

**BAHAN AJAR  
MATA KULIAH TERMODINAMIKA  
(FI39322)**



**Oleh  
Dra. NI NYOMAN RATINI, M.Si  
19670401 199303 2 001**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS UDAYANA  
2015**

## I KONSEP DASAR TERMODINAMIKA

### 1.1. Pengertian

**Termodinamika** merupakan bagian dari **cabang Fisika** yang namanya Termodinamika (Thermal Physics). Termodinamika adalah ilmu yang mempelajari hubungan antara energi dan kerja dari suatu sistem. Termodinamika hanya mempelajari besaran-besaran yang berskala besar (makroskopis) dari sistem yang dapat diamati dan diukur dalam eksperimen. Besaran-besaran yang berskala kecil (mikroskopis) dipelajari dalam Teori Kinetik Gas (Kinetic Theory of Gas) atau Fisika Statistik (Statistical Physics).

**Termodinamika** juga dapat diartikan sebagai ilmu yang menjelaskan kaitan antara besaran fisis tertentu yang menggambarkan sikap zat di bawah pengaruh kalor. Besaran fisis ini disebut koordinat makroskopis sistem. Kaitan atau rumus yang menjelaskan hubungan antar besaran fisis diperoleh dari eksperimen dan kemudian dapat digunakan untuk meramalkan perilaku zat di bawah pengaruh kalor. Jadi, Termodinamika merupakan ilmu yang berlandaskan pada hasil-hasil eksperimen.

**Termodinamika** memusatkan perhatiannya pada faham mengenai:

1. ketetapan energi.
2. ketetapan entropi, dalam arti, proses yang menghasilkan entropi mungkin dapat terjadi, namun proses yang menghapuskan entropi mustahil terjadi.
3. entropi yang dapat digunakan untuk menentukan jumlah daya berguna maksimum yang dapat diperoleh dari berbagai sumber energi untuk melakukan kerja.

#### • Aplikasi Termodinamika

Aplikasi termodinamika dalam kehidupan sehari-hari sangat banyak dan setiap saat selalu berkembang. Secara alamiah dapat dilihat bagaimana energi dapat diubah menjadi kerja yang bermanfaat bagi manusia. Kemampuan manusia menciptakan mesin-mesin yang mampu mengubah kalor menjadi kerja sangat membantu dalam memenuhi kebutuhan energi. Sebagai contoh penerapan prinsip dan metode termodinamika dapat dilihat pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), PLTN, refrigerator, mesin kalor, roket dan lain-lain.

- Berdasarkan hubungan antara sistem dengan lingkungannya, sistem dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu:
  - *Sistem Terisolasi*, yaitu bila antara sistem dengan lingkungannya tidak terjadi pertukaran energi dan materi.
  - *Sistem Tertutup*, yaitu bila antara sistem dan lingkungannya hanya dapat dipertukarkan energi, materi tidak dapat menembus sistem tersebut.
  - *Sistem Terbuka*, bila antara sistem dan lingkungan dapat dipertukarkan energi maupun materi.

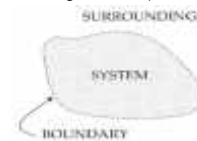
**Termodinamika** dalam arti sempit merupakan salah satu **ranting** dari Ilmu Alam, Ilmu fisika yang mempelajari materi yang ada dalam keadaan setimbang terhadap perubahan temperatur, tekanan, volume, dan komposisi kimia. Termodinamika didasarkan pada empat konsepsi empiris, yaitu: hukum ke nol, pertama (yang berkaitan dengan kerja suatu sistem), kedua, dan ketiga Termodinamika. Oleh karena itu, sebagian ahli menyatakan, Termodinamika merupakan ranting Fisika yang mempelajari hubungan antara kalor dan kerja.

Secara umum Termodinamika dapat dimanfaatkan untuk:

1. menjelaskan kerja beberapa sistem termodinamis.
2. menjelaskan mengapa suatu sistem termodinamis tidak bekerja sesuai dengan yang diharapkan.
3. menjelaskan mengapa suatu sistem termodinamis sama sekali tidak mungkin dapat bekerja.

### 1.2. Sistem Termodinamika

Setiap penerapan hukum pertama pada suatu bagian diskrit dari alam semesta memerlukan definisi *sistem* dan *lingkungannya*. Sistem adalah sejumlah zat yang dibatasi oleh dinding tertutup. Yang dimaksud dengan zat di sini dapat berupa zat padat, cair atau gas, dapat pula dipol magnet, energi radiasi, foton dan lain-lain. Dinding yang membatasi sistem dapat dengan lingkungan dapat dinyatakan nyata atau imajiner, dapat diam atau bergerak, dapat berubah ukuran atau bentuknya. Segala sesuatu di luar sistem yang mempunyai pengaruh langsung terhadap sistem disebut *lingkungan*. Suatu sistem dengan lingkungannya disebut dengan semesta (*universe*)



Gambar 1.1 Sistem dan lingkungan

### 1.3. Pandangan Makroskopik

Suatu sistem dalam volume tertentu dicirikan dengan empat besaran, yaitu komposisi, volume, tekanan dan temperatur. Kuantitas yang empat ini disebut sebagai koordinat makroskopik. Ciri umum atau sifat skala besar dari sistem pada umumnya dapat dinyatakan dengan kuantitas tersebut.

Kuantitas yang harus dipilih untuk dapat mencirikan secara makroskopik suatu sistem dengan sistem lainnya tentu saja berbeda, tetapi pada umumnya koordinat makroskopik memiliki ciri khusus yang sama, yaitu:

1. koordinat ini tidak menyangkut pengandaian khusus mengenai struktur materi
2. jumlah koordinatnya sedikit
3. koordinat ini dipilih melalui daya terima indera secara langsung
4. pada umumnya koordinat ini dapat diukur secara langsung.

