

## PRINCIPLES OF THERMO-FLUID IN FLUID SYSTEM

Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng  
Mechanical Engineering Department  
Faculty of Engineering University of Indonesia



# Sifat-sifat Fluida



## Fluida :

- tidak mampu menahan gaya geser pada lapisan-lapisannya
- deformasi sebanding dengan tegangan geser

### Relasi Deformasi dengan Tegangan Geser

Fluida Newtonian

Fluida Non-Newtonian

### Perubahan Densitas/Kerapatan

Fluida Mampu- mampat

Fluida Tak Mampu-mampat

# Sifat-sifat Fluida



## Fluida Newtonian

Deformasi berbanding lurus dengan tegangan geser



# Sifat-sifat Fluida



## Fluida Non-Newtonian

Deformasi tidak berbanding lurus dengan tegangan geser



# Sifat-sifat Fluida



**Fluida Mampu Mampat (Compressible)**



# Sifat-sifat Fluida



**Fluida Tak Mampu Mampat (Incompressible)**



# Sifat-sifat Fluida



**Densitas/Kerapatan/Massa Jenis,  $\rho$**

**Massa Fluida Persatuan Volume**

**Dimensi :  $ML^{-3}$**

**Satuan :  $kg/m^3$  (SI),  $slugs/ft^3$  (BG)**



**Volume Jenis:**

$$v = \frac{1}{\rho}$$

# Sifat-sifat Fluida



**Berat Spesifik (*Specific Weight*),  $\gamma$**

**Berat Fluida Persatuan Volume**

**Dimensi :  $FL^{-3}$**

**Satuan :  $N/m^3$  (SI),  $lb/ft^3$  (BG)**

$$\gamma = \rho g$$

# Sifat-sifat Fluida



## Gravitasi Spesifik (*Specific Gravity*), *s.g*

Perbandingan (rasio) kerapatan/density suatu fluida terhadap kerapatan fluida acuan

Fluida acuan cairan adalah air

Fluida acuan gas dan uap adalah udara

$$s.g = \frac{\rho_{liquid}}{\rho_{water}} = \frac{\gamma_{liquid}}{\gamma_{water}} \quad (\text{liquid/cair})$$

$$s.g = \frac{\rho_{gas/vapor}}{\rho_{air}} = \frac{\gamma_{gas/vapor}}{\gamma_{air}} \quad (\text{gas/gas})$$

# Sifat-sifat Fluida



## Modulus Bulk Elastisitas Fluida, $E_v$

Sifat yang biasa digunakan untuk menentukan Kemampumampatan (compressibility) suatu fluida

Dimensi :  $FL^{-2}$

Satuan :  $N/m^2$  (SI),  $lb/in.^2$  (BG)

$$E_v = - \frac{dp}{dV/V} = \frac{dp}{d\rho/\rho}$$

$E_v$  besar  $\rightarrow$  fluida incompresible (tak mampu mampat)

Nilai dari modulus bulk gas tergantung pada jenis

Proses yang berlangsung

Isotermal :  $E_v = p$

Isentropik :  $E_v = kp$

# Sifat-sifat Fluida



## Kecepatan Akustik, $c$

Kecepatan bunyi di dalam fluida

$$c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{\frac{E_v}{\rho}}$$

Untuk gas ideal dengan proses isentropik

$$c = \sqrt{\frac{k\rho}{\rho}} = \sqrt{kRT}$$

# Sifat-sifat Fluida



## Viskositas

- Resistensi fluida terhadap tegangan geser
- kontrol terhadap transfer momentum antar lapisan



### Penyebab:

- Kohesi molekuler
- Perpindahan molekul antar lapisan

### Pengaruh peningkatan temperatur:

- cairan : viskositas berkurang
- gas : viskositas bertambah

# Sifat-sifat Fluida



## Viskositas Dinamik (Absolut), $\mu$

Rasio tegangan geser terhadap laju deformasi

Dimensi :  $FTL^{-2}$

Satuan :  $N.s/m^2$  (SI),  $lb.s/ft^2$  (BG)

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy}$$

**Pengaruh Temperatur:**

**Gas : Persamaan *Sutherland***

$$\mu = \frac{CT^{3/2}}{T + S}$$

**Cair: Persamaan Andrade**

$$\mu = De^{B/T}$$

# Sifat-sifat Fluida



## Viskositas Kinematik, $\nu$

Rasio viskositas dinamik dengan kerapatan fluida

Dimensi :  $L^2T^{-1}$

Satuan :  $m^2/s$  (SI),  $ft^2/s$  (BG)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

# Sifat-sifat Fluida



## Tegangan Permukaan, $\sigma$

Intensitas gaya tarik molekul persatuan panjang sepanjang garis permukaan

Dimensi :  $FL^{-1}$

Satuan : N/m (SI), lb/ft (BG)

