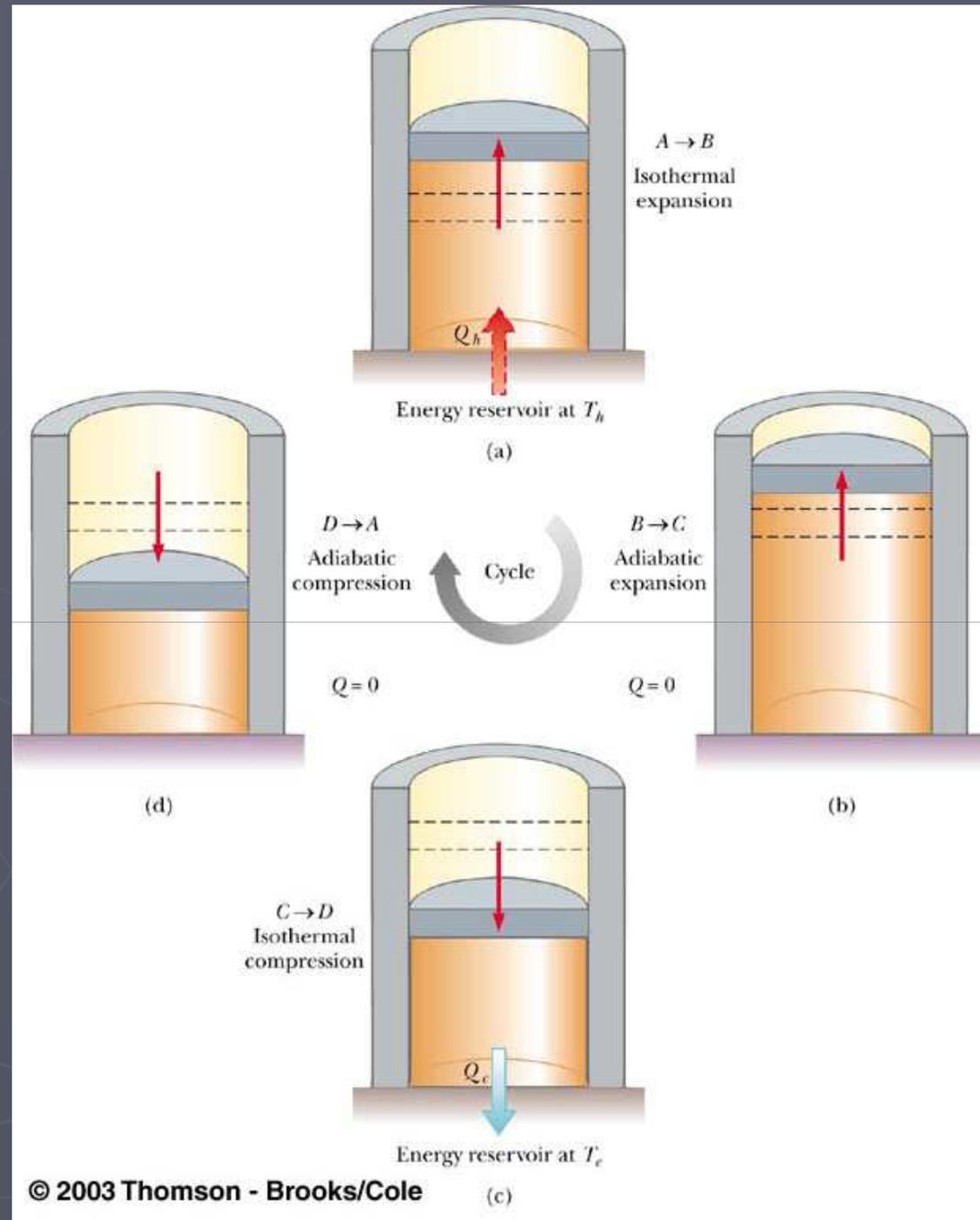
Proses *Reversible* dan Proses *Irreversible*

- ▶ Syarat yang diperlukan agar proses bersifat **reversibel**:
 1. Tidak ada energi mekanik yang dapat hilang karena gesekan, gaya viskos, atau gaya disipatif lain yang menghasilkan panas.
 2. Tidak ada konduksi panas karena beda temperatur tertentu.
 3. Proses harus **kuasi-statik** agar sistem selalu dalam keadaan setimbang
- ▶ Tiap proses yang melanggar salah satu kondisi di atas merupakan proses **irreversibel**.