Jadi ciri makroskopik suatu sistem meliputi perincian beberapa sifat pokok sistem yang dapat diukur.

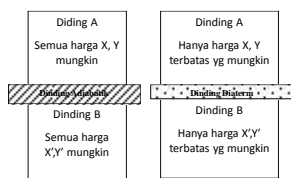
#### 1.4. Pandangan Mikroskopik

Menurut mekanika statistik, sistem diandaikan terdiri dari sejumlah besar  $N$  molekul, yang masing-masing dalam sekumpulan keadaan yang energinya  $e_1, e_2, e_3, \dots, e_N$ . Molekul ini dianggap saling berinteraksi melalui tumbukan atau melalui gaya yang ditimbulkan oleh medan. Sistem ini dapat diilustrasikan terisolasi atau dalam beberapa hal dapat dianggap terdapat dalam sekumpulan sistem yang serupa atau *ensemble sistem*.

Pencirian mikroskopik suatu sistem meliputi ciri-ciri khusus sebagai berikut:

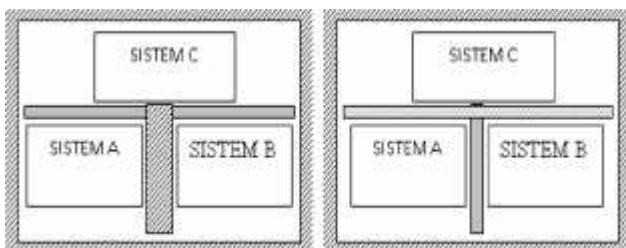
1. terdapat pengandaian mengenai struktur materi, yaitu molekul dianggap ada
2. banyak kuantitas yang harus diperinci
3. kuantitas yang diperinci tidak berdasarkan penerimaan panca indera
4. kuantitasnya tidak dapat diukur

#### • Kesetimbangan termal



Gambar 1.2 Sifat dinding adiabat dan diaterm

Jika kedua sistem dipisahkan oleh dinding diaterm, harga  $X$ ,  $Y$  dan  $X'$ ,  $Y'$  akan berubah secara spontan sampai keadaan setimbang sistem gabungan tercapai. Dalam keadaan ini sistem dinyatakan dalam keadaan 'kesetimbangan termal'.



Postulat hukum ke Nol Termodinamika ( R.H. Fowler).

“Dua sistem yang berada dalam kesetimbangan termal dengan sistem ketiga berarti kedua sistem tersebut dalam kesetimbangan termal satu sama lainnya.

#### 1.5. Kesetimbangan termal

Keadaan setimbang dalam suatu sistem bergantung pada sistem lain yang ada didekatnya dan sifat dinding yang memisahkannya. Dinding pemisah sistem dengan sekitarnya atau dengan sistem lain dapat disebut *dinding adiabat* atau *dinding diaterm*.

Jika dinding pembatasnya adiabat, keadaan  $X$  dan  $Y$  untuk sistem A dan  $X'$  dan  $Y'$  untuk sistem B dapat bersama-sama sebagai keadaan setimbang untuk setiap harga yang dapat dimiliki oleh keempat kuantitas itu, asal saja dinding itu dapat menahan tegangan yang ditimbulkan oleh perbedaan antara kedua perangkat koordinat itu.

- Kesetimbangan termal adalah keadaan yang dicapai oleh dua (atau lebih) sistem yang dicirikan oleh keterbatasan harga koordinat sistem itu setelah sistem saling berinteraksi melalui dinding diaterm.
- Misalkan dua sistem A dan B yang dipisahkan oleh dinding adiabat tetapi kedua sistem bersentuhan dengan sistem ketiga yaitu C melalui dinding diaterm. Seluruh sistem dibungkus dengan dinding adiabat, sehingga tidak ada interaksi dengan lingkungan luarnya. Jika kedua sistem A dan B mencapai kesetimbangan termal dengan sistem ketiga, C, dan tidak ada perubahan lagi jika dinding adiabat yang memisahkan A dan B diganti dengan dinding diaterm. Artinya jika A dan B yang semula dipisahkan dengan adiabat tetapi masing-masing setimbang termal dengan C, ternyata jika dinding adiabat diganti dengan dinding diaterm maka sistem gabungan akan tetap dalam keadaan setimbang termal.

#### 1.6. Skala Temperatur Celcius

- Temperatur  
‘Temperatur sistem adalah suatu sifat yang menentukan apakah sistem dalam kesetimbangan termal dengan sistem lainnya’

- Skala Temperatur Celcius

Skala temperatur celcius memakai derajat yang besarnya sama dengan skala temperatur gas ideal, tetapi titik nolnya digeser sehingga temperatur celcius titik tiple air adalah 0,01 derajat celcius (0,01°C). Jika  $t$  menyatakan temperatur celcius

$$t (^{\circ}\text{C}) = {}_t (K) - 273,15$$

Dengan demikian temperatur Celcius  $t_s$  yaitu temperatur pada waktu uap air mengembun pada tekanan atmosfer baku adalah:

$$\begin{aligned} t_s &= \theta_s - 273,15 \\ &= 373,125 - 273,15 \\ &= 99,975 ^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

Untuk titik es (temperatur terjadinya es yang dalam kesetimbangan dengan air jenuh dalam udara pada tekanan atmosfer baku) pada skala Celcius adalah 0,00°C.

