



**PAKET TUTORIAL**  
**TERMODINAMIKA**

**OLEH:**  
**DRA. HARTATIEK, M.SI.**

**JURUSAN FISIKA**  
**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**  
**UNIVERSITAS NEGERI MALANG**  
**2009**

# BAB I

## KONSEP-KONSEP DASAR

### A. Pendahuluan

Pada bab ini Anda akan mempelajari konsep-konsep dasar termodinamika. Pemahaman yang baik pada bagian ini akan sangat membantu anda dalam mempelajari bab selanjutnya. Pada bab ini dibahas tentang lingkup termodinamika, kesetimbangan termal dan Hukum ke-Nol Termodinamika, konsep suhu, tekanan, sistem dan persamaan keadaannya, perubahan keadaan kesetimbangan dan beberapa rumusan matematis yang mendukung termodinamika.

Setelah mempelajari bab ini mahasiswa diharapkan memiliki kompetensi:

1. Memahami apa yang dikaji di dalam termodinamika.
2. Memahami pengertian kesetimbangan termal dan Hukum ke-nol Termodinamika.
3. Memahami konsep suhu dan pengukurannya.
4. Memahami konsep tekanan.
5. Memahami sistem termodinamika serta persamaan keadaannya.
6. Memahami perubahan keadaan kesetimbangan.
7. Memahami beberapa rumusan matematika yang digunakan dalam termodinamika.
8. Dapat mengaplikasikan konsep-konsep dasar termodinamika untuk menyelesaikan soal-soal terkait.
9. Terampil menyelesaikan masalah menggunakan penyelesaian berbasis eksplisit

**Kata-kata kunci:** termodinamika, suhu, tekanan, sistem, hukum ke-Nol, kesetimbangan, persamaan keadaan

### B. Uraian Materi

#### 1. Lingkup Termodinamika

Termofisika adalah ilmu pengetahuan yang mencakup semua cabang ilmu pengetahuan yang mempelajari dan menjelaskan perilaku zat akibat pengaruh kalor dan perubahan yang menyertainya. Di dalamnya tercakup: kalorimetri, termometri, perpindahan kalor, termodinamika, teori kinetik gas, dan fisika statistik.

Selanjutnya yang akan dibahas hanya termodinamika saja sedangkan yang lain dibahas di fisika statistik.

Apa perbedaan termodinamika dan fisika statistik? Dalam **termodinamika** kita berusaha mendapatkan rumusan dan kaitan-kaitan antara besaran fisis tertentu yang menggambarkan perilaku zat akibat pengaruh kalor. Besaran itu disebut **koordinat makroskopik sistem**. Rumusan dan kaitan itu kita peroleh dari eksperimen dan kemudian digunakan untuk meramalkan perilaku zat tersebut dibawah pengaruh kalor. Sehingga nyata bahwa termodinamika adalah ilmu pengetahuan yang didasarkan pada **eksperimen (empiris)**. Koordinat makroskopik yang digunakan untuk menggambarkan perilaku zat jumlahnya tidak besar, misal-nya tekanan, suhu, volume, dan komposisi. Koordinat ini memiliki ciri umum: (1) tidak menyangkut pengandaian khusus, (2) dapat diterima indera secara langsung, dan (3) dapat diukur langsung.

Dalam **fisika statistik** kita tidak memperhatikan sistem sebagai suatu keseluruhan, melainkan memandang partikel-partikelnya secara individual. Dengan mengadakan beberapa permisalan tentang partikel itu **secara teoritik** dicoba diturunkan hubungan dan kaitan-kaitan yang menghubungkan besaran makroskopik dengan sifat partikel. Dengan demikian terbentuklah jembatan antara dunia mikroskopik dan dunia makroskopik. Sehingga dapat dipahami bahwa jumlah koordinat mikroskopik besar sekali yakni sebesar jumlah partikel di dalam sistem (sejumlah  $N$  yang seorde dengan bilangan avogadro).

Semisal suatu sistem yang terdiri atas  $N$  molekul gas. Dalam **termodinamika** besaran makroskopik yang menggambarkan sistem ini adalah tekanan gas  $P$ , volume  $V$ , dan suhu  $T$ . Dari **eksperimen** diketahui bahwa antara ketiga besaran ini ternyata ada kaitan tertentu. Artinya gas tersebut dapat kita beri volume tertentu, dipanaskan sampai mencapai suhu tertentu, maka ternyata tekanannya juga mempunyai **nilai tertentu pula**. Secara matematik kaitan antara  $P$ ,  $V$ , dan  $T$  terdapat hubungan fungsional yang dinyatakan  **$f(PVT) = 0$** . Dari hubungan empiris ini dapat kita buat ramalan-ramalan tertentu misalnya tentang koefisien muai volum sistem. Ramalan ini kemudain diuji dengan eksperimen.

Dalam fisika statistik gas dipandang sebagai suatu kumpulan  $N$  partikel yang masing-masing bermassa  $m$  dan kecepatan  $v$ . **Tekanan gas** ternyata adalah **nilai rata-rata** perubahan momentum partikel ketika bertumbukan dengan din-

ding bejana. Dengan membuat beberapa asumsi (misalkan tumbukan berlangsung elastis sempurna) diperoleh rumusan teoritik  $P = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m\bar{v}^2$ . Bila diperhatikan bahwa rumusan ini **menghubungkan koordinat mikroskopik (m,v) dengan koordinat makroskopik (P,V)**.

Dalam termodinamika didefinisikan sejumlah besaran fisika tertentu yang disebut **koordinat sistem** yaitu besaran-besaran makroskopik yang dapat menggambarkan **keadaan kesetimbangan sistem**, oleh karena itu disebut **variabel keadaan (state variable) sistem**. Untuk sistem berupa gas 8 koordinat itu adalah

Besaran	Lambang	Satuan (SI)
Tekanan	P	Pa (N/m <sup>2</sup> )
Suhu	T	K
Volume	V	m <sup>3</sup>
Entropi	S	J/K
Energi-internal	U	J
Entalpi	H	J
Energi bebas Helmholtz	F	J
Energi bebas Gibbs	G	J

Kita tinjau sistem gas dalam bejana tertutup (tidak bocor). Selama komposisinya tidak berubah (tidak terjadi reaksi kimia yang menyebabkan jumlah partikel berubah dan tidak terjadi difusi), dalam eksperimen volume dan tekanan dapat kita ubah sekehendak. Ini berarti bahwa pada volume V tertentu gas dapat berada pada T tertentu berapa saja atau sebaliknya gas pada T tertentu volume dapat berada pada V berapa saja. Hal ini ternyata terdapat koordinat ketiga yang menyesuaikan diri misalnya tekanan P.

## 2. Kesetimbangan Termal dan Hukum Ke-Nol Termodinamika

Pemerian mikroskopis campuran gas dapat dinyatakan dengan memerinci kuantitas seperti komposisi, massa, tekanan dan volume. Jika sistem dianggap bermassa tetap dan komposisi tetap, maka pemerriannya hanya memerlukan *sepasang koordinat bebas*, misalnya X dan Y.

Keadaan sistem yang memiliki harga  $X$  dan  $Y$  tertentu yang tetap selama kondisi eksternal tidak berubah disebut keadaan *setimbang*. Percobaan menunjukkan bahwa adanya keadaan setimbang dalam suatu sistem bergantung pada sistem lain yang ada di dekatnya dan sifat dinding yang memisahkannya.

Kita andaikan terdapat dua sistem A dan B, yang masing-masing mempunyai koordinat termodinamik  $X, Y$  dan  $X', Y'$ , yang dipisahkan oleh sebuah dinding. Bila dinding pemisah bersifat *diaterm*, maka harga  $X, Y$  dan  $X', Y'$  akan berubah secara spontan sampai ke keadaan setimbang sistem gabungan ini tercapai. Hal demikian disebut *kesetimbangan termal*, yaitu keadaan yang dicapai oleh dua (atau lebih) sistem yang dicirikan oleh keterbatasan harga koordinat sistem itu setelah sistem saling berinteraksi melalui dinding diaterm. Kesetimbangan termal tidak terjadi jika dinding pemisah bersifat adiabat.

Sekarang, kita andaikan terdapat tiga sistem A, B dan C. Dua sistem A dan B dipisahkan oleh dinding *adiabat*, tetapi masing-masing bersentuhan dengan sistem ketiga, yaitu C, melalui dinding *diaterm*. Keadaan demikian memenuhi keadaan *Hukum ke-nol Termodinamika*, yaitu dua sistem (A dan B) yang ada dalam kesetimbangan termal dengan sistem ketiga (C), berarti dalam kesetimbangan termal satu sama lain

### 3. Konsep Suhu dan Pengukurannya

Sifat yang menjamin bahwa sistem dalam kesetimbangan termal dengan sistem lain disebut **suhu**.

Jika tiga sistem P, Q dan R berada dalam kesetimbangan termal satu sama lain, maka ada fungsi yang sama untuk setiap kumpulan koordinat. Harga yang sama dari fungsi ini adalah suhu empirik  $t$ , yang memenuhi hubungan

$$t = h_P(X, Y) = h_Q(X', Y'') = h_R(X'', Y''')$$

Suhu semua sistem dalam kesetimbangan termal dapat dinyatakan dengan bilangan. Untuk menetapkan skala suhu empirik dipilih beberapa sistem dengan koordinat  $Y$  dan  $X$  sebagai sistem baku yang disebut *termometer* dan mengambil seperangkat kaidah untuk menentukan harga numerik pada suhu yang berkaitan dengan masing-masing isoterm. Pada setiap sistem lain yang dalam kesetimbangan termal dengan termometer itu dipilih bilangan yang sama untuk menunjukkan suhunya.

Jika koordinat Y dibuat tetap, maka didapatkan titik-titik dengan koordinat X berbeda. Koordinat X disebut *sifat termometrik* dan bentuk *fungsi termometrik*  $\theta(X)$  menentukan skala suhu. Suhu yang biasa dipakai untuk termometer dan semua sistem dalam kesetimbangan termal dengannya memenuhi

$$\theta(X) = a X \quad , a = \text{tetapan (konstanta)}$$

Persamaan ini dapat dipakai bila termometer bersentuhan dengan *sistem baku* yang telah dipilih, yaitu *titik tripel air* (keadaan air murni sebagai campuran setimbang dari es, zat cair dan uap). Suhu pada keadaan ini adalah 273,16 K sehingga

$$a = (273,16 \text{ K})/X_{TP}$$

dengan  $X_{TP}$  menyatakan sifat X secara eksplisit pada suhu titik tripel. Dengan demikian

$$\theta(X) = 273,16 \text{ K} (X/X_{TP}) \quad (Y = \text{tetap})$$

#### 4. Tekanan

Tekanan yang dilakukan oleh sistem adalah gaya tekan normal tiap satu satuan luas batas sistem. Ketika suatu fluida diisikan kedalam sebuah bejana, tekanan yang menekan dinding bejana sama dengan perubahan momentum rata-rata partikel yang menekan tegak lurus batas sistem tiap satuan luas tiap satuan waktu.

Analisis termodinamika memperhatikan nilai **tekanan mutlak** (tekanan absolut). Pada umumnya peralatan pengukur tekanan hanya menunjukkan tekanan pengukuran, yang merupakan perbedaan antara tekanan absolut sistem dan tekanan absolut atmosfer. Konversi dari tekanan pengukuran menjadi tekanan absolut mengikuti hubungan :

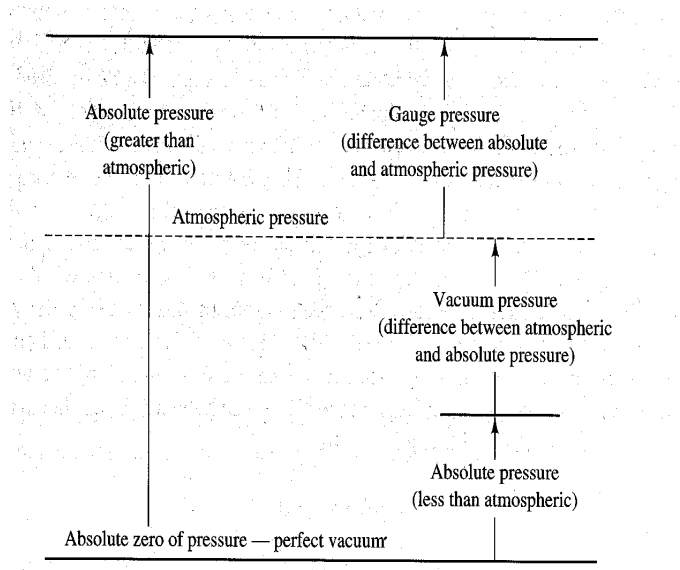
$$P_{abs} = P_{pengukuran} - P_{atm}$$

Hubungan ini ditunjukkan pada Gambar 1.1. Yang perlu dicatat bahwa data tekanan absolut adalah vakum sempurna, sedangkan data skala pengukuran adalah tekanan atmosfer.

Untuk tekanan di bawah tekanan atmosfer, tekanan pengukuran adalah negatif, dan istilah vakum menunjukkan besarnya perbedaan antara tekanan atmosfer dan tekanan absolut sehingga:

$$P_{abs} = P_{pengukuran} - P_{vakum}$$

Satuan tekanan dalam sistem SI adalah pascal ( $p_a$ ); ( $1 p_a = N / m^2$ ) satuan tekanan yang lain adalah bar,  $1 bar = 100 k p_a$ . Tekanan satu atmosfer standar didefinisikan



**Gambar 1.1** Hubungan Antara Tekanan Absolut, Tekanan Atmosfer, Tekanan Pengukuran dan Tekanan Vakum.

sebagai tekanan yang dihasilkan oleh kolom merkuri pada ketinggian 760 mm Hg, kerapatan merkuri  $13,5951 \text{ gram/cm}^2$  dan percepatan gravitasi standar  $9,80665 \text{ m/s}^2$ . Tekanan atmosfer standar sebesar  $101,325 \text{ kpa}$  ( $\text{k N/m}^2$ )

## 5. Keadaan Kestimbangan dan Persamaan Keadaannya

Yang dimaksud dengan keadaan kesetimbangan adalah kesetimbangan termodinamik. Pada sistem termodinamik, koordinat makroskopis yang telah ditentukan, ternyata dapat berubah, baik secara spontan atau karena pengaruh luar. Sistem yang demikian dikatakan mengalami *perubahan keadaan*.

Bila di bagian dalam sistem dan juga antara sistem dengan lingkungannya tidak ada gaya yang tidak berimbang, maka sistem dalam keadaan *setimbang mekanis*.

Bila sistem yang ada dalam kesetimbangan mekanis tidak cenderung mengalami perubahan spontan dari struktur internalnya, seperti reaksi kimia, atau perpindahan materi dari satu bagian ke bagian lainnya, seperti difusi atau pelarutan, bagaimanapun lambatanya, maka sistem dalam keadaan *setimbang kimia*.

**Kesetimbangan termal** terjadi bila tidak terjadi perubahan spontan dalam koordinat sistem yang ada dalam kesetimbangan mekanis dan kimia bila sistem itu dipisahkan dari lingkungannya oleh dinding diaterm. Dalam kesetimbangan termal, semua bagian sistem bersuhu sama, dan suhu ini sama dengan lingkungannya. Bila persyaratan untuk masing-masing kesetimbangan tidak terpenuhi, maka sistem mengalami perubahan keadaan sampai kesetimbangan baru tercapai.

Bila persyaratan untuk semua jenis kesetimbangan di atas tercapai, sistem dikatakan **setimbang termodinamik**.

Persamaan keadaan digunakan saat sistem berada dalam keadaan setimbang termodinamik. Persamaan keadaan suatu sistem menyatakan hubungan fungsional antara koordinat-koordinat sistem. Ditinjau persamaan keadaan umum yang menyatakan hubungan dari tiga koordinat sistem sebarang yaitu  $x, y, z$

$$f(x, y, z) = 0$$

Secara eksplisit, masing-masing variabel dapat dinyatakan sebagai fungsi dari dua variabel yang lain.

$$x = x(y, z)$$

$$y = y(z, x)$$

$$z = z(x, y)$$

Dengan demikian dapat dinyatakan

$$dz = \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)_y dx + \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right)_x dy$$

jika  $M = \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)_y$  dan  $N = \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right)_x$

maka  $dz = Mdx + Ndy$

Jika  $z$  adalah fungsi yang memang ada, maka  $dz$  disebut deferensial eksak dan berlaku **syarat Euler**

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)_y \right]_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right)_x \right]_y \quad \text{atau} \quad \left( \frac{\partial M}{\partial y} \right)_x = \left( \frac{\partial N}{\partial x} \right)_y$$

Suatu fungsi yang memenuhi persamaan diatas disebut **fungsi keadaan**.

Persamaan keadaan kesetimbangan teoritis, yang didasarkan atas pengendalian kelakuan molekular yang sampai sekarang masih dipakai ialah persamaan keadaan Van der Walls

$$(P + (a/v^2))(v - b) = RT \quad ; \quad a, b = \text{tetapan; } v = \text{volume molar (V/n)}$$



Persamaan keadaan gas ideal

$$PV = nRT \quad ; n = \text{jumlah mol}$$

Persamaan keadaan gas Dieterici

$$P = \frac{RT}{(v-b)} e^{-a/ktv} \quad ; a, b = \text{tetapan}$$

Persamaan keadaan gas Beattie-Bridgeman

$$P = \frac{RT}{v^2} (1 - c/vT^3) [v + B_0(1 - b/v)] - \frac{A_0}{v^2} (1 - a/v)$$

a, b, c, A<sub>0</sub>, B<sub>0</sub> merupakan tetapan

Persamaan keadaan gas dalam bentuk virial

$$Pv = RT [ A + B/v + C/v^2 + D/v^3 + \dots ]$$

A, B, C, D, ..... merupakan koefisien virial gas yang bersangkutan

Persamaan virial dalam bentuk yang lain

$$Pv = RT + B'P + C'P^2 + D'P^3 + \dots$$

B', C', D', ..... merupakan koefisien virial

## 6. Perubahan Infinit pada Keadaan Kesetimbangan

Pada sistem termodinamik, koordinat makroskopis yang telah ditentukan, ternyata dapat berubah, baik secara spontan atau karena pengaruh luar. Sistem yang demikian dikatakan mengalami *perubahan keadaan*. Jika sistem mengalami perubahan kecil keadaan, mulai dari keadaan setimbang awal ke keadaan setimbang lain, pada umumnya ketiga koordinatnya mengalami sedikit perubahan.

Misalnya, jika perubahan V sangat kecil (infinit) dibandingkan dengan V, tetapi sangat besar dibandingkan dengan ruang yang ditempati oleh beberapa molekul, maka perubahan V dapat dituliskan sebagai deferensial dV. Begitu pula P dan T. Perubahan infinit dari satu keadaan setimbang ke keadaan setimbang lain menyangkut dV, dT dan dP. Persamaan keadaan dapat dipecahkan dengan menyatakan setiap koordinatnya sebagai dari dua koordinat yang lain, misalnya

$$V = V(T, P)$$

sehingga perubahan infinitnya menggunakan deferensial parsial

$$dV = (\partial V/\partial T)_P dT + (\partial V/\partial P)_T dP$$

$(\partial V/\partial T)_P dT$  : perubahan volume apabila suhu diubah sebesar dT sedangkan P dijaga tetap.

$(\partial V/\partial P)_T dP$  : perubahan volume apabila tekanan diubah sebesar  $dP$  sedangkan  $T$  dijaga tetap.

$dV$  : perubahan total volume apabila suhu dan tekanan diubah perubahan volume apabila suhu diubah sebesar  $dT$  sedangkan  $P$  dijaga tetap.

Dengan cara yang sama, maka untuk tekanan dan suhu masing-masing adalah

$$dP = (\partial P/\partial T)_V dT + (\partial P/\partial V)_T dV$$

$$dT = (\partial T/\partial P)_V dP + (\partial T/\partial V)_P dV$$

Kemuaian volum didefinisikan sebagai

$$\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \quad (\text{satuan } K^{-1})$$

merupakan perubahan relatif volume apabila suhu diubah sedangkan tekanan tetap

Ketermampatan isothermal didefinisikan sebagai

$$\kappa = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \quad (\text{satuan } Pa^{-1})$$

merupakan perubahan relatif volume apabila tekanan diubah sedangkan suhu tetap.

$\beta$  dan  $\kappa$  adalah fungsi koordinat, tetapi pada batas-batas perubahan yang tidak terlalu besar, sering dianggap tetap.

## 7. Persamaan Keadaan Gas Nyata

Pada suhu tetap sebarang, gas nyata sebanyak  $n$  mol memenuhi hubungan deret pangkat (uraian virial)

$$Pv = A (1 + (B/v) + (C/v^2) + (D/v^3) + \dots)$$

dengan  $v=V/n$  dan  $A, B, C, \dots$  disebut koefisien virial pertama, kedua, ketiga, ... yang bergantung pada suhu dan jenis gas. Pada umumnya makin besar kisaran tekanannya makin banyak jumlah suku dalam uraian virialnya.

Pada tekanan mendekati nol, perkalian  $Pv$  mendekati harga yang sama untuk semua gas pada suhu yang sama.

Ketika gas bermassa tetap tekanannya mendekati nol, maka volumenya mendekati tak berhingga sehingga pada persamaan di atas perkalian  $Pv$  mendekati koefisien virial pertama  $A$ . Dengan bantuan konsep suhu diperoleh hubungan  $A=RT$ , dimana  $R$  adalah tetapan gas universal. Dengan demikian persamaan gas nyata meenjadi

$$(P v)/(R T) = 1 + (B/v) + (C/v^2) + (D/v^3) + \dots$$

Kemuaian volum didefinisikan sebagai

$$\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (\text{satuan } K^{-1})$$

Ketermampatan isothermal didefinisikan sebagai

$$\kappa = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \quad (\text{satuan } Pa^{-1})$$

### 8. Dua Hubungan Penting antara Deferensial Parsial

Ada dua teorema matematik sederhana yang digunakan dalam termodinamika yaitu:

$$\left( \frac{\partial x}{\partial y} \right)_z = \frac{1}{\left( \frac{\partial y}{\partial x} \right)_z}$$

$$\left( \frac{\partial x}{\partial y} \right)_z \left( \frac{\partial y}{\partial z} \right)_x \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)_y = -1$$

Semisal:  $\left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T = \frac{1}{\left( \frac{\partial P}{\partial V} \right)_T}$

$$\left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_V \left( \frac{\partial P}{\partial V} \right)_T = -1$$

Hubungan ini berlaku siklis.

### 9. Kuantitas Intensif dan Ekstensif

Sistem dalam kesetimbangan dibagi menjadi dua bagian yang sama, masing-masing dengan massa yang sama pula. Kuantitas dalam bagian sistem yang tetap sama disebut intensif sedangkan kuantitas yang menjadi separuhnya disebut ekstensif, seperti ditunjukkan pada gambar berikut

P	P
T	T
1/2V	1/2V

**Koordinat intensif** tidak bergantung massa sistem sedangkan **koordinat ekstensif** bergantung massa sistem.

### C. Ringkasan

- (1) **Termodinamika** adalah ilmu pengetahuan empiris yang berusaha mendapatkan rumusan dan kaitan-kaitan antara besaran fisis tertentu yang menggambarkan perilaku zat akibat pengaruh kalor.
- (2) **Kesetimbangan termal**, yaitu keadaan yang dicapai oleh dua (atau lebih) sistem yang dicirikan oleh keterbatasan harga koordinat sistem itu setelah sistem saling berinteraksi melalui dinding diaterm, pada keadaan ini suhu kedua sistem sama.
- (3) Keadaan **setimbang termodinamik** dicapai apabila tiga syarat kesetimbangan dipenuhi yaitu setimbang mekanik, setimbang kimiawi dan setimbang termal.
- (4) Sifat yang menjamin bahwa sistem dalam kesetimbangan termal dengan sistem lain disebut **suhu**.
- (5) Konversi dari tekanan pengukuran menjadi tekanan absolut mengikuti hubungan :

$$P_{abs} = P_{pengukuran} + P_{atm}$$

- (6) Jika  $z$  adalah fungsi yang memang ada, maka  $dz$  disebut deferensial eksak dan berlaku **syarat Euler**

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)_y \right]_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right)_x \right]_y \quad \text{atau} \quad \left( \frac{\partial M}{\partial y} \right)_x = \left( \frac{\partial N}{\partial x} \right)_y$$

Suatu fungsi yang memenuhi persamaan diatas disebut **fungsi keadaan**.

- (7) Perubahan infinit dari satu keadaan setimbang ke keadaan setimbang lain menyangkut  $dV$ ,  $dT$  dan  $dP$  misalnya  $V = V(T,P)$  perubahan infinitnya menggunakan deferensial parsial

$$dV = (\partial V / \partial T)_P dT + (\partial V / \partial P)_T dP$$

- (8) Kemuaian volum didefinisikan sebagai

$$\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \quad (\text{satuan } K^{-1})$$

Ketermampatan isothermal didefinisikan sebagai

$$\kappa = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \quad (\text{satuan } Pa^{-1})$$

- (9) Dua hubungan penting deferensial parsial

$$\left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z = \frac{1}{\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_z}$$

$$\left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)_x \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_y = -1$$

(10) **Koordinat intensif** tidak bergantung massa sistem sedangkan **koordinat ekstensif** bergantung massa sistem

#### D. Contoh Soal Berbasis Penyelesaian Eksplisit

##### Contoh 1

Sistem A, B dan C adalah gas dengan koordinat masing-masing  $P, V; P', V'; P'', V''$ . A dan C dalam kesetimbangan termal dan memenuhi persamaan  $PV - aP - P''V'' = 0$ . Bila B dan C dalam kesetimbangan termal memenuhi persamaan  $P'V' - P''V'' + bP''V''/b = 0$ . Tentukan fungsi yang menunjukkan kesetimbangan antara A, B dan C yang sama dengan suhu empiris.

Langkah 1: Memfokuskan masalah

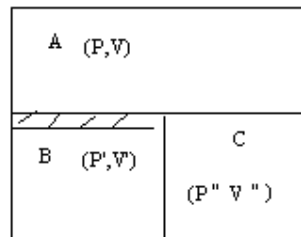
Diketahui:  $f_A = (P, V)$

$f_B = (P', V')$

$f_C = (P'', V'')$

Ditentukan  $t = f_A = f_B = f_C$

Sket keadaan Sistem:



Langkah 2: Menggambarkan keadaan fisis

A-C setimbang termal maka dicapai suatu keadaan dimana suhu kedua sistem ini sama

B-C setimbang termal maka dicapai suatu keadaan dimana suhu kedua sistem ini sama

Langkah 3: Merencanakan Penyelesaian

Diasumsikan ketiga sistem tersebut tersekat termal sehingga tidak ada interaksi kalor dengan lingkungan. Interaksi kalor hanya terjadi antara tiga sistem tersebut.

Langkah 4: Penyelesaian

A-C setimbang termal

$$f_{AC} = PV - aP - P''V'' = 0$$

$$P(V - a) = P''V''$$

$$f_A = f_C$$

B-C setimbang termal

$$f_{BC} = P'V' - P''V'' + b P''V''/b = 0$$

$$P'V' / \{1 - (b/V^2)\} = P''V''$$

$$f_B = f_C$$

$$f_A = f_B = f_C = P(V - a) = P'V' / \{1 - (b/V^2)\} = P''V'' = t$$

Langkah 5: Pengecekan hasil

Jawaban sesuai.

## Contoh 2

Persamaan keadaan gas ideal adalah  $Pv = RT$ . Tentukan koefisien muai volum dan kompresibilitasnya

Langkah 1: Memfokuskan masalah

Diketahui: persamaan gas ideal  $Pv = RT$

Ditentukan:  $\beta$  dan  $\kappa$

Langkah 2: Menggambarkan keadaan fisis

Gas ideal adalah sistem hidrostatis dengan koordinat  $(P, V, T)$ . Sistem ini bisa mengalami pemuaiian dan juga dapat dikompresi.

Langkah 3: Merencanakan penyelesaian

Mengacu pada definisi  $\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$  dan  $\kappa = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$

Langkah 4: Penyelesaian

$$v = RT/P$$

$$\left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = R/P$$

$$\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = R/Pv = 1/T$$

$$\left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T = -RT/P^2$$

$$\kappa = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T = - \left\{ -RT / vP^2 \right\} = 1/P$$

Langkah 5: Pengecekan hasil

Jawaban terbukti

### Contoh 3

Interaksi kalor dengan suatu sistem diungkapkan dengan persamaan yang dinyatakan sebagai fungsi T dan V berikut

$$dq = f(T)dT + \frac{RT}{v} dv$$

dengan R suatu konstanta dan T dan v menyatakan suhu dan volume spesifik sistem. Apakah dq merupakan deferensial eksak?

Langkah 1:

Diketahui fungsi  $dq = f(T)dT + \frac{RT}{v} dv$

Ditentukan: membuktikan dq bersifat eksak

Langkah 2:

Mengambarkan keadaan fisis

Sistem hidrostatis dengan koordinat (P,v,T), dalam hal ini v dan T dipilih sebagai variabel bebas.

Langkah 3: merencanakan penyelesaian

Untuk membuktikan dq eksak digunakan syarat Euler  $\left( \frac{\partial M}{\partial y} \right)_x = \left( \frac{\partial N}{\partial x} \right)_y$

Langkah 4: Penyelesaian

$$dq = f(T)dT + \frac{RT}{v} dv$$

$$M = f(T) \text{ dan } N = RT/v$$

syarat Euler  $\left( \frac{\partial M}{\partial v} \right)_T = \left( \frac{\partial N}{\partial T} \right)_v$

$$\frac{\partial f(T)}{\partial v} = 0 \quad \text{dan} \quad \frac{\partial (RT/v)}{\partial T} = \frac{R}{v}$$

Karena  $0 \neq R/v$ , maka dq bukan deferensial eksak. Artinya tidak ada fungsi keadaan yang memiliki deferensial sama dengan δq.

Langkah 5: Pengecekan hasil

Jawaban terbukti, sebab q (kalor ) memang bukan fungsi keadaan.

#### Contoh 4

Hubungan P-v-T suatu gas dinyatakan  $P(v-b) = RT$ , dengan R dan b konstanta.

Tunjukkan bahwa tekanan P merupakan fungsi keadaan atau koordinat sistem.

Langkah 1: Memfokuskan masalah

Diketahui: persamaan keadaan gas  $P(v-b) = RT$

Ditentukan: membuktikan bahwa P fungsi keadaan

Langkah 2: Menggambarkan keadaan fisis

Gas sebagai sistem hidrostatis dengan koordinat (P,v,T). karena P merupakan koordinat sistem seharusnya dP adalah defersial eksak dan P fungsi keadaan.

Langkah 3: Merencanakan Penyelesaian

Untuk membuktikan dq eksak digunakan syarat Euler  $\left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)_x = \left(\frac{\partial N}{\partial x}\right)_y$

Langkah 4: Penyelesaian

Dari  $P = f(v,T)$

$$dp = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T dv$$

karena  $p = RT/(v-b)$  maka

$$M = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \frac{R}{v-b} \quad \text{dan} \quad \left(\frac{\partial^2 p}{\partial v \partial T}\right) = -\frac{R}{(v-b)^2}$$

$$N = \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T = -\frac{RT}{(v-b)^2} \quad \text{dan} \quad \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T \partial v}\right) = -\frac{R}{(v-b)^2}$$

Karena  $\left(\frac{\partial^2 p}{\partial v \partial T}\right) = \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T \partial v}\right)$ , syarat Euler dipenuhi maka p merupakan fungsi

keadaan

Langkah 5: Pengecekan hasil

Jawaban terbukti (sesuai)

#### Contoh 5

Udara pada suhu  $25^{\circ}\text{C}$  dan tekanan 101, 325 kpa. Jika konstanta gas  $R=287$  J/kg.K, tentukan volume spsifik dan massa molar gas ini, anggap sebagai gas Ideal.