Mesin Carnot

- ▶ Teori mesin dikembangkan oleh Sadi Carnot
- ▶ *Teorema Carnot: Tidak ada mesin yang bekerja antara dua reservoir panas yang tersedia yang dapat lebih efisien dari pada mesin reversibel yang bekerja di antara kedua reservoir itu.*
- ▶ Mesin reversibel yang bekerja di antara dua tandon panas dinamakan **Mesin Carnot**

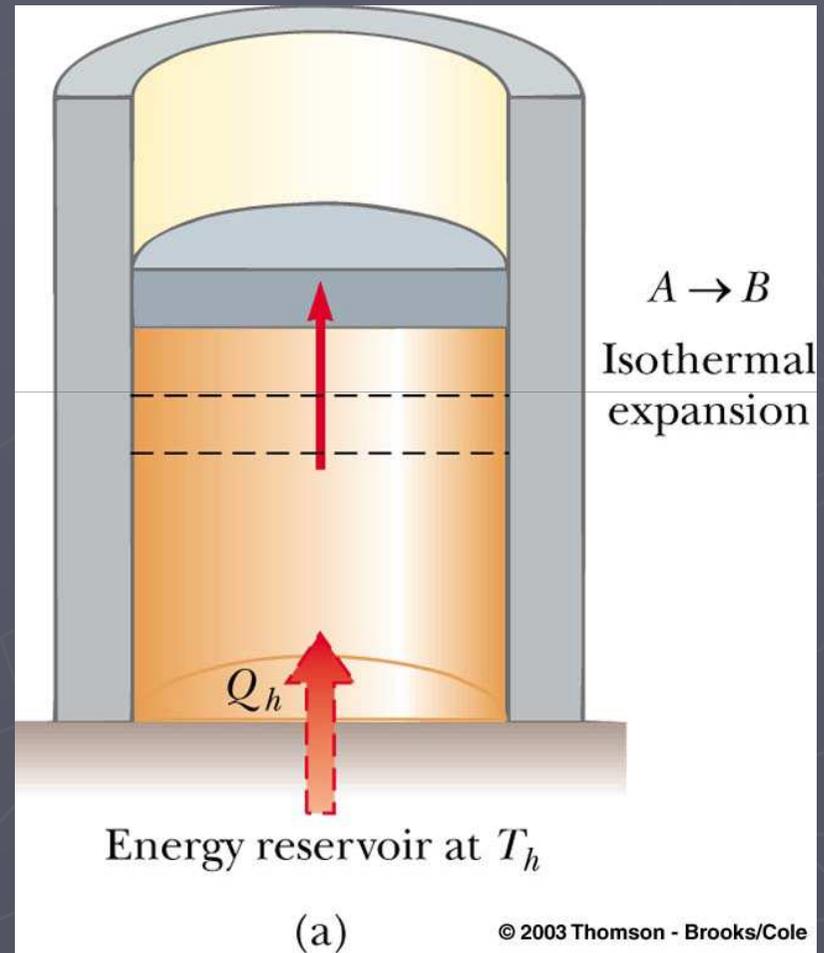
Siklus Carnot



Animasi 13.5

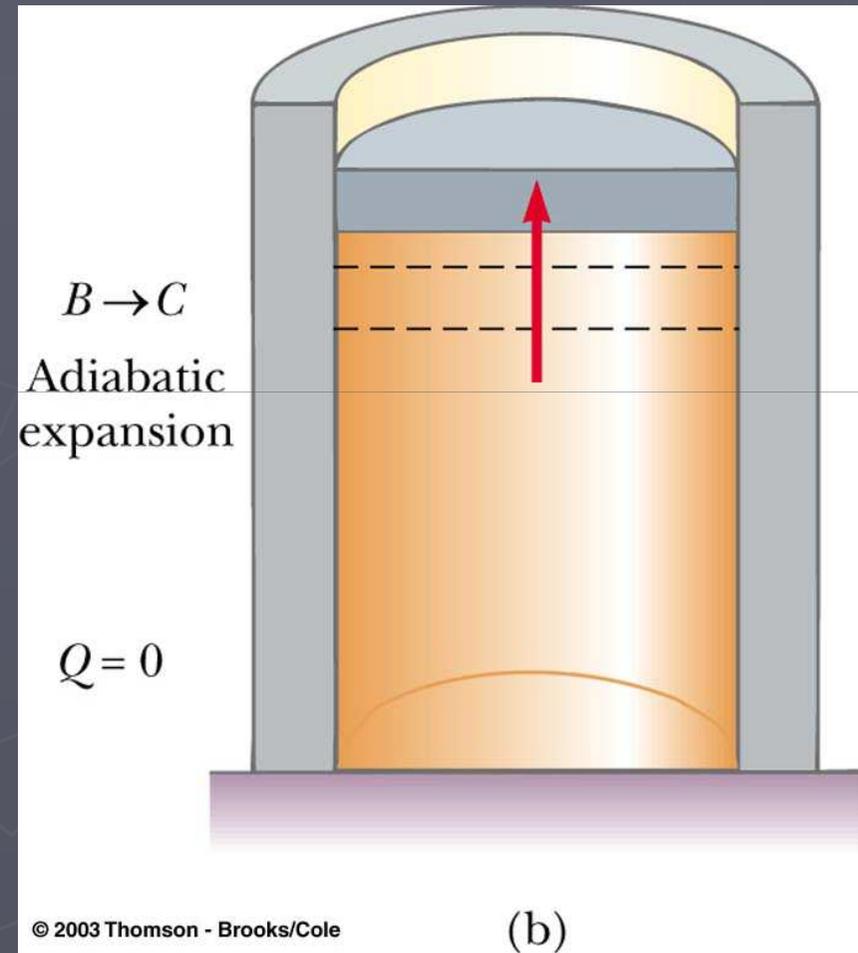
Siklus Carnot, A ke B

- ▶ A ke B adalah ekspansi isotermal
- ▶ Gas ditempatkan pada reservoir dengan temperatur tinggi.
- ▶ Gas akan menyerap panas sebesar Q_h
- ▶ Gas bekerja sebesar W_{AB} untuk menaikkan piston.