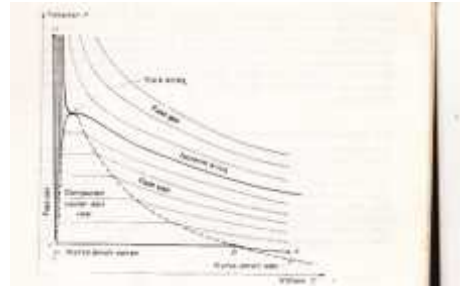
## II SISTEM TERMODINAMIKA SEDERHANA

### 2.1. Kesetimbangan Termodinamika

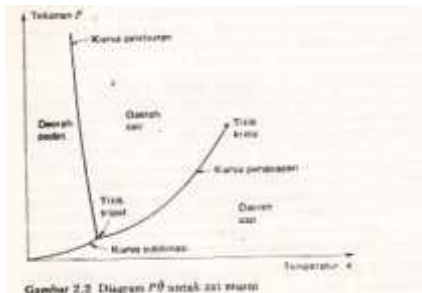
Untuk sistem termodinamika maka keadaan makroskopisnya dicirikan dengan suatu koordinat tertentu. Bila koordinat tersebut berubah baik secara spontan ataupun karena adanya pengaruh dari luar, maka sistem mengalami perubahan keadaan.

Kesetimbangan termal terjadi apabila tidak ada perubahan spontan dalam koordinat sistem yang setimbang mekanis dan setimbang kimia bila sistem dipisahkan dari lingkungan dengan dinding diaterm. Dalam kesetimbangan termal, semua bagian sistem bertemperatur sama, dan temperatur ini sama dengan temperatur lingkungannya. Bila pernyataan ini tidak terpenuhi, perubahan keadaan akan berlangsung sampai kesetimbangan termalnya tercapai

### 2.2 Diagram PV Untuk Zat Murni

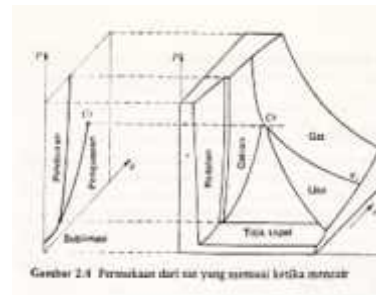


### 2.3 Diagram PT Untuk Zat Murni (dlm gb $\theta=T$ )



Gambar 2.3 Diagram P-T untuk zat murni

### 2.4 Permukaan PVT



Gambar 2.4 Permukaan dari zat yang sama ketika memutar

### 2.5. Persamaan Keadaan

Persamaan keadaan gas ideal

$$Pv = RT \quad ; \quad v = \frac{V}{n} \text{ volume molar}$$

$n$  = banyaknya mol gas

$R$  = tetapan gas

$P$  = tekanan

$T$  = temperatur

Persamaan Beattie-Bridgman

$$P = \frac{RT}{v} \left( 1 - \frac{A}{v} \right) \left( v + B \right) - \frac{A^2}{v^2}$$

Persamaan keadaan van der Waals

$$\left( P + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT$$

### 2.6. Perubahan Difrensial Keadaan

Variabel P,V dan T ini sering digunakan untuk menyatakan keadaan (status) dari suatu zat, dan hub fungsinya :

1. implisit :  $F(P, V, T) = 0$

pers. di atas adalah pers keadaan yg dapat dipecahkan untuk memperoleh tiap variabel :

2. eksplisit

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

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

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

Persamaan difrensial parsial :

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

dV dikenal sebagai difresial total

$$\left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P, \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$$

dikenal sebagai turunan parsial

### 2.7. Teorema Matematis

Jika ada hub. antara tiga koordinat yaitu x,y dan z; jadi f(x,y,z) = 0, kemudian :

$$x=x(y,z) \rightarrow dx = \left( \frac{\partial x}{\partial y} \right)_z dy + \left( \frac{\partial x}{\partial z} \right)_y dz \dots (1)$$

$$y=y(x,z) \rightarrow dy = \left( \frac{\partial y}{\partial x} \right)_z dx + \left( \frac{\partial y}{\partial z} \right)_x dz \dots (2)$$

dengan mensubstitusikan (2) ke (1) :

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

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

Dalam hal sistem hidrostatik, terorema di atas menghasilkan :

$$f(x,y,z)=0 \rightarrow \left( \frac{\partial x}{\partial y} \right)_z \left( \frac{\partial y}{\partial z} \right)_x \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)_y = -1$$

$$f(P,V,T)=0 \rightarrow \left( \frac{\partial P}{\partial V} \right)_T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = - \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V$$

didefinisikan :

$$\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$$

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

jadi

$$\left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V = - \left( \frac{\partial P}{\partial V} \right)_T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = - \frac{\left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_P}{\left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T} = \frac{\beta}{\alpha}$$

Kedua turunan parsial di atas mempunyai arti fisis yang fundamental kegunaannya dalam analisis termodinamika. Dan kaitannya dengan kuantitas fisis yang disebut dengan koefisien muai volum rata-rata yaitu perubahan volume akibat temperatur pada tekanan tetap persatuan volume :

$$\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$$

$\beta$  dinyatakan sebagai perderajat ( 1/derajat)

Akibat perubahan volume yang menyertai perubahan tekanan dengan temperatur tetap persatuan volume yang didefinisikan sebagai ketermaanafaatan isoterm :

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

satuan :  $\text{Pa}^{-1}$  atau  $\text{bar}^{-1}$

Dari ketiga koordinat tsb hanya ada dua yang bebas, yaitu x dan z. jadi, jika dz=0, maka dx  $\neq$  0, kita dapatkan

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

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

jika dx=0, dz $\neq$ 0, maka :

$$\left( \frac{\partial x}{\partial y} \right)_z \left( \frac{\partial y}{\partial z} \right)_x + \left( \frac{\partial x}{\partial z} \right)_y = 0$$

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

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

Perubahan tekanan

$$P=P(T,V) \rightarrow dP = \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V dT + \left( \frac{\partial P}{\partial V} \right)_T dV$$

atau

$$dP = \frac{\beta}{\alpha} dT - \frac{1}{V} dV$$

untuk volume tetap (dV=0):

$$dP = \frac{\beta}{\alpha} dT$$

dgn mengintegalkan kedua keadaan itu, kita dapatkan:

$$P_f - P_i = \int_{T_i}^{T_f} \frac{\beta}{\alpha} dT$$

$$\text{perubahan infinitesimal : } P_f - P_i = \frac{\beta}{\alpha} (T_f - T_i)$$