Langkah 1: Memfokuskan masalah



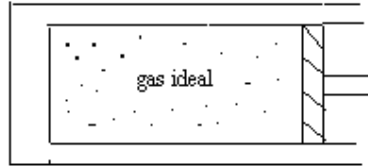
Diketahui:  $T = 25 + 273 = 298\text{K}$

$P = 101,325 \text{ kpa}$

$R = 287 \text{ J/kgK}$

Ditentukan:  $v$  dan  $m$

Sket keadaan sistem



Langkah 2: Menggambarkan keadaan sistem

Udara di dalam suatu sistem tertutup sehingga massa tak berubah

Langkah 3: Merencanakan Penyelesaian

Udara dianggap gas ideal sehingga berlaku persamaan  $pv = RT$

Langkah 4: Penyelesaian

$$pv = RT$$

$$(101,325 \text{ kpa})v = (0,287 \text{ kJ/kg K}) [25+273,15] \text{ K}$$

$$v = 0,8445 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

$$\begin{aligned} \text{massa molar} = M &= \frac{\bar{R}}{R} = \frac{8314,4 \text{ J/kg.molK}}{287 \text{ J/kgK}} \\ &= 28,97 \text{ kg/kg-mol} \end{aligned}$$

Langkah 5: Pengecekan Hasil

Volume spesifik  $v = 0,8445 \text{ m}^3/\text{kg}$  dan massa molar  $M = 28,97 \text{ kg/kg-mol}$  ( besar dan satuan sesuai)

### Contoh 6

Koefisien kompresibilitas isothermal air pada  $10^0\text{C}$  dan tekanan atmosfer adalah  $50 \times 10^{-6} \text{ atm}^{-1}$  Berapakah tekanan absolut yang diperlukan untuk menurunkan volumenya sekitar 5% pada suhu yang sama?

Langkah 1: Memfokuskan masalah

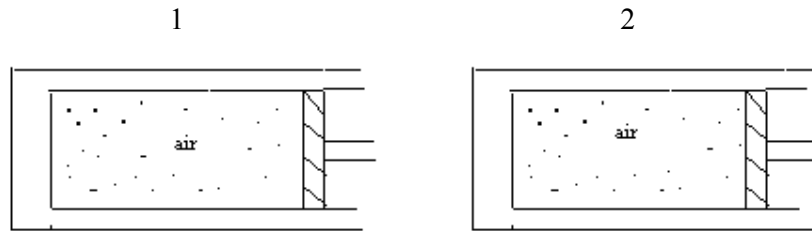
$$\text{Diketahui: } K = -\frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T = 50 \times 10^{-6} \text{ atm}^{-1}$$

$$V_1 = v$$

$$V_2 = 0,95v$$

Ditntukan: Tekanan absolut

Sket keadaan sistem:



**Langkah 2:** Menggambarkan keadaan fisis

Air dikompresi secara isothermal sehingga volumenya turun 5% dari awalnya, sehingga tekanan absolutnya naik.

Langkah 3: Merencanakan penyelesaian

Mengacu pada definisi kompresibilitas

Langkah 4: Penyelesaian

$$\text{Koefisien kompresibilitas } K = -\frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T = 50 \times 10^{-6} \text{ atm}^{-1}$$

Dengan pemisahan variabel dan diintegrasikan memberikan :

$$\int_{p=1 \text{ atm}}^p dp = -(2 \times 10^4) \text{ atm} \int_v^{0,95v} \frac{dv}{v} = -(2 \times 10^4) \ln 0,95$$

$$= 1026 \text{ atm}$$

Langkah 5: Pengecekan hasil

Tekanan absolut yang harus diberikan adalah  $1026+1=1027$  atm (besar dan satuan) sesuai

### Contoh 7

Uraikan persamaan gas ideal dalam bentuk virial dan tentukan koefisien-koefisien virialnya.

Langkah 1: Memfokuskan masalah

Diketahui: Persamaan gas ideal  $Pv = RT$

Ditentukan: persamaan bentuk virial dan koefisien virial

Langkah 2: Menggambarkan keadaan fisis

Persamaan keadaan gas ideal atau gas yang lain dapat dinyatakan dalam bentuk umum yaitu bentuk virial

Langkah 3: Merencanakan penyelesaian

Mengacu pada bentuk persamaan virial  $Pv = RT + B'P + C'P^2 + D'P^3 + \dots$

Langkah 4: Penyelesaian

$$Pv = RT + B'P + C'P^2 + D'P^3 + \dots$$

Persamaan gas ideal  $Pv = RT$        $P = RT/v$

$$Pv = RT + B'(RT/v) + C'(RT/v)^2 + D'(RT/v)^3 + \dots$$

$$Pv = RT \{1 + B'/v + C'RT/v^2 + D'(RT)^2/v^3 + \dots\}$$

Diperoleh koefisien virial

$$A = 1$$

$$B = B'$$

$$C = C'RT$$

$$D = D'(RT)^2 \text{ dst.}$$

### E. Soal-soal Latihan/Tugas

**Untuk** melatih pemahaman konsep anda tentang materi bab I, kerjakan soal-soal berikut menggunakan langkah-langkah pemecahan masalah seperti pada contoh soal.

1.1 Sistem A dan B adalah garam paramagnetik dengan koordinat masing-masing  $H, M$  dan  $H', M'$ . Sistem C adalah gas dengan koordinat  $P, V$ . Bila A dan C dalam kesetimbangan termal, persamaan berikut dipenuhi

$$4\pi nRC_c H - MPV = 0$$

Bila B dan C dalam kesetimbangan termal memenuhi

$$nR\Theta M' + 4\pi nRC'_c H' - M'PV = 0$$

Dengan  $n, R, C_c, C'_c$  dan  $\Theta$

Tentukan tiga fungsi yang sama dengan suhu empiris

1.2 Persamaan gas ideal dinyatakan  $Pv = RT$ . Unjukkan bahwa

a.  $\beta = \frac{1}{T}$

b.  $\kappa = \frac{1}{P}$

1.3 a. Tunjukkan bahwa kemuaian isovolum juga bisa dinyatakan sebagai

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \text{ dengan } \rho \text{ menyatakan kerapatan}$$

b. Tunjukkan bahwa ketertampatan isoterm bisa dinyatakan sebagai

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T$$

1.4 Sebuah silinder dilengkapi dengan piston yang dapat bergerak berisi gas ideal pada tekanan  $P_1$ , volume spesifik  $v_1$  dan suhu  $T_1$ . Tekana dan volume secara bersama-sama dinaikkan sedemikian hingga pada setiap  $P$  dan  $v$  memenuhi persamaan  $P = Av$ , dengan  $A$  tetapan.

- Nyatakan tetapan  $A$  dalam  $P_1$ ,  $T_1$  dan konstanta Gas  $R$
- Tentukan suhu ketika volumenya menjadi 2 kalinya dan  $T_1 = 200K$

1.5 Sebuah logam memiliki  $\beta = 5 \times 10^{-5} K^{-1}$  dan  $\kappa = 1,2 \times 10^{-11} Pa^{-1}$ , berada pada tekanan  $1 \times 10^5 Pa$  dan suhu  $20^\circ C$ . Logam ini dilingkupi secara pas oleh invar tebal yang  $\beta$  dan  $\kappa$  dapat diabaikan.

- Tentukan tekanan akhir jika suhunya dinaikkan  $44^\circ C$ .
- Jika invar penutup dapat menahan tekanan maksimum  $1,2 \times 10^8 Pa$ , tentukan suhu tertinggi sistem

1.6 Sebuah tangki volumenya  $0,5m^3$  berisi oksigen pada tekanan  $1,5 \times 10^6 N/m^2$  dan temperaur  $20^\circ C$ . Anggap oksigen sebagai gas ideal.

- Tentukan berapa kilomol oksigen di dalam tangki
- Berapa kg?
- Tentukan tekanan jika suhu dinaikkan hingga  $500^\circ C$
- Pada suhu  $20^\circ C$ , berapa jumlah kilomol oksigen yang dikeluarkan dari tangki sebelum tekanan turun hingga 10% dari tekanan awalnya.

1.7 Jika  $dU$  adalah fungsi dari tiga properti  $x, y$  dan  $z$  sehingga

$$dU = M dx + N dy + P dz$$

dengan  $M, N$  dan  $P$  fungsi dari  $x, y$  dan  $z$ .

Buktikan bahwa syarat berikut perlu agar  $dU$  menjadi deferensial eksak.

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial N}{\partial z} \quad \frac{\partial M}{\partial z} = \frac{\partial P}{\partial x} \quad \frac{\partial N}{\partial x} = \frac{\partial M}{\partial y}$$

1.8 Deferensial tekanan dari suatu gas tertentu dinyatakan oleh salah satu persamaan berikut:

$$dp = \frac{2RT}{(v-b)^2} dv + \frac{R}{v-b} dT \quad \text{atau}$$

$$dp = -\frac{RT}{(v-b)^2} dv + \frac{R}{v-b} dT$$

Identifikasikan persamaan mana yang benar dan tentukan persamaan keadaan gas tersebut

1.9 Persamaan keadaan van der Waals adalah:

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2} \text{ dengan } a \text{ dan } b \text{ suatu konstanta.}$$

Tentukan:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T ; \quad \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p ; \quad \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v$$

- 1.10 Tekanan pengukuran terbaca 620 mmHg. Jika tekanan barometer 760 mmHg tentukan tekanan absolut dalam SI.
- 1.11 Hitunglah ketinggian kolom air yang ekuivalen dengan tekanan atmosfer 101,325 kPa jika suhu air 15<sup>0</sup>C. Tentukan ketinggiannya jika air diganti Hg (merkuri).
- 1.12 Tentukan berat udara pada atmosfer yang mengelilingi bumi jika tekanan pada setiap tempat pada permukaan bumi 101,325 kPa. Anggaplah bumi adalah bola dengan diameter 13000 km.
- 1.13 Sifat termometrik x (panjang kolom Hg pada termometer gelas) sama dengan 8 cm dan 50 cm ketika termometer berada pada titik es dan titik uap. Suhu T bervariasi secara linier dengan x. Anggaplah suhu T\* dengan skala celcius dinyatakan dengan persamaan  $T^* = a + bx^2$ , dengan  $T^* = 0^0$  dan  $100^0$  pada titik es dan titik uap, dan a, b suatu konstanta. Tentukan suhu T\* jika suhu T 40<sup>0</sup>C.
- 1.14 Sebuah balon berisi gas ideal yang mempunyai volume 0,2 m<sup>3</sup>. Suhu dan tekanan gas adalah 15<sup>0</sup>C dan 101,325 kPa. Jika gas dipanasi hingga 60<sup>0</sup>C, tentukan tekanan yang harus diberikan agar volume tetap konstan.
- 1.15 Udara pada tekanan 1 atm dan suhu 300<sup>0</sup>K dimampatkan secara isotermal dari volume 100 m<sup>3</sup> hingga 5 m<sup>3</sup>. Tentukan massa udara dan tekanan akhirnya.
- 1.16 Dua tangki dihubungkan dengan suatu katup. Salah satu tangki berisi 1 kg gas nitrogen pada 60<sup>0</sup>C dan 60 kPa. Tangki yang lain berisi 0,4 kg gas yang sama pada suhu 35<sup>0</sup>C dan 200 kPa. Katup dibuka dan gas bercampur. Jika suhu kesetimbangan 50<sup>0</sup>C, tentukan tekanan kesetimbangan akhir.

1.17 Tentukan nilai konstanta gas universal jika 1 kg-mol gas menempati volume 22,41 m<sup>3</sup> pada 0<sup>0</sup>C dan tekanan atmosfer standar.

1.18 Buktikan bahwa:

$$\left[ \frac{\partial \beta}{\partial p} \right]_T = - \left[ \frac{\partial \kappa}{\partial T} \right]_p$$

1.19 Koefisien muai volum dan koefisien keternampatan didefinisikan sebagai:

$$\beta = \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad \text{dan} \quad \kappa = - \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T$$

tentukan  $(\partial p / \partial T)_v$  untuk gas ideal dinyatakan dalam  $\beta$  dan  $\kappa$ .

1.20 Koefisien muai volum dan koefisien keternampatan untuk bahan tertentu dinyatakan:

$$\beta = \frac{2bT}{v} \quad \text{dan} \quad \kappa = \frac{a}{v}$$

dengan a dan b konstanta. Tentukan persamaan keadaan bahan ini.

## BAB II

### KERJA

#### A. Pendahuluan

Pada bab ini anda akan mempelajari konsep tentang kerja. Pemahaman yang baik konsep ini akan membantu anda untuk memahami bab selanjutnya tentang konsep kalor dan Hukum I Termodinamika.

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan memiliki kompetensi:

1. Memahami pengertian proses kuasistatis
2. Mendefinisikan konsep kerja dalam termodinamika
3. Memahami pengertian kerja-kuasistatis
4. Dapat mengaplikasikan konsep kerja pada beberapa sistem termodinamik
5. Terampil menyelesaikan soal menggunakan penyelesaian berbasis eksplisit

**Kata kunci:** Proses kuasistatis, kerja , penyelesaian eksplisit

#### B. Uraian Materi

##### 1. Proses Kuasistatis

Sistem yang berada dalam kesetimbangan akan tetap mempertahankan keadaan itu. Untuk mengubah keadaan kesetimbangan ini diperlukan pengaruh

dari luar, artinya **sistem harus berinteraksi dengan lingkungannya**. Dalam termodinamika dikenal tiga cara interaksi yaitu: melalui kerja luar, pertukaran kalor, dan melalui keduanya.

Perubahan yang dialami sistem dari interaksi itu dianggap berlangsung **secara kuasistatis, artinya perubahan itu dicapai dalam tahapan yang sangat kecil (infinitesimal) sedemikian sehingga sistem senantiasa pada setiap saat proses tsb berlangsung, berada dalam keadaan setimbang termodinamik**. Hal ini berarti pada tahapan proses tetap dapat digambarkan oleh persamaan keadaannya.

Semisal, jika volume gas diperbesar secara kuasistatis, volumenya ditambah sedikit demi sedikit serara berkesinambungan hingga perubahan yang diinginkan dicapai, dan pada setiap saat berlaku persamaan  $f(P, V, T) = 0$  tetap berlaku. Seandainya perubahan volum itu berlangsung secara **non-kuasistatik**, maka volume gas diperbesar **secara mendadak**, di dalam gas akan terjadi aliran-aliran turbulen, gesekan, yang keduanya menyebabkan keadaan taksetimbang. Dalam kondisi ini tidak ada persamaan yang dapat menggambarkan keadaan sistem.

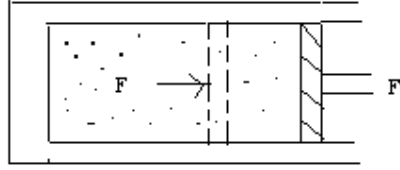
Meskipun proses kuasistatis tidak kita jumpai di alam, idealisasi akan selalu digunakan dalam termodinamika, karena proses ini sebenarnya dapat didekati sebaik-baiknya dengan mengkondisikan pengaturan-pengaturan lingkungan seperlunya.

## 2. Kerja Kuasistatis

Kerja pada umumnya (dalam Mekanika) didefinisikan sebagai hasil kali antara gaya yang bekerja ( $F$ ) dan pergeseran dalam arah gaya ( $x$ ).

Kerja dalam termodinamika melibatkan interaksi antara sistem (objek yang di tinjau) dengan lingkungannya (sistem lain yang berinteraksi dengan sistem yang diselidiki) jadi hanya mengenai kerja luar.

Semisal, suatu gas di dalam tabung yang dilengkapi piston tanpa massa, tanpa gesekan. Jelas bahwa untuk mendorong piston ke luar mendorong udara diperlukan kerja. Agar sistem dapat dikatakan melakukan kerja luar, maka harus ada ada sesuatu yang harus dilawan, misalnya gesekan, tekanan udara luar.



Gas dalam silinder mempunyai koordinat  $P, V, T$ .

Gas melakukan gaya pada piston sebesar  $\vec{F} = PA\hat{x}$

Sedangkan udara luar melakukan gaya  $F'$  pada piston. Misalnya  $F > F'$ , maka piston akan terdorong keluar. Setelah bergerak sejauh  $dx$ , sistem (gas) telah melakukan kerja  $dW$ , yang menurut Mekanika dinyatakan:

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{x} = Fdx = PA dx = PdV$$

**Hal penting yang harus diperhatikan:**

**(1) Rumus ini berlaku untuk proses kuasistatis maupun non-kuasistatis.**

Untuk proses kuasistatis,  $P$  dapat diperoleh dari persamaan keadaan sistem yang berlaku (untuk gas ideal  $P = nRT/V$ ).

Untuk proses non-kuasistatis, tidak ada persamaan keadaan yang menggambarkan keadaan sistem, dalam hal ini secara pendekatan diambil  $P$  pada akhir proses.

**(2) Bahwa  $dW$  tidak diperoleh dengan mendiferensiasi suatu fungsi  $W$ .**

Ini berarti  $dW$  bukan diferensial eksak.  $dW$  dimaknai kerja luar dalam jumlah yang sangat kecil (infinitesimal)

**(3) Perjanjian tanda untuk  $W$**

Bila sistem (gas) mengembang (ekspansi), maka  $dV$  positif, dan sistem melakukan kerja pada lingkungan, kerja ini dihitung negatif, jadi rumusan untuk  $dW$  selanjutnya dinyatakan:

$$dW = -PdV$$

perjanjian tanda ini sesuai dengan perjanjian yang ada di Fisika maupun Kimia, dimana kerja dihitung negatif apabila energi keluar dari sistem.

Bila gas ditekan (dikompresi)  $dV$  negatif, maka  $dW$  positif, dan sistem dikenai kerja dari lingkungan. Jadi dapat dinyatakan:

Sistem melakukan kerja  $dW$  negatif (tanda -)

Sistem dikenai kerja  $dW$  positif (tanda +)



Kerja dalam sistem SI diberi satuan Joule (J) Sering dalam suatu situasi menyatakan kerja tiap satuan masa sistem atau kerja spesifik yang didefinisikan

$$w = \frac{W}{m} \quad (\text{dalam J/kg})$$

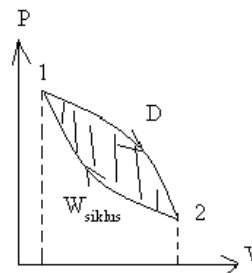
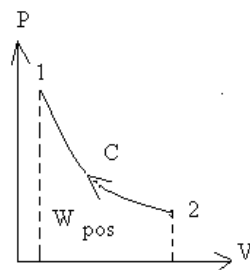
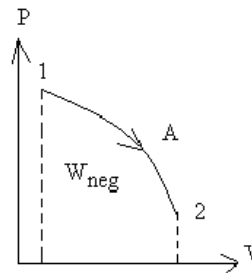
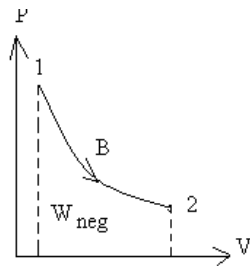
### 3. Kerja Bergantung Pada Lintasan

Kerja pada sistem hidrostatis secara grafik dapat digambarkan pada diagram P-V.

Berikut disajikan 4 proses yang berbeda yaitu: proses ekspansi (lintasan A), proses ekspansi (lintasan B), proses kompresi ( lintasan C), dan proses bersiklus (lintasan tertutup D). Pada diagram P-V, jumlah kerja pada masing-masing lintasan sama dengan luasan dibawah lintasan (kurva) proses.

Kerja pada lintasan A = luasan dibawah kurva A, bertanda negatif (kerja dilakukan oleh sistem).

Kerja pada lintasan B = luasan dibawah kurva B, bertanda negatif (kerja dilakukan oleh sistem).



Jelas bahwa besarnya luasan dibawah kurva A lebih besar daripada luasan dibawah kurva B, maka kerja yang dilakukan sistem pada lintasan A lebih besar daripada pada lintasan B. Ini menunjukkan bahwa meskipun keadaan awal dan keadaan akhir kedua proses sama tetapi lintasan prosesnya berbeda

maka kerjanya juga berbeda. Jadi kerja selain bergantung pada keadaan awal dan akhir juga bergantung pada lintasan.

Kerja pada lintasan C = luasan dibawah kurva C, bertanda positif (kerja dilakukan pada sistem).

Tampak bahwa luasan dibawah kurva B = luasan dibawah kurva C, hanya berbeda tanda. Jadi  $W_B = -W_C$  atau  $W_C = -W_B$ .

Kerja pada lintasan tertutup D = luasan siklus, bertanda negatif ( kerja dilakukan oleh sistem)

$$W_{\text{siklus}} = W_{\text{netto}} = W_A + W_C$$

#### 4. Kerja pada Beberapa Sistem Termodinamik Sederhana

##### a. Kerja pada sistem hidrostatik

Sistem hidrostatik adalah sistem yang keadaannya dapat digambarkan dengan koordinat termodinamik (P, V, T) masing-masing dalam satuan (N/m<sup>2</sup>, m<sup>3</sup>, K)

Kerja infinitesimal (proses kuasistatis/kuasi-setimbang) dinyatakan

$$\delta W = -PdV$$

Untuk proses kuasistatis berhingga dengan perubahan volume dari V<sub>1</sub> ke V<sub>2</sub>

Kerja dapat dihitung

$$W_{12} = -\int_1^2 PdV \quad (\text{dalam Joule})$$

##### b. Kerja untuk Mengubah Panjang Seutas Kawat

Sistem kawat teregang keadaannya digambarkan dengan koordinat termodinamik (gaya tegang F, L, T) masing-masing dalam satuan (N, m, K).

Jika seutas kawat ditarik dengan gaya F panjangnya berubah dari L menjadi L+dL, kerja infinitesimal yang dilakukan pada kawat

$$W = F dL$$

Untuk dL positif, W bertanda positif artinya kerja dilakukan pada kawat

Untuk perubahan panjang kawat tertentu dari L<sub>1</sub> ke L<sub>2</sub> kerja yang dilakukan

$$W_{12} = \int_1^2 FdL \quad (\text{dalam Joule})$$

##### c. Kerja untuk Mengubah Luas Bidang Selaput Permukaan

Sistem selaput permukaan keadaannya dapat digambarkan dengan koordinat termodinamik (tegangan permukaan  $S$ ,  $A$ ,  $T$ ) masing-masing dalam satuan ( $N/m$ ,  $m^2$ ,  $K$ ).

Kerja untuk mengubah luasan selaput permukaan sejumlah  $dA$  dinyatakan

$$\delta W = S dA$$

Untuk perubahan luasan berhingga dari  $A_1$  ke  $A_2$

$$W_{12} = \int_1^2 S dA \quad (\text{dalam Joule})$$

#### d. Kerja untuk Mengubah Muatan Sel Terbalikkan

Sistem sel terbalikkan keadaannya dapat digambarkan dengan koordinat termodinamik (elektromotansi  $\varepsilon$ ,  $Z$ ,  $T$ ) masing-masing dalam satuan (Volt, C, K)

Pada proses pemuatan sel terbalikkan (pengisian) kerja yang dilakukan pada sistem dinyatakan

$$\delta W = \varepsilon dZ$$

Pada proses pelucutan  $dZ$  bertanda negatif, kerja dilakukan oleh system.

Pada proses pemuatan  $dZ$  bertanda positif, kerja dilakukan pada system.

Jika terdapat perubahan berhingga dari  $Z_1$  ke  $Z_2$  kerja yang dilakukan system

$$W_{12} = \int_1^2 \varepsilon dZ \quad (\text{dalam Joule})$$

#### e. Kerja untuk Mengubah polarisasi Padatan Dielektrik

Sistem lempengan dielektrik keadaannya dapat digambarkan dengan koordinat termodinamik (medan listrik  $E$ ,  $P$ ,  $T$ ) masing-masing dalam satuan ( $V/m$ ,  $C-m$ ,  $K$ ).

Kerja yang dilakukan untuk menaikkan polarisasi padatan dielektrik sejumlah  $dP$  dinyatakan

$$\delta W = E dP$$

Jika polarisasi diubah sejumlah tertentu dari  $P_1$  ke  $P_2$  kerjanya

$$W_{12} = \int_1^2 E dP \quad (\text{dalam Joule})$$

#### f. Kerja untuk Mengubah Magnetisasi Padatan Magnetik

Sistem padatan magnetik keadaannya dapat digambarkan dengan koordinat termodinamik ( intensitas magnetic H, momen magnetic total M, T) masing-masing dalam satuan ( A/m, A m<sup>2</sup>, K).

Kerja yang dilakukan untuk menaikkan magnetisasi bahan sejumlah dM dinyatakan

$$\delta W = \mu_0 H dM$$

Jika magnetisasi diubah sejumlah tertentu dari M<sub>1</sub> ke M<sub>2</sub> diperlukan kerja

$$W_{12} = \mu_0 \int_1^2 H dM \quad (\text{dalam Joule})$$

### C. Ringkasan

- (1) Proses secara kuasistatis adalah proses perubahan yang dicapai dalam tahapan yang sangat kecil (infinitesimal) sedemikian sehingga sistem senantiasa pada setiap saat proses tsb berlangsung, berada dalam keadaan setimbang termodinamik.
- (2) Perjanjian tanda untuk dW:  
 Sistem melakukan kerja dW negatif (tanda -)  
 Sistem dikenai kerja dW positif ( tanda +)
- (3) Besarnya kerja bergantung pada lintasan (prosesnya) artinya untuk mengubah keadaan sistem dari keadaan awal i ke keadaan akhir f yang sama bergantung pada lintasan proses yang menghubungkan kedua keadaan tersebut. Untuk lintasan berbeda besarnya W juga berbeda.
- (4) Rumusan matematis dW untuk beberapa sistem termodinamik:

$$\delta W = -PdV \quad \text{dan} \quad W_{12} = -\int_1^2 PdV \quad (\text{sistem hidrostatik})$$

$$\delta W = F dL \quad \text{dan} \quad W_{12} = \int_1^2 F dL \quad (\text{sistem kawat})$$

$$\delta W = S dA \quad \text{dan} \quad W_{12} = \int_1^2 S dA \quad (\text{sistem selaput permukaan})$$

$$\delta W = \epsilon dZ \quad \text{dan} \quad W_{12} = \int_1^2 \epsilon dZ \quad (\text{sistem sel listrik})$$

$$\delta W = E dP \quad \text{dan} \quad W_{12} = \int_1^2 E dP \quad (\text{sistem dielektrik})$$

$$\delta W = \mu_0 H dM \text{ dan } W_{12} = \mu_0 \int_1^2 H dM \quad (\text{sistem magnetik})$$

### D. Contoh Soal Berbasis Penyelesaian Eksplisit

#### Contoh 1

Suatu sistem gas dalam silinder dilengkapi oleh piston yang di atasnya diletakkan beban kecil-kecil. Tekanan awal 200 kPa dan volume awal  $0,04 \text{ m}^3$ . Pembakar bunsen diletakkan dibawah silinder yang mengakibatkan volume gas naik menjadi  $0,1 \text{ m}^3$  sedangkan tekanannya tetap. Hitunglah kerja yang dilakukan oleh sistem selama proses tersebut.

#### Langkah 1: Memfokuskan Masalah

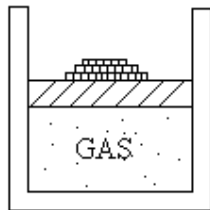
Diketahui:  $P_1 = 200 \text{ kPa} = 2 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = P_2$  (proses isobarik)

$$V_1 = 4 \times 10^{-2} \text{ m}^3$$

$$V_2 = 10 \times 10^{-2} \text{ m}^3$$

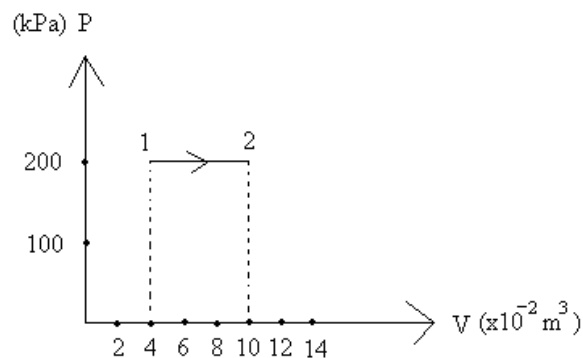
Ditentukan: Kerja yang dilakukan sistem (W) selama proses isobarik

Sket keadaan sistem:



#### Langkah 2: Menggambarkan keadaan fisis (proses)

Proses yang dialami sistem digambarkan pada diagram P-V



#### Langkah 3: Merencanakan penyelesaian

**Asumsi:** (1) Gas dianggap sebagai sistem tertutup

(2) Proses yang dialami sistem berlangsung secara kuasi-setimbang sehingga berlaku persamaan matematik  $dW = - P dV$

**Langkah 4:** Penyelesaian

$$W_{12} = -\int_1^2 P dV$$

Karena selama proses berlangsung tekanan sistem tetap, maka P bisa keluar dari tanda integral dan menjadi

$$\begin{aligned} W_{12} &= -P \int_1^2 dV = -P(V_2 - V_1) \\ &= -200 \text{ kPa} \times (10 \times 10^{-2} - 4 \times 10^{-2}) \text{ m}^3 \\ &= -12 \text{ kJ} \end{aligned}$$

**Langkah 5:** Pengecekan Hasil

kerja yang dilakukan sistem selama proses isobarik sebesar 12 kJ ( besar dan satuan sesuai)

### Contoh 2

Udara di dalam silinder berpiston masanya 2 kg, berekspansi secara reversibel isoterm pada temperatur 300K dari volume  $2 \text{ m}^3$  menjadi  $4 \text{ m}^3$ . Hitunglah kerja yang dilakukan sistem.