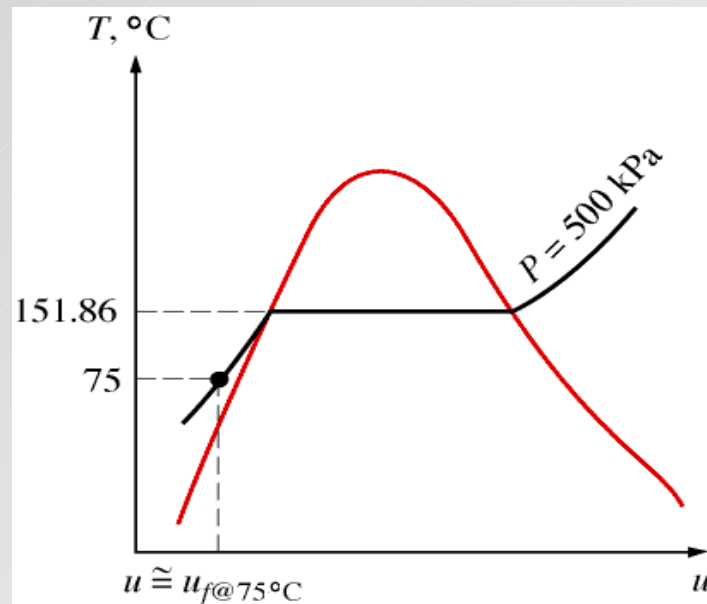


# Sifat-sifat Fluida



## Tekanan Uap, $p_v$

Tekanan pada mana cairan dan uap fluida berada dalam kesetimbangan pada temperatur tertentu



# Hidrostatika dan Hidrodinamika



## Hidrostatika

- Energi dipindahkan melalui fluida tertutup (dibatasi batas padat) oleh tekanan yang dibangkitkan dari pengenaan suatu gaya pada fluida tersebut
- Kebanyakan sistem hidrolik adalah sistem hidrostatik, dengan energi tekanan bersumber utama dari gaya tekan. Gerakan fluida diperlukan, tetapi tidak sebagai penghasil gaya

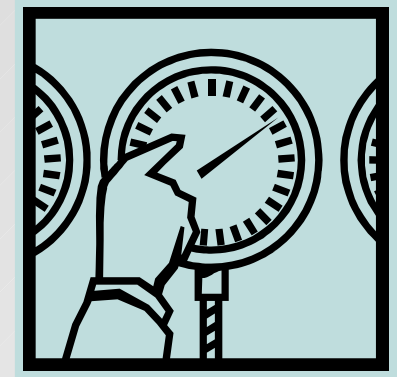
# Hidrostatika dan Hidrodinamika



## Hidrodinamika

- Energi kinetik aliran fluida dikonversikan menjadi energi mekanik (biasanya rotasional) dan digunakan untuk menghasilkan kerja
- Dalam sistem hidrodinamik energi ditransmisikan oleh gerakan fluida itu sendiri
- Kincir air, turbin dll. merupakan contoh aplikasi sistem hidrodinamik

# Statika Fluida



## Statika Fluida

- Fluida dalam keadaan diam

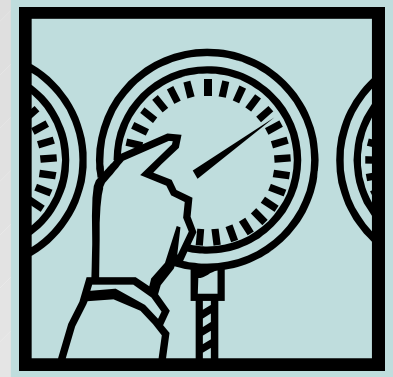
$$\nabla p + \gamma \hat{\mathbf{k}} = 0$$

- Fluida bergerak sedemikian rupa tidak ada gerakan relatif antara partikel fluida yang berdekatan

$$-\nabla p - \gamma \hat{\mathbf{k}} = \rho \mathbf{a}$$

- Tidak ada tegangan geser dalam fluid
- Gaya yang terbentuk pada permukaan partikel akibat tekanan
- Kajian terhadap tekanan dan variasinya dalam fluida dan pengaruh tekanan pada permukaan yang tenggelam

# Statika Fluida



**Fluida Tak Mampu-mampat**  
Dalam keadaan diam

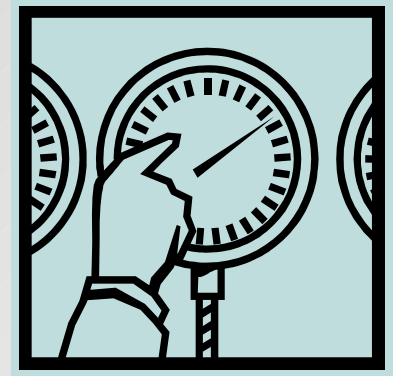
$$\nabla p + \gamma \hat{\mathbf{k}} = 0 \longrightarrow \frac{dp}{dz} = -\gamma \longrightarrow p_1 = \gamma h + p_2$$