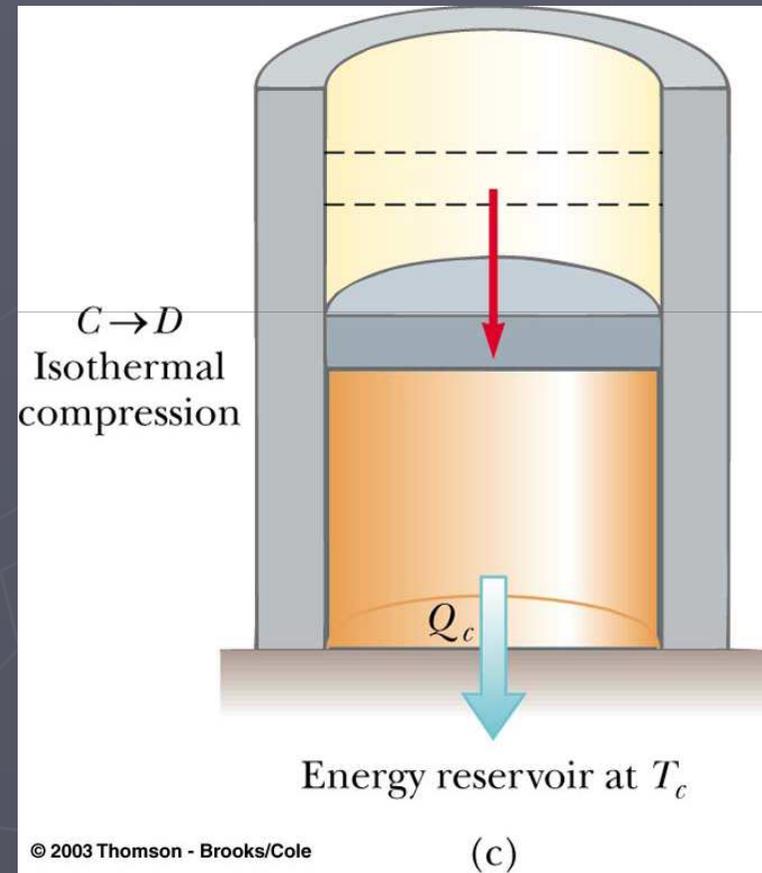
Siklus Carnot, B ke C

- ▶ Dari B ke C adalah proses ekspansi adiabatik.
- ▶ Pada bagian dasar silinder diganti dengan dinding yang tidak dapat menghantarkan panas.
- ▶ Tidak ada panas yang masuk atau keluar sistem.
- ▶ Temperatur akan menurun dari T_h ke T_c
- ▶ Gas bekerja sebesar W_{BC}



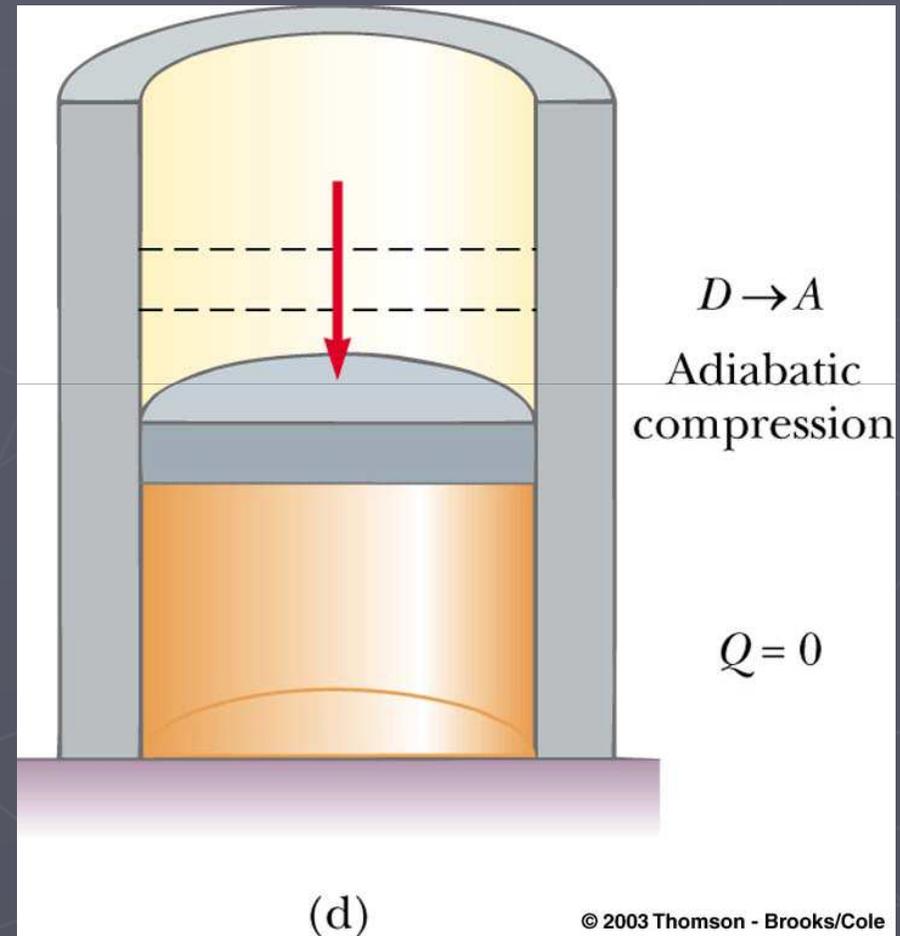
Siklus Carnot, C ke D

- ▶ Gas ditempatkan pada reservoir bertemperatur dingin.
- ▶ C ke D adalah proses kompresi isotermal
- ▶ Gas akan membuang energi Q_c .
- ▶ Usaha W_{CD} adalah usaha yang dilakukan oleh gas