**Langkah 1:** Memfokuskan masalah

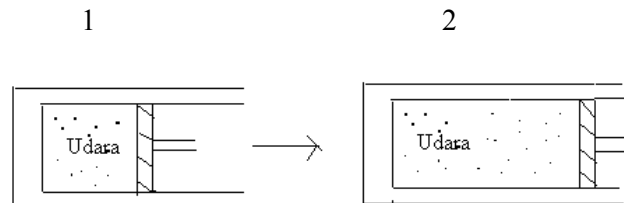
Diketahui:  $T_1 = 300 \text{ K} = T_2$  (proses isoterm)

$$V_1 = 2 \text{ m}^3$$

$$V_2 = 4 \text{ m}^3$$

Ditentukan: Kerja yang dilakukan sistem selama proses isoterm

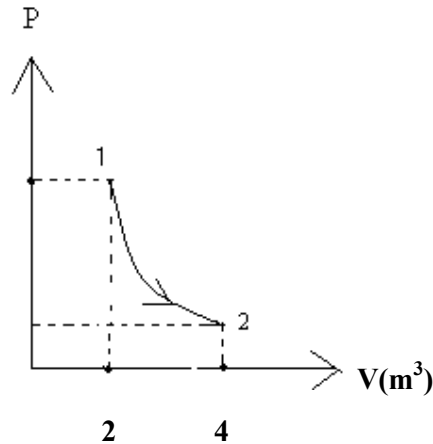
Sket keadaan sistem:



**Langkah 2:** Menggambarkan keadaan fisis (proses)

Proses yang dialami sistem secara isoterm berlaku  $PV = \text{Konstan}$

Apabila digambarkan pada diagram P-V



**Langkah 3:** Merencanakan penyelesaian

Asumsi: (1) Udara sebagai sistem tertutup

(2) Udara dianggap sebagai gas ideal maka berlaku  $PV = mRT$

(3) Sistem menjalani proses secara kuasi-setimbang maka berlaku

$$dW = - PdV$$

Untuk proses isoterm berlaku  $P_1V_1 = P_2V_2 = C$  atau  $V_2/V_1 = P_1/P_2$

**Langkah 4:** Penyelesaian

$$\begin{aligned} W_{12} &= -\int_1^2 PdV = -\int_1^2 \frac{mRT}{V} dV = -mRT \int_1^2 \frac{dV}{V} = -mRT \ln \frac{V_2}{V_1} = -mRT \ln \frac{P_1}{P_2} \\ &= - (2 \text{ kg})(0,287 \text{ kJ/kg K})(300 \text{ K}) \ln (4/2) \\ &= - 119,36 \text{ kJ} \end{aligned}$$

**Langkah 5:** Pengecekan hasil

Kerja yang dilakukan sistem selama proses isoterm sebesar 119,36 kJ (besar dan satuan sesuai)

Catatan: Tanda negatif (-) menunjukkan kerja dilakukan oleh sistem.

$$R_u = 8,314 \text{ kJ/kmol K (SI)}$$

= konstanta gas umum

R = konstanta gas individual

$$R = \frac{R_u}{M}$$

M = berat molekul gas

**Contoh 3**

Suatu sistem gas ideal menjalani proses pemuaian mengikuti persamaan  $P=250 - 300V$ ,  $P$  dalam kPa dan  $V$  dalam  $m^3$ . Tentukan kerja yang dilakukan sistem selama pemuaian dari volume  $0,2 m^3$  ke volume akhir  $0,4 m^3$

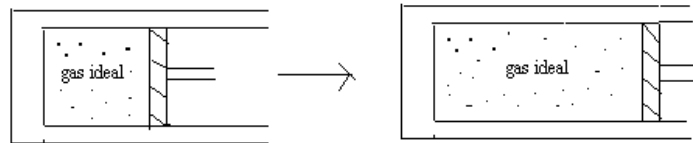
**Langkah 1:**Memfokuskan masalah

Diketahui:  $V_1 = 0,2 m^3$

$$V_2 = 0,4 m^3$$

Ditentukan:Kerja yang dilakukan pada proses pemuaian

Sket keadaan sistem:



**Langkah 2:** Menggambarkan keadaan fisis (proses)

Proses yang dijalani sistem selama pemuaian mengikuti persamaan

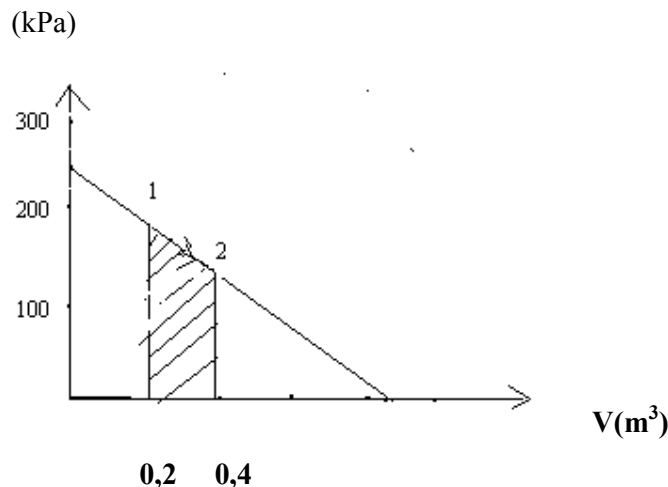
$$P = 250 - 300V.$$

Pada saat  $V = 0$  ;  $P = 250$

$$P = 0 ; V = 5/6$$

Kemiringan garis lurus (gradien)  $-300$

Proses pemuaian ini digambarkan pada diagram P-V sebagai berikut.



**Langkah 3:** Merencanakan penyelesaian

Asumsi:(1) gas ideal sebagai sistem tertutup

(2) Sistem menjalani proses secara kuasi-setimbang maka berlaku

$$dW = - PdV$$

Kerja yang dilakukan sistem = luas daerah yang diarsir dibawah kurva garis lurus



**Langkah 4:** Penyelesaian

$$\begin{aligned}W_{12} &= -\int_1^2 PdV = -\int_1^2 (250 - 300V)dV \\&= -\left[250V - 150V^2\right]_1^2 \\&= -\left[ \{250 \text{ kPa} \times (0,4)\text{m}^3 - 150 \text{ kPa/m}^3 \times (0,4)^2 \text{ m}^6\} - \right. \\&\quad \left. \{250 \text{ kPa} \times (0,2) \text{ m}^3 - 150 \text{ kPa/m}^3 \times (0,2)^3 \text{ m}^6\} \right] \\&= -[76 - 44] = -32 \text{ kJ}\end{aligned}$$

**Langkah 5:** Pengecekan Hasil

Besarnya kerja yang dilakukan sistem sebesar 32 kJ (besar dan satuan sesuai)

**Contoh 4**

Gaya tegang seutas kawat logam yang panjangnya 1 m dan luasnya  $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2$  dinaikkan secara kuasi-setimbang dan isotherm pada  $0^\circ\text{C}$  dari 0 hingga 100 N. Modulus Young isotherm pada  $0^\circ\text{C}$  ialah  $2,5 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ . Tentukan kerja yang dilakukan pada sistem.

**Langkah1:** Memfokuskan masalah

Diketahui:  $F_1 = 0 \text{ N}$

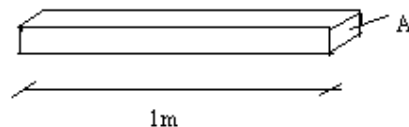
$$F_2 = 100 \text{ N}$$

$$Y = 2,5 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$$

$$A = 1 \times 10^{-7} \text{ m}^2$$

Ditentukan: Kerja yang dilakukan pada sistem pada proses isotherm

Sket keadaan sistem:



**Langkah 2:** Menggambarkan keadaan fisis

Untuk sistem kawat teregang keadaan sistem dapat digambarkan oleh tiga koordinat (variabel) termodinamik yaitu;  $F$  (gaya tegang kawat), panjang kawat

(L) dan temperatur (T) atau secara matematik ketiga koordinat tersebut dihubungkan dengan persamaan  $f(F,L,T) = 0$

**Langkah 3:** Merencanakan Penyelesaian

Asumsi: Proses yang dialami sistem berlangsung secara kuasi-setimbang (proses infinitesimal) sehingga berlaku persamaan matematik  $dW = F dL$

Perubahan infinitesimal panjang kawat  $dL$  dapat dinyatakan

$$L = f(F,T)$$

$$dL = \left(\frac{\partial L}{\partial T}\right)_F dT + \left(\frac{\partial L}{\partial F}\right)_T dF$$

Untuk proses isoterm  $dT = 0$  maka  $dL = \left(\frac{\partial L}{\partial F}\right)_T dF$

Modulus Young isoterm didefinisikan  $Y = \frac{L}{A} \left(\frac{\partial F}{\partial L}\right)_T$  maka  $\left(\frac{\partial L}{\partial F}\right)_T = \frac{L}{YA}$  dan

$$dL = \left(\frac{L}{YA}\right) dF$$

**Langkah 4:** Penyelesaian

$$dW = FdL = \frac{L}{YA} FdF$$

$$W_{12} = \frac{L}{YA} \int_1^2 FdF = \frac{L}{YA} (F_2^2 - F_1^2)$$

$$= 1/(2 \times 2,5 \times 10^{11} \text{ N/m}^2 \times 1 \times 10^{-7} \text{ m}^2) (100^2 - 0) \text{ N}^2 = 0,2 \text{ Nm (J)}$$

**Langkah 5:** Pengecekan hasil

Kerja yang dilakukan pada system sebesar 0,2 J (besar dan satuan sesuai)

**Contoh 5**

Dua kg gas di dalam silinder dilengkapi piston pada temperatur 27°C dan volume 0,040 m<sup>3</sup> dikompresi secara isothermal menjadi 0,020 m<sup>3</sup>. Persamaan keadaan gas dinyatakan sebagai  $PV = mRT [1 + (a/V)]$ , dengan  $R = 0,140 \text{ kJ/kg K}$  dan  $a = 0,010 \text{ m}^3$ . Tentukan kerja yang dilakukan selama proses kompresi.

**Langkah 1:** Memfokuskan masalah

Diketahui:  $T_1 = 27 + 273 = 300 \text{ K} = T_2$  (proses isothermal)

$$V_1 = 0,040 \text{ m}^3$$

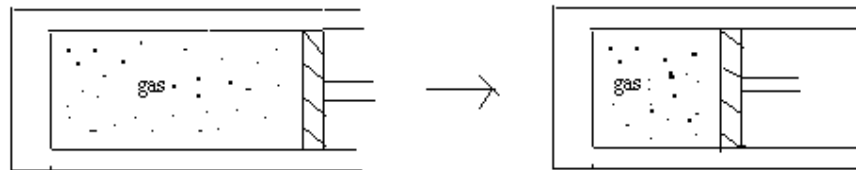
$$V_2 = 0,020 \text{ m}^3$$

$$R = 0,140 \text{ kJ/kgK}$$

$$a = 0,010 \text{ m}^3$$

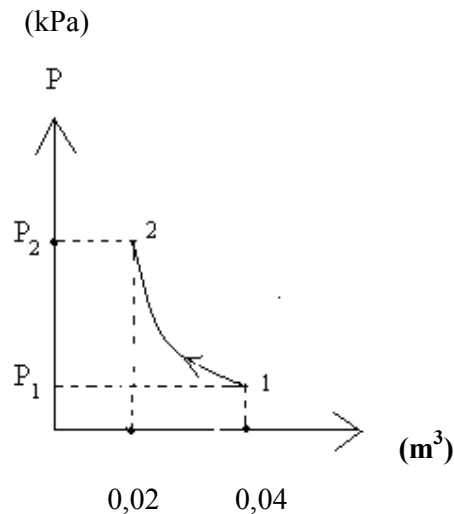
Yang ditanyakan: Kerja yang dilakukan selama kompresi isothermal

Sket keadaan sistem:



**Langkah 2:** Menggambarkan keadaan fisis (proses)

Proses yang dialami sistem adalah proses kompresi isothermal. Proses ini digambarkan pada diagram P-V sebagai berikut:



**Langkah 3:** Merencanakan Penyelesaian

Asumsi: (1) Gas di dalam silinder dianggap sebagai sistem tertutup

(2) Sistem menjalani proses secara kuasi-setimbang sehingga berlaku persamaan matematik  $dW = -PdV$

Persamaan keadaan gas  $PV = mRT [1 + (a/V)]$  maka  $P = \frac{mRT}{V} \left(1 + \frac{a}{V}\right)$

**Langkah 4:** Penyelesaian

$$W_{12} = -\int_1^2 PdV = -\int_1^2 \frac{mRT}{V} \left(1 + \frac{a}{V}\right) dV = -mRT \ln \frac{V_2}{V_1} - mRTa \left(\frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2}\right)$$

$$\begin{aligned}
&= - 2 \text{ kg} \times 0,0140 \text{ kJ/kgK} \times 300 \text{ K} \times \ln (0,020/0,040) - \\
&\quad 2 \text{ kg} \times 0,0140 \text{ kJ/kgK} \times 300 \text{ K} \times 0,010 \text{ m}^3 (1/0,040 - \\
&\quad 1/0,020)\text{m}^{-3} \\
&= 58,2 + 21 = 79,2 \text{ kJ}
\end{aligned}$$

**Langkah 5:** Pengecekan Hasil

Kerja yang dilakukan pada sistem (W positif) selama proses kompresi sebesar 79,2 kJ (besar dan satuan sesuai).

**Contoh 6**

Tentukan kerja yang diperlukan untu menggelembungkan air sabun pada tekana atmos-fer, jika jejari gelembung 3 cm dan tegangan permukaan air sabun adalah 50 dyne/cm.

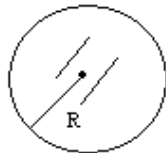
Langkah 1: Memfokuskan masalah

Diketahui:  $R = 3 \text{ cm}$

$$S = 50 \text{ dyne/cm}$$

Ditentukan: Kerja

Sket keadaan sistem:



Langkah 2 : Menggambarkan keadaan fisis

Gelembung sabun dapat dianggap sebagai sistem selaput permukaan.

Langkah 3: Merencanakan penyelesaian

Menggunakan persamaan  $dW = 2SdA$

Gelembung dianggap berbentuk bola memiliki luas  $A = 4\pi R^2$  maka  $dA = 8\pi R dR$

Langkah 4: Penyelesaian

$$\delta W = 2S \times 8\pi R dR$$

$$W = 16\pi S \int_0^R R dR = 8\pi S R^2$$

$$= 8 \times 3,14 \times 50 (3)^2 = 11304 \text{ dyne/cm}$$

Langkah 5: Pengecekan hasil

Besarnya kerja yang diperlukan untuk meniup gelembung sabun dengan jejari 3 cm adalah 11304 dyne/cm ( besar dan satuan sesuai).

**Contoh 7**

Zat dielektrik memiliki persamaan keadaan  $P/V = kE$ , dengan  $V$  adalah volume dan  $k$  tetapan yang bergantung pada  $T$  saja. Tunjukkan bahwa kerja untuk mengubah muatan dielektrik secara isothermal kuasistatik adalah

$$W = 1/2kV (P_f^2 - P_i^2) = kV/2 (E_f^2 - E_i^2)$$

Langkah 1: Memfokuskan masalah

Diketahui: persamaan keadaan sistem dielektrik  $P/V = kE$

Ditentukan: Membuktikan kerja  $W = 1/2kV (P_f^2 - P_i^2) = kV/2 (E_f^2 - E_i^2)$

Langkah 2: Menggambarkan keadaan fisis

Sistem dielektrik memiliki koordinat  $(P, E, T)$

Langkah 3: Merencanakan Penyelesaian

Mengacu pada persamaan  $\delta W = E dP$  dan  $W_{12} = \int_1^2 E dP$

Langkah 4: Penyelesaian

$$dW = E dP$$

$$P/V = kE \quad \text{maka} \quad E = P/kV$$

$$dW = 1/kV P dP$$

$$W_{if} = \frac{1}{kV} \int_i^f P dP = \frac{1}{2kV} (P_f^2 - P_i^2)$$

Atau  $P = kVE$  maka  $dP = kVdE$

$$dW = kVEdE$$

$$W_{if} = kV \int_i^f E dE = \frac{kV}{2} (E_f^2 - E_i^2)$$

Langkah 5: Pengecekan hasil

Jawaban terbukti.

### E. Soal- soal Latihan/Tugas

Untuk melatih anda mengaplikasikan konsep tentang kerja, kerjakan soal-soal latihan berikut ini. Kerjakan sesuai contoh soal yakni menggunakan lima langkah berbasis penyelesaian eksplisit: (1) memfokuskan masalah, (2) menggambarkan keadaan fisisnya, (3) merencanakan penyelesaian, (4) menyelesaikan berdasarkan rencana dan (5) pengecekan hasil. Hal ini dimaksudkan agar anda memiliki kemampuan *problem-solving* yang semakin baik, selamat mencoba.

- 2.1 Suatu sistem gas mengalami proses ekspansi dari volume  $0,01 \text{ m}^3$  menjadi  $0,03 \text{ m}^3$ . Perubahan tekanan selama proses mengikuti persamaan  $P = -4000V + 240$ ,  $P$  dalam kPa dan  $V$  dalam  $\text{m}^3$ . Tentukan kerja yang dilakukan gas.
- 2.2 Suatu gas dikompresi dari keadaan 1 bar volume  $0,30 \text{ m}^3$  ke keadaan akhir 4 bar. Proses kompresi mengikuti persamaan  $P = aV + b$ , dengan  $a = -15 \text{ bar/m}^3$ . Tentukan kerja yang dilakukan gas selama proses.
- 2.3 Seperlima kilogram gas diisikan ke dalam piranti silinder berpiston, keadaan awal  $0,02 \text{ m}^3$  dan 7 bar. Gas selanjutnya mengembang ke volume akhir  $0,05 \text{ m}^3$ . Tentukan jumlah kerja yang dilakukan pada tiga proses berikut: (a)  $P$  konstan, (b)  $PV$  konstan, (c)  $PV^2$  konstan. Bandingkan hasilnya.
- 2.4 Satu kilogram gas dengan berat molekul 35 dikompresi secara isothermal pada temperature  $77^\circ\text{C}$  dari volume  $0,05 \text{ m}^3$  ke  $0,025 \text{ m}^3$ . Hubungan  $PvT$  gas dinyatakan  $Pv = RT[1 + (c/v^2)]$ , dengan  $c = 2,0 \text{ m}^6/(\text{kg}\cdot\text{mol})^2$ . Tentukan: (a) kerja yang dilakukan (b) Jika  $c=0$  apakah kerja yang dilakukan lebih besar, sama atau lebih kecil dari (a)
- 2.5 Suatu gas dengan berat molekul 46 dikompresi dari volume  $0,08 \text{ m}^3$  menjadi  $0,04 \text{ m}^3$ . Persamaan proses mengikuti  $P = 0,1V^{-2} + 80$ ,  $P$  dalam kPa dan  $V$  dalam  $\text{m}^3$ . Tentukan kerja kompresi
- 2.6 Tentukan kerja yang diperlukan untuk mengkompresi tembaga secara isothermal dari 1 bar menjadi 500 bar pada temperature (a) 300 K, (b) 500K. Anggaphlah kerapatan tembaga pada kedua temperature tersebut  $8,90 \text{ g/cm}^3$ .
- 2.7 Tekanan pada 1 kg air (cair) dinaikkan secara isotermal kuasistatis dari 1 bar menjadi 1000 bar. Kerapatan air  $1 \text{ g/cm}^3$ . Tentukan kerja yang diperlukan jika temperature (a)  $20^\circ\text{C}$  dan (b)  $50^\circ\text{C}$ .
- 2.8 Tentukan kerja yang diperlukan untuk mengkompresi  $20 \text{ cm}^3$  merkuri pada temperature konstan  $0^\circ\text{C}$  dari tekanan 1 bar menjadi: (a) 500 bar, (b) 1000

bar. Kompresibilitas isotermal merkuri pada temperature  $0^{\circ}\text{C}$   $K_T = 3,9 \times 10^{-6} - 1,0 \times 10^{-10} P$ , dengan  $K_T$  dalam  $\text{bar}^{-1}$ ,  $P$  dalam bar dan kerapatan merkuri  $13,6 \text{ g/cm}^3$ .

- 2.9 Temperatur gas ideal pada tekanan awal  $P_1$  dan volume  $V_1$  dinaikkan pada volume konstan menjadi dua kalinya. Gas kemudian mengembang secara isothermal hingga tekanannya turun ke nilai awal, selanjutnya dikompresi pada tekanan konstan hingga volume kembali ke nilai awal. Tentukan kerja pada masing-masing proses dan kerja dalam satu siklus jika  $n = 2$  kilomol,  $P_1 = 2 \text{ atm}$  dan  $V_1 = 4 \text{ m}^3$ .
- 2.10 Suatu gas ideal dan sebuah balok tembaga mempunyai volume yang sama  $0,5 \text{ m}^3$  pada temperature  $300 \text{ K}$  dan tekanan atmosfer. Tekanan keduanya dinaikkan secara isothermal menjadi  $5 \text{ atm}$ . Tentukan: (a) kerja pada masing-masing proses jika kompresibilitas tembaga  $K_T = 0,7 \times 10^{-6} \text{ atm}^{-1}$ , (b) Mana kerja yang lebih besar, (c) Hitung perubahan volume pada masing-masing.
- 2.11 Suatu kondensator plat sejajar dalam rangkaian dc dimuati secara lambat dengan menaikkan tegangan yang melewati kondensator dari  $0$  hingga  $110 \text{ V}$ . Pada proses ini tegangan dan muatan mengikuti persamaan  $Q = kV$ ,  $k$  kapasitansi kondensator. Tentukan kerja yang diperlukan untuk memuati kondensator jika  $k = 2 \times 10^{-5} \text{ C/V}$ .
- 2.12 Suatu silinder berpiston berisi gas, keadaan awal pada tekanan  $6 \text{ bar}$  dan  $177^{\circ}\text{C}$  dan menempati volume  $0,05 \text{ m}^3$ . Gas menjalani proses kuasistatis mengikuti persamaan  $PV^2 = \text{konstan}$  hingga tekanan akhir  $1,5 \text{ bar}$ . Tentukan kerja yang dilakukan.
- 2.13 Potensial listrik  $115 \text{ V}$  dipasangkan pada suatu resistor sehingga arus  $9 \text{ A}$  melewatinya dalam waktu  $2$  menit. Tentukan jumlah kerja listrik yang dilakukan.

- 2.14 Suatu battery 12 V digunakan untuk memberikan arus 1,5 A, melewati hambatan eksternal dalam waktu 15 detik. Tentukan jumlah kerja listrik yang dilakukan.
- 2.15 Tembaga dikompresi secara isothermal dari 1 bar hingga 500 bar pada temperatur 300 K. Bila diketahui kerapatan tembaga  $8,90 \text{ g/cm}^3$  tentukan kerja yang diperlukan.
- 2.16 Tekanan 1 kg air dinaikkan secara isothermal-kuasistatik dari 1bar hingga 1000bar pada temperatur  $20^\circ\text{C}$ . Bila diketahui kerapatan air  $1\text{g/cm}^3$  tentukan kerja yang diperlukan.
- 2.17 Suatu gas dengan massa molar 32 dikompresi dari  $0,04$  hingga  $2\text{m}^3$ . Persamaan proses mengikuti hubungan  $P = 0,2V^{-2} + 40$ , P dalam kPa dan V dalam  $\text{m}^3$ . Tentuka kerja kompresi yang diperlukan.
- 2.18 Suatu kapasitor plat sejajar dimuati sesara kuasistatik pada temperatur kamar dengan potensial 100 V. Luas plat  $49\text{cm}^2$  dan terpisah pada jarak 1 mm. Persamaan keadaan dielektrik udara diantara plat dinyatakan  $P = 4,75 \times 10^{-15} E$ , P dalam  $\text{C/m}^2$  dan E dalam V/m. Tentukan kerja yang diperlukan untuk mempolarisasi udara.
- 2.19 Tunjukkan bahwa kerja yang diperlukan untuk meniup gelembung sabun berbentuk bola berjari R dalam proses isoterm kuasistatis dalam atmosfer sama dengan  $8\pi SR^2$
- 2.20 Gaya tegang seutas kawat dinaikkan secara kuasistatis isoterm dari  $F_i$  ke  $F_f$ . Jika panjang, penampang serta modulus Young kawat itu secara praktis tetap, tunjukkan bahwa kerja yang dilakukan adalah

$$W = \frac{L}{2AY} (F_f^2 - F_i^2)$$





## BAB III

### KALOR DAN HUKUM I TERMODINAMIKA

#### A. Pendahuluan

Pada bab ini anda akan mempelajari konsep kalor dan hukum I Termodinamika. Pemahaman yang baik pada konsep kerja akan sangat membantu anda dalam mempelajari bab ini. Setelah mempelajari bab ini diharapkan mahasiswa memiliki kompetensi:

1. Memahami konsep kalor
2. Memahami proses perpindahan kalor secara kuasistatis
3. Memahami perumusan Hukum I Termodinamika
4. Memahami konsep kapasitas kalor
5. Dapat mengaplikasikan konsep kalor dan hukum I Termodinamika
6. Terampil menyelesaikan soal menggunakan penyelesaian berbasis eksplisit

**Kata kunci: kalor, hukum I termodinamika, kapasitas kalor**

#### A. Uraian Materi

##### 1. Konsep Kalor

Ditinjau dua sistem pada temperatur berbeda. Apabila keduanya dikontakkan melalui dinding diatermis, diketahui bahwa kedua sistem akan berubah sedemikian sehingga akhirnya temperatur kedua sistem menjadi sama. Ada sesuatu yang berpindah dari sistem yang lebih panas ke sistem yang lebih dingin.



**Kalor didefinisikan sebagai bentuk energi yang berpindah pada kontak termal antara dua sistem yang berlainan temperatur, dari sistem yang bertemperatur tinggi ke sistem yang bertemperatur lebih rendah.**

Perpindahan energi antara dua sistem ini berlangsung hingga dicapai kesetimbangan termal (temperatur kedua sistem sama). Bahwasanya suatu

benda (sistem) **tidak pernah** mengandung kalor. Kalor teridentifikasi hanya ketika ia melewati batas sistem, jadi merupakan fenomena yang bersifat sementara (transien). Tentu saja setiap benda (sistem) mengandung (menyimpan) energi bukan kalor.

Kalor dilambangkan  $Q$  dan memiliki satuan Joule (SI).

#### **Perjanjian tanda untuk $Q$ :**

Kalor masuk ke sistem dinyatakan positif ( $Q > 0$ )

Kalor keluar dari sistem dinyatakan negatif ( $Q < 0$ )

Proses adiabatik adalah proses yang tidak melibatkan perpindahan kalor ( $Q = 0$ ).

Kalor, seperti halnya kerja merupakan fungsi lintasan sehingga secara matematik dinyatakan sebagai deferensial tak eksak. Artinya jumlah kalor yang diperlukan ketika sistem menjalani perubahan (proses) dari keadaan 1 ke keadaan 2 bergantung pada lintasan yang dilalui sistem selama perubahan keadaan tersebut, jadi tidak menggambarkan perubahan infinit suatu fungsi  $Q$  (sebagai fungsi koordinat). Karena kalor deferensial tak eksak maka ditulis  $\delta Q$  dan diartikan sebagai kalor dalam jumlah infinit (kecil). Jumlah kalor ini dihitung dengan integrasi

$$\int_1^2 \delta Q = Q_{12}$$

Laju kalor yang dipindahkan ke sistem dilambangkan  $\dot{Q}$ ;  $\dot{Q} = \frac{\delta Q}{dt}$

Kalor tiap satuan masa sistem atau kalor spesifik  $q = \frac{Q}{m}$  (dalam J/kg).

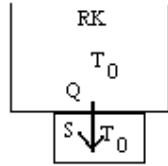
## **2. Perpindahan Kalor Secara Kuasistatis**

Agar pertukaran kalor dapat berlangsung secara kuasistatis diperlukan pengertian tentang **tandon kalor** (reservoar kalor).

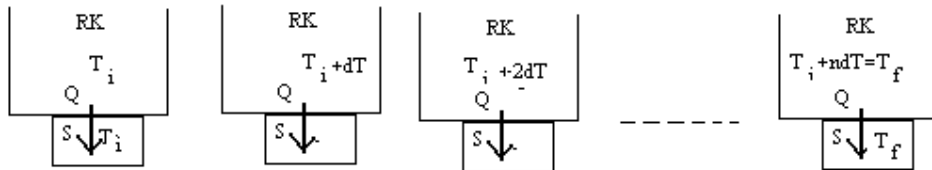
**Reservoar kalor** didefinisikan sebagai sistem yang sedemikian (besarnya) sehingga temperaturnya maupun koordinat lainnya tidak berubah meskipun sistem menerima atau melepaskan sejumlah kalor. Contoh: samodra, atmosfer, lingkungan dan benda-benda lain yang berukuran besar dibanding ukuran sistem.

Ditinjau dua proses pertukaran kalor:

(1) Penyerapan oleh sistem tanpa disertai kenaikan temperatur dapat berlangsung antara sistem dan 1 RK saja. Asal tidak menyebabkan gejala-gejala di dalam sistem.



(2) Interaksi kalor antara sistem dan lingkungan yang harus berlangsung secara kuasistatis dan disertai kenaikan temperatur tertentu, memerlukan tersediannya sejumlah banyak RK yang masing-masing temperaturnya berbeda sedikit (infinitesimal).



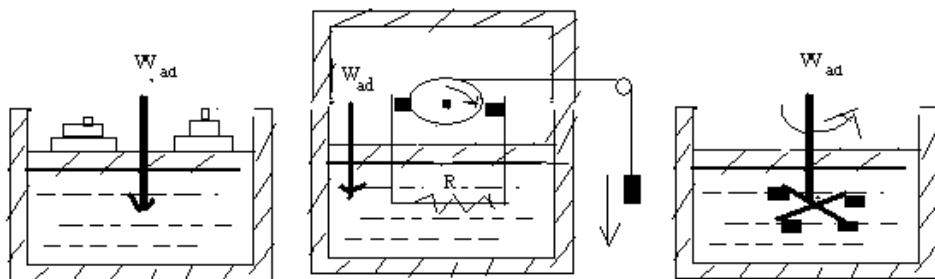
Agar pertukaran kalor antara sistem dan lingkungan berlangsung secara kuasistatis sistem harus dikontakkan dengan ke-n RK secara berturut-turut.

### 3. Perumusan Hukum I Termodinamika

Proses adiabatik adalah proses yang berlangsung tanpa adanya pertukaran kalor antara sistem dan lingkungannya.

Proses ini dapat dicapai dengan mengisolasi sistem dari lingkungannya (diselubungi dengan dinding adiabatik).

Berikut ini disajikan 3 cara dimana kita dapat melakukan kerja pada sistem secara adiabatik ( dan kuasistatik).



Cara-cara melakukan kerja adiabatik tidak terbatas pada ketiga contoh di atas ada banyak cara lagi. Namun semua eksperimen yang pernah dilakukan hingga saat ini menunjukkan:

**“ Apabila keadaan sistem diubah dari keadaan i ke keadaan f dengan melakukan kerja padanya, maka kerja yang diperlukan ternyata tidak bergantung pada cara yang digunakan, selama cara tersebut adalah cara adiabatik”**

Kerja adiabatik hanya ditentukan oleh keadaan awal dan keadaan akhir sistem.

$$\text{Dengan kata lain: } W_{ad} = -\int_i^f PdV$$

Tidak bergantung pada jalan integrasi yang ditempuh, jadi selalu memberi hasil yang sama.

Secara matematik ini berarti adanya suatu besaran fisis yang merupakan fungsi dari koordinat sistem. Fungsi ini disebut **fungsi keadaan**, dan  $W_{ad}$  sama dengan perubahan besaran fisis tersebut.

Fungsi keadaan ini diberi nama **energi-internal sistem** dan diberi lambang  $U$ .

Dengan demikian dapat dinyatakan

$$W_{ad} = -\int_i^f PdV = +(U_f - U_i)$$

$$\Delta U - W_{ad} = 0$$

**Perlu diperhatikan:**

Tanda + pada rumusan di atas sesuai perjanjian tabda yang berlaku untuk  $W$ . Sebab apabila  $W_{ad}$  positif ( artinya kerja dilakukan pada sistem), maka energi-internalnya naik. Memang seharusnya demikian karena energi sistem bertambah.

Rumus ini hanya berlaku untuk proses adiabatik.

Energi-internal sistem didefinisikan sebagai jumlah energi yang dimiliki partikel-partikel sistem. Apabila  $E_i$  adalah energi yang dimiliki partikel sistem, maka energi-internal seluruh sistem adalah:

$$U = \sum_{i=1}^N E_i$$

Dengan  $N$  adalah jumlah partikel dalam sistem.

Seperti telah disebutkan di atas bahwa energi-internal merupakan fungsi keadaan, jadi dapat dipandang sebagai fungsi 2 variabel (koordinat) sistem yang mana saja.