## 2.8. Kawat teregang

Untuk seutas kawat dlm koordinat termodinamika ( $\mathfrak{S}, L, T$ ) pada temperatur tetap, hukum Hooke berlaku

$$\mathfrak{S} = \text{tetapan}(L - L_0)$$

dgn  $L_0 \Rightarrow$  menyatakan panjang ketika tegangannya nol

Jika kawat mengalami perubahan perubahan panjang infinitesimal :

$$L = L(T, \mathfrak{S}) \longrightarrow dL = \left(\frac{\partial L}{\partial T}\right)_{\mathfrak{S}} dT + \left(\frac{\partial L}{\partial \mathfrak{S}}\right)_T d\mathfrak{S}$$

Turunan ini berkaitan dgn kuantitas fisis, kita definisikan kemuaihan linier  $\alpha$  :

$$\alpha = \frac{1}{L} \left(\frac{\partial L}{\partial T}\right)_{\mathfrak{S}}$$

Menurut definisi, modulus Young isoterm, yg dilambangkan Y :

$$Y = \frac{L}{A} \left(\frac{\partial \mathfrak{S}}{\partial L}\right)_T$$

dengan :

- $\mathfrak{S}$  = gaya tegangan kawat (N)
- Y = modulus Young ( $N/m^2$ )
- A = luas penampang kawat
- L = panjang kawat
- T = temperatur gas ideal

## 2.9. Batang Paramagnetik

Imbas magnetik dalam batang diberi simbol B

$$B = \mu_0 \left( H + \frac{M}{V} \right)$$

berdasarkan percobaan bahwa magnetisasi sebagian besar padatan paramagnetik mrpkan fungsi dari hasil bagi intensitas magnetik dgn temperatur, yaitu :

$$M = C'_c \frac{H}{T} \text{ — pers Curie}$$

dgn :

$$C'_c = \text{tetapan Curie}$$

$$C'_c = \frac{A \cdot m^2}{A/m} K = m^3 K$$

## 2.10 Kuantitas intensif dan ekstensif

Sistem sederhana	Koordinat intensif	Koordinat ekstensif		
Sistem hidrostatik	Tekanan	P	Volum	V
Kawat teregang	Gaya tegang	$\mathfrak{S}$	Panjang	L
Selaput permukaan	Tegangan permukaan	$\ell$	Luas	A
Sel listrik	Elektromotansi	$\epsilon$	Muatan	Z
Lempeng dielektrik	Intensitas listrik	E	Polarisasi	$\Pi$
Batang paramagnetik	Intensitas magnetik	H	Magnetisasi	M

## III. KERJA

### 3.1. KERJA

Kerja  $\Rightarrow$  Bila sistem mengalami pergeseran karena beraksinya gaya.

kerja eksternal : kerja yang dilakukan oleh sistem atau pada sistem

kerja internal : kerja yang dilakukan oleh bagian sistem pada bagian sistem yang lain

Yang berperan dalam termodinamika adalah kerja eksternal yakni interaksi sistem dan lingkungan, sehingga perubahan yang terjadi dapat diberikan oleh kuantitas makroskopik yang berhubungan dengan sistem secara keseluruhan.

### 3.2. Proses kuasi-statik

Sistem dlm kesetimbangan termodinamika memenuhi persyaratan sbb:

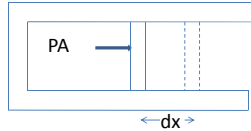
1. kesetimbangan mekanis
2. kesetimbangan termal
3. kesetimbangan kimia

Catatan : jadi, kita didorong untuk menerima keadaan ideal dengan hanya mengubah sedikit saja gaya eksternal yang beraksi pada sistem sehingga gaya tak berimbang sangat kuat. Proses ini disebut proses kuasi-statik.

“selama proses kuasi-statik berlangsung pd setiap saat keadaan sistem itu sangat mendekati keadaan setimbang termodinamika” dan semua keadaan yg dilewati oleh sistem yg diberikan dgn menggunakan koordinat termodinamika yg mengacu pd sistem secara keseluruhan

### 3.3. Kerja sistem hidrostatik

Pada gb. berikut ; silinder memp. luas penampang A, tekanan oleh piston P, sehingga mengakibatkan besarnya gaya : PA



Jika piston bergerak sejauh dx dlm arah berlawanan gaya PA, maka sistem melakukan kerja infinitesimal dW, dgn :

$$dW = -PA dx, \quad A dx = dV$$

maka  $dW = -PdV$

Tanda  $\ominus$  di depan PdV menyatakan :

dV = positif (pemuai)  $\longrightarrow$  kerja yang negatif

dV = negatif (pemampatan)  $\longrightarrow$  kerja yang positif

Proses kuasi-statik dgn perubahan volume dari  $v_i$  ke  $v_f$

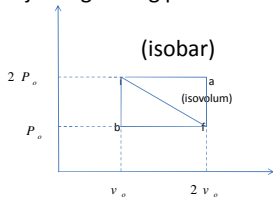
$$W_{if} = - \int_{v_i}^{v_f} PdV$$

Sedangkan pemuai dari  $f$  ke  $i$  sepanjang lintasan sama tetapi dgn arah yg berlawanan, :

$$W_{fi} = - \int_{v_f}^{v_i} PdV$$

Beda lintasannya kuasi-statik :  $W_{if} = -W_{fi}$

### 3.4 Kerja bergantung pada lintasan



Dalam hal ini kerja yg dilakukan :

luas di bawah garis ai :

$$W_{ai} = - \int_{v_o}^{2v_o} 2P_o dV = -2P_o V_o$$

luas di bawah garis bf :

$$W_{bf} = - \int_{v_o}^{2v_o} P_o dV = -P_o V_o$$

garis lurus dari i ke f :

$$W_{if} = - \int_{v_o}^{2v_o} \frac{1}{2} (P_o + 2P_o) dV = -\frac{3}{2} P_o V_o$$