## Hukum Pascal

**Tekanan yang dikenakan pada sistem tertutup akan diteruskan ke segala arah**

$$p_1 = p_2 \rightarrow \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

# Statika Fluida



## Pengukuran Tekanan

### *Tekanan Mutlak (Absolute Pressure)*

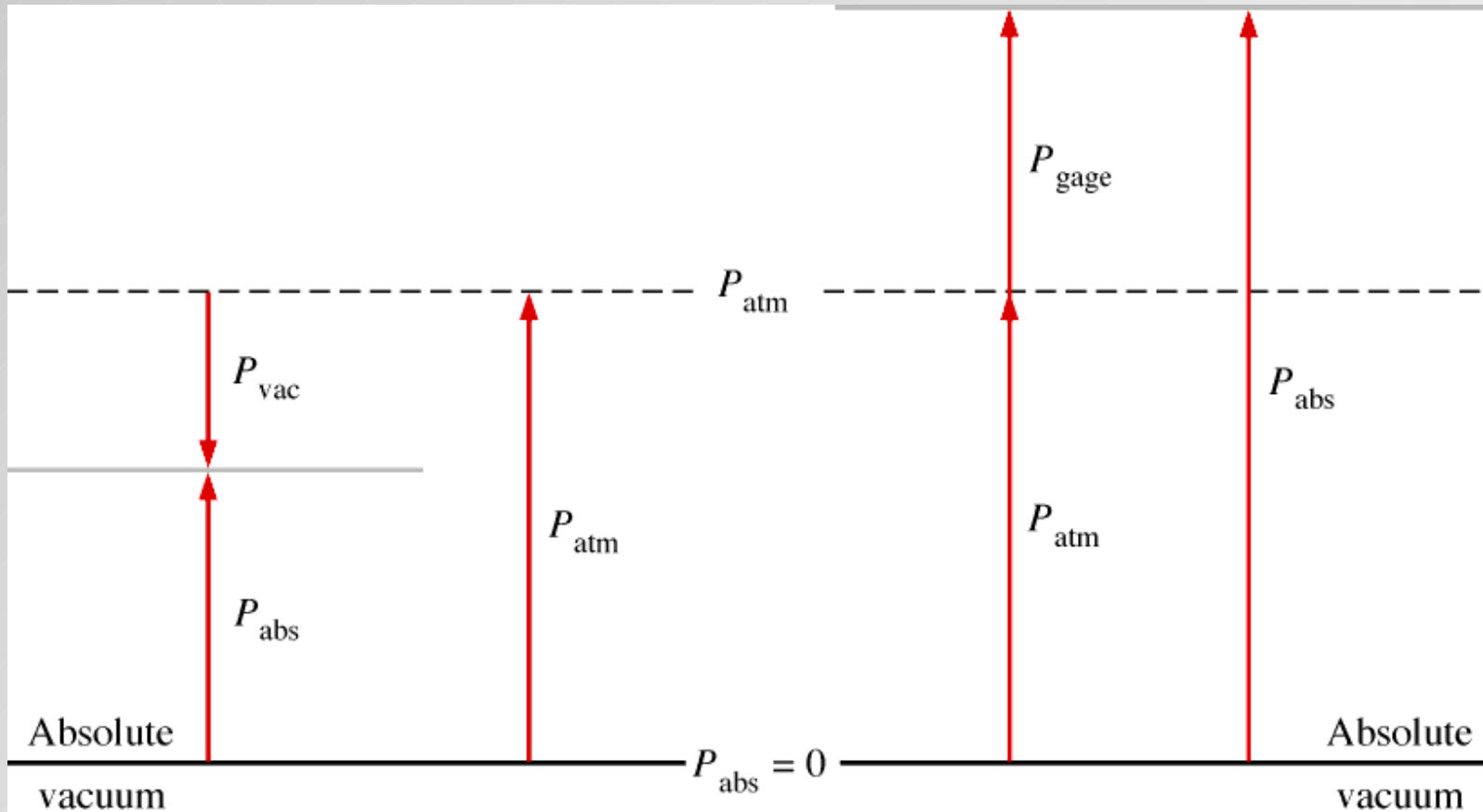
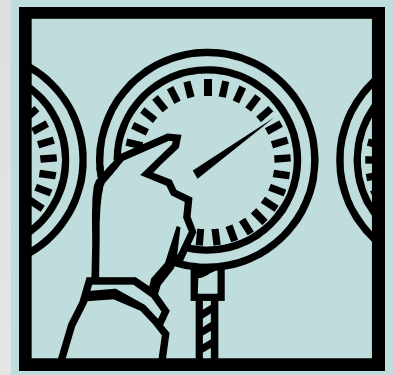
- Tekanan aktual pada suatu posisi tertentu, dan diukur relative terhadap keadaan hampa udara sempurna (*absolute vacuum*)
- Keadaan hampa udara sempurna memiliki tekanan mutlak nol (*absolute vacuum = zero absolute pressure*)

### *Tekanan Pengukuran*

- Alat pengukur tekanan dikalibrasi pada tekanan atmosfer, jadi skala bacaannya menyatakan perbedaan antara tekanan mutlak dengan tekanan udara setempat (Tekanan Gage =  $P_{\text{gage}}$ )
- Tekanan di bawah tekanan atmosfer disebut tekanan vakum ( $P_{\text{vac}}$ )