Untuk sistem hidrostatik dapat dinyatakan:

$$U = U_1(P, V) \quad \text{dan} \quad dU_1 = \left( \frac{\partial U}{\partial P} \right)_V dP + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_P dV$$

$$U = U_2(T, V) \quad \text{dan} \quad dU_2 = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left( \frac{\partial U}{\partial P} \right)_T dP$$

$$U = U_2(T, P) \quad \text{dan} \quad dU_3 = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_P dT + \left( \frac{\partial U}{\partial P} \right)_T dP$$

Ketiga dU ini bersifat eksak, maka dapat dinyatakan:

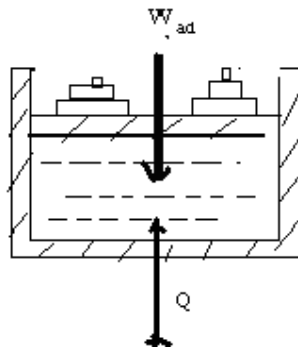
$$\int_i^f dU = U_f - U_i \quad \text{dan} \quad \oint dU = 0$$

### Perumusan Hukum I secara Umum

Pada dasarnya perubahan energi-internal sistem dapat diukur/dihitung

menggunakan persamaan  $W_{ad} = -\int_i^f P dV = +(U_f - U_i)$ , yakni dengan

meengukur kerja yang dilakukan secara adiabatik. Akan tetapi secara praktik tidaklah demikian caranya. dU diukur pada proses non-adiabatik. Sistem diberi kesempatan berinteraksi termal dengan lingkungan.



Dengan demikian jelas bahwa untuk memperoleh  $\Delta U$  yang sama, diperlukan jumlah kerja yang berbeda artinya

$$W_{\text{non-ad}} \neq W_{\text{ad}}$$

Maka  $\Delta U - W_{non-ad} \neq 0$

Ruas kanan pada persamaan ini tidak lain adalah kalor yang terlibat pada proses non-adiabatik tersebut, dan diperoleh perumusan umum hukum I termodinamika

$$\Delta U - W_{non-ad} = Q$$

### Hal penting yang perlu diperhatikan:

- (1) Perjanjian tanda untuk Q sama dengan perjanjian tanda untuk W  
Apabila sistem diberi/menyerap kalor, sebagian energi ini dapat digunakan untuk menaikkan energi-internal sistem ( $\Delta U$  positif) dan sisanya untuk melakukan kerja luar (W negatif)
- (2) Perumusan umum hukum I Termodinamika ini menyatakan suatu pernyataan kekalnya energi-internal dalam proses termodinamika. Karena merupakan **hukum kekekalan energi**, maka berlaku untuk proses apa saja: proses kuasistatis maupun non-kuasistatis, isothermal, isobarik dan sebagainya.

### Perumusan Hukum I Termodinamika dalam bentuk deferensial

$$\delta Q = dU - \delta W$$

Untuk Proses kuasistatis,  $\delta W = -PdV$

$$\delta Q = dU + PdV$$

### Rumusan Hukum I Termodinamika Untuk berbagai Sistem

Untuk proses kuasistatis dinyatakan:

$$dU = \delta Q - PdV \quad (\text{sistem hidrostatis})$$

$$dU = \delta Q + FdL \quad (\text{sistem kawat})$$

$$dU = \delta Q + SdA \quad (\text{sistem selaput permukaan})$$

$$dU = \delta Q + \epsilon dZ \quad (\text{sistem sel listrik})$$

$$dU = \delta Q + EdP \quad (\text{sistem lempengan dielektrik})$$

$$dU = \delta Q + \mu_0 HdM \quad (\text{sistem paramagnetik})$$

### Perbedaan antara Kalor dan Kerja

- (a) Kalor dan Kerja merupakan fenomena bersifat sementara (transien).  
Sistem tidak pernah memiliki kalor dan kerja, tetapi salah satu atau

keduanya melewati batas sistem ketika sistem menjalani perubahan keadaan.

(b) Kalor dan kerja merupakan fenomena pada batas sistem. Keduanya teramati hanya pada batas sistem, dan menunjukkan energi yang melewati batas sistem.

(c) Kalor dan Kerja merupakan fungsi lintasan dan diferensial tak eksak.

#### 4. Kapasitas Kalor dan Kalor jenis (spesifik)

Apabila suatu sistem menyerap kalor dan karenanya mengalami kenaikan temperatur, dikatakan bahwa sistem tersebut memiliki **kapasitas kalor**, dan dilambangkan C

$$\text{Didefinisikan } C_{\text{sistem}} = \frac{\text{kalor yang diserap}}{\text{kenaikan temperatur sistem}} = \frac{Q}{dT}$$

Kapasitas kalor (C) sesaat didefinisikan:

$$C = \frac{\delta Q}{dT} \quad (\text{J/K dalam SI})$$

$$c_{\text{spesifik}} = \frac{C}{m} \quad (\text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1})$$

$$c_{\text{molar}} = \frac{C}{n} \quad (\text{JK}^{-1}\text{kmol}^{-1})$$

Kapasitas kalor pada tekanan tetap didefinisikan:

$$C_P = \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_P$$

Kapasitas kalor pada volume tetap didefinisikan:

$$C_V = \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_V$$

Kalor jenis pada volume konstan didefinisikan sebagai:

$$c_v = \left( \frac{dq}{dT} \right)_v$$

Kalor jenis pada tekanan konstan didefinisikan sebagai:

$$c_p = \left( \frac{dq}{dT} \right)_p$$

Kedua kapasitas kalor merupakan fungsi dari koordinat, namun dalam soal sering dianggap tetapan.

Hubungan antara kedua kapasitas kalor diungkapkan:



$$\delta Q = dU + PdV \quad \text{apabila dibagi dengan } dT$$

$$\frac{\delta Q}{dT} = \frac{dU}{dT} + P \frac{dV}{dT}$$

apabila perubahan temperatur ini berlangsung pada V tetap (proses isovolum),  
 $dV = 0$

$$\left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_V = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V + 0$$

maka diperoleh

$$C_V = \left( \frac{\partial Q}{\partial T} \right)_V = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = f(T, V)$$

Untuk  $C_P$  diperoleh sebagai berikut:

$$U = U(T, V) \quad \text{maka} \quad dU = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV$$

Dengan menggunakan hukum I diperoleh

$$\delta Q = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left\{ \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + P \right\} dV, \text{ dibagi dengan } dT$$

$$\frac{\delta Q}{dT} = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V + \left\{ \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + P \right\} \frac{dV}{dT}$$

Untuk proses pada tekanan tetap,  $dP = 0$ , maka

$$\left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_P = C_V dT + \left\{ \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + P \right\} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$$

$$C_P = C_V dT + \left\{ \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + P \right\} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$$

Pada umumnya fungsi dari T dan V

Kita juga bisa menyatakan turunan parsial dari U

$$\left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T = \frac{C_P - C_V}{\left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P} - P$$

## 5. Beberapa Hubungan Penting yang Berlaku Hanya untuk Gas Ideal

Energi intenal untuk semua proses yang terjadi pada gas ideal:

$$du = c_v dT \quad (\text{hanya fungsi } T)$$

$$\Delta u = \int c_v dT$$

Entalpi gas ideal:

$$dh = du + RdT$$

$$dh = c_p dT$$

$$c_p dT = c_v dT + R_u dT$$

$$c_p - c_v = R_u$$

#### D. Ringkasan

(1) Kalor didefinisikan sebagai bentuk energi yang berpindah pada kontak termal antara dua sistem yang berlainan temperatur, dari sistem yang bertemperatur tinggi ke sistem yang bertemperatur lebih rendah.

(2) **Perjanjian tanda untuk Q:**

Kalor masuk ke sistem dinyatakan positif ( $Q > 0$ )

Kalor keluar dari sistem dinyatakan negatif ( $Q < 0$ )

(3) **Reservoir kalor** didefinisikan sebagai sistem yang sedemikian (besarnya) sehingga temperaturnya maupun koordinat lainnya tidak berubah meskipun sistem menerima atau melepaskan sejumlah kalor.

(4) Perumusan Hukum I Termodinamika:

**“ Apabila keadaan sistem diubah dari keadaan i ke keadaan f dengan melakukan kerja padanya, maka kerja yang diperlukan ternyata tidak bergantung pada cara yang digunakan, selama cara tersebut adalah cara adiabatik ”**

(5) Perumusan matematis Hukum I Termodinamika secara umum

$$\Delta U - W_{non-ad} = Q$$

(6) **Perumusan Hukum I Termodinamika dalam bentuk diferensial**

$$\delta Q = dU - \delta W$$

(7) **Rumusan Hukum I Termodinamika Untuk berbagai Sistem**

Untuk proses kuasistatis dinyatakan:

$$dU = \delta Q - PdV \quad (\text{sistem hidrostatis})$$

$$dU = \delta Q + FdL \quad (\text{sistem kawat})$$

$$dU = \delta Q + SdA \quad (\text{sistem selaput permukaan})$$

$$dU = \delta Q + \epsilon dZ \quad (\text{sistem sel listrik})$$

$$dU = \delta Q + EdP \quad (\text{sistem lempengan dielektrik})$$

$$dU = \delta Q + \mu_0 H dM \text{ (sistem paramagnetik)}$$

(8) Didefinisikan Kapasitas Kalor  $C_{sistem} = \frac{\text{kaloryangdiserap}}{\text{kenaikkantemperatursistem}} = \frac{Q}{dT}$

Kapasitas kalor pada tekanan tetap didefinisikan:

$$C_P = \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_P$$

Kapasitas kalor pada volume tetap didefinisikan:

$$C_V = \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_V$$

Hubungan antara  $C_P$  dan  $C_V$ :

$$C_V = \left( \frac{\partial Q}{\partial T} \right)_V = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = f(T, V)$$

$$C_P = C_V dT + \left\{ \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + P \right\} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$$

$$\left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T = \frac{C_P - C_V}{\left( \partial V / \partial T \right)_P} - P$$

#### D. Contoh Soal Berbasis Penyelesaian Masalah Eksplisit

##### Contoh 1

Ketika suatu sistem berubah keadaan dari a ke b sepanjang lintasan a-c-b 80 J kalor mengalir ke dalam system dan system melakukan kerja 30 J (lihat gambar berikut). (a) Berapapa jumlah kalor yang mengalir ke sistem sepanjang lintasan a-d-b, jika kerja yang dilakukan sistem 10 J. (b) Sistem kembali dari keadaan b ke keadaan a sepanjang lintasan lengkung, kerja yang dilakukan pada sistem 20 J. Apakah sistem menyerap atau membebaskan kalor? Berapa besarnya? (c) Jika  $U_a = 0$  dan  $U_d = 40$  J, tentukan kalor yang diserap sepanjang proses a-d dan d-b.

##### Langkah 1: Memfokuskan masalah

Diketahui:  $Q_{a-c-b} = 80$  J

$$W_{a-c-b} = -30$$
 J

$$W_{a-d-b} = -10$$
 J

$$W_{b-a} = 20$$
 J

$$U_a = 0$$

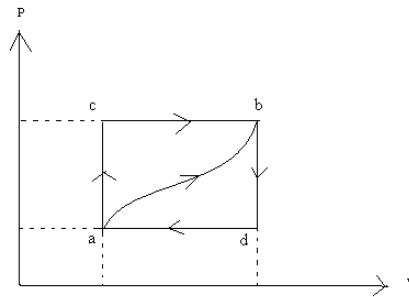
$$U_d = 40 \text{ J}$$

Ditentukan:  $Q_{a-d-b}$

$$Q_{b-a}$$

$$Q_{a-d} \text{ dan } Q_{d-b}$$

Sket proses yang dijalani sistem:



**Langkah 2:** Menggambarkan keadaan fisis

Sistem menjalani proses dari keadaan awal a ke keadaan akhir b melalui tiga lintasan yang berbeda: a-b, a-c-b dan a-d-b dan kembali ke keadaan awal melalui lintasan lengkung b-a.

**Langkah 3:** Merencanakan Penyelesaian

Asumsi (1) sistem merupakan sistem tertutup

(2) sistem menjalani proses secara kuasistatis

Mengacu pada Hukum I Termodinamika:  $\Delta U = Q + W$

**Langkah 4:** Penyelesaian

$$\begin{aligned} \text{(a)} \quad \Delta U_{acb} &= Q_{acb} + W_{acb} \\ &= 80 \text{ J} + (-30 \text{ J}) = 50 \text{ J} \end{aligned}$$

$$\Delta U_{acb} = \Delta U_{adb} \text{ (karena keadan awal dan keadaan akhirnya sama, U fungsi}$$

keadaan

$$\begin{aligned} \Delta U_{adb} &= Q_{adb} + W_{adb} \\ 50 \text{ J} &= Q_{adb} + (-10 \text{ J}) \\ Q_{adb} &= 60 \text{ J} \end{aligned}$$

$$\text{(b)} \quad \Delta U_{acb} = \Delta U_{adb} = \Delta U_{ab} \quad \text{dan} \quad \Delta U_{ab} = -\Delta U_{ba}$$

$$\Delta U_{ba} = -\Delta U_{ab} = -50 \text{ J}$$

$$\Delta U_{ba} = Q_{ba} + W_{ba}$$

$$-50 \text{ J} = Q_{ba} + 20 \text{ J}$$

$$Q_{ba} = -70 \text{ J}$$

Sistem membebaskan kalor sebesar 70 J

(c)  $\Delta U_{ad} = Q_{ad} + W_{ad}$  ;  $\Delta U_{ad} = U_d - U_a = 40 \text{ J} - 0 = 40 \text{ J}$

$$W_{adb} = W_{ad} + W_{db}$$
 ;  $W_{db} = 0$  (dV = 0, isovolum)
$$W_{ad} = W_{adb} = -10 \text{ J}$$

$$\Delta U_{ad} = Q_{ad} + W_{ad}$$

$$40 \text{ J} = Q_{ad} + (-10) \text{ J}$$

$$Q_{ad} = 40 \text{ J} + 10 \text{ J} = 50 \text{ J}$$

$$Q_{adb} = Q_{ad} + Q_{db}$$

$$60 \text{ J} = 50 \text{ J} + Q_{db}$$

$$Q_{db} = 60 \text{ J} - 50 \text{ J} = 10 \text{ J}$$

**Langkah 5:** Pengecekan hasil

Kalor yang diserap pada proses a-d-b sebesar 60 J; kalor yang dibebaskan pada proses b-a sebesar 70 J; kalor yang diserap pada proses a-d sebesar 50 J dan kalor yang diserap pada proses d-b sebesar 10 J. ( besar dan satuan sesuai).

**Contoh 2**

Suatu silinder berpiston yang terisolasi termal berisi gas keadaan awalnya 6 bar dan 177°C menempati volume 0,05 m<sup>3</sup>. Gas menjalani proses kuasistatis mengikuti persamaan PV<sup>2</sup> = konstan. Tekanan akhir 1,5 bar. Tentukan kerja yang dilakukan dan perubahan energi internalnya.

**Langkah 1:** Memfokuskan masalah

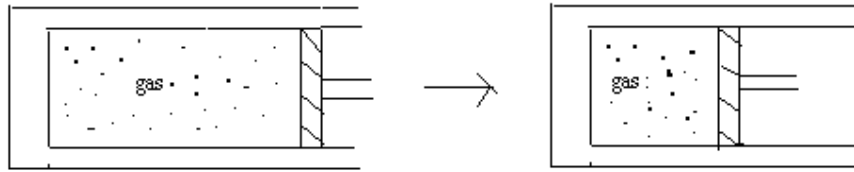
Diketahui: P<sub>1</sub> = 6 bar = 6x10<sup>5</sup> N/m<sup>2</sup> ; P<sub>2</sub> = 1,5x10<sup>5</sup> N/m<sup>2</sup>

$$T_1 = 177 + 273 = 450 \text{ K}$$

$$V_1 = 0,05 \text{ m}^3$$

Ditentukan: W yang dilakukan dan ΔU

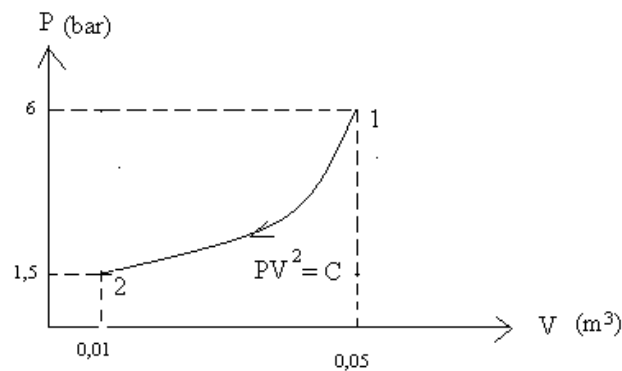
Sket keadaan sistem:



**Langkah 2:** Menggambarkan keadaan fisis (proses)

Pesamaan proses  $PV^2$  konstan;  $P_1V_1^2 = P_2V_2^2$ ;  $V_2^2 = 6 \times (0,05)^2 / 1,5 = 0,01 \text{ m}^3$

Sistem mengalami proses kompresi. Pada diagram P-V digambarkan:



**Langkah 3:** Merencanakan Penyelesaian

Asumsi (1) Sistem tertutup yang terisolasi termal secara baik, sehingga tidak ada

Interaksi kalor dengan lingkungannya ( $Q = 0$ )

(2) Sistem menjalani proses secara kuasistatis berlaku  $dW = -PdV$

Mengacu pada Hukum I Termodinamika:  $\Delta U = Q + W$

**Langkah 4:** Penyelesaian

Menentukan kerja kompresi

$$dW = -PdV$$

$$W_{12} = -\int_1^2 PdV = -\int_1^2 \frac{C}{V^2} dV = C \left( \frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1} \right) = P_1V_1^2 \left( \frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1} \right)$$

$$= 6 \times 10^5 \text{ (N/m}^2\text{)} (0,05)^2 \text{ m}^6 (100 - 20) \text{ m}^{-3}$$

$$= 120 \text{ kJ}$$

$$\Delta U = 120 \text{ kJ}$$

**Langkah 5:** Pengecekan hasil

Besarnya kerja kompresi 120 kJ dan terdapat kenaikan energi internal sistem sebesar 120 kJ (besar dan satuan sesuai).

**Contoh 3**

Suatu silinder berpiston berisi gas 1,4 kg dipertahankan pada tekanan konstan 5 bar. Selama proses berlangsung membebaskan kalor sebesar 50 kJ, sedangkan volume berubah dari 0,15 m<sup>3</sup> menjadi 0,09m<sup>3</sup>. Tentukan perubahan energi internal dalam kJ/kg

**Langkah 1:** memfokuskan masalah

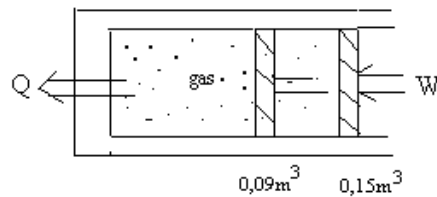
Diketahui:  $m=1,4\text{kg}$        $P_1=P_2= 5 \text{ bar}$

$V_1= 0,15 \text{ m}^3$        $V_2= 0,09 \text{ m}^3$

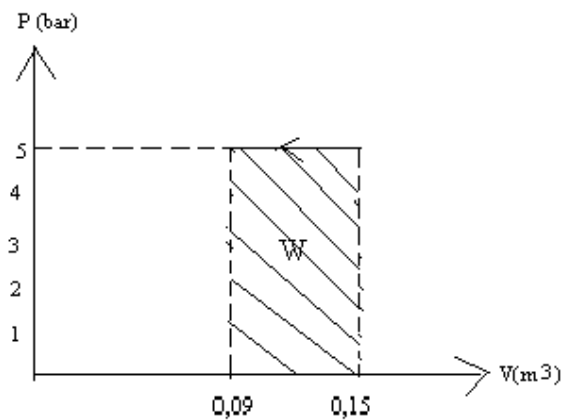
$Q = -50 \text{ kJ}$  (tanda – menunjukkan kalor keluar sistem)

Yang Ditanyakan:  $\Delta u$  (kJ/kg)

Sket Keadaan Sistem:



**Langkah 2:** Penggambaran Keadaan Fisis



**Langkah 3:** Merencanakan Penyelesaian

Asumsi: (1) Gas dianggap sistem tertutup

(2) Sistem menjalani proses kuasistatis shg berlaku  $dW = - PdV$

**Langkah 4: Penyelesaian**

Menentukan kerja kompresi:

$$dW = -PdV$$

$$\begin{aligned} W_{12} &= -\int_1^2 PdV = -P \int_1^2 dV = -P(V_2 - V_1) \\ &= -5 \times 10^5 (0,09 - 0,15) \\ &= -30 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Hukum Termodinamika I:

$$\begin{aligned} \Delta U &= Q + W \\ &= -50 \text{ kJ} + 30 \text{ kJ} = -20 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Perubahan energi internal tiap satuan massa sistem  $\Delta u = \Delta U / m = -20 / 1,4 = 14,3$  kJ/kg

**Langkah 5: Pengecekan hasil**

Energi internal sistem turun sebesar 14,3 kJ/kg (besar dan satuan sesuai)

**Contoh 4**

Sepersepuluh kg gas ideal dimasukkan ke dalam tangkai tegar pada tekanan 1,2 bar dan temperatur 30°C. Sebuah pengaduk di dalam tangki melakukan kerja pada gas 520J dan dalam waktu yang bersamaan ditambahkan kalor 810J. Selama proses berlangsung temperatur gas naik 25°C (Bm=48). Tentukan kalor jenis rata-rata gas  $c_v$  dalam kJ/kg °C

**Langkah 1: Memfokuskan masalah**

Diketahui:  $P_1 = 1,2$  bar ;  $m = 0,1$  kg

$$T_1 = 30^\circ\text{C}$$

$$W = + 520\text{J (kerja dilakukan pada sistem)}$$

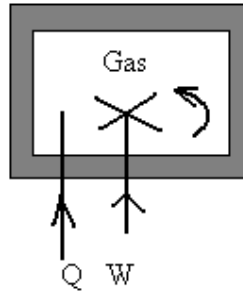
$$Q = + 810\text{J (kalor masuk sistem)}$$

$$T_2 = 30 + 25 = 55^\circ\text{C}$$

Ditentukan:  $c_v$

Sket Keadaan Sistem:





**Langkah 2:** Penggambaran Keadaan Fisis

Gas merupakan sistem tertutup. Tangki tegar sehingga volume sistem dianggap konstan selama proses. Sistem mendapatkan tambahan energi berupa kerja  $W$  sebesar 520J dan berupa kalor  $Q$  sebesar 810J. Penambahan energi menyebabkan energi gas naik sebesar  $25^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta T$ ).

**Langkah 3:** Merencanakan Penyelesaian

Mengacu pada definisi  $C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_v$  dan Hukum I  $\Delta U = Q + W$

**Langkah 4:** Penyelesaian

$$\begin{aligned} \Delta U &= Q + W \\ &= 520 + 810 = 1330 \text{ J} \\ \Delta u &= \Delta U / m = 1330/0,1 = 13300\text{J} = 13,3\text{kJ/kg} \\ C_{v\text{rata-rata}} &= \Delta U / \Delta T = 0,532\text{kJ} / \text{kg}^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

**Langkah 5:** Pengecekan hasil

Kalor jenis rata-rata gas sebesar  $0,532 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$  (besar dan jumlah sesuai)

**Contoh 5**

Pada temperatur diatas  $500\text{K}$ , nilai  $c_p$  untuk tembaga dihipotesis oleh hubungan linier

$c_p = a + bT$  ;  $a = 24 \text{ J/kmolK}$  ;  $b = 6,9 \times 10^{-3} \text{ J/kmolK}^2$ . Tentukan perubahan entalpi spesifik dari tembaga pada tekanan 1atm ketika temperatur dinaikkan dari  $500\text{K}$  hingga  $1200\text{K}$

**Langkah 1:** Memfokuskan masalah

Diketahui:  $T_1 = 500\text{K}$        $T_2 = 1200\text{K}$   
 $P = 1 \text{ atm}$

$$C_p = a + bT$$

Ditentukan:  $\Delta h$

**Langkah 2:** Menggambarkan keadaan fisis

Perubahan entalpi spesifik memiliki kaitan dengan  $c_p$

**Langkah 3:** Merencanakan Penyelesaian

Asumsi: Kenaikan temperatur tembaga berlangsung secara kuasistatis dan reversibel

$$dh = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_P dT + \left( \frac{\partial h}{\partial P} \right) dP$$

Untuk proses tekanan konstan  $dP=0$

$$dh = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_P dT \text{ dan } c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_P$$

$$dh = c_p dT$$

**Langkah 4:** Penyelesaian

$$dh = c_p dT$$

$$\Delta h_{12} = \int_1^2 c_p dT = \int_1^2 (a + bT) dT = \left[ aT + 0,5bT^2 \right]_{500}^{1200}$$

$$= (33.768 - 12.862,5) = 2,09 \times 10^4 \text{ J/kmol}$$

**Langkah 5:** Pengecekan hasil

Perubahan entalpi spesifik tembaga sebesar  $2,09 \times 10^4$  J/kmol (besar dan satuan sesuai)

**Contoh 6**

Untuk gas ideal tunjukkan bahwa  $\left( \frac{\partial U}{\partial P} \right)_T = 0$

**Langkah 1:** Memfokuskan masalah

Diketahui: Sistem gas ideal berlaku persamaan  $Pv = RT$

Ditentukan:  $\left( \frac{\partial u}{\partial P} \right)_T = 0$

**Langkah 2:** Menggambarkan keadaan fisis.

Sistem adalah gas ideal, keadaanya dapat digambarkan dengan koordinat P, V, T.

**Langkah 3:** Merencanakan Penyelesaian.

Asumsi: Gas ideal menjalankan perubahan keadaan secara kuasistatis.

Menggunakan kaitan:

$$\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_y = \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_y \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_y$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_T = \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T$$

**Langkah 4:** Penyesuaian.

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = 0 \text{ karena energi internal gas ideal hanya fungsi T}$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T = -\frac{RT}{P^2}$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_T = \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T = 0 \cdot -\frac{RT}{P^2} = 0$$

**Langkah 5:** Pengecekan hasil

Karena energi internal gas ideal hanya fungsi T maka  $\left(\frac{\partial u}{\partial P}\right)_T = 0$

**Contoh 7**

Persamaan keadaan suatu gas  $(P+b)v = RT$  dan energi internal spesifik  $u = aT + bv + u_0$ . Tentukan  $c_v$  dan tunjukkan  $c_p - c_v = R$

**Langkah 1:** Memfokuskan Masalah

Diketahui: persamaan keadaan gas  $(P+b)v = RT$

Energi internal spesifik  $u = aT + bv + u_0$

Ditentukan:  $c_v$  dan  $c_p - c_v = R$

**Langkah 2:** Menggambarkan keadaan fisis

Sistem gas dengan koordinat P, v, T maka  $c_v$  mempunyai kaitan dengan persamaan energi internal

**Langkah 3:** Merencanakan penyelesaian

Asumsi: Sistem gas menjalani perubahan keadaan secara kuasistatis

Dipilih  $u=f(T,v)$

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T dv$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v = c_v$$

**Langkah 4:** Penyelesaian

$$u = aT + bv + u_0$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v = a \text{ maka } c_v = a$$

Berdasarkan Hukum I  $dq = du + Pd v$

$$dq = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T + P\right] dv$$

$$dq = c_v dT + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T + P\right] dv$$

Untuk  $p$  konstan  $dq = c_p dT$

$$c_p dT_p = c_v dT_p + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T + P\right] dv_p$$

$$(c_p - c_v) = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T + P\right] \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = b \text{ dan } \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{R}{P+b}\right)$$

$$(c_p - c_v) = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T + P\right] \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = (P+b) \left(\frac{R}{P+b}\right) = R$$

**Langkah 5:** Pengecekan hasil

Persamaan sesuai (terbukti)

**Contoh 8**

Tunjukkan bahwa pada gas ideal kerja untuk mengkompresi pada perubahan tekanan yang sama, proses secara isothermal memerlukan kerja yang lebih besar daripada proses adiabatik. Diketahui keadaan awal tekanan  $10^6 \text{N/m}^2$  volume  $0,5 \text{m}^3/\text{kmol}$ , dan tekanan akhir  $2 \cdot 10^6 \text{N/m}^2$

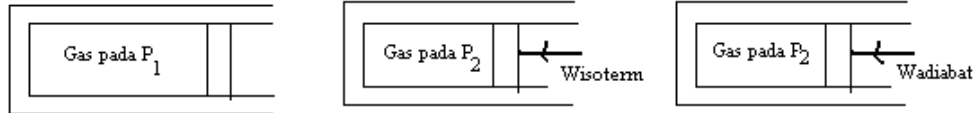
**Langkah 1:** Memfokuskan masalah

Diketahui:  $P_1 = 10^6 \text{N/m}^2$ ;  $P_2 = 2 \cdot 10^6 \text{N/m}^2$

$$v_1 = 0,5 \text{m}^3/\text{kmol}$$

Ditentukan:  $W_{\text{isothermal}}$  dan  $W_{\text{adiabatik}}$

Sket keadaan sistem



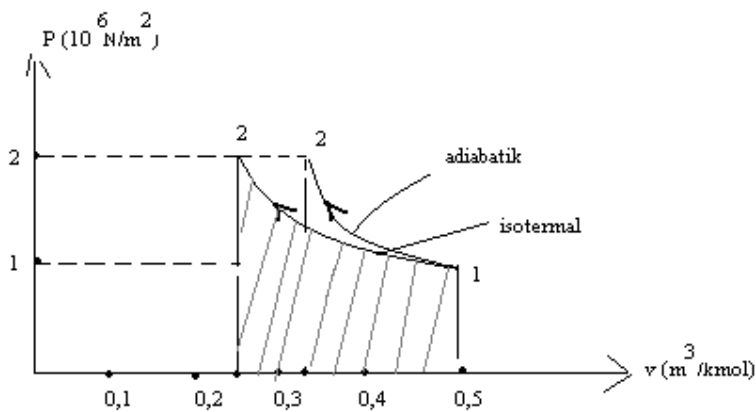
**Langkah 2:** Menggambarkan keadaan fisis

Kedua proses tersebut digambarkan pada diagram P-v

Pada proses isothermal  $P_1 v_1 = P_2 v_2 = C$  maka  $v_2 = P_1 v_1 / P_2 = \frac{1}{2} v_1$

Pada proses adiabatik  $P_1 v_1^\gamma = P_2 v_2^\gamma = C$  maka  $v_2^\gamma = (P_1 v_1^\gamma / P_2) = \frac{1}{2} v_1^\gamma$ ;

$$v_2 = \left(\frac{1}{2}\right)^{3/5} v_1 = 0,66 v_1$$



**Langkah 3:** Merencanakan Penyelesaian

Asumsi: Sistem menjalani proses secara kuasistatis berlaku  $dw = -PdV$

Angkah 4: Penyelesaian

$$W_{iso} = -\int_1^2 Pdv = -\left( P_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} \right) = -(10^6 \times 0,5 \times \ln 0,5) = 245 \text{ kJ / kmol}$$

$$W_{adiabat} = -\int_1^2 Pdv = -\int_1^2 \frac{c}{v^\gamma} dv = c \frac{v^{1-\gamma}}{\gamma-1}$$

$$= \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{\gamma-1} = \frac{2 \cdot 10^6 \times 0,66 \times 0,5 - 10^6 \times 0,5}{0,67} = 239 \text{ kJ/kmol}$$

**Langkah 5:** Pengecekan hasil

$W_{iso} = 245 \text{ kJ/kmol}$  dan  $W_{adiabat} = 239 \text{ kJ/kmol}$ , terbukti bahwa kerja yang dilakukan pada proses isothermal memerlukan tenaga yang lebih besar daripada secara adiabatik. Hal ini juga terlihat dari luasan dibawah kurva proses pada diagram P-v (besar dan satuan sesuai).