### 3.5. Kerja dalam proses kuasi-statik

Pemuai atau pemampatan isotherm yang kuasi-statik dari gas ideal :

$$W = - \int_{v_i}^{v_f} PdV$$

Pers. Gas ideal :  $PV = nRT$

substitusikan P, shg :

$$W = -nRT \int_{v_i}^{v_f} \frac{dV}{V} \longrightarrow W = -nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$$

dalam logaritma:

$$W = -2,30 nRT \log \frac{V_f}{V_i}$$

Pertambahan tekanan, proses isotherm yang kuasi-statik pada zat padat :

$$W = - \int PdV$$

$$V = V(P, T) \longrightarrow dV = \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T dP + \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P dT$$

ingat keternampatan isotherm (kompresibilitas):

$$\beta = - \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \longrightarrow dV = - \beta V dP$$

substitusika dV, kita peroleh :

$$W = \int_{P_i}^{P_f} \beta V P dP \longrightarrow W \approx \frac{\beta V}{2} (P_f^2 - P_i^2)$$

bila :

$$V = \frac{m}{\rho} \longrightarrow W \approx \frac{m}{2\rho} (P_f^2 - P_i^2)$$

Contoh : untuk tembaga pada  $0^\circ C$

diketahui :  $\rho = 8930 \text{ kg/m}^3$

$$\beta = 7,16 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$$

$$m = 100 \text{ kg}$$

$$P_i = 0$$

$$P_f = 1000 \text{ atm} = 1,01 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\text{jadi : } W = \frac{100 \text{ kg} \times 7,16 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1} \times (1,01 \times 10^8 \text{ Pa})^2}{2 \times 8930 \text{ kg/m}^3}$$

$$= 0,411 \text{ kJ}$$

### Tabel kerja sistem sederhana

Sistem sederhana	Kuantitas intensif	Kuantitas ekstensif	Kerja (J)
Sistem hidrostatik	P (pa)	V (m <sup>3</sup> )	$dW = -PdV$
Kawat	F (N)	L(m)	$dW = FdL$
Selaput permukaan	S (N/m)	A(m <sup>2</sup> )	$dW = SdA$
Sel terbalikkan	$\epsilon$ (V)	Z (C)	$dW = v dZ$
Padatan dielektrik	E (V/m)	$\Pi$ (C.m)	$dW = E d \Pi$
Padatan magnetik	H (A/m)	M (A. m <sup>2</sup> )	$dW = - \int_0^M H dM$

## IV KALOR DAN HUKUM PERTAMA TERMODINAMIKA

### 4.1. Definisi dan Satuan Kalor

Kalor disebut juga dengan panas didefinisikan sebagai energi yang mengalir atau berpindah (masuk atau keluar) sistem, karena adanya perbedaan temperatur. Kalor berpindah dari sistem bertemperatur tinggi ke sistem bertemperatur rendah. Kalor yang masuk ke dalam sistem dianggap positif dan kalor yang keluar dari sistem dianggap negatif. Simbol  $Q$  digunakan untuk menyatakan kalor. Proses yang menyatakan tidak ada perubahan panas ( $Q=0$ ) disebut sebagai proses adiabat.

Kalor seperti halnya juga dengan kerja sama-sama terkait dengan energi, sehingga satuan kalor sama saja dengan satuan energi yaitu joule (J).

### 4.3. Kerja Adiabat dan Energi Internal

- Jika suatu sistem diubah dari keadaan awal ke keadaan akhir hanya secara adiabat, maka kerja yang dilakukan sama besar untuk semua lintasan adiabat yang menghubungkan kedua keadaan itu.
- Bila suatu kuantitas hanya bergantung pada keadaan awal dan keadaan akhir tanpa memperhatikan proses pencapaian keadaan tersebut, maka kesimpulan penting dapat diambil: bahwa terdapat fungsi koordinat ruang dari benda, yang apabila harga akhirnya dikurangi dengan harga awalnya sama dengan kerja yang dilakukan. Fungsi itu dikenal dengan 'fungsi energi potensial'.
- ❖ Fungsi ini dikenal dengan sebagai 'fungsi energi internal' yang dilambangkan dengan  $U$ .

$$W_{i \rightarrow f}(\text{adiabat}) = U_f - U_i$$

Artinya jika kerja positif dilakukan pada sistem atau lingkungan melakukan kerja pada sistem maka energinya bertambah.

### Soal

1. Hitunglah kerja yang dilakukan oleh 1 mol gas dalam proses pemuaian isoterm kuasi-statik dari volume awal ke volume akhir bila persamaan keadaannya :

a.  $P(v-b) = RT$  (R,b = tetapan)

b.  $Pv = RT(1 - \frac{B}{v})$  [ R =tetapan, B=f(T)]

### 4.2. Kesetaraan Kerja dan Kalor

Untuk mengubah keadaan sistem, tidak hanya dilakukan dengan cara melibatkan kerja pada sistem. Tinjau kasus-kasus berikut ini:

- Sejumlah fluida mengalami pemuaian adiabat dalam suatu kombinasi silinder piston yang terganggu dengan lingkungan melalui benda tergantung, sehingga ketika pemuaian terjadi akan mengakibatkan benda terangkat, sedangkan fluidanya selalu mendekati kesetimbangan (**kerja adiabat**)
- Sejumlah cairan yang dalam kesetimbangan dengan uapnya, melalui dinding diatermal, bersentuhan dengan suatu pembakar Bunsen dan mengalami penguapan disertai dengankenaikan temperatur dan tekanan tanpa adanya kerja (**Aliran kalor tanpa kerja**)
- Sejumlah fluida dimuaikan ketika bersentuhan dengan pembakaran Bunsen (**kerja dan kalor**).