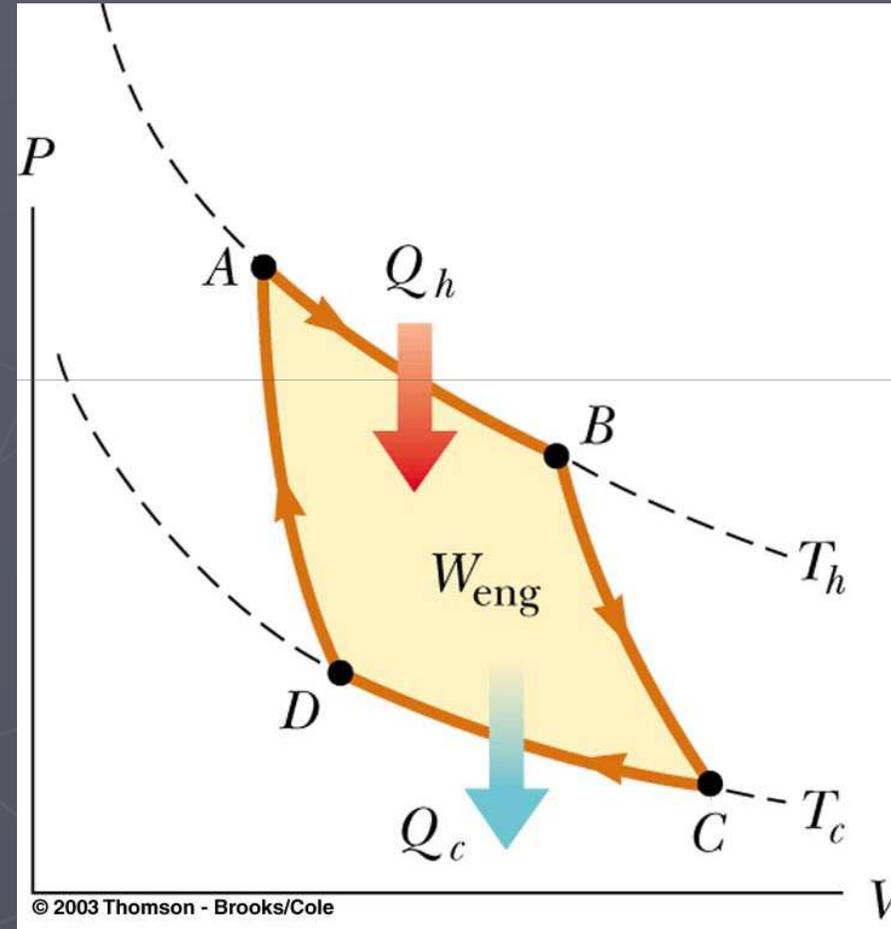
Siklus Carnot, D ke A

- ▶ D ke A adalah proses kompresi adiabatik
- ▶ Gas kembali ditempatkan pada tempat tidak dapat menghantarkan panas. Sehingga tidak ada pertukaran panas dengan lingkungan.
- ▶ Temperatur gas akan naik dari T_C ke T_h
- ▶ Usaha yang dilakukan gas sebesar W_{CD}



Siklus Carnot, Diagram PV

- ▶ Usaha yang dilakukan oleh mesin adalah sebesar luas area kurva tertutup seperti pada gambar.
- ▶ Jumlah usaha sama dengan $Q_h - Q_c$



Efisiensi Mesin Carnot

- ▶ Carnot menunjukkan bahwa efisiensi mesin tergantung pada temperatur reservoir.

$$e_c = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

- ▶ Temperatur dinyatakan dalam Kelvin
- ▶ Semua mesin Carnot yang beroperasi antara dua temperatur yang sama maka akan menghasilkan efisiensi yang sama.