**Contoh 9**

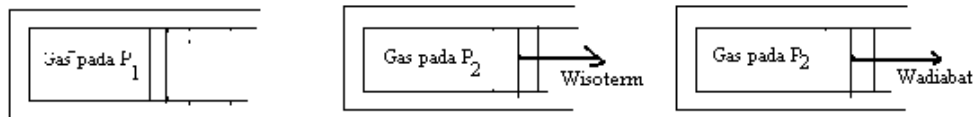
Suatu gas ideal memiliki  $c_v = 3/2R$  menempati volume  $4\text{m}^3$  dan tekanan 8 atm. Tentukan volume dan temperatur akhir, kerja yang dilakukan, kalor yang diserap dan perubahan energi internal untuk proses (a) ekspansi isothermal reversibel (b) Ekspansi adiabatik reversibel.

Langkah 1: Memfokuskan masalah

Diketahui:  $c_v = 3/2R$ ;  $V_1 = 4\text{m}^3$ ;  $T_1 = 400\text{K}$ ;  $P_1 = 8 \text{ atm}$ ;  $P_2 = 1 \text{ atm}$

Ditentukan:  $V_2$ ;  $T_2$ ;  $W$ ;  $Q$  dan  $\Delta U$

Sket keadaan Siistem:



**Langkah 2:** Menggambarkan keadaan fisis

Sistem gas ideal menjalani proses yang berbeda dari keadaan awal yang sama. Ingin kita bandingkan antara proses isothermal dan prooses adiabatik

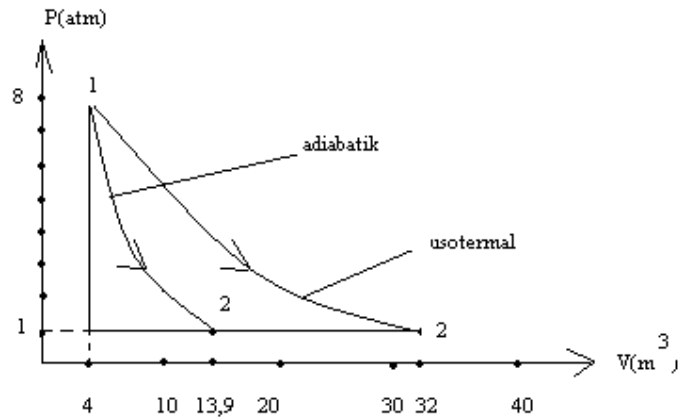
Untuk gas ideal berlaku  $(c_p - c_v) = R$ ;  $c_p = 5/2R$ ;  $\gamma = 5/3 R$

Untuk proses isothermal  $P_1 v_1 = P_2 v_2 = C$  maka  $v_2 = P_1 v_1 / P_2 = 8v_1 = 32\text{m}^3$

Untuk proses adiabatik  $P_1 v_1^\gamma = P_2 v_2^\gamma = C$  maka

$$v_2 = \left( P_1^{1/\gamma} v_1 / P_2^{1/\gamma} \right) = (8)^{3/5} v_1 = 13,9 m^3$$

Kedua proses tersebut bila digambarkan pada diagram P-V



### Langkah 3: Merencanakan Penyelesaian

Asumsi: Sistem menjalani kedua proses secara reversibel kuasistatis

Pada proses isotermal  $T_2 = T_1 = 400K$

Pada proses adiabatik  $T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$  maka  $T_2 = T_1 V_1^{\gamma-1} / V_2^{\gamma-1} = 173,6 = 174 K$

Mengacu pada hukum I:  $dU = dQ + dW$

### Langkah 4: Penyelesaian

$$W_{iso} = - \int_1^2 P dv = - \left( P_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} \right)$$

$$= - 8 \times 1,01325 \times 10^5 \times 4 \times \ln(32/4) = - 6,74 \times 10^6 J$$

$$W_{adiabat} = - \int_1^2 P dv = - \int_1^2 \frac{c}{v^\gamma} dv = c \frac{v^{1-\gamma}}{\gamma-1} = \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{\gamma-1}$$

$$= - ( 8 \times 1,01325 \times 10^5 \times 4 - 1,10325 \times 10^5 \times 13,9 ) = - 2,75 \times 10^6 J$$

Proses isotermal  $dT = 0$ :

Untuk gas ideal  $dU = c_v dT$  ;  $dT = 0$  maka  $dU = 0$

Dari Hukum I :  $dU = Q + W = 0$

$$Q = -W = 6,74 \times 10^6 J$$

Proses adiabatik  $Q = 0$

Dari Hukum I :  $dU = Q + W = 0 + (-2,75J) = -2,75J$

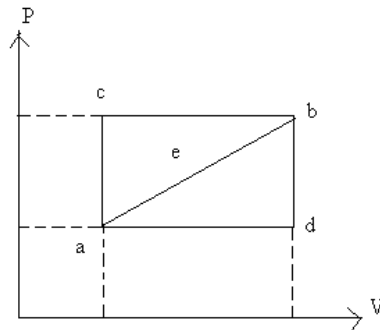
### Langkah 5: Pengecekan Hasil

- W isothermal -  $6,74 \times 10^6$  J (kerja dilakukan oleh sistem)
  - W adiabatik -  $2,75 \times 10^6$  J kerja dilakukan oleh sistem)
  - dU isothermal 0 ( tidak ada perubahan energi internal sistem)
  - dU adiabatik - $2,75$ J energi internal sistem turun)
  - Q isothermal  $6,74 \times 10^6$  J kalor masuk/diserap sistem)
  - Q adiabatik 0 (tidak ada kalor yang masuk atau keluar dari sistem)
- (besar dan satuan sesuai)

**E. Soal-Soal Tugas/Latihan**

Untuk mengaplikasikan konsep tentang kalor dan hukum I termodinamika serta melatih kemampuan problem-solving saudara, kerjakan latihan berikut sesuai langkah-langkah pada contoh soal.

- 3.1 Satu mol suatu gas memenuhi persamaan keadaan  $(P+a/v^2)(v-b) = RT$  dan energi internal molarnya  $u = cT - a/v$  dengan  $v$  volume molar dan  $a, b, c, R$  suatu konstanta. Tentukan kapasitas kalor molar  $c_v$  dan  $c_p$
- 3.2 Tunjukkan bahwa  $\left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T = -c_p \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h$
- 3.3 Tunjukkan bahwa untuk gas ideal  $h = h_0 + c_p(T-T_0)$
- 3.4 Suatu sistem gas menjalani proses seperti pada gambar di bawah ini. Pada proses acb gas menyerap 80 J dan melakukan kerja 30J.



- a. Tentukan kalor yang diserap gas pada proses adb jika pada proses ini gas melakukan kerja sebesar 10 J.
- b. Sistem dari keadaan b kembali ke keadaan a melalui lintasan e dan dikenai kerja sebesar 20 J. Tentukan kalor yang terlibat pada proses ini.
- c. Jika diketahui  $U_a = 0$  dan  $U_d = 40$ J. Tentukan kalor yang terlibat pada proses ad dan bd, tentukan pula arah aliran kalornya.



3.5 Tentukan perubahan energi internal suatu fluida dalam tabung adiabatik, jika fluida dikontakkan dengan suatu resistor 4 ohm yang dialiri arus 10 A selama 70 detik.

3.6 Suatu silinder yang dilengkapi piston terselubungi secara adiabatik, berisi gas dengan keadaan awal 6 bar dan 177° menempati volume 0,05 m<sup>3</sup>. Gas menjalani proses kuasistatis mengikuti persamaan PV<sup>2</sup>. Jika tekanan akhir 1,5 bar, tentukan:

- Kerja yang dilakukan dalam N-m
- Perubahan energi-internal dala kJ

3.7 Persamaan keadaan suatu gas dinyatakan sebagai P(v-b) = RT; dengan b konstanta. Energi internal spesifik gas dinyatakan u = c<sub>v</sub>T + konstanta. Tunjukkan:

- c<sub>p</sub>=c<sub>v</sub>+R
- pada proses reversibel adiabatik berlaku P(v-1)<sup>γ</sup> = konstan

3.8 Untuk sistem satu dimensi tunjukkan:

$$(a) C_L = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_L \quad (b) C_F = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_F$$

3.9 Tunjukkan untuk sistem hidrostatis, yang energi internalnya fungsi T dan P:

$$(a) dQ = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_p + P \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \right] dT + \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial P} \right)_T + P \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \right] dP$$

$$(b) \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_p = (c_p - Pv\beta), \beta = \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$$

3.10 Energi internal sistem hidrostatis merupakan fungsi P dan V, tunjukkan bahwa:

$$(a) dQ = \left( \frac{\partial u}{\partial P} \right)_V dP + \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial V} \right)_P + P \right] dV$$

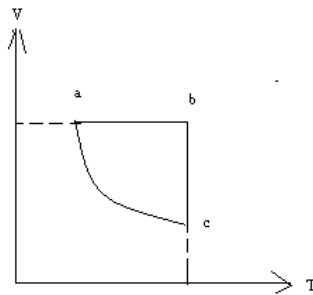
$$(b) \left( \frac{\partial u}{\partial P} \right)_V = c_v \frac{\kappa}{\beta}$$

$$(c) \left( \frac{\partial u}{\partial V} \right)_P = \frac{c_p}{V\beta} - P$$

3.11 Kapasitas kalor molar pada tekanan tetap suatu gas bervariasi terhadap temperatur menurut persamaan c<sub>p</sub> = a + bT - c/T<sup>2</sup> ; a,b,c konstanta. Tentukan

jumlah kalor yang dipindahkan selama proses isobarik sehingga  $n$  mol gas mengalami kenaikan temperatur dari  $T_1$  menjadi  $T_2$ .

- 3.12 Untuk mengadakan kompresi pada suatu sistem secara adiabatik (proses a-c) diperlukan energi 1000 J. Apabila dikompresi melalui lintasan b-c diperlukan 15000 J, tetapi ternyata 600 J kalor keluar dari sistem. Proses ini ditunjukkan pada gambar berikut



Tentukan  $Q$ ,  $\Delta U$  dan  $W$  pada masing-masing proses a-b, b-c, c-a dan pada siklus a-b-c-a. Tuangkan jawaban anda pada tabel berikut

Proses	$Q$	$\Delta U$	$W$
a-b			
b-c			
c-a			
a-b-c-a			

- 3.13 Karbon dioksida berekspansi secara isothermal-kuasistatis di dalam sistem tertutup dari keadaan awal 1,3 bar,  $150^{\circ}\text{C}$  dan volume  $0,1 \text{ m}^3$  ke volume akhir: (a)  $0,2 \text{ m}^3$  (b)  $0,3 \text{ m}^3$ . Tentukan besar dan arah aliran kalor dalam kJ.
- 3.14 Suatu silinder berpiston berisi  $0,12 \text{ kg}$  udara pada keadaan awal  $200 \text{ kPa}$  dan  $123^{\circ}\text{C}$ . Selama proses isothermal-kuasistatis kalor dipindahkan sejumlah: (a)  $20 \text{ kJ}$  (b)  $15 \text{ kJ}$  dan kerja listrik dilakukan pada sistem sebesar  $1,75 \text{ W}$ . Tentukan rasio volume akhir dan volume awal.
- 3.15 Sepuluh kg gas ideal yang memiliki massa molar (BM) 32 berada di dalam sistem tertutup, menjalani proses ekspansi isobar-kuasistatis dari keadaan awal  $1,3 \text{ bar}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$  ke keadaan akhir  $80^{\circ}\text{C}$ . Selama proses kalor  $550 \text{ J}$  ditambahkan. Tentukan nilai rata-rata  $c_v$  gas (dalam  $\text{kJ/kg } ^{\circ}\text{C}$ ).

- 3.16 Suatu gas berada di dalam balon yang terisolasi dengan baik. Volume balon mengembang 10%. Apakah energi internal balon naik, turun atau tetap sama? atau tidak cukup informasi untuk menentukan perubahan energi internalnya. Jelaskan jawaban anda.
- 3.17 Suatu campuran gas hidrogen dan oksigen di dalam tabung terisolasi tegar (misal tabung gas elpiji) diledakkan dengan percikan bunga api. Temperatur dan tekanannya naik. Abaikan jumlah kecil energi dari percikan api. (a) apakah ada aliran kalor ke dalam sistem?  
(b) Apakah kerja telah dilakukan oleh sistem? Apakah telah terjadi perubahan energi internal sistem? Jelaskan
- 3.18 Suatu gas ideal dengan  $C_V = 3/2R$  menempati volume  $4 \text{ m}^3$ , tekanan 8 atm dan temperatur 400K. Gas berekspansi sampai pada tekanan akhir 1 atm. Tentukan:
- Volume dan temperatur akhir
  - Kerja yang dilakukan
  - Kalor yang diserap
  - Perubahan energi internal
- masing-masing pada proses ekspansi isothermal reversibel dan ekspansi adiabatik.
- 3.19 Satu mol gas ideal dari  $P = 1 \text{ atm}$  dan  $T = 273 \text{ K}$  menuju  $P = 0,5 \text{ atm}$  dan  $T = 546 \text{ K}$
- Dijalani secara isothermal reversibel diikuti proses isobarik reversibel. Keadaan kembali ke kondisi awal dijalani secara isokhorik reversibel diikuti proses adiabatik reversibel. Anggaplah  $C_p = 3/2R$ .
- Gambarkan Siklus yang dijalani sistem pada diagram P-V
  - Untuk masing-masing proses dan siklus keseluruhan tentukan:  $T, V, P, W, Q, W, U$  dan  $H$  dan tabelkan.
- 3.20 Untuk gas van der Waals dengan persamaan energi  $u = c_v T - a/v + \text{tetapan}$   
Tunjukkan bahwa:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_s = \frac{\gamma}{\nu \kappa} \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_s$$



## BAB IV

### KONSEKUENSI HUKUM I TERMODINAMIKA

#### A. Pendahuluan

Pada bab ini anda akan mempelajari beberapa konsekuensi dari Hukum I Termodinamika meliputi: persamaan energi, variabel bebas  $T$  dan  $v$ , variabel bebas  $T$  dan  $P$ , variabel bebas  $P$  dan  $v$ , bentuk umum turunan parsial, proses reversibel adiabatik gas ideal, siklus Carnot, Mesin kalor dan Mesin pendingin. Pemahaman yang baik pada bab ini sangat membantu anda memahami Hukum II Termodinamika. Setelah mempelajari bab ini mahasiswa diharapkan memiliki kompetensi:

1. Memahami prinsip persamaan energi
2. Dapat menurunkan persamaan energi dengan  $T$  dan  $v$  sebagai variabel bebas
3. Dapat menurunkan persamaan energi dengan  $T$  dan  $P$  sebagai variabel bebas
4. Dapat menurunkan persamaan energi dengan  $P$  dan  $v$  sebagai variabel bebas
5. Dapat memanfaatkan dua bentuk umum turunan parsial untuk menyelesaikan masalah terkait
6. Memahami proses reversibel gas ideal
7. Memahami proses siklus Carnot
8. Memahami prinsip kerja mesin kalor dan mesin pendingin.
9. Terampil menyelesaikan soal-soal terkait menggunakan penyelesaian berbasis eksplisit

**Kata kunci:** persamaan energi, reversibel, siklus Carnot, mesin kalor, mesin pendingin

#### A Uraian Materi

##### 1. Persamaan Energi

Persamaan energi adalah persamaan yang mengungkapkan energi internal suatu bahan (sistem) sebagai fungsi variabel keadaan sistem.

Persamaan energi dan persamaan keadaan secara bersama-sama saling melengkapi dalam menentukan sifat-sifat bahan. Persamaan energi tidak dapat

diturunkan dari persamaan keadaan tetapi harus ditentukan secara terpisah. Oleh karena variabel P,v,T dihubungkan melalui persamaan keadaan, maka nilai dua diantaranya sudah cukup untuk menentukan keadaan. Dalam hal ini energi internal dapat dinyatakan sebagai fungsi dari dua variabel bebas sebarang. Masing-masing persamaan mendefinisikan suatu permukaan yang disebut **permukaan energi** dalam sistem koordinat cartesian.

Untuk sistem dengan variabel keadaan T,P dan v (volume spesifik adalah V/m) dapat dipilih dua diantaranya sebagai variabel bebas.

## 2. T dan v sebagai variabel bebas

Apabila dipilih u sebagai fungsi T dan v

$$u = f(T,v)$$

Perbedaan energi internal antara dua keadaan kesetimbangan dinyatakan

$$du = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv$$

Turunan parsial  $\left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T$  menyatakan kemiringan garis isothermal dan

$\left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$  kemiringan garis isokhorik pada permukaan u.

Hukum I Termodinamika untuk proses reversibel

$$dq = du + Pdv$$

$$dq = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + P \right] dv$$

Pada proses v konstan  $dv = 0$  dan  $dq = c_v dT$  dan berlaku

$$c_v dT_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT_v \text{ atau } \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = c_v$$

$$dq = c_v dT + \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + P \right] dv$$

Untuk proses tekanan konstan  $dq = c_p dT$

$$c_p dT_p = c_v dT_p + \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + P \right] dv_p \text{ persamaan ini bila dibagi dengan } dT_p$$

diperoleh

$$c_p - c_v = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + P \right] \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$$

Yang perlu dicatat bahwa persamaan ini mengacu pada suatu proses antara dua keadaan kesetimbangan. Dan hanya menyatakann hubungan umum yang sederhana dari variabel/koordinat sistem pada suatu keadaan setimbang. Oleh karena semua variabel disebelah kanan dapat dihitung dari persamaan keadaan sedangkan  $c_p$  dan  $c_v$  dapat diukur secara eksperimen.

Untuk proses temperatur konstan  $dT = 0$

$$dq = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + P \right] dv_T = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv_T + P dv_T \right]$$

Persamaan ini semata-mata hanya menyatakan suatu keadaan dimana kalor yang disuplai ke sistem pada proses reversibel isothermal sama dengan jumlah kerja yang dilakukan oleh sistem dan menaikkan energi internal.

Untuk proses adiabatik  $dq = 0$  (ditandai dengan subskrip s)

$$-c_v \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_s = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + P \right]$$

### 3. T dan P sebagai variabel bebas

Seperti halnya  $u$ , entalpi  $h$  suatu bahan hanya bergantung pada keadaan sehingga dapat dinyatakan sebagai fungsi dua variabel  $P, v$  dan  $T$ .

Apabila dipilih  $h$  sebagai fungsi  $T$  dan  $P$

$$h = f(T, P)$$

Entalpi antara keadaan dua keadaan kesetimbangan

$$dh = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial h}{\partial P} \right)_T dP$$

Turunan  $\left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$  dapat dihitung dari persamaan keadaan sedangkan  $\left( \frac{\partial h}{\partial P} \right)_T$  dapat

ditentukan dengan terlebih dahulu mendefinisikan  $\mathbf{h} = \mathbf{u} + \mathbf{Pv}$

Untuk dua keadaan yang berbeda

$$dh = du + Pdv + vdP$$

Apabila dihubungkan dengan hukum I termodinamika

$$dq = du + Pdv, \text{ diperoleh}$$

$$dq = dh - v dP$$

$$dq = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial h}{\partial P} - v \right)_T dP$$

Pada proses tekanan konstan,  $dP = 0$  dan  $dq = c_p dT$  sehingga diperoleh

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

$$dq = c_p dT + \left( \frac{\partial h}{\partial P} - v \right)_T dP$$

Pada proses volume konstan,  $dv = 0$  dan  $dq = c_v dT$

$$c_p - c_v = - \left[ \left( \frac{\partial h}{\partial P} \right)_T - P \right] \left( \frac{\partial T}{\partial T} \right)_v$$

Pada temperatur konstan

$$dq_T = \left( \frac{\partial h}{\partial P} - v \right)_T dP_T$$

Pada proses adiabatik,  $dq = 0$

$$c_p \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_s = - \left( \frac{\partial h}{\partial P} - v \right)_T$$

#### 4. P dan v sebagai variabel bebas

Apabila dipilih u sebagai fungsi P dan v

$$U = f(P, v)$$

$$du = \left( \frac{\partial u}{\partial P} \right)_v dP + \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_P dv \text{ dan bila fungsi } u = f(T, v)$$

$$du = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv$$

$$dT = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_v dP + \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_T dv \text{ dengan mengeliminasi } dT \text{ diperoleh}$$

$$du = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_v \right] dP + \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_T + \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T \right] dv$$

Akhirnya diperoleh turunan parsial u sebagai fungsi P dan v

$$\left( \frac{\partial u}{\partial P} \right)_v = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_v \right]$$



$$\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_p = \left[ \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T \right]$$

### 5. Bentuk Umum Hubungan Turunan Parsial

Setelah mengenal fungsi keadaan  $u$  dan  $h$  yang masing-masing dapat dinyatakan sebagai fungsi dua variabel diantara  $P, T$  dan  $v$ .

Terdapat bentuk umum hubungan antara turunan parsial.

Misal:  $w$  diidentikkan dengan  $u$  dan  $h$

$x, y, z$  identik dengan  $P, v, T$

Bentuk umum dinyatakan:

$$\boxed{\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_y = \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_y \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_y}$$

$$\boxed{\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_y = \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_u \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_y + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_z}$$

Contoh:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial P}\right)_v = \left[ \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_v \right]$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial P}\right)_v = \left[ \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_p \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_v + \left(\frac{\partial u}{\partial P}\right)_T \right]$$

### 6. Proses Reversibel Adiabatis gas Ideal

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_s = \left[ \frac{c_p}{c_v} \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T \right] \quad (\text{indek s menyatakan proses adiabatik})$$

Untuk gas ideal  $Pv = RT$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T = -\frac{P}{v} \quad \text{dan} \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

$$\boxed{Pv^\gamma = \text{kons tan}}$$

$$\boxed{TP^{(1-\gamma/\gamma)} = \text{kons tan}}$$

$$\boxed{Tv^{\gamma-1} = \text{kons tan}}$$

Untuk gas ideal monoatomik  $\gamma = 1,67$

Untuk gas ideal diatomik  $\gamma = 1,40$

Untuk gas ideal yang menjalani proses adiabatik berlaku hubungan:

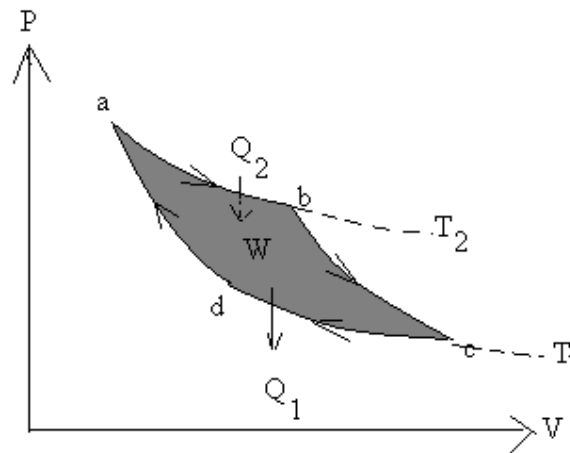
$$w = \frac{1}{1-\gamma} (P_2 v_2 - P_1 v_1)$$

$$w = c_v (T_1 - T_2)$$

## 7. Siklus Carnot

Siklus Carnot adalah siklus reversibel yang terdiri atas: proses ekspansi isothermal pada  $T_2$  yang lebih tinggi, proses ekspansi adiabatik, proses kompresi isothermal pada  $T_1$  yang lebih rendah dan kompresi adiabatik menuju ke keadaan awal.

Pada diagram P-V siklus Carnot digambarkan sebagai berikut:



Apabila yang menjalani siklus adalah gas ideal, maka energi internalnya hanya fungsi T

$$U=f(T).$$

Oleh karena itu pada proses a-b (isoterm), energi internal sistem konstan dan jumlah kalor yang masuk ( $Q_2$ ) ke dalam sistem sama dengan kerja yang dilakukan pada proses ini ( $W_2$ ):

$$|Q_2| = |W_2| = nRT_2 \ln V_b / V_a$$

Pada proses c-d, jumlah kalor yang dilepas sistem ( $Q_1$ ) sama dengan kerja ( $W_1$ ):

$$|Q_1| = |W_1| = nRT_1 \ln V_c / V_b$$

Pada proses c-d (adiabatik) berlaku hubungan:

$$T_2 V_b^{\gamma-1} = T_1 V_c^{\gamma-1}$$

Pada proses d-a juga berlaku:

$$T_2 V_a^{\gamma-1} = T_1 V_d^{\gamma-1}$$

Apabila persamaan pertama dibagi persamaan kedua diperoleh:

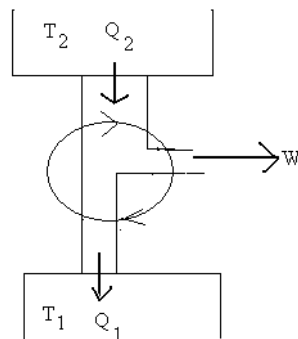
$$\frac{V_b}{V_a} = \frac{V_c}{V_d} \quad \text{sehingga} \quad \boxed{\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}}$$

Dapat disimpulkan bahwa untuk benda kerja gas ideal perbandingan  $Q_2/Q_1$  hanya bergantung pada temperatur  $T_1$  dan  $T_2$ .

## 8. Mesin Kalor

Semua sistem yang menjalani siklus Carnot adalah prototip dari mesin kalor. Mesin kalor adalah suatu piranti yang bekerja dalam suatu siklus; menerima masukan kalor  $Q_2$  dari RK bertemperatur lebih tinggi  $T_2$ ; melakukan kerja mekanik  $W$  pada lingkungan; dan membuang kalor  $Q_1$  pada RK bertemperatur lebih rendah.

Secara sederhana diagram kerja mesin kalor digambarkan sbb:



Apabila benda kerja (working substance) yang menjalani suatu proses bersiklus, maka tidak mengalami perubahan energi internal ( $\Delta U = 0$ ). Oleh karena itu menurut Hukum I jumlah kalor netto ( $Q$ ) yang masuk sama dengan kerja netto ( $W$ ) yang dilakukan mesin dalam satu siklus:

$$Q = Q_2 - Q_1$$

$$W = Q = Q_2 - Q_1$$

Efisiensi termal mesin kalor ( $\eta$ ) didefinisikan sebagai perbandingan antara kerja keluaran  $W$  dengan kalor masukan  $Q_2$

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

Nilai  $\eta$  maksimum 100%.  $Q_1$  merupakan bagian kalor yang dibuang ke lingkungan yang tidak memiliki nilai ekonomis (justru menyumbang pada polusi termal lingkungan).

Apabila benda kerja gas ideal berlaku kaitan

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Dan efisiensi mesin kalor Carnot dinyatakan

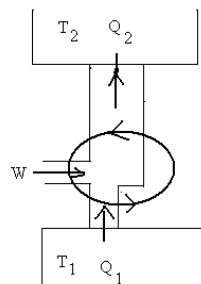
$$\eta = \frac{W}{Q_2} = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

## 9. Mesin Pendingin dan Pompa kalor

Mesin pendingin adalah suatu piranti yang bekerja dalam suatu siklus; memindahkan kalor  $Q_1$  dari reservoir (tandon kalor) bertemperatur rendah  $T_1$ ; kerja  $W$  dilakukan pada sistem (mesin); kalor  $Q_2$  ( $Q_2 = W + Q_1$ ) diberikan pada reservoir yang bertemperatur lebih tinggi  $T_2$ .

Secara sederhana diagram kerja mesin pendingin digambarkan sbb:



Koefisien Performansi  $\omega$  didefinisikan sebagai perbandingan antara kalor yang dipindahkan  $Q_1$  dengan kerja yang masuk  $W$ :

$$\omega_{pendingin} = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1}$$

Nilai  $C$  bisa lebih besar dari 100%

Untuk mesin pendingin Carnot:

$$\omega = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

Pompa Kalor adalah suatu piranti yang ditujukan untuk mensuplai kalor ke reservoir bertemperatur lebih tinggi  $T_2$  dan diperlukan kalor netto  $W$ .

Koefisien performansi didefinisikan sebagai perbandingan antara kalor yang disuplai  $Q_2$  dengan kerja yang masuk  $W$ :

$$\omega_{\text{pompa kalor}} = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_2 - Q_1}$$

Untuk pompa kalor Carnot:

$$\omega_{\text{pompa kalorcarnot}} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

### C. Ringkasan

(1) Persamaan energi adalah persamaan yang mengungkapkan energi internal suatu bahan (sistem) sebagai fungsi variabel keadaan sistem.

(2) Untuk variabel bebas  $T$  dan  $v$  berlaku kaitan

$$dq = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + P \right] dv$$

$$c_p - c_v = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + P \right] \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$$

(3) Untuk variabel bebas  $T$  dan  $P$  berlaku kaitan

$$dq = c_p dT + \left( \frac{\partial h}{\partial P} - v \right) dP$$

$$c_p - c_v = - \left[ \left( \frac{\partial h}{\partial P} \right)_T - P \right] \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_v$$

(4) Untuk variabel bebas  $P$  dan  $v$  berlaku kaitan

$$\left( \frac{\partial u}{\partial P} \right)_v = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_v \right]$$

$$\left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_P = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_P + \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T \right]$$

(5) Dua bentuk umum turunan parsial

$$\left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)_y = \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)_y \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)_y$$

$$\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_y = \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_u \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_y + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_z$$

(6) Untuk proses adiabatik gas ideal berlaku kaitan

$$Pv^\gamma = \text{kons tan}$$

$$TP^{(1-\gamma/\gamma)} = \text{kons tan}$$

$$Tv^{\gamma-1} = \text{kons tan}$$

$$w = \frac{1}{1-\gamma} (P_2 v_2 - P_1 v_1)$$

$$w = c_v (T_1 - T_2)$$

(7) Siklus Carnot adalah siklus reversibel yang terdiri atas: proses ekspansi isothermal pada  $T_2$  yang lebih tinggi, proses ekspansi adiabatik, proses kompresi isothermal pada  $T_1$  yang lebih rendah dan kompresi adiabatik menuju ke keadaan awal.

Apabila yang menjalani siklus Carnot gas ideal berlaku kaitan

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

(8) Mesin kalor adalah suatu piranti yang bekerja dalam suatu siklus; menerima masukan kalor pada temperatur yang lebih tinggi; melakukan kerja mekanik pada lingkungan; dan membuang kalor pada temperatur yang lebih rendah.

Efisiensi mesin kalor dinyatakan

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

(9) Mesin pendingin adalah suatu piranti yang bekerja dalam suatu siklus; memindahkan kalor  $Q_1$  dari reservoir (tandon kalor) yang bertemperatur rendah  $T_1$ ; kerja  $W$  dilakukan pada sistem (mesin); kalor  $Q_2$  ( $Q_2 = W + Q_1$ ) diberikan pada reservoir yang bertemperatur lebih tinggi  $T_2$ . Koefisien kinerja mesin pendingin dinyatakan

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

(10) Pompa Kalor adalah suatu piranti yang ditujukan untuk mensuplai kalor ke reservoir bertemperatur lebih tinggi  $T_2$  dan diperlukan kalor netto  $W$ .