- ❖ Energi internal adalah suatu fungsi koordinat termodinamika P,V, dan T yang digunakan untuk mengamati kedua keadaan hanya berbeda infinitesimal, perubahan energi-internalnya adalah  $dU$ , yang merupakan diferensial eksak, karena merupakan diferensial dari fungsi sebenarnya. Untuk sistem hidrostatik  $U$  dipandang sebagai fungsi dari T dan V, maka:

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

atau dengan memandang  $U$  sebagai fungsi dari T dan P.

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



#### 4.4. Perumusan Matematis Hukum I Termodinamika

Tinjau dua percobaan yang berbeda yang dilakukan pada sistem yang sama.

- ukur kerja adiabat yang dilakukan untuk mengubah keadaan sistem dari  $i$  ke  $f$  yang besarnya adalah  $W_{if} = U_i - U_f$
- buat sistem mengalami perubahan keadaan yang sama tapi berlangsung tidak adiabat, maka kerjanya non adiabat, maka  $W_{if} \neq U_i - U_f$

- Supaya cara kedua memenuhi prinsip kekekalan energi, disimpulkan bahwa energi telah dipindahkan dengan cara lain dari pelaksanaan kerja.
- Perpindahan energi antara sistem dan lingkungan yang terjadi karena perbedaan temperatur sistem dan lingkungan disebut dengan kalor

Definisi termodinamika dari kalor adalah:

*'Bila suatu sistem yang lingkungannya bertemperatur berbeda dan kerja bisa dilakukan padanya (mengalami suatu proses), maka energi yang dipindahkan dengan cara non mekanis yang sama dengan perbedaan antara perubahan energi internal dan kerja yang dilakukan disebut kalor.'*

Jika kalor dilambangkan dengan  $Q$ , maka  $Q = U_f - U_i - W$  atau

$$U_f - U_i = Q + W$$

Dengan kesepakatan  $Q$  positif jika kalor masuk sistem (kalor sistem bertambah) dan sebaliknya negatif jika kalor keluar dari sistem. Persamaan ini dikenal dengan *perumusan matematis hukum pertama termodinamika*,

- Secara sederhana, hukum I termodinamika dapat dinyatakan sebagai berikut:

*"Jika suatu benda (misalnya krupuk) dipanaskan (atau digoreng) yang berarti diberi kalor  $Q$ , benda (krupuk) akan mengembang atau bertambah volumenya yang berarti melakukan usaha  $W$  dan benda (krupuk) akan bertambah panas (coba aja dipegang, pasti panas!) yang berarti mengalami perubahan energi dalam  $\Delta U$ ".*

#### 4.5. Bentuk Differensial Hukum I Termodinamika

Proses yang hanya menyangkut perubahan infinitesimal dari koordinat termodinamika (*proses infinitesimal*), sehingga hukum I menjadi:

$$dU = dQ + dW$$

Untuk proses kuasi-statik infinitesimal sistem hidrostatik, hukum I menjadi:

$$dU = dQ - PdV$$

Sistem yang mengalami perubahan volume akan melakukan kerja dan sistem yang mengalami perubahan temperatur akan mengalami perubahan energi dalam. Jadi, kalor yang diberikan kepada sistem akan menyebabkan sistem melakukan kerja dan mengalami perubahan energi dalam. Prinsip ini dikenal sebagai hukum kekekalan energi dalam termodinamika

Tabel Hukum pertama termodinamika untuk sistem sederhana

Sistem sederhana	Hukum Pertama	U fungsi dari dua antara
Sistem hidrostatik	$dU = dQ - PdV$	P, V, T
Kawat	$dU = dQ + FdL$	F, L, T
Selaput permukaan	$dU = dQ + SdA$	S, A, T
Sel terbalikkan	$dU = dQ + \nu dZ$	E, Z, T
Padatan dielektrik	$dU = dQ + Ed\Gamma$	E, $\Gamma$ , T
Padatan magnetik	$dU = dQ + \sim_v H dM$	H, M, T

#### 4.6. Persamaan Untuk sistem Hidrostatik

Hukum I untuk sistem hidrostatik adalah :

$$dQ = dU + PdV$$

Untuk  $U$  fungsi  $T$  dan  $V$  di dapat

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

Sehingga hukum I dapat ditulis sebagai:

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

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

Persamaan ini berlaku untuk setiap proses yang menyangkut perubahan temperatur  $dT$  dan perubahan volume  $dV$ .

a) jika  $V$  tetap,  $dV = 0$ , maka:

$$\left(\frac{dQ}{dT}\right)_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V$$

Nisbah ruas kiri merupakan definisi kapasitas kalor pada volume tetap

$$C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V$$

Jika  $U$  dihitung secara matematis dengan menggunakan pengandaian khusus tentang atom suatu bahan khusus, maka dilakukan dengan mendefinisikan  $U$  terhadap  $T$  pada  $V$  tetap, dan membandingkannya dengan  $C_V$  yang terukur dari percobaan.

b) jika  $P$  tetap, maka:

$$\left(\frac{dQ}{dT}\right)_P = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_P + \left[\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_P + P\right]\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$

menurut definisi:  $c_p = \left(\frac{dQ}{dT}\right)_P$  dan juga  $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = \frac{1}{\beta S}$ , shg:

$$C_p = C_V + \left[\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_P + P\right]VS$$

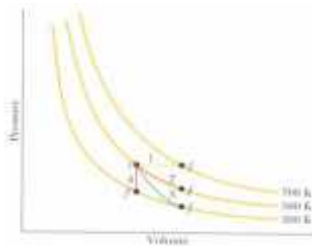
atau

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_P = \frac{C_p - C_V}{VS} - P$$

Persamaan terakhir ini menyatakan  $(\partial U/\partial V)_T$  yang terukur dengan  $C_p, C_V, S, V, P$  yang bisa diukur.