Beberapa catatan tentang efisiensi Mesin Carnot

- ▶ Efisiensi sama dengan nol jika $T_h = T_c$
- ▶ Efisiensi sama dengan 100% hanya jika $T_c = 0$ K. Pada kenyataannya tidak ada reservoir yang memenuhi kondisi ini.
- ▶ Efisiensi akan naik pada saat T_c diturunkan dan ketika T_h dinaikkan.
- ▶ Pada prakteknya, T_c mendekati suhu ruang sebesar 300 K. Jadi pada umumnya T_h dinaikkan untuk meningkatkan efisiensi.

Mesin Sesungguhnya dibandingkan dengan Mesin Carnot

- ▶ Semua mesin sesungguhnya memiliki efisiensi lebih rendah dibandingkan dengan mesin Carnot.
 - Mesin sesungguhnya bersifat irreversible karena adanya gesekan.
 - Mesin sesungguhnya merupakan irreversible karena siklus yang dialami secara lengkap hanya terjadi pada waktu yang singkat (spontan).

Mesin Otto

Animasi 13.6



Entropi

- ▶ Variabel keadaan yang berhubungan dengan Hukum kedua termodinamika adalah Entropi.
- ▶ Perubahan entropi dinyatakan dengan ΔS , yaitu panas yang harus ditambahkan pada sistem dalam suatu proses reversibel untuk membawanya dari keadaan awalnya ke keadaan akhirnya Q_r dibagi dengan temperatur absolut T pada sistem dalam interval tersebut.

Entropi

- ▶ Secara matematis

$$\Delta S = \frac{Q_r}{T}$$

- ▶ Persamaan ini hanya dapat diterapkan pada bagian proses yang reversibel, walaupun pada kenyataannya sistem merupakan irreversibel.
 - Untuk menghitung besarnya entropi untuk proses irreversibel dimodelkan sebagai proses reversibel.
- ▶ Ketika energi diserap, Q berharga positif dan entropi akan naik.
- ▶ Ketika energi dibuang, Q akan berharga negatif dan entropi akan turun.

Entropi Lanjutan

- ▶ Ingat, persamaan matematis sebelumnya hanya mendefinisikan *perubahan entropi*
- ▶ Entropi alam semesta meningkat karena proses-proses yang terjadi secara alami
- ▶ Terdapat proses-proses dimana entropi sebuah sistem menurun:
 - Jika entropi suatu sistem ,A, menurun, maka akan dibarengi dengan meningkatnya entropi sistem yang lain, B.
 - Perubahan entropi sistem B akan lebih besar dibandingkan perubahan entropi sistem A.

Entropi dan ketidakteraturan

- ▶ Entropi dapat dinyatakan dalam ketidakteraturan
- ▶ Sistem yang terisolasi cenderung menuju ke keadaan ketidakteraturan lebih besar, dan entropi adalah ukuran ketidakteraturan tersebut
 - $S = k_B \ln W$
 - ▶ k_B adalah konstanta Boltzmann
 - ▶ W adalah jumlah keadaan yang sebanding dengan probabilitas sistem berada dalam konfigurasi tertentu

Akhir Alam Semesta

- ▶ Entropi alam semesta selalu meningkat
- ▶ Entropi alam semesta pada akhirnya akan mencapai maksimum
 - Pada saat tersebut, alam semesta akan berada pada temperatur dan kerapatan yang uniform
 - Keadaan ketidakteraturan sempurna ini mensyaratkan tidak ada energi yang dapat digunakan untuk melakukan usaha
- ▶ Keadaan ini dinamakan akhir alam semesta

PR

Buku Tipler Jilid I

Hal 648-649 no. 54, 67

Hal 687 no. 55, 58