Koefisien performansi didefinisikan sebagai perbandingan antara kalor yang disuplai  $Q_2$  dengan kerja yang masuk  $W$ :

$$\omega_{\text{pompa kalor}} = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_2 - Q_1}$$

## D. Contoh Soal Berbasis Penyelesaian Masalah Eksplisit

### Contoh 1.

Tunjukkan bahwa  $\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_P = c_P - P\beta v$

**Langkah 1:** Memfokuskan masalah

Diketahui: sistem hidrostatik dengan koordinat  $P, v, T$

Ditentukan: membuktikan bahwa  $\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_P = c_P - P\beta v$

**Langkah 2 :** mengambarkan keadaan fisis

Sistem hidrostatik dengan koordinat  $P, v, T$  dapat ditentukan turunan parsial  $u$

**Langkah 3:** merencanakan penyelesaian

Memilih  $u$  sebagai fungsi  $T$  dan  $P$

Mengacu pada persamaan Hukum I

**Langkah 4:** Penyelesaian

$$u = f(T, P)$$

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial u}{\partial P}\right)_T dP$$

Untuk sistem hidrostatik berlaku

$$dq = du + Pdv$$

$$dq = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial u}{\partial P}\right)_T dP + Pdv$$

Untuk proses tekanan konstan,  $dP = 0$  dan  $dq = c_P dT$

$$c_P dT = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_P dT + Pdv_P$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_P = c_P - P \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \text{ sedangkan } \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = \beta v$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_P = c_p - P\beta v$$

**Langkah 5:** Pengecekan hasil

Persamaan terbukti

**Contoh 2**

Tunjukkan untuk sistem hidrostatik berlaku

$$\left(\frac{\partial u}{\partial P}\right)_T = Pv\kappa - (c_p - c_v)\frac{\kappa}{\beta}; \kappa = -\frac{1}{v}\left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T$$

**Langkah 1:** Memfokuskan masalah

Diketahui : sistem hidrostatik dengan koordinat P,v,T

Ditentukan: Membuktikan persamaan

**Langkah 2:** Menggambarkan keadaan fisis

Sistem hidrostatik dapat ditentukan turunan parsial  $\left(\frac{\partial u}{\partial P}\right)_T$  karena memiliki

koordinat P,v,T.

**Langkah 3:** Merencanakan Penyelesaian

Memilih u sebagai fungsi T dan P dan v sebagai fungsi (T,P)

Mengacu pada rumusan matematik Hukum I

**Langkah 4:** Penyelesaian

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial u}{\partial P}\right)_T dP$$

$$dv = \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T dP$$

Untuk sistem hidrostatik

$$dq = du + Pdv$$

$$dq = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial u}{\partial P}\right)_T dP + P\left[\left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T dP + \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P dT\right]dP$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial P}\right)_T dP = dq - \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_P dT - P\left[\left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T dP + \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P dT\right] \text{ bila dibagi}$$

dengan dT

$$\left(\frac{\partial u}{\partial P}\right)_T dP / dT = dq / dT - \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_P + P\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \right\} - P\left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)$$



$$\left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_P + P \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \right\} = c_P$$

$$P \left( \frac{\partial v}{\partial P} \right)_T = -\kappa v$$

Untuk proses volume konstan

$$\left( \frac{\partial u}{\partial P} \right)_T \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_v = (dq/dT)_v - c_P + P\kappa v \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_v$$

$$\left( \frac{\partial u}{\partial P} \right)_T = (c_v - c_P) \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_v + P\kappa v$$

$$f(T, P, v) = 0$$

$$\left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_v \left( \frac{\partial P}{\partial v} \right)_T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_P = -1$$

$$\left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_v = - \left( \frac{\partial v}{\partial P} \right)_T / \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_P = \frac{\kappa}{\beta}$$

$$\text{Jadi } \left( \frac{\partial u}{\partial P} \right)_T = -(c_P - c_v)\kappa / \beta + P\kappa v$$

**Langkah 5:** Pengecekan hasil

Persamaan terbukti

### Contoh 3

Suatu mesin Carnot beroperasi antara dua reservoir kalor pada 400K dan 300K

- Jika mesin menerima 1200 kal dari reservoir 400K dalam satu siklus, tentukan jumlah kalor yang dibuang pada reservoir 300K
- Jika mesin beroperasi sebagai mesin pendingin(dibalik) dan menerima 1200 kal dari reservoir 300K, tentukan kalor yang dipindahkan pada reservoir 400K
- Tentukan jumlah kerja yang dilakukan mesin pada masing-masing kasus

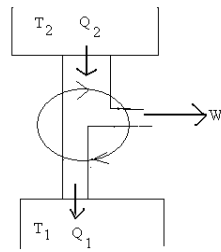
**Langkah 1:** Memfokuskan masalah

Diketahui: Mesin Kalor Carnot:  $Q_2 = 1200$  kal;  $T_2 = 400$ K;  $T_1 = 300$ K

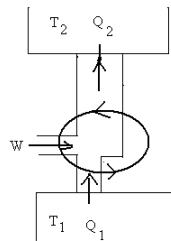
Mesin Pendingin Carnot:  $Q_1 = 1200$  kal;  $T_1 = 300$ K;  $T_2 = 400$ K

Ditentukan: Mesin Kalor Carnot:  $Q_1$  dan W keluaran Mesin Pendingin

Mesin kalor Carnot:



Mesin Pendingin Carnot:



**Langkah 2:** Menggambarkan keadaan fisis

- \*Mesin kalor Carnot bekerja pada reservoir 400K dan 300K, memperoleh kalormasukan 1200kal tiap siklus
- \* Mesin pendingin Carnot bekerja pada reservoir 300K dan 400K , memindahkan kalor 1200 kalori tiap siklus

**Langkah 3:** Merencanakan penyelesaian

Asumsi: mesin kalor dan mesin pendingin menjalani siklus secara reversibel

Berlaku kaitan  $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$

**Langkah 4:** Penyelesaian

Mesin kalor Carnot:

$$Q_1 = \frac{T_1}{T_2} Q_2 = 300/400 \times 1200 \text{ kal} = 900 \text{ kal.}$$

$$W = Q_2 - Q_1 = 1200 - 900 \text{ kal} = 300 \text{ kal.}$$

Mesin Pendingin Carnot:

$$Q_2 = \frac{T_2}{T_1} Q_1 = 400/300 \times 1200 \text{ kal} = 1600 \text{ kal.}$$

$$W = Q_2 - Q_1 = 1600 - 1200 = 400 \text{ kal.}$$

**Langkah 5:** Pengecekan hasil

- Kalor yang dibuang mesin kalor sebesar 900 kal
- Kalor yang dibuang mesin pendingin ke lingkungan sebesar 1600 kal
- Kerja yang dilakukan mesin kalor sebesar 300 kal
- Kerja masukan yang diperlukan mesin pendingin sebesar 400 kal  
(besar dan satuan sesuai)

**Contoh 4**

Suatu gedung didinginkan dengan mesin pendingin Carnot. Temperatur diluar gedung  $35^{\circ}\text{C}$  dan temperatur di dalam gedung  $20^{\circ}\text{C}$ . Jika mesin dijalankan oleh motor listrik  $12 \times 10^3$  watt, tentukan jumlah kalor yang dipindahkan dari dalam gedung tiap jam.

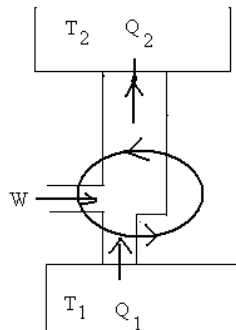
**Langkah 1:** Memfokuskan masalah

Diketahui:  $T_2 = 35 + 273 = 308\text{K}$ ;  $T_1 = 20 + 273 = 293\text{K}$ ;

$$W_{\text{masukan}} = 12 \times 10^3 \text{ J/dt}$$

Ditentukan:  $Q_1$  tiap jam

Sket keadaan sistem:



**Langkah 2:** Menggambarkan keadaan fisis

Gedung didinginkan dengan mesin pendingin Carnot dalam hal ini temperatur di dalam gedung sebagai  $T_1$  dan temperatur di luar gedung sebagai  $T_2$

**Langkah 3:** Merencanakan penyelesaian

Asumsi: Mesin pendingin Carnot bekerja secara reversibel

Berlaku kaitan  $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$  dan  $W = Q_2 - Q_1$

**Langkah 4:** Penyelesaian

$$Q_2 = W + Q_1 = 12 \times 10^3 + Q_1$$

$$\frac{12 \times 10^3 + Q_1}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \text{ maka } \frac{12 \times 10^3}{Q_1} + 1 = \frac{308}{293}$$

$$Q_1 = 12 \times 10^3 / 0,05 = 240 \times 10^3 \text{ J} = 2,4 \times 10^5 \text{ J/dt}$$

Untuk satu jam  $Q_1 = 2,4 \times 10^5 \times 3600 = 86,4 \times 10^7 \text{ J}$

**Langkah 5:** Pengecekan hasil

Besarnya kalor yang dipindahkan dari dalam gedung dalam waktu satu jam  $86,4 \times 10^7 \text{ J}$  (besar dan satuan sesuai)

### Contoh 5

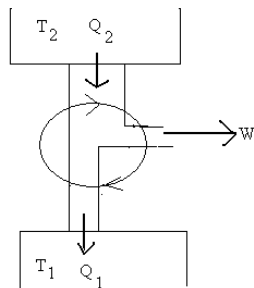
Mesin Kalor beroperasi dengan siklus Carnot memiliki efisiensi 40% dan membuang kalor pada temperatur  $25^\circ\text{C}$ . Tentukan (a) daya keluaran dalam kw; (b) temperatur sumber dalam  $^\circ\text{C}$  jika kalor yang disuplai 4000kJ/jam

**Langkah 1:** Memfokuskan masalah

Diketahui:  $\eta = 40\%$ ;  $T_1 = 25 + 273 = 298\text{K}$ ;  $Q_2 = 4000\text{kJ/jam} = 1,11\text{kw}$

Ditentukan:  $W$  dan  $T_2$

Sket sistem:



**Langkah 2:** Menggambarkan keadaan fisis

Mesin kalor Carnot beroperasi pada  $T_1 = 298\text{K}$  dan menghasilkan daya keluaran  $P$ , mendapatkan kalor  $Q_2 = 1,11\text{kw}$ , memiliki efisiensi 40%.

**Langkah 3:** Merencanakan Penyelesaian

Asumsi: mesin kalor menjalani siklus reversibel

Berlaku kaitan:  $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$  dan  $\eta = \frac{W}{Q_2}$

**Langkah 4:** Penyelesaian

(a)  $W = \eta \times Q_2 = 40/100 \times 1,1 \text{ kw} = 0,44 \text{ kw}$

(b)  $W = Q_2 - Q_1$  ;  $Q_1 = Q_2 - W = 1,11 - 0,44 = 0,67 \text{ kw}$

$T_2 = Q_2/Q_1 \times T_1 = 1,11/0,67 \times 298 \text{ K} = 494\text{K} = 494 - 273 = 221^{\circ}\text{C}$

**Langkah 5:** Pengecekan hasil

Daya keluaran mesin sebesar 0,44 kw dan temperatur sumber 221<sup>0</sup>C (besar dan satuan sesuai)

**Contoh 6**

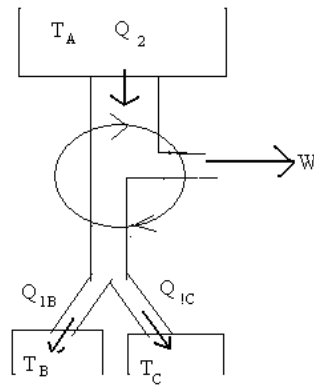
Suatu mesin kalor reversibel bertukar kalor dengan tiga reservoir dan menghasilkan kerja 400kJ. Reservoir A bertemperatur 500k dan mensuplai 1200kJ ke mesin. Jika reservoir B dan C memiliki temperatur 400K dan 300K. Tentukan jumlah kalor masing-masing yang dipertukarkan dengan mesin (dalam kJ) dan tentukan arah pertukaran kalornya.

**Langkah 1:** Memfokuskan masalah

Diketahui:  $W = 400\text{kJ}$ ;  $Q_{2A} = 1200\text{kJ}$ ;  $T_A = 500\text{K}$ ;  $T_B = 400\text{K}$ ;  $T_C = 300\text{K}$

Ditentukan:  $Q_{1B}$  dan  $Q_{1C}$

Sket keadaan sistem:



**Langkah2:** Menggambarkan keadaan fisis

Mesin kalor beroperasi dengan tiga reservoir kalor;  $T_A = 500\text{K}$ ;  $T_B = 400\text{K}$ ;  $T_C = 300\text{K}$  mendapatkan masukan kalor  $Q_2 = 1200\text{kJ}$  dan menghasilkan kerja keluaran  $W = 400\text{kJ}$

**Langkah 3:** Merencanakan penyelesaian

Asumsi: mesin beroperasi secara reversibel

Berlaku kaitan:  $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$  dan  $\eta = \frac{W}{Q_2}$

Kalor total yang dibuang melalui reservoir  $T_B$  dan  $T_C$  adalah  $Q_1 = Q_{1B} + Q_{1C}$  ;  
 $Q_1 = Q_2 - W$

**Langkah 4:** Penyelesaian

$$Q_1 = 1200 - 400 = 800\text{kJ}$$

$$Q_{1B} = \frac{T_B}{T_B + T_C} \times Q_1 = 400 / 700 \times 800 = 457\text{kJ}$$

$$Q_{1C} = \frac{T_C}{T_B + T_C} \times Q_1 = 300 / 700 \times 800 = 343\text{kJ}$$

**Langkah 5:** Pengecekan hasil

Kalor yang dibuang ke reservoir  $T_B$  sebesar 457kJ dan pada  $T_C$  sebesar 343kJ (besar dan satuan sesuai)

**Contoh 7**

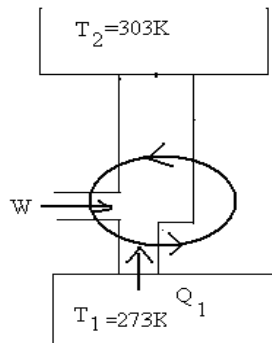
Mesin pendingin Carnot digunakan untuk menghasilkan es pada temperatur  $0^\circ\text{C}$ . Kalor dibuang pada reservoir  $30^\circ\text{C}$  dan entalpi pembekuan  $335\text{kJ/kg}$ . tentukan jumlah es yang dihasilkan tiap kw daya masukan tiap jam.

**Langkah 1:** Memfokuskan masalah

Diketahui:  $T_1 = 0 + 273 = 273\text{K}$ ;  $T_2 = 30 + 273 = 303\text{K}$ ;  $Q_1 = 335\text{kJ/kg}$

Ditentukan: m es yang dihasilkan

Sket keadaan sistem:



**Langkah 2:** Menggambarkan keadaan fisis

Mesin pendingin Carnot beroperasi pada reservoir  $T_1=273\text{K}$  (ruang es yang didinginkan)

dan  $T_2$  (lingkungan). Untuk pembekuan dibebaskan kalor sebesar  $335\text{kJ/kg}$  ( $Q_1$ )

**Langkah 3:** Merencanakan Penyelesaian

Berlaku kaitan:  $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$  dan  $W = Q_2 - Q_1$

**Langkah 4:** Penyelesaian

Kalor yang dibuang ke lingkungan  $Q_2$ :  $Q_2 = \frac{T_2}{T_1} Q_1$

$$= 303/273 \times 335 \text{ kJ/kg} = 372\text{kJ/kg}$$

Jumlah kerja masukan  $W$ :

$$W = Q_2 - Q_1 = 372 - 335 = 37 \text{ kJ/kg}$$

$1\text{kw} = 1\text{kJ/dt}$ , maka dalam 1 jam jumlah kerja masukan =  $1\text{kJ} \times 3600 = 3600\text{kJ}$

Dalam 1 jam jumlah es yang dihasilkan =  $3600\text{kJ}/(37\text{kJ/kg}) = 97,3 \text{ kg}$

**Langkah 5:** Pengecekan hasil

Jumlah es yang dihasilkan dalam waktu 1 jam sebesar  $97,3\text{kg}$  (besar dan satuan sesuai)

### Contoh 8

Pompa kalor Carnot digunakan untuk mempertahankan ruangan rumah dengan mensuplai kalor  $80.000\text{kJ/jam}$  pada temperatur  $22^\circ\text{C}$ . Kalor disuplai dari udara luar pada temperatur  $-5^\circ\text{C}$

(a) Tentukan daya masukan yang diperlukan (dalam kw)

(b) Jika biaya listrik tiap kwh Rp. 650,00. tentukan biaya yang dikeluarkan untuk 1 hari (mesin bekerja kontinyu)

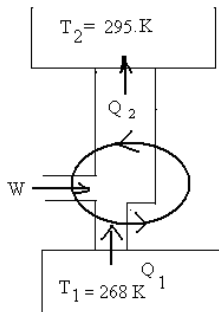
**Langkah 1:** Memfokuskan masalah

Diketahui:  $T_2=22+273=295\text{K}$ ;  $T_1=-5+273=268\text{K}$ ;

$$Q_2=80.000\text{kJ/jam}= 80.000/3600=22,2\text{kJ/dt} = 22,2 \text{ kw}$$

Ditentukan: P dan biaya tiap hari

Sket keadaan Sistem:



**Langkah2:** Menggambarkan keadaan fisis

Pompa kalor Carnot digunakan untuk mempertahankan temperatur ruangan rumah pada  $T_2= 295\text{K}$  dengan cara mensuplai kalor sebesar  $80.000\text{kJ/jam}$ . Kalor diperoleh dari udara luar sebesar  $Q_1$  yang bertemperatur  $268\text{K}$

**Langkah 3:** merencanakan Penyelesaian

Asumsi: Pompa kalor bekerja secara reversibel

$$\text{Berlaku kaitan : } \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \text{ dan } C_{\text{pompa kalor}} = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_2 - Q_1} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

**Langkah 4:**Penyelesaian

Jumlah kalor yang disuplai dari udara luar :

$$Q_1= T_1/T_2 \times Q_2 = 268/295 \times 22,2 = 20,2 \text{ kW}$$

$$W= Q_2 - Q_1= 22,2 - 20,2 = 2 \text{ kW}$$

Dalam satu hari biaya yang diperlukan  $2 \times 24 \times \text{Rp } 650,00= \text{Rp } 31.200,00$

**Langkah 5:** Pengecekan hasil

Besarnya daya masukan yang diperlukan  $2\text{kW}$  dan biaya tiap hari  $\text{Rp } 31.200,00$  (besar dan satuan sesuai)

**Contoh 8**

Sebuah mesin kalor Carnot menerima  $90\text{kJ}$  dari reservoir yang bertemperatur  $627^0\text{C}$  dan membuang kalor ke lingkungan yang bertemperatur  $27^0\text{C}$ . Sepertiga



kerja keluaran yang dihasilkan digunakan untuk menjalankan mesin pendingin Carnot. Mesin pendingin membuang 60kJ ke lingkungan pada 27°C. Tentukan:

- (a) Kerja keluaran mesin kalor
- (b) efisiensi mesin kalor
- (c) Temperatur rendah mesin pendingin
- (d) Koefisien performansi mesin pendingin

**Langkah 1:** Memfokuskan masalah

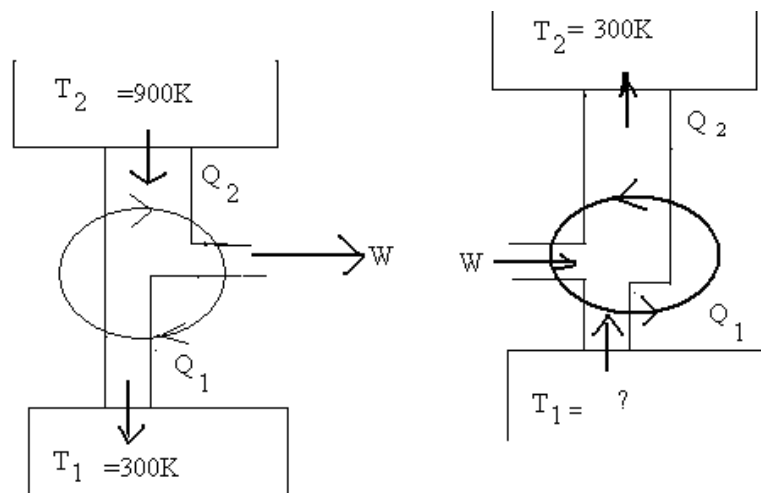
Diketahui:

Mesin Kalor Carnot:  $Q_2 = 90\text{kJ}$  ;  $T_2 = 637 + 273 = 900\text{K}$ ;  $T_1 = 27 + 273 = 300\text{K}$

Mesin Pendingin Carnot:  $W = 1/3 W$  mesin kalor;  $Q_2 = 60\text{kJ}$ ;  $T_2 = 27 + 273 = 300\text{K}$

Ditentukan:  $W$  mesin kalor;  $\eta$  mesin kalor;  $T_1$  mesin pendingin;  $C$  mesin pendingin

Sket keadaan sistem:



**Langkah 2:** Menggambarkan keadaan Fisis

Mesin kalor Carnot menerima kalor  $Q_2 = 90\text{kJ}$  dari reservoir  $T_2 = 900\text{K}$ , membuang kalor  $Q_1$  pada reservoir  $T_1 = 300\text{K}$  dan menghasilkan kerja keluaran  $W$ .

Selanjutnya  $1/3 W$  yang dihasilkan mesin kalor digunakan untuk menjalankan mesin pendingin yang memindahkan kalor  $Q_1$  dari reservoir  $T_1$  ke reservoir  $T_2$  (lingkungan) sebesar  $Q_2 = 60\text{kJ}$

**Langkah 3:** Merencanakan Penyelesaian

Asumsi: Mesin kalor dan mesin pendingin menjalani siklus secara reversibel

Berlaku kaitan:  $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$ ;  $W = Q_2 - Q_1$ ;  $\eta = \frac{W}{Q_2}$ ;  $C_{\text{pendingin}} = \frac{Q_1}{W}$

**Langkah 4: Penyelesaian**

Mesin kalor:  $Q_1 = T_1/T_2 \times Q_2 = 300/900 \times 90\text{kJ} = 60 \text{ kJ}$

$W = Q_2 - Q_1 = 90 - 60 = 30\text{kJ}$

$\eta = \frac{W}{Q_2} = 30/90 = 33\%$

Mesin Pendingin:  $W_{\text{pendingin}} = 1/3 W_{\text{kalor}} = 1/3 \times 90 = 30\text{kJ}$

$Q_1 = Q_2 - W = 90 - 30 = 60\text{kJ}$

$T_1 = Q_1/Q_2 \times T_2 = 60/90 \times 300\text{K} = 200\text{K}$

$T_1 = 200 - 273 = -73^\circ\text{C}$

$C = Q_1/W = 60/30 = 2$

**E. Soal-Soal Latihan/Tugas**

4.1 Satu mol suatu gas memenuhi persamaan keadaan  $(P+a/v^2)(v-b) = RT$  dan energi internal molarnya  $u = cT - a/v$  dengan  $v$  volume molar dan  $a, b, c, R$  suatu konstanta. Tentukan kapasitas kalor molar  $c_v$  dan  $c_p$

4.2 Tunjukkan bahwa  $\left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T = -c_p \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h$

4.3 Buktikan bahwa  $\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_P = c_p - P\beta v$

4.4 Buktikan bahwa  $\left(\frac{\partial h}{\partial v}\right)_P = c_p \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_P$

4.5 Buktikan bahwa  $\left(\frac{\partial u}{\partial P}\right)_v = c_v \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_v$

4.6 Tunjukkan bahwa untuk gas ideal  $h = h_0 + c_p(T-T_0)$

4.7 Persamaan keadaan suatu gas dinyatakan  $(P + b)v = RT$  dan energi internal spesifik  $u = aT + bv + u_0$ . Tunjukkan bahwa:

a.  $h = (a + R)T + \text{konstanta}$

b.  $\left(\frac{\partial h}{\partial v}\right)_P = c_p T / v$

c. Tentukan  $c_p$  dan  $c_v$

d. Buktikan  $c_p - c_v = R$

- 4.8 Pada temperatur berapakah kalor disuplai ke mesin Carnot yang membuang 1000kJ/menit kalor ke reservoir yang bertemperatur  $7^{\circ}\text{C}$  dan menghasilkan (a) Daya 40kw; (b) 50kw
- 4.9 Sebuah mesin kalor Carnot beroperasi antara temperatur  $827^{\circ}\text{C}$  dan  $17^{\circ}\text{C}$ . Untuk setiap kw daya keluaran, tentukan: (a) kalor yang disuplai dan yang dibuang (dalam kJ/jam; (b) efisiensi termal
- 4.10 Dua mesin kalor carnot disusun seri. Mesin A menerima kalor pada  $727^{\circ}\text{C}$  dan membuang kalor pada reservoir yang bertemperatur T. Mesin B menerima kalor yang dibuang mesin A, dan membuang kembali kalor pada reservoir yang bertemperatur  $7^{\circ}\text{C}$ . Tentukan temperatur T (dalam  $^{\circ}\text{C}$ ) untuk keadaan: (a) daya keluaran kedua mesin adalah sama; (b) Efisiensi kedua mesin sama
- 4.11 Sebuah mesin pendingin reversibel menyerap 400kJ/menit dari ruang pendingin dan memerlukan 3 kw untuk menjalankannya. Jika mesin dibalik arahnya menerima 100 kJ/menit dari sumber panas. Tentukan daya dalam kw yang dihasilkan
- 4.12 Pompa kalor Carnot digunakan untuk memanaskan gedung. Udara luar  $-6^{\circ}\text{C}$  merupakan reservoir bertemperatur rendah (dingin). Gedung pada temperatur  $26^{\circ}\text{C}$  adalah reservoir panas dan diperlukan daya 120.000 kJ/jam untuk pemanasan. Tentukan (a) udara yang diambil dari udara luar dalam kJ/jam; (b) daya masukan yang diperlukan dalam kw
- 4.13 Pompa kalor Carnot beroperasi antara temperatur  $-7^{\circ}\text{C}$  dan  $29^{\circ}\text{C}$  memerlukan daya masukan 3,5kw. Tentukan (a) koefisien performansi;(b) kalor yang disuplai pada reservoir  $29^{\circ}\text{C}$  dalam kJ/dt
- 4.14 Pompa kalor Carnot memindahkan kalor dari reservoir bertemperatur rendah  $-15^{\circ}\text{C}$  dan membuang kalor pada temperatur  $26^{\circ}\text{C}$ . Jika biaya listrik Rp 590,00 tiap kwh, tentukan biaya operasi untuk mensuplai 50.000kJ/jam
- 4.15 Mesin kalor Carnot beroperasi antara  $727^{\circ}\text{C}$  dan  $27^{\circ}\text{C}$  disuplai 500kJ/siklus. 60% kerja yang dihasilkan digunakan untuk menjalankan pompa kalor yang membuang kalor ke lingkungan pada temperatur  $27^{\circ}\text{C}$ . jika pompa kalor memindahkan 1050 kJ/siklus dari reservoir yang bertemperatur rendah, tentukan (a) kalor yang dibuang ke lingkungan yang bertemperatur  $27^{\circ}\text{C}$  dalam kj/siklus; (b) temperatur reservoir

- 4.16 Mesin kalor Carnot menerima 90kJ dari reservoir pada temperatur 627<sup>0</sup>C, kemudian membuang kalor ke lingkungan yang bertemperatur 27<sup>0</sup>C. Sepertiga kerja yang dihasilkan digunakan untuk menjalankan mesin pendingin Carnot. Mesin pendingin membuang 60 kJ ke lingkungan pada temperatur 27<sup>0</sup>C. Tentukan:
- (a) kerja yang dihasilkan mesin kalor; (b) Efisiensi mesin kalor; (c) temperatur reservoir yang bertemperatur rendah mesin pendingin; (d) koefisien performansi mesin pendingin
- 4.17 Mesin kalor Carnot menerima kalor dari reservoir pada temperatur tinggi sebesar 800kJ/menit, dan membuang kalor ke lingkungan pada temperatur 27<sup>0</sup>C. Kerja yang dihasilkan mesin kalor digunakan untuk menjalankan mesin pendingin Carnot yang menerima kalor sebesar 100kJ/menit dari reservoir bertemperatur -23<sup>0</sup>C. Mesin pendingin juga membuang kalor ke lingkungan pada 27<sup>0</sup>C. Tentukan (a) Kerja yang dihasilkan mesin dalam kJ/menit; (b) Temperatur tinggi mesin kalor
- 2.18 Mesin pendingin Carnot memindahkan kalor dari reservoir yang bertemperatur -8<sup>0</sup>C dan membuang kalor ke lingkungan pada 15<sup>0</sup>C. Mesin pendingin digandengkan dengan keluaran mesin kalor Carnot yang menerima kalor pada 577<sup>0</sup>C dan juga membuang kalor ke lingkungan. Tentukan rasio antara kalor yang disuplai ke mesin kalor dengan kalor yang dipindahkan oleh mesin pendingin
- 4.19 Mesin kalor Carnot digunakan untuk menjalankan mesin pendingin Carnot. Mesin kalor menerima  $Q_1$  dari  $T_1$  dan membuang  $Q_2$  dari  $T_2$ . Mesin pendingin memindahkan  $Q_3$  dari  $T_3$  dan membuang  $Q_4$  pada  $T_4$ . Nyatakan rasio  $Q_3/Q_1$  dalam variasi temperatur reservoir kalor ( $T_2$  dan  $T_1$ )
- 4.20 Energi internal spesifik gas van der Waals dinyatakan  $u = c_v T - a/v +$  konstanta

Tunjukkan bahwa:  $c_p - c_v = R \frac{1}{1 - \frac{2a(v-b)^2}{RTv^3}}$



## BAB V

### HUKUM II TERMODINAMIKA DAN ENTROPI

#### A. Pendahuluan

Pada bab ini anda akan mempelajari prinsip hukum II termodinamika yang meliputi; perubahan kerja menjadi kalor dan sebaliknya, perumusan hukum II, proses reversibel, bukti adanya fungsi keadaan entropi: Teorema Clausius, entropi gas ideal, perubahan entropi pada proses reversibel, perubahan entropi pada proses irreversibel, azas entropi dan penerapannya, entropi dan ketidakteraturan. Pemahaman yang baik pada bab ini akan membantu anda dalam mempelajari bab selanjutnya.

Setelah mempelajari bab ini diharapkan mahasiswa memiliki kompetensi:

1. Memahami proses perubahan kerja menjadi kalor dan sebaliknya
2. Memahami perumusan hukum II
3. Dapat menjelaskan proses reversibel
4. Dapat menjelaskan bukti adanya fungsi keadaan entropi: Teorema Clausius
5. Dapat menurunkan fungsi entropi gas ideal
6. Dapat memberi makna kurva pada diagram T-S
7. Dapat menentukan besarnya perubahan entropi pada proses reversibel
8. Dapat menentukan besarnya perubahan entropi pada proses irreversibel
9. Memahami azas entropi dan penerapannya
10. Menjelaskan hubungan entropi dan ketidakteraturan
11. Terampil menyelesaikan soal menggunakan penyelesaian soal berbasis eksplisit

**Kata-kata kunci: Hukum II, entropi, reversibel**

#### B. Uraian Materi

##### 1. Perubahan Kerja Menjadi Kalor dan Sebaliknya

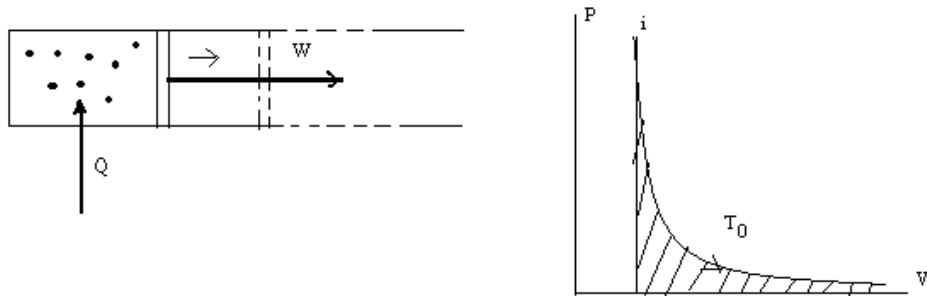
Dari pengalaman (eksperimen) telah diketahui bahwa kerja dapat diubah menjadi kalor seluruhnya. Misalnya, kalau dua benda (batu) digosokkan satu terhadap yang lain di dalam suatu fluida (sistem), maka kerja yang 'hilang' timbul sebagai kalor di dalam sistem.