## □ PROSES-PROSES TERMODINAMIKA

- Proses Isobarik (1)
  - Tekanan konstan
- Proses Isotermis (2)
  - Temperatur konstan
- Proses Adiabatik (3)
  - Tidak ada kalor yang hilang
- Proses Isokorik (4)
  - Volume konstan



## ➤ PROSES ISOKHORIK

▪ KERJA :

$$W = \int_{V_i}^{V_f} p dV$$

$$V_f = V_i \rightarrow W = 0$$

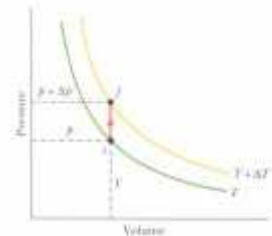
▪ KALOR

$$dQ = C_V dT = C_V (T_f - T_i)$$

▪ PERUBAHAN ENERGI DALAM :

$$dU = dQ + dW \rightarrow dU = C_V dT$$

$$C_V = \text{Kapasitas panas volume konstan}$$



## ➤ PROSES ISOBARIK

▪ KERJA :

$$W = \int_{V_i}^{V_f} p dV \quad p = \text{konstan}$$

$$W = p(V_f - V_i)$$

▪ KALOR

$$dQ = C_p dT = C_p (T_f - T_i)$$

▪ PERUBAHAN ENERGI DALAM :

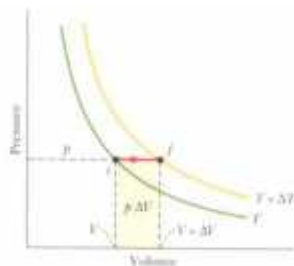
$$dU = dQ + dW \rightarrow dU = C_p dT - p dV$$

$$pV = nRT \rightarrow p dV = nR dT$$

$$C_p = C_V + nR \rightarrow dU = C_p dT - nR dT = C_V dT$$

$R =$  Konstanta gas universal  $= 8.31 \text{ J/mol.K}$

$C_p =$  Kapasitas panas tekanan konstan



## • Soal

Andaikan konduksi kalor terjadi pada laju yang tetap  $\dot{Q}$  melalui dinding silinder berongga dengan jejari dalam  $r_1$  pada temperatur  $T_1$  dan jejari luar  $r_2$  pada temperatur  $T_2$ . Tunjukkan untuk silinder yang panjangnya  $L$  dan konduktivitas termal tetap  $K$ , perbedaan temperatur antara kedua permukaan dinding diberikan oleh pers.

$$T_1 - T_2 = \frac{\dot{Q}}{2\pi LK} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

## V GAS IDEAL

### 5.1. Persamaan Gas Ideal

Andaikan tekanan  $P$ , dan volume  $V$  dari  $n$  mol gas yang dipertahankan pada temperatur tetap, diukur dalam daerah harga tekanan yang besar dan perkalian  $P\hat{v}$ , dengan  $\hat{v}=V/n$ , dinyatakan sebagai fungsi  $1/\hat{v}$ . Hubungan  $P\hat{v}$  dan  $1/\hat{v}$  dapat dinyatakan sebagai deret pangkat (uraian virial) yang berbentuk:

$$P\hat{v} = A\left(1 + \frac{B}{\hat{v}} + \frac{C}{\hat{v}^2} + \frac{D}{\hat{v}^3} + \dots\right)$$

dengan A, B, C, D, ... merupakan koefisien virial pertama, kedua, ketiga dan seterusnya, yang bergantung pada temperatur dan jenis gas.

Tahun 1972, Bateuces menentukan  $\lim (P\hat{v})_0^0$  untuk oxygen adalah 22,4132 liter, atm/mol (=2,27102 kJ/mol). Jadi tetapan  $R = 8,31441$  J/mol K. Dengan mengganti  $\hat{v}$  dengan  $V/n$ , didapat persamaan keadaan gas dalam limit tekanan rendah:

$$\lim (PV) = nRT$$

Karena  $P\hat{v} = A = RT$ , maka uraian virialnya

$$\frac{P\hat{v}}{RT} = 1 + \frac{B}{\hat{v}} + \frac{C}{\hat{v}^2} + \dots$$

Akhirnya, karena  $(\partial U/\partial P)_T$  dan  $(\partial U/\partial V)_T$  keduanya sama dgn nol, maka

$$U = \text{fungsi}(T) \text{ saja}$$

Khusus untuk gas ideal  $U$  merupakan fungsi temperatur  $T$  saja, sehingga turunan parsial terhadap  $T$  sama dengan turunan totalnya, jadi:

$$C_V = \frac{dU}{dT} \text{ dan } dQ = C_V dT + PdV$$

semua keadaan setimbang dinyatakan oleh pers. gas ideal

$$PV = nRT$$

dan untuk proses kuasi statik infinitesimal

$$PdV + VdP = nRdT$$

Dalam tekanan antara 0 hingga 40 atmosfer baku, hubungan  $P\hat{v}$  dengan  $1/\hat{v}$  praktis linier, sehingga suku pertama dan kedua yang berperan

$$P\hat{v} = A\left(1 + \frac{B}{\hat{v}}\right)$$

Sifat gas menjadi faktor penting dalam termometri. Perkalian  $P\hat{v}$  yang dirajah terhadap  $P$  untuk 4 macam gas berbeda, semuanya pada temperatur titik didih air, pada temperatur titik triple air, dan pada temperatur CO<sub>2</sub> padat. Pada setiap kasus, terlihat ketika tekanannya mendekati nol, perkalian  $P\hat{v}$  mendekati harga yang sama untuk semua gas pada temperatur yang sama.