Sekarang ingin diketahui apakah proses sebaliknya juga dapat terjadi; dapatkah kalor diubah menjadi kerja seluruhnya? Hal ini sangat penting artinya untuk

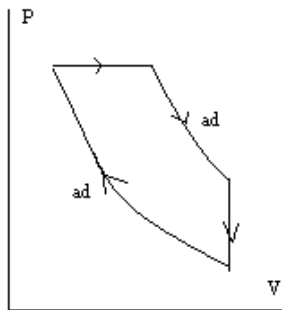
kehidupan sehari-hari, karena konversi ini merupakan dasar semua mesin bakar. Dalam suatu mesin bakar, bahan bakar menghasilkan kalor dan kalor ini dikonversikan menjadi kerja mekanis.

Menurut Hukum I :  $Q = \Delta U - W$

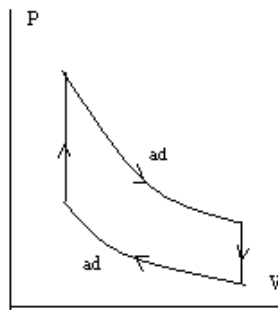
Untuk proses ekspansi isothermal gas ideal jelas  $\Delta U = 0$ , maka  $Q = -W$  artinya kalor yang diberikan ke sistem dapat diubah menjadi kerja luar . Namun secara praktis proses ini tidaklah mungkin terjadi secara terus-menerus, karena harus disediakan volume yang takhingga sebab piston harus bergeser terus, sehingga proses ini tidak dapat diambil manfaatnya.



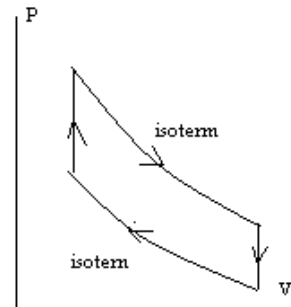
Agar secara praktis dapat bermanfaat, konversi harus dapat berjalan secara terus-menerus, tanpa memerlukan volum yang takhingga. Caranya adalah dengan menggunakan serangkaian proses sedemikian sehingga keadaan sistem **pada akhir** proses sama dengan keadaan awalnya, sehingga proses **dapat diulang** secara terus-menerus. Rangkaian proses ini disebut **siklus/daur**. Berikut ini ditinjau beberapa siklus yang digambarkan pada diagram P-V terlihat sebagai **kurva tertutup**.



Siklus Diesel



Siklus Otto



Siklus Stirling

**Hal yang perlu diperhatikan:**

1. Keadaan sistem pada akhir proses sama dengan keadaan awalnya, karena U fungsi keadaan maka  $U_f = U_i$  atau  $\oint dU = 0$  sehingga menurut Hukum I  $Q = -W$ .
2. Selama satu siklus ada proses dimana sistem melakukan kerja dan pada proses lain kerja dilakukan padanya.
3. Selama satu siklus terdapat proses dimana sistem menyerap kalor dan pada proses yang lain sistem melepas kalor
4. Siklus yang dijalani searah dengan arah putaran jarum jam mesin menghasilkan kerja ( $W = -|W|$ ). Mesin yang menjalani cara ini disebut Mesin kalor.
5. Siklus yang dijalani berlawanan arah perputaran jarum jam memerlukan kerja luar. Mesin demikian disebut mesin pendingin.

## 2. Perumusan Hukum II Termodinamika

**Perumusan Clausius:** Tidaklah mungkin dibuat mesin pendingin yang bekerja dalam suatu siklus yang dapat memindahkan kalor dari benda yang bertemperatur rendah ke benda yang bertemperatur tinggi, **tanpa** memerlukan kerja luar.

**Perumusan Kelvin-Planck:** tidaklah mungkin dibuat mesin kalor yang bekerja bersiklus dan dapat menghasilkan kerja luar, hanya dengan menyerap sejumlah kalor dari satu sumber panas saja, tanpa mengeluarkan sebagian kalor itu ke lingkungan dalam bentuk kalor. (sehubungan dengan mesin kalor, tidak mungkin memiliki efisiensi 100%).

Meskipun demikian kedua perumusan ini ekuivalen: tidak saling bertentangan.

## 3. Proses Reversibel

Di dalam termodinamika semua proses dianggap berlangsung secara kuasistatis. Proses demikian tidak sesuai dengan kenyataan di alam, karena semua proses berlangsung secara tidak kuasistatis. Proses alam bersifat spontan dari keadaan tak setimbang sistem beralih ke keadaan setimbang yang lain melalui keadaan –keadaan yang bukan setimbang.

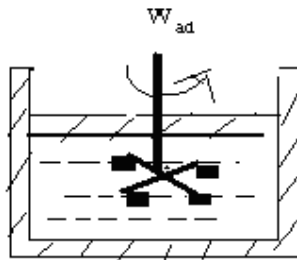
Fakta lain yang perlu diingat ialah bahwa semua proses alam disertai efek-efek berikut:



- gesekan: gaya antara benda-benda yang bergerak, bersentuhan satu dengan yang lain;
- viskositas: gesekan antara partikel-partikel fluida;
- hambatan listrik: hambatan yang dialami elektron dari inti-inti dalam kawat logam;
- histerisis: semacam hambatan dalam zat magnetik.

Dengan efek ini sistem dapat berelaksasi dari keadaan tak setimbang ke keadaan setimbang. Peristiwa ini juga disebut efek disipasi (to dissipate = menghilang).

Proses kuasistatis dan tidak disertai efek disipasi disebut **proses reversibel**, dan semua proses yang tidak memenuhi dua persyaratan ini disebut **irreversibel**. Jadi semua proses alam bersifat irreversibel. Hal ini dapat dibuktikan dengan menunjukkan suatu proses alam, dan mencoba membalikinya. Pada pembalikan ini ternyata **Hukum II dilanggar**. Sebagai contoh ditinjau proses kerja adiabatik berikut.



Suatu fluida kental di dalam wadah yang diselubungi dinding adiabatik diaduk. Menurut hukum I:  $dQ = 0$  dan  $W = U_f - U_i$ ; usaha luar yang dilakukan pada sistem diubah seluruhnya menjadi energi-internal. Proses ini jelas irreversibel, sebab seandainya reversibel berarti sistem dapat mengembalikan energi tersebut dan mengubah 100% menjadi kerja. Hal ini melanggar/bertentangan dengan Hukum II.

#### 4. Bukti adanya Fungsi Keadaan Entropi: Teorema Clausius

Suatu proses **reversibel** adalah proses yang berlangsung sedemikian sehingga pada akhir proses itu, baik sistem dan lingkungan setempatnya, dapat dikembalikan ke keadaan semula tanpa menimbulkan perubahan apapun pada sisa semesta. Pengertian entropi sistem diungkapkan oleh persamaan

$$dS = dQ_R/T$$

Indek R menunjukkan bahwa jumlah kalor  $dQ$  harus dipindahkan secara reversibel dan  $dS$  menyatakan perubahan entropi infinit sistem.

Jika integrasi dilakukan sepanjang siklus reversibel sehingga entropi awal dan akhirnya sama maka dinyatakan

$$\oint \frac{\delta Q_R}{T} = 0$$

Persamaan ini dikenal dengan nama **Teorema Clausius**. Di dalam matematika pernyataan diatas berarti bahwa  $\frac{\delta Q}{T}$  merupakan defetensial eksak, yaitu

**deferensial total dari suatu fungsi keadaan.** Fungsi ini diber nama **entropi** sistem dengan lambang S.

**Hal yang perlu diperhatikan:**

- $(\frac{\delta Q}{T})_R = dS$  adalah deferensial eksak
- $\oint dS = 0$ , integral  $dS$  sepanjang siklus reversibel sama dengan 0
- $\int_i^f dS = S_f - S_i = \Delta S_{if}$ , integral terbatas  $dS$  hanya bergantung keadaan awal dan keadaan akhir.

Untuk proses irreversibel berlaku **ketaksamaan Clausius** dinyatakan

$$\oint \frac{\delta Q_R}{T} < 0 \quad \text{atau} \quad (\frac{\delta Q}{T})_R < dS$$

Jadi dapat disimpulkan:

$$\boxed{\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0} \quad ; \quad \boxed{(\frac{\delta Q}{T}) \leq dS}$$

Tanda < untuk proses irreversibel; tanda = untuk proses reversibel

## 5. Entropi Gas Ideal

### a. Fungsi entropi untuk gas ideal sebgai fungsi T dan V

Hukum I :  $Q = \Delta U - W$

Untuk proses kuasistatis :  $\delta Q = dU + PdV$

Untuk Gas ideal :  $\delta Q = C_V dT + PdV$  dan  $PV = nRT$

Untuk proses reversibel :  $TdS = C_V dT + PdV$  atau  $dS = C_V \frac{dT}{T} + nR \frac{dV}{V}$

Apabila  $C_V$  dianggap konstan integrasi tanpa batas menghasilkan

$$S = C_V \ln T + nR \ln V + \text{kons tan ta}$$

### b. Entropi gas ideal sebagai fungsi T dan P

Untuk proses reversibel :  $TdS = C_P dT - VdP$  atau  $dS = C_P \frac{dT}{T} - nR \frac{dP}{P}$

Apabila  $C_P$  dianggap konstan integrasi tanpa batas menghasilkan

$$S = C_P \ln T - nR \ln P + \text{kons tan ta}$$

### c. Fungsi entropi gas ideal sebagai fungsi P dan V

Untuk gas ideal berlaku  $PdV + VdP = nRdT$

Untuk proses reversibel :  $TdS = C_P dT - VdP$  atau  $dS = C_P \frac{dT}{T} + C_V \frac{dV}{V}$

Apabila  $C_P$  dan  $C_V$  dianggap konstan integrasi tanpa batas menghasilkan

$$S = C_P \ln V + C_V \ln P + \text{kons tan ta}$$

## 6. Diagram T-S

Telah kita ketahui untuk proses reversibel berlaku  $dS = dQ/T$

Untuk proses adiabatik reversibel  $dQ = 0$  (atau  $Q = 0$ ) maka  $dS = 0$  ( $\Delta S = 0$ )

maka  $S_f = S_i$  (entropi tetap), proses ini juga disebut **proses isentropik**.

Proses isentropik dalam diagram T-S digambarkan sebagai garis lurus vertikal (tegak),

Diagram T-S merupakan diagram energi atau tepatnya diagram kalor.

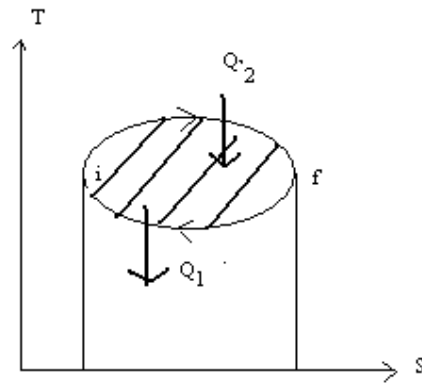
Untuk proses reversibel  $\delta Q = TdS$

$$Q = \int T dS$$

= luas dibawah kurva proses

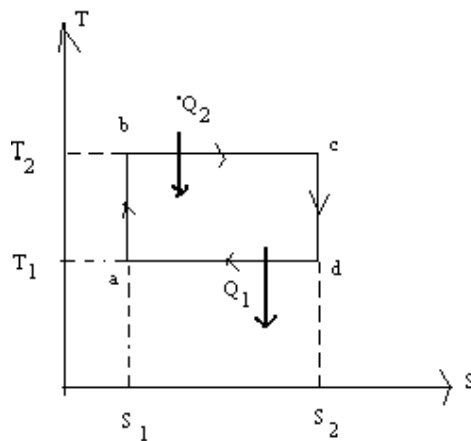
= kalor yang terlibat dalam proses

Oleh karena itu kerja yang dilakukan sistem dalam suatu siklus reversibel sama dengan luas siklus pada diagram T-S, karena  $W = Q_2 - Q_1$  seperti disajikan pada gambar berikut ini:



Siklus Carnot yang telah kita bahas menjadi sederhana bila digambarkan pada diagram

T-S, karena berupa persegi panjang (bujursangkar)



Efisiensi mesin Carnot dengan mudah dapat ditentukan:

$$\eta = \frac{W}{Q_2} = \frac{\text{luasbcda}}{\text{luasbc}S_2S_1} = 1 - \frac{adS_2S_1}{bcS_2S_1} = 1 - \frac{T_2(S_2 - S_1)}{T_1(S_2 - S_1)}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

## 7. Perubahan Entropi pada Proses Reversibel

Dalam suatu proses, jika perubahan entropi sistem ditambahkan terhadap perubahan entropi lingkungan lokalnya, maka dihasilkan perubahan **entropi semesta**. Dalam **proses reversibel entropi semesta tidak berubah**. Dengan kata lain, penjumlahan kedua perubahan entropi sistem dan lingkungan lokal menghasilkan perubahan entropi semesta nol.

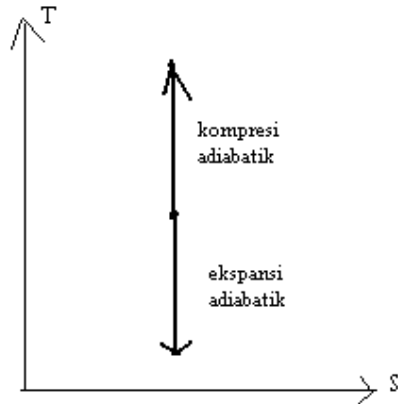
Untuk menghitung perubahan entropi ( $\Delta S$ ) sistem pada proses reversibel dari keadaan keseimbangan awal i ke keadaan keseimbangan akhir f, akan ditinjau

sistem gas ideal untuk masing-masing proses reversibel: adiabatik, isothermal, isokorik, dan isobarik. Masing-masing proses digambarkan pada diagram T-S berikut:

**a. Proses adiabatik reversibel**

$dQ = TdS$ ,  $dQ = 0$  maka  $\Delta S = 0$  atau  $S = \text{tetap}$

Pada diagram T-S, proses adiabatik reversibel tampak sebagai garis lurus vertikal



**b. Proses isothermal reversibel**

Dari persamaan  $dS = C_v \frac{dT}{T} + nR \frac{dV}{V}$  atau persamaan  $dS = C_p \frac{dT}{T} - nR \frac{dP}{P}$

Karena  $dT = 0$  maka  $dS = nR \frac{dV}{V}$  atau  $dS = -nR \frac{dP}{P}$

Sehingga untuk proses isothermal reversibel

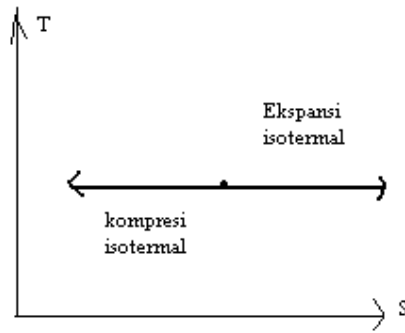
$$\Delta S_T = nR \ln \frac{V_f}{V_i}$$

Dari persamaan ini jelas bahwa

- untuk proses **ekspansi isothermal** menghasilkan **penambahan entropi** sistem
- untuk proses **kompresi isothermal** menghasilkan **pengurangan entropi** sistem

Juga bisa bertolak dari persamaan  $\Delta S_T = -nR \ln \frac{P_f}{P_i}$

Pada diagram T-S digambarkan sebagai berikut



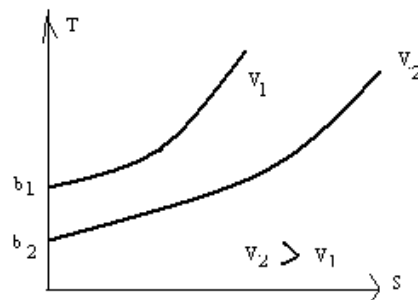
**c. Proses isokhorik reversibel**

Dari persamaan  $dS = C_V \frac{dT}{T} + nR \frac{dV}{V}$ , untuk  $dV = 0$  maka  $dS_V = C_V \frac{dT}{T}$

Dengan menganggap  $C_V$  tetap dan diintegrasikan diperoleh  $\Delta S_V = C_V \ln \frac{T_f}{T_i}$

Dari persamaan ini : apabila terjadi pemanasan menghasilkan penambahan entropi dan sebaliknya. Untuk menggambarkan proses isokorik, berangkat dari persamaan entropi

$$S = C_V \ln T + a \text{ atau } T = e \exp\left(\frac{S-a}{C_V}\right) = be^{S/C_V}$$



Tampak bahwa proses isokorik tergambar sebagai kurva ekponensial dengan kemiringan  $\left(\frac{\partial T}{\partial S}\right)_V = \frac{T}{C_V}$ . Bisa dibuktikan bahwa pada  $V_2 > V_1$  diperoleh kurva yang letaknya lebih rendah.

**d. Proses isobarik reversibel**

Dari persamaan  $dS = C_P \frac{dT}{T} - nR \frac{dP}{P}$ , karena  $dP = 0$  maka  $dS_P = C_P \frac{dT}{T}$

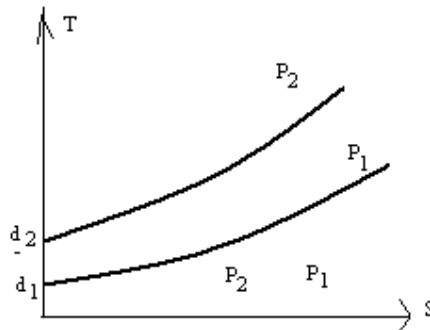
Dengan menganggap  $C_P$  konstan dan diintegrasikan menghasilkan  $\Delta S_P = C_P \ln \frac{T_f}{T_i}$

Untuk menggambarkan proses isobarik pada diagram T-S, berangkat dari persamaan

$$S = C_p \ln T + c \quad \text{atau} \quad T = e \exp\left(\frac{S-c}{C_p}\right) = de^{S/C_p}$$

Kemiringan kurva isobar  $\left(\frac{\partial T}{\partial S}\right)_P = \frac{T}{C_p}$ . Bisa dibuktikan bahwa pada  $P_2 > P_1$

diperoleh kurva yang letaknya diatas  $P_1$ . Pada diagram T-S tampak bahwa kurva isobar lebih landai dibanding isokor.



#### e. Perubahan Entropi pada RK

Dengan mengingat sifat RK, bahwa kalor yang keluar maupu masuk RK tidak mengubah suhunya, maka proses pertukaran kalor pada RK berlangsung secara isothermal, pada suhu RK tersebut. Selain itu P dan V tidak berubah, keadaan keseimbangan tidak terganggu, sehingga proses itu bersifat reversibel. Maka berlaku:

$$\Delta S_{RK} = \int \frac{\delta Q}{T} = \frac{1}{T_{RK}} \int \delta Q = \frac{Q}{T_{RK}}$$

Q dalam hal ini kalor yang masuk/keluar RK

#### f. Perubahan Entropi Sistem pada Perubahan Fase

Proses perubahan fase terjadi pada T yang tetap (isothermal) pada suhu transisi dan P tetap (isobarik).

Perubahan entropi sistem dapat dihitung dengan persamaan:

$$\Delta S = \frac{Q_{yangterlibat}}{suhutransisi}$$

### 8. Perubahan Entropi pada Proses Irreversibel

Selanjutnya akan dihitung  $\Delta S$  sistem pada proses irreversibel. Sebagai langkah awal akan ditinjau 2 proses pencampuran, yaitu:

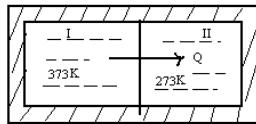
1. Pencampuran 2 cairan; air 1 kg pada suhu 273K dicampurkan dengan air 1 kg pada suhu 273K secara adiabatik dan isobarik.
2. Pencampuran 2 gas; gas H<sub>2</sub> pada (P,V,T) dicampurkan dengan gas N<sub>2</sub> pada (P,V,T) yang sama secara adiabatik.

Jelas kedua proses di atas bersifat irreversibel, sehingga cenderung mengatakan bahwa rumus  $\Delta S = \int \delta Q / T$ , tidak dapat digunakan dalam perhitungan, karena rumus tersebut hanya berlaku untuk proses reversibel. Tetapi jika diperhatikan, pada kedua proses tersebut keadaan akhir dan keadaan awal merupakan keadaan keseimbangan, maka Teorema Clausius dapat diberlakukan. **Hal ini dikarenakan S adalah fungsi keadaan, maka nilai integralnya hanyalah ditentukan oleh keadaan awal dan keadaan akhir, tidak oleh jalannya.**

**“ Apabila dalam suatu proses irreversibel, i dan f merupakan keadaan keseimbangan, maka dalam menghitung  $\Delta S$  lintasan irreversibel tersebut, dapat diganti dengan jalan reversibel, asalkan keadaan i dan keadaan f kedua proses tersebut adalah sama”**

Untuk proses pencampuran 2 cairan tersebut  $\Delta S$  sistem dapat dihitung dengan cara sbb.

Keadaan i (sebelum dicampur) adalah keadaan keseimbangan demikian keadaan f (sesudah dicampur) juga keadaan keseimbangan. Proses ini jelas irreversibel.



$$\Delta S_I = C_p \int_{373}^{323} \frac{dT}{T} = C_p \ln \frac{323}{373} \quad (T_f = 323K \text{ suhu akhir keseimbangan mudah}$$

ditentukan)

$$\Delta S_{II} = C_p \int_{273}^{323} \frac{dT}{T} = C_p \ln \frac{323}{273}$$

$$\Delta S_{sistem} = \Delta S_I + \Delta S_{II} = C_p \ln \frac{323}{273} + C_p \ln \frac{323}{373}$$



$$= c_p \ln \frac{(323)^2}{(273)(373)} > 0 \text{ (karena } \Delta S > 0 \text{ maka proses pencampuran ini}$$

irreversibel)

## 9. Azas Entropi dan Penerapannya

Apabila perhitungan  $\Delta S$  dilakukan pada sistem dan lingkungan lokalnya untuk proses reversibel dan juga proses irreversibel akan diperoleh kesimpulan bahwa :

$$(\Delta S)_{\text{alam/semesta}} = (\Delta S)_{\text{sistem}} + (\Delta S)_{\text{lingkungan}} \geq 0$$

yang disebut sebagai **Azas Entropi**. Tanda  $>$  untuk proses irreversibel sedangkan tanda  $=$  untuk proses reversibel. Ada versi perumusan lain dari azas entropi ini yakni untuk sistem yang terisolasi dari lingkungan maka  $\Delta S_{\text{lingkungan}} = 0$  sehingga berlaku:

$$(\Delta S)_{\text{sistem}} \geq 0$$

Tanda  $>$  untuk proses irreversibel, dan tanda  $=$  untuk proses reversibel. Proses ini adalah

### perumusan lain Hukum II Termodinamika.

Berikut ini kita tinjau beberapa proses agar lebih memahami azas entropi.

#### a. Proses Reversibel non-adiabatik

Pada proses ini jelas terjadi pertukaran kalor antara sistem dan lingkungan yang berlangsung secara reversibel. Apabila pada proses ini terjadi perubahan temperatur berarti supaya reversibel maka diperlukan tak berhingga jumlah RK yang bersuhu antara  $T_i$  dan  $T_f$ , dan sistem dikontakkan pada RK satu persatu.

Untuk menghitung  $\Delta S$ , misalkan sistem menyerap kalor dari RK ke-j sebanyak  $dQ_j$  yang berlangsung pada suhu  $T_j$  maka  $(\Delta S)_{\text{sistem}} = + (dQ_j/T_j)$ , dilain pihak RK menyerahkan kalor  $dQ_j$  ke sistem

$$(\Delta S)_{\text{RK}} = - (dQ_j/T_j)$$

$$(\Delta S)_{\text{semesta}} = (\Delta S)_{\text{sistem}} + (\Delta S)_{\text{RK}} = + (dQ_j/T_j) - (dQ_j/T_j) = 0$$

#### b. Proses reversibel adiabatik

$(\Delta S)_{\text{sistem}} = \int \delta Q / T = 0$ , (karena sistem tidak menerima/melepas kalor  $dQ = 0$ )

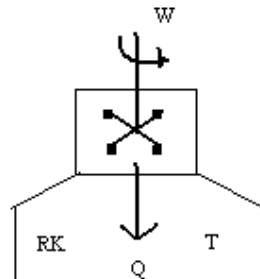
$$(\Delta S)_{\text{RK}} = (dQ_j/T_j) = 0, \text{ (karena } Q = 0)$$

$$(\Delta S)_{\text{semesta}} = (\Delta S)_{\text{sistem}} + (\Delta S)_{\text{RK}} = 0$$

**Kesimpulan: pada proses-proses reversibel,  $(\Delta S)_{\text{semesta}} = 0$**

**c. Proses irreversibel, non-adiabatik antara 2 keadaan kesetimbangan**

Cairan kental yang diaduk dengan kerja  $W$ , yang berubah menjadi  $Q$ , Kalor  $Q$  berpindah ke RK sehingga keadaan sistem tidak berubah. Proses ini irreversibel, sebab bila reversibel akan terjadi RK melepas  $Q$  yang oleh sistem dapat diubah menjadi  $W$  seluruhnya. Hal ini jelas melanggar Hukum II, jadi tidak mungkin terjadi.

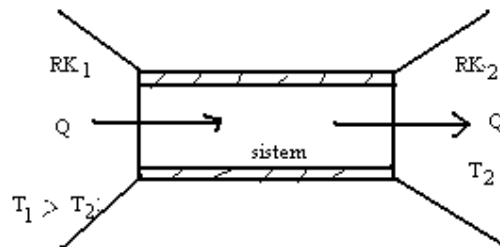


$$(\Delta S)_{\text{sistem}} = 0, \text{ (karena sistem tidak mengalami perubahan keadaan)}$$

$$\Delta S_{\text{lingkungan}} = Q/T_{\text{RK}}, \text{ yang positif}$$

$$(\Delta S)_{\text{semesta}} = (\Delta S)_{\text{sistem}} + (\Delta S)_{\text{L}} = Q/T_{\text{RK}} > 0 \text{ (positif)}$$

Selanjutnya ditinjau proses kalor masuk ke sistem dan meninggalkan lagi, tanpa mengubah keadaan sistem, secara sederhana tampak pada gambar berikut.



$$(\Delta S)_{\text{sistem}} = 0, \text{ (karena sistem tidak mengalami perubahan keadaan)}$$

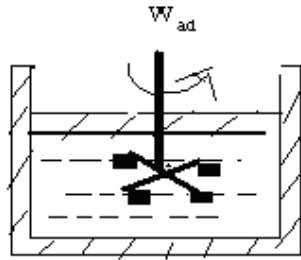
$$\Delta S_{\text{RK-1}} = -Q/T_1, \text{ yang negatif karena kalor keluar dari RK-1}$$

$$\Delta S_{\text{RK-2}} = +Q/T_2, \text{ yang positif karena kalor masuk ke RK-2}$$

$$\Delta S_{\text{semesta}} = |Q| \left[ \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right] > 0$$

**d. Proses irreversibel, adiabatik antara 2 keadaan kesetimbangan**

Proses cairan kental yang diaduk dengan  $W$  yang berubah menjadi kalor



$$\Delta S_{sist} = \int_i^f \delta Q / T$$

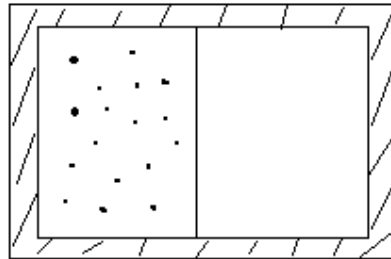
Untuk sistem gas ideal dan proses berlangsung secara isobarik

$$\Delta S_{sist} = C_p \int_i^f \frac{dT}{T} = C_p \ln \frac{T_f}{T_i}, \quad (\text{bila } C_p \text{ dianggap tetap})$$

$$\Delta S_{lingkungan} = 0$$

$$\Delta S_{semesta} = C_p \int_i^f \frac{dT}{T} = C_p \ln \frac{T_f}{T_i} > 0$$

Pada proses ekspansi bebas gas ideal yang keadaan awal dan akhirnya berupa keadaan kesetimbangan



$$\Delta S_{sist} = nR \int_i^f \frac{dV}{V} = nR \ln \frac{V_f}{V_i}$$

$$\Delta S_{lingkungan} = 0 \quad (\text{karena adiabatik})$$

$$\Delta S_{alam} = nR \int_i^f \frac{dV}{V} = nR \ln \frac{V_f}{V_i} > 0$$

**Kesimpulan: Pada proses-proses irreversibel  $(\Delta S)_{semesta} > 0$**

## 10. Entropi dan ketakteraturan

Kerja dalam termodinamika adalah konsep makroskopis. kerja menyangkut gerak molekular yang teratur. Tetapi, umumnya yang berlangsung secara alamiah melibatkan gerak rambang (ketakteraturan) molekul. Jadi proses seperti ini menyangkut transisi dari keteraturan menuju ke ketakteraturan. Dengan

demikian dapatlah dikatakan bahwa dalam semua proses alamiah didapatkan **kecenderungan alam untuk mengikuti proses menuju ke keadaan yang ketak-teraturannya lebih besar.**

Pertambahan entropi semesta ketika proses alamiah berlangsung merupakan ungkapan dari transisi ini. Dengan demikian dapatlah dikatakan bahwa **entropi sistem adalah derajat kerambangan molekular yang ada dalam sistem.** Hubungan antara entropi dan derajat kerambangan (yang dinyatakan kuantitas  $\Omega$  sebagai peluang termodinamik) diungkapkan oleh

$$S = k \ln \Omega$$

dengan k adalah tetapan.

### C. Ringkasan

(1) **Perumusan Clausius:** Tidaklah mungkin dibuat mesin pendingin yang bekerja dalam suatu siklus yang dapat memindahkan kalor dari benda yang bertemperatur rendah ke benda yang bertemperatur tinggi, **tanpa** memerlukan kerja luar.

(2) **Perumusan Kelvin-Planck:** tidaklah mungkin dibuat mesin kalor yang bekerja bersiklus dan dapat menghasilkan kerja luar, hanya dengan menyerap sejumlah kalor dari satu sumber panas saja, tanpa mengeluarkan sebagian kalor itu ke lingkungan dalam bentuk kalor.

(3) Proses kuasistatis dan tidak disertai efek disipasi disebut **proses reversibel** dan semua proses yang tidak memenuhi dua persyaratan ini disebut **irreversibel.**

(4) **Teorema Clausius** diungkapkan sebagai  $\oint \frac{\delta Q_R}{T} = 0$

$$(5) \quad \boxed{\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0} \quad ; \quad \boxed{\left( \frac{\delta Q}{T} \right) \leq dS}$$

Tanda < untuk proses irreversibel; tanda = untuk proses reversibel

(6) Entropi gas ideal dinyatakan sebagai fungsi 2 koordinat

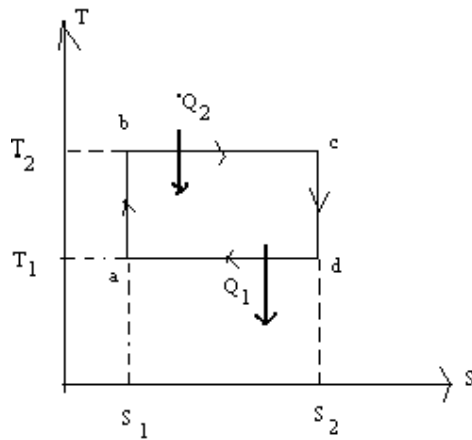
$$\boxed{S = C_V \ln T + nR \ln V + \text{kons} \tan ta}$$

$$\boxed{S = C_p \ln T - nR \ln P + \text{kons} \tan ta}$$

$$\boxed{S = C_p \ln V + C_V \ln P + \text{kons} \tan ta}$$

(7) Siklus Carnot yang telah kita bahas menjadi sederhana bila digambarkan pada diagram

T-S, karena berupa persegi panjang (bujursangkar)



(8) Dalam proses reversibel entropi semesta tidak berubah

(9) Dalam proses irreversibel entropi semesta bertambah

(10) **Azas Entropi** diungkapkan sebagai:  $(\Delta S)_{\text{alam/semesta}} = (\Delta S)_{\text{sistem}} +$

$(\Delta S)_{\text{lingkungan}} \geq 0$

(11) **Entropi sistem adalah derajat kerambangan molekular yang ada dalam sistem.** Hubungan antara entropi dan derajat kerambangan (yang dinyatakan kuantitas  $\Omega$  sebagai peluang termodinamik) diungkapkan oleh  $S = k \ln \Omega$

#### D. Contoh Soal Berbasis Penyelesaian Eksplisit

##### Contoh 1.

Arus listrik sebesar 10 A dipertahankan selama 1 detik dalam sebuah hambatan 25  $\Omega$ , sedangkan temperatur hambat dijaga tetap 27<sup>0</sup>C. Tentukan:

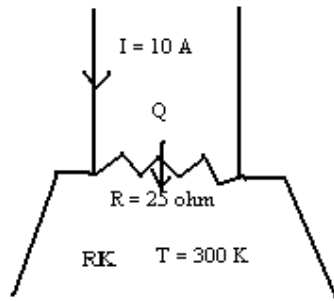
- perubahan entropi hambatan
- perubahan entropi semesta

##### Langkah 1: Memfokuskan masalah

Diketahui:  $I = 10 \text{ A}$ ,  $t = 1 \text{ dt}$ ,  $R = 25\Omega$ ,  $T = 27 + 273 = 300 \text{ K}$

Ditentukan :  $(\Delta S)_{\text{sistem}}$  dan  $(\Delta S)_{\text{alam/semesta}}$

Sket Sistem:



### Langkah 2; Menggambarkan keadaan fisis

Hambatan adalah sistemnya sedangkan RK adalah lingkungan. Setelah hambatan dialiri arus timbul kalor yang akan mengalir ke- RK, sehingga pada akhir proses sistem kembali ke keadaan awal.

### Langkah 3: Merencanakan Penyelesaian

Diasumsikan keadaan awal dan keadaan akhir sistem berada dalam ketimbangan,

sehingga persamaan  $\Delta S_{sist} = \int_i^f \delta Q / T$  dapat digunakan.

### Langkah 4: Penyelesaian

$\Delta S_{hambat} = 0$ , (karena pada akhir proses keadaannya tidak berubah

$$\begin{aligned} \Delta S_{RK \text{ (lingk)}} &= dQ/T = (I)^2 R t / T = \{(10)^2 \times 25 \times 1\} / 300 \\ &= 8,33 \text{ J/K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\Delta S)_{\text{alam/semesta}} &= (\Delta S)_{\text{sistem}} + (\Delta S)_{\text{lingkungan}} \\ &= 0 + 8,33 = 8,33 \text{ J/K} \end{aligned}$$

### Langkah 5: Pengecekan hasil

Besarnya perubahan entropi hambatan 0

Besarnya perubahan entropi semesta 8,33 J/K. Ini berarti proses tersebut adalah proses irreversibel (besar dan satuan sesuai).

### Contoh 2

Arus yang sama seperti pada contoh 1, dipertahankan dalam hambatan yang sama, tetapi hambatan sekarang tersekat secara termal dengan suhu awal  $27^{\circ}\text{C}$ . Jika hambatan ini bermassa 0,01 kg dan  $c_p = 0,84 \text{ kJ/kg K}$ . Tentukan:

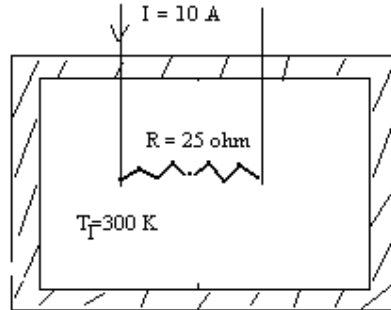
- besar perubahan entropi hambatan
- besar perubahan entropi semesta

### Langkah 1: Memfokuskan masalah

Diketahui :  $I = 10 \text{ A}$  ,  $t = 1 \text{ dt}$ ,  $R = 25\Omega$ ,  $T = 27 + 273 = 300 \text{ K}$ ;  $m = 0,01 \text{ kg}$  ;  
 $c_p = 0,84 \text{ kJ/kg K}$

Ditentukan :  $(\Delta S)_{\text{sistem}}$  dan  $(\Delta S)_{\text{alam/semesta}}$

Sket Keadaan sistem:



### Langkah 2: Menggambarkan keadaan fisis

Hambatan adalah sisemnya yang tersekat termal sehingga tidak ada interaksi dengan lingkungan atau prosesnya adiabatik.

### Langkah 3: Merencanakan penyelesaian

Diasumsikan keadaan awal dan keadaan akhir sistem berada dalam ketimbangan,

sehingga persamaan  $\Delta S_{\text{sist}} = \int_i^f \delta Q / T$  dapat digunakan.

### Langkah 4: Penyelesaian

$\Delta S_{\text{lingkungan}} = 0$  , (karena proses adiabatik)

Kalor yang masuk hambatan  $Q = (I)^2 R t = (10)^2 25 1 = 2500 \text{ J}$

Kalor yang diterima hambatan =  $m c_p (T_2 - T_1) = 2500$

Suhu akhir hambatan  $T_2 = T_1 + 2500 / (0,01 \times 840) = 300 + 297,6 = 597,6 \text{ K}$

$$\begin{aligned} \Delta S_{\text{hambat}} &= \Delta S_{\text{sist}} = \int_{300}^{597,6} \delta Q / T = m c_p \int_{300}^{597,6} dT / T = m c_p \ln T \\ &= 0,01 \times 840 \times \ln (597,6 / 300) = 5,79 \text{ J/K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\Delta S)_{\text{alam/semesta}} &= (\Delta S)_{\text{sistem}} + (\Delta S)_{\text{lingkungan}} \\ &= 5,79 + 0 = 5,79 \text{ J/K} \end{aligned}$$

### Langkah 5: Pengecekan Hasil

Besarnya perubahan entropi lingkungan 0

Besarnya perubahan entropi hambatan 5,79 J/K

Besarnya perubahan entropi semesta 5,79 J/K , artinya proses berlangsung secara irreversibel. (besar dan satuan sesuai)

### Contoh 3

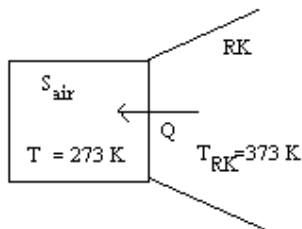
- a. Satu kg air pada 273 K disentuhkan pada RK bersuhu 373 K. Bila temperatur air mencapai 373 K, berapa perubahan entropi air? Perubahan entropi RK dan perubahan entropi semesta
- b. Jika mula-mula air telah dipanaskan dari 273 K dengan menyentuhkan ke RK 323 K, kemudian ke RK 273 K. Tentukan perubahan entropi semesta

#### Langkah 1: Memfokuskan masalah

Diketahui :  $T_1 = 273 \text{ K}$ ;  $m = 1 \text{ kg}$ ;  $T_{\text{RK}} = 373 \text{ K}$ ;  $c_p = 4,2 \text{ J/g K}$

Ditentukan :  $(\Delta S)_{\text{sistem}}$  dan  $(\Delta S)_{\text{alam/semesta}}$

Sket Keadaan sistem:



#### Langkah 2: Menggambarkan keadaan fisis

air adalah sisemnya sedangkan RK lingkungan. Karena suhu  $\text{RK} >$  dari suhu air maka ada aliran kalor dari RK ke air, ini akan menyebabkan kenaikan entropi sistem.

#### Langkah 3: Merencanakan penyelesaian

Diasumsikan keadaan awal dan keadaan akhir sistem berada dalam ketimbangan,

sehingga persamaan  $\Delta S_{\text{sist}} = \int_i^f \delta Q / T$  dapat digunakan.

#### Langkah 4: Penyelesaian

$$\text{a. } (\Delta S)_{\text{air}} = \Delta S_{\text{sist}} = \int_{273}^{373} \delta Q / T = m c_p \int_{273}^{373} dT / T = m c_p \ln T \text{ (dengan menganggap } c_p$$

konstan)

$$= 1 \times 4,2 \times 10^3 \ln (373/273) = 1319 \text{ J/K}$$

RK melepas kalor sejumlah  $dQ$

$$(\Delta S)_{\text{RK}} = - dQ / T = - m c_p (T_2 - T_1) / T_{\text{RK}}$$

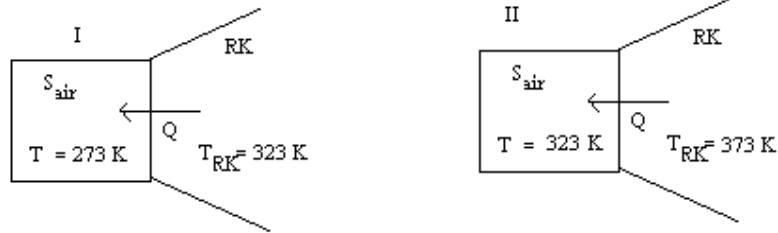
$$= - 1 \times 4,2 \times 10^3 (373 - 273) / 373 = - 1126 \text{ J/K}$$

$$(\Delta S)_{\text{alam/semesta}} = (\Delta S)_{\text{sistem}} + (\Delta S)_{\text{RK}}$$



$$= 1310 - 1126 = 184 \text{ J/K}$$

b. Proses kedua digambarkan sebagai berikut



$$(\Delta S)_{\text{air}} =$$

$$\Delta S_{\text{sisI}} = \int_{273}^{323} \delta Q / T = m c_p dT/T = m c_p \ln T \text{ (dengan menganggap } c_p \text{ konstan)}$$

$$= 1 \times 4,2 \times 10^3 \ln (323/273) = 706 \text{ J/K}$$

$$\Delta S_{\text{sisII}} = \int_{323}^{373} \delta Q / T = m c_p dT/T = m c_p \ln T \text{ (dengan menganggap } c_p \text{ konstan)}$$

$$= 1 \times 4,2 \times 10^3 \ln (373/323) = 605 \text{ J/K}$$

$$(\Delta S)_{\text{air}} = (\Delta S)_{\text{I}} + (\Delta S)_{\text{II}} = 706 + 605 = 1311 \text{ J/K}$$

$$(\Delta S)_{\text{RKI}} = - m c_p (323 - 273) / 323 = -1 \times 4,2 \times 10^3 (323 - 273) / 323 = -650 \text{ J/K}$$

$$(\Delta S)_{\text{RKII}} = - m c_p (373 - 323) / 373 = - 1 \times 4,2 \times 10^3 (373 - 323) / 373 = - 563 \text{ J/K}$$

$$(\Delta S)_{\text{RK}} = (\Delta S)_{\text{RKI}} + (\Delta S)_{\text{RKII}} = - 650 - 563 = -1213 \text{ J/K}$$

$$(\Delta S)_{\text{alam/semesta}} = (\Delta S)_{\text{sistem}} + (\Delta S)_{\text{RK}} = 1311 - 1213 = 98 \text{ J/K}$$

#### Langkah 5: Pengecekan hasil

Pada proses I perubahan entropi semesta 184 J/K

Pada prosesII perubahan entropi semesta 98 J/K

Dari kedua proses tersebut dapat disimpulkan bahwa proses keduanya berlangsung secara irreversibel ( besar dan satuan sesuai)

#### Contoh 4

Di dalam silinder yang dindingnya tersekat termal dan kedua ujungnya tetuap dipasang piston penghantar panas tanpa gesekan, yang membagi silinder menjadi dua bagian. Mula-mula piston dijepit di tengah-tengah, di ruangan kiri terdapat  $10^{-3} \text{ m}^3$  udara pada 300 K dan tekanan  $2 \times 10^5 \text{ Pa}$ , dan di ruangan kanan terdapat  $10^{-3} \text{ m}^3$  pada suhu 300 K dan tekanan  $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ . Selanjutnya piston dilepaskan dan

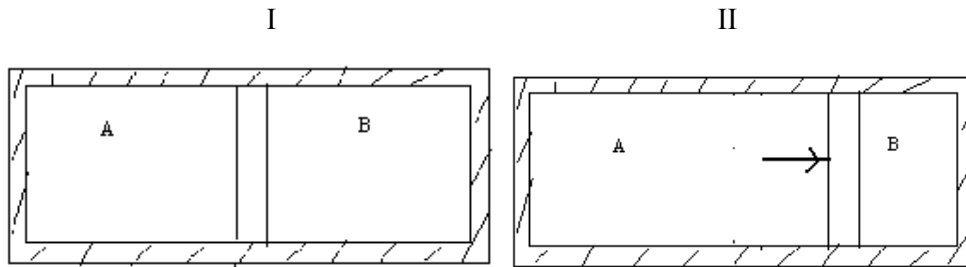
mencapai kesetimbangan tekanan dan suhu pada kedudukan yang baru. Tentukan tekanan dan suhu akhir serta pertambahan entropi total

**Langkah 1: Memfokuskan masalah**

Diketahui :  $T_A = 300 \text{ K}$ ;  $V_A = 10^{-3} \text{ m}^3$ ;  $P_A = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$ ;  $T_B = 300 \text{ K}$ ;  $V_B = 10^{-3} \text{ m}^3$ ;  $P_B = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$

Ditentukan : P akhir; T akhir dan  $(\Delta S)_{\text{sistem total}}$

Sket keadaan Sistem:



**Langkah 2: Menggambarkan keadaan fisis**

Karena tekanan sistem A > Sistem B maka ketika piston dilepas maka akan bergerak ke kanan mendorong sistem B hingga dicapai kesetimbangan tekanan dan suhu. Volume A > volume B sehingga ada transfer energi dalam bentuk kerja dari sistem A ke sistem B.

**Langkah 3: Merencanakan penyelesaian**

Diasumsikan keadaan akhir kedua sistem adalah keadaan kesetimbangan.

Tekanan dan suhu akhir kesetimbangan dapat dicari dengan kaitan  $P_1V_1 = P_2V_2$ , karena tidak ada perbedaan suhu kedua sistem maka pada akhir proses suhunya sama (isoterm) dan  $V_A + V_B = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

**Langkah 4: Penyelesaian**

Untuk Sistem A:  $P_{1A}V_{1A} = PV_{2A}$

Untuk sistem B:  $P_{1B}V_{1B} = PV_{2B}$

Untuk Sistem A:  $P_{1A}V_{1A} = PV_{2A} = 2 \times 10^5 \times 10^{-3} = PV_{2A}$

Untuk sistem B:  $P_{1B}V_{1B} = PV_{2B} = 1 \times 10^5 \times 10^{-3} = PV_{2B}$   
 $= 2 \times 10^5 \times 10^{-3} (V_{2B}/V_{2A})$

$(V_{2B}/V_{2A}) = 1/2$  atau  $V_{2A} = 2 V_{2B}$

$2V_{2B} + V_{2B} = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  atau  $V_{2B} = 2/3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  dan  $V_{2A} = 4/3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

$P_{1A}V_{1A} = PV_{2A}$  atau  $P = P_{1A}V_{1A}/V_{2A} = 2 \times 10^5 \times 10^{-3} / (4/3 \times 10^{-3}) = 1,5 \times 10^5$

Pa

$T_A = T_B = T_{\text{akhir}} = 300 \text{ K}$

$$(\Delta S)_{\text{sistem A}} = W_A / T_A = (2 + 1,5)/2 \times 10^5 \text{ Pa} (4/3 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-3}) / (300 \text{ K}) = 0,1944$$

$$(\Delta S)_{\text{sistem B}} = W_B / T_B = (1 + 1,5)/2 \times 10^5 \text{ Pa} (2/3 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-3}) / (300 \text{ K}) = -0,1388$$

$$(\Delta S)_{\text{sistem total}} = (\Delta S)_{\text{sistem A}} + (\Delta S)_{\text{sistem B}} = 0,1944 - 0,1388 = 0,0556 \text{ J/K}$$

### Langkah 5: Pengecekan hasil

Besarnya perubahan entropi total sistem 0,0556 J/K (besar dan satuan sesuai).

### Contoh 5

Tentukan perubahan entropi suatu gas yang memiliki persamaan keadaan P (V-b) = nRT

#### Langkah 1: Memfokuskan masalah

Diketahui persamaan keadaan P (V-b) = nRT

Ditentukan: ( $\Delta S$ )

#### Langkah 2: Menggambarkan keadaan fisis

Sistem gas sebagai sistem PVT, dalam menjalani proses maka timbul perubahan entropi di dalam sistem, karena S merupakan fungsi keadaan.

#### Langkah 3: Merencanakan penyelesaian

Diasumsikan keadaan awal dan akhir merupakan keadaan kesetimbangan

Untuk proses volume tetap berlaku kaitan :  $dQ = C_V dT + PdV$

Untuk proses tekanan tetap berlaku kaitan:  $dQ = C_P dT - VdP$

#### Langkah 4: Penyelesaian

Untuk proses volume tetap :  $dQ = C_V dT + PdV$  dan P (V-b) = nRT

$$dQ = C_V dT + \frac{nRT}{V-b} dV$$

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T} = \int \frac{C_V}{T} dT + \int \frac{nRT}{(V-b)T} dV$$

Untuk  $C_V =$  konstan

$$\Delta S = C_V \ln \frac{T_f}{T_i} + nR \ln \left( \frac{V_f - b}{V_i - b} \right)$$

Untuk tekanan tetap  $dQ = C_P dT - VdP$

$$dQ = C_P dT - \left( \frac{nRT}{P} + b \right) dP$$

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T} = \int \frac{C_p}{T} dT + nR \int \frac{dP}{P} - \frac{b}{T} \int dP$$

$$\Delta S = C_p \ln \frac{T_f}{T_i} - nR \ln \frac{P_f}{P_i} - \frac{b}{T} (P_f - P_i)$$

### Langkah 5: Pengecekan hasil

Persamaan yang diperoleh telah sesuai

### E. Soal-soal Latihan/Tugas

Kerjakanlah soal-soal berikut sesuai langkah-langkah penyelesaian pada contoh soal.

5.1 Suatu resistor memiliki hambatan 50 ohm dialiri arus 1 A yang dipertahankan pada suhu konstan 27<sup>0</sup>C dengan jalan mengalirkan air dingin. Jika dialiri arus selama 1 detik, tentukan:

- perubahan entropi resistor
- perubahan entropi semesta

5.2 Satu kg air dipanasi secara reversibel dengan pemanas listrik dari suhu 20<sup>0</sup>C hingga 80<sup>0</sup>C. Anggaplah kapasitas kalor jenis air konstan, tentukan:

- perubahan entropi air
- perubahan entropi semesta

5.3 Sebuah resistor yang terisolasi secara termal memiliki hambatan 50 ohm dialiri arus 1 A selama 1 detik. Suhu awal resistor 10<sup>0</sup>C, massa 5 g dan c = 850 J/kg K. Tentukan:

- perubahan entropi resistor
- perubahan entropi semesta

5.4 Tunjukkan jika suatu benda pada suhu T<sub>1</sub> dikontakkan dengan RK yang bersuhu

T<sub>2</sub> < T<sub>1</sub> menyebabkan entropi semesta naik, anggaplah kapasitas kalor benda konstan.

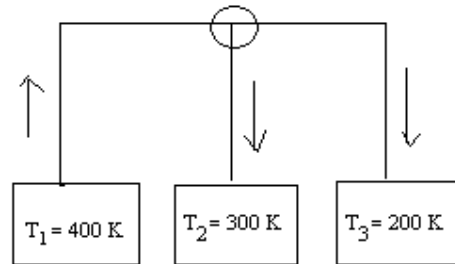
5.5 a. Satu kg air pada 0<sup>0</sup>C dikontakkan dengan RK pada 100<sup>0</sup>C. Jika suhu air mencapai 100<sup>0</sup>C apakah telah terjadi perubahan entropi air, RK dan semesta?

- Jika air dipanasi dari 0<sup>0</sup>C hingga 100<sup>0</sup>C dengan cara yang pertama dikontakkan dengan RK 50<sup>0</sup>C kemudian dengan RK 100<sup>0</sup>C, apakah telah terjadi perubahan entropi semesta?

- c. Jelaskan bagaimana air bisa dipanasi dari  $0^{\circ}\text{C}$  hingga  $100^{\circ}\text{C}$  tanpa menimbulkan perubahan entropi semesta!
- 5.6 Air massa 10 kg dan suhu  $20^{\circ}\text{C}$  dicampur dengan es 2 kg pada suhu  $-5^{\circ}\text{C}$  pada tekanan 1 atm hingga kesetimbangan dicapai. Tentukan temperatur akhir dan perubahan entropi sistem. Diketahui  $c_p \text{ air} = 4,18 \times 10^3 \text{ J/kgK}$ ;  $c_p \text{ es} = 2,09 \times 10^3 \text{ J/kgK}$  dan  $l_{12} = 3,34 \times 10^5 \text{ J/kg}$  (kalor lebur)
- 5.7 Tentukan perubahan entropi semesta sebagai akibat dari proses berikut.
- Sepotong tembaga bermassa 0,4 kg dan kapasitas kalor pada tekanan tetap  $150 \text{ J/K}$  pada  $100^{\circ}\text{C}$  dimasukkan ke dalam danau bersuhu  $10^{\circ}\text{C}$ .
  - Potongan tembaga yang sama bersuhu  $10^{\circ}\text{C}$ , dijatuhkan dari ketinggian 100 m di atas danau.
  - Dua potongan tembaga seperti itu yang bersuhu  $100^{\circ}\text{C}$  dan  $0^{\circ}\text{C}$  disentuhkan .
- 5.8 Tentukan perubahan entropi semesta akibat masing-masing proses berikut.
- Sebuah kapasitor 1 mikrofarad dihubungkan dengan baterai reversibel 100 V pada  $0^{\circ}\text{C}$ .
  - Kapasitor yang sama, setelah diisi oleh baterai 100 V, dilucuti muatannya melalui hambatan yang suhunya dijaga tetap  $0^{\circ}\text{C}$ .
- 5.9 Tiga puluh enam gram air pada suhu  $20^{\circ}\text{C}$  diubah menjadi uap pada  $250^{\circ}\text{C}$  pada tekanan atmosfer tetap. Andaikan kapasitas kalor per gram air tetap yaitu  $4,2 \text{ J/g K}$  dan kalor penguapan pada  $100^{\circ}\text{C}$  sama dengan  $2260 \text{ J/g}$ . Hitunglah perubahan entropi sistem
- 5.10 Dua benda identik yang berkapasitas kalor tetap, masing-masing bersuhu  $T_1$  dan  $T_2$ , digunakan sebagai tandon sebuah mesin. Jika benda itu tekanannya tetap dan tidak mengalami perubahan fase kerja yang diperoleh ialah  $W = C_p (T_1 + T_2 - 2T_f)$   
 Dengan  $T_f$  menyatakan suhu akhir yang dicapai oleh kedua benda. Tunjukkan bahwa jika  $W$  maksimum,  $T_f = \sqrt{T_1 T_2}$
- 5.11 Sebuah mesin Carnot beroperasi dengan 1 kg metana yang dianggap sebagai gas ideal. Diketahui  $\gamma = 1,35$ . Jika rasio volume maksimum dan minimum 4 dan efisiensi mesin 25%. Tentukan kenaikan entropi metana selama ekspansi isothermal.

5.12 Siklus berikut menunjukkan operasi dari mesin reversibel. Selama satu siklus mesin menyerap 1200 J dari RK pada 400 K dan melakukan kerja mekanik 200 J.

- Tentukan jumlah pertukaran kalor dengan RK yang lain, dan apakah RK memberi atau menyerap kalor.
- Tentukan perubahan entropi masing-masing RK
- Tentukan perubahan entropi semesta



5.13 Nilai kalor jenis suatu bahan tertentu dinyatakan  $c_p = a + bT$ .

- Tentukan kalor yang diserap dan kenaikan entropi bahan bermassa  $m$  ketika suhu dinaikkan pada tekanan tetap dari  $T_1$  hingga  $T_2$
- Tentukan kenaikan entropi molal spesifik dari tembaga, jika suhu dinaikkan dari 500 K hingga 1200 K.

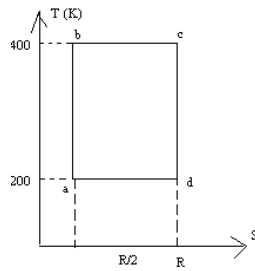
5.14 Pada suatu diagram T-S yang sama, gambarkan kurva proses reversibel gas ideal dimulai dari keadaan awal yang sama untuk proses berikut:

- Ekspansi isothermal
- ekspansi adiabatik
- Ekspansi isokhorik
- ekspansi isokhorik yang ditambahkan kalor dari luar

5.15 Suatu sistem menjalani siklus reversibel a-b-c-d seperti ditunjukkan pada diagram

T-S berikut.

- apakah siklus a-b-c-d beroperasi sebagai mesin pendingin?
- Tentukan kalor yang ditransfer pada masing-masing proses
- Tentukan efisiensi mesin ini melalui grafik secara langsung
- Tentukan koefisien kinerja mesin bila beroperasi sebagai mesin pendingin.



- 5.16 Suatu benda dengan suhu  $T_1 = 200$  K memiliki kapasitas kalor  $10$  J/K berkontak termal dengan sebuah RK. Tentukan perubahan entropi benda dan RK jika suhu RK
- $T_2 = 400$  K
  - $T_2 = 600$  K
  - $T_2 = 100$  K
  - Tunjukkan untuk masing-masing kasus diatas, menyebabkan temperatur semesta naik.
- 5.17 Suatu cairan bermassa  $m$  pada suhu  $T_1$  dicampur dengan cairan yang sama dan bermassa sama pada suhu  $T_2$ . Sistem terisolasi secara termal. Tunjukkan bahwa perubahan entropi semesta

$$2mc_p \ln \frac{(T_1 + T_2)/2}{\sqrt{T_1 T_2}}$$

Dan buktikan bahwa nilainya positif.

- 5.18 Rancanglah suatu proses reversibel untuk menunjukkan secara eksplisit bahwa selama proses ekspansi bebas gas ideal entropi naik
- 5.19 Ketika ada aliran kalor keluar dari sistem selama proses isothermal reversibel, entropi sistem turun. Mengapa proses ini tidak melanggar hukum II?
- 5.20 Suhu gas ideal dengan kapasitas kalor konstan diubah dari  $T_1$  menjadi  $T_2$ . Tunjukkan bahwa perubahan entropi gas lebih besar jika keadaannya diubah pada proses tekanan konstan daripada proses volume konstan.
- tunjukkan bahwa perubahan entropi gas berlawanan tanda jika tekanan diubah dari  $P_1$  menjadi  $P_2$  melalui proses isothermal dan proses isokhorik.

## DAFTAR PUSTAKA

1. F. W. Sears and G.L. Salinger. 1982. Thermodynamics, kinetic Theory and Statistical Thermodynamics. Addison-Wesley. USA
2. M.W. Zemansky and .R.H. Dittman. 1986. Heat and Thermodynamics. McGraw Hill. USA
3. K. Wark. 1983. Thermodynamics. McGraw Hill. USA
4. R.E. Sonntag, C. Borgnakke and G. J. Van Wylen. 2002. Fundamentals of Thermodynamics. John wiley & Sons. USA



## KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Allah S.W.T atas segala rahmat-Nya sehingga penulisan bahan ajar Termodinamika ini dapat terselesaikan.

Bahan tutorial termodinamika ini terdiri atas lima bab, masing-masing bab memuat tujuan pembelajaran, uraian materi, ringkasan, contoh soal dan soal-soal latihan/tugas. Dengan urutan semacam ini diharapkan mahasiswa dapat mempelajari bahan tutorial ini secara mandiri.

Pada kesempatan ini kami sampaikan ucapan terima kasih kepada Lemlit UM yang telah memberi kepercayaan untuk melakukan penelitian pengembangan sehingga bahan ajar ini dapat terwujud.

Kami menyadari bahwa tulisan ini masih kurang sempurna sehingga kritik dan saran yang membangun sangat kami harapkan. Akhirnya kami berharap semoga tulisan ini bermanfaat bagi para mahasiswa khususnya dan para pembaca umumnya.

Malang, November 2009

Penyusun

## DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
<b>BAB I KONSEP DASAR</b>	<b>1</b>
A. Pendahuluan	1
B. Uraian Materi	1
1 Lingkup Termodinamika	1
2 Kesetimbangan Termal dan Hukum ke-nol Termodinamika	3
3 Konsep Temperatur dan Pengukurannya	4
4 Tekanan	5
5 Keadaan Keseimbangan dan Persamaannya	6
6 Perubahan Infinit pada Keadaan Keseimbangan	8
7 Persamaan Keadaan Gas Nyata	9
8 Dua Hubungan Penting antara Defersial Parsial	10
9 Kuantitas Intensif dan Ekstensif	10
C. Ringkasan	10
D. Contoh Soal Berbasis Penyelesaian Eksplisit	12
E. Soal Latihan/Tugas	17
<b>BAB II KERJA</b>	<b>21</b>
A. Pendahuluan	21
B. Uraian Materi	21
1 Proses Kuasistatik	21
2 Kerja Kuasistatik	22
3 Kerja Bergantung pada Lintasan	23
4 Kerja pada Beberapa Sistem Termodinamika	24
C. Ringkasan	26
D. Contoh Soal Penyelesaian Eksplisit	27
E. Soal-Soal Latihan/Tugas	36
<b>BAB III KALOR DAN HUKUM KE-1 TERMODINAMIKA</b>	<b>39</b>
A. Pendahuluan	39
B. Uraian Materi	39
1 Pengertian Kalor	39
2 Perpindahan Kalor Secara Kuasistatik	40
3 Perumusan Hukum ke-1 Termodinamika	41
4 Kapasitas Kalor	44
5 Dua Hubungan Penting Gas Ideal	46
C. Ringkasan	46
D. Contoh Soal Penyelesaian Eksplisit	48
E. Soal-Soal Latihan/Tugas	59
<b>BAB IV KONSEKUENSI HUKUM I TERMODINAMIKA</b>	<b>64</b>
A. Pendahuluan	64

B. Uraian Materi	64
1 Persamaan Energi	64
2 Variabel Bebas T dan v	65
3 Variabel Bebas T dan P	66
4 Variabel P dan v	67
5 Dua Bentuk Umum Turunan Parsial	68
6 Proses Reversibel Adiabatik Gas Ideal	68
7 Siklus Carnot	69
8 Mesin Kalor	70
9 Mesin Pendingin dan Pompa Kalor	71
C. Ringkasan	72
D. Contoh Soal Penyelesaian Eksplisit	74
E. Soal-Soal Latihan/Tugas	84
<b>BAB V HUKUM II TERMODINAMIKA DAN ENTROPI</b>	<b>87</b>
A. Pendahuluan	87
B. Uraian Materi	87
1 Perubahan Kerja Menjadi Kalor dan Sebaliknya	89
2 Perumusan Hukum Ke-2 Termodinamika	89
3 Proses Reversibel	89
4 Bukti Adanya Fungsi Keadaan Entropi: Teorema Clausius	90
5 Entropi Gas Ideal	91
6 Diagram T-S	92
7 Perubahan Entropi Pada Proses Reversibel	93
8 Perubahan Entropi Pada Proses Irreversibel	96
9 Asas Entropi dan Penerapannya	98
10 Entropi Dan Ketidakteraturan	100
C. Ringkasan	101
D. Contoh Soal Berbasis Penyelesaian eksplisit	102
E. Soal-Soal Latihan/tugas	108
DAFTAR PUSTAKA	113