### 5.2. Gas Ideal

Gas sejati dalam limit tekanan mendekati nol sajalah persamaan keadaannya yang sederhana  $PV=nRT$ . Energi internal gas sejati merupakan fungsi tekanan dan temperatur.

Kemudian didefinisikan gas ideal yang mendekati gas sejati pada tekanan rendah, yang memenuhi

$$PV = nRT$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial P}\right)_T = 0$$

Persyaratan kedua dapat ditulis sebagai:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial U}{\partial P}\right)_T \left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T$$

maka untuk gas ideal:  $\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = 0$

Dengan mensubstitusikan pers. di atas, kita dptkn:

$$dQ = (C_V + nR)dT - VdP$$

$$\frac{dQ}{dT} = (C_V + nR) - V \frac{dP}{dT}$$

pada P tetap :

$$C_P = C_V + nR \text{ jadi utk gas ideal } C_P > C_V$$

U = fungsi (T) saja, maka :

$$C_V = \frac{dU}{dT} = \text{fungsi dari T saja, dan}$$

$$C_P = C_V + nR = \text{fungsi dari T saja}$$

dan juga

$$dQ = C_P dT - VdP$$

### 5.3. Penentuan Kapasitas Kalor Menurut Percobaan

Hasil pengukuran ini untuk gas bertekanan rendah (mendekati gas idela) dapat dinyatakan secara sederhana dalam bentuk kapasitas kalor molar

1) Untuk semua gas berlaku:

- a.  $c_v$  fungsi dari  $T$  saja
- b.  $c_p$  fungsi dari  $T$  dan  $c_p > c_v$
- c.  $c_p - c_v = \text{tetap} = R$
- d.  $x = c_p/c_v =$  fungsi dari  $T$  saja dan  $x > 1$

2) Untuk gas monoatomik, seperti He, Ne, Ar, serta hampir semua uap metalik seperti uap Na, Cd, dan Hg, berlaku

- a.  $c_v$  tetap untuk kisaran temperatur yang cukup besar dan hampir sama dengan  $3/2 R$
- b.  $c_p$  tetap untuk kisaran temperatur yang cukup besar dan hampir sama dengan  $5/2 R$
- c.  $\gamma = c_p/c_v$  tetap untuk kisaran temperatur yang cukup besar dan hampir sama dengan  $5/3$

3) Untuk gas dwiatomik permanen, yaitu udara,  $H_2$ ,  $D_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ , NO, dan CO, berlaku:

- a.  $c_v$  tetap untuk kisaran temperatur biasa dan hampir sama dengan  $5/2 R$ , serta bertambah ketika temperatur dinaikkan
- b.  $c_p$  tetap untuk kisaran temperatur biasa dan hampir sama dengan  $7/2 R$ , serta bertambah ketika temperatur dinaikkan
- c.  $\gamma = c_p/c_v$  tetap untuk kisaran temperatur biasa dan hampir sama dengan  $7/5$ , serta bertambah ketika temperatur dinaikkan

4) Untuk gas poliatomik dan gas yang aktif secara kimiawi seperti  $CO_2$ ,  $NH_3$ ,  $CH_4$ ,  $Cl_2$ , dan  $Br_2$ , maka  $c_v$ ,  $c_p$ , dan  $\gamma$  bervariasi terhadap temperatur, variasinya berbeda untuk masing-masing gas.

### 5.4. Proses Kuasi Statik Adiabatic

Bila gas ideal mengalami proses adiabat kuasi-statik, maka tekanan, volume, dan temperatur berubah dengan cara yang diberikan oleh hubungan antara  $P$  dan  $V$ ,  $P$  dan  $T$ ,  $V$  dan  $T$ . Untuk mendapatkan persamaan keadaannya, khusus untuk gas ideal dimulai dari:

$dQ = C_v dT + PdV$  dan  $dQ = C_p dT - VdP$   
 karena proses yang dilakukan adiabat,  $dQ=0$ , sehingga kedua persamaan di atas dapat ditulis sebagai:

dan  $C_v dT = -PdV$   
 $C_p dT = VdP$   
 dengan membagi pers pertama dgn yg kedua :

$$\frac{dP}{P} = -\frac{C_p}{C_v} \frac{dV}{V}$$

$$dU = dQ + dW$$

	dW	dQ	dU
Isokhorik	0	$nC_v dT$	$nC_v dT$
Isobarik	$p(V_f - V_i)$	$nC_p dT$	$nC_v dT$
Isotermis	$nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$	$nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$	0
Adiabatic	$\frac{1}{1-\gamma} (p_i V_i - p_f V_f)$	0	$nC_v \Delta T$

dan dengan menyatakan perbandingan kapasitas kalor dgn lambang  $\gamma$ , maka :

$$\frac{dP}{P} = -\gamma \frac{dV}{V}$$

Karena  $\gamma$  tetap untuk gas monoatomik, sedangkan untuk gas dwiatomik dan poliatomik  $\gamma$  dapat berubah menurut temperatur. Namun  $\gamma$  akan mengalami perubahan yang berarti jika perubahan temperaturnya cukup besar, seperti Carbon Monoksida yang menaikkan temperaturnya dari 0 hingga 2000°C menimbulkan penurunan  $\gamma$  dari 1,4 menjadi 1,3. Karena sebagian besar proses adiabat tidak menyangkut perubahan temperatur yang cukup besar, maka  $\gamma$  dapat dianggap tetap.

$$\ln P = -\gamma \ln V + \ln \text{tetapan}$$

atau  $PV^\gamma = \text{tetap}$

### Soal

1. Uraikan persamaan berikut dlm bentuk :

$$P = A \left( 1 + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \frac{D}{V^3} + \dots \right)$$

tentukan koefisien virial untuk persamaan

$$\left( P + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = RT$$

a. **van der Waals**

$$P = \frac{RT}{V-b} e^{-a/RTV}$$

b. **Dieterici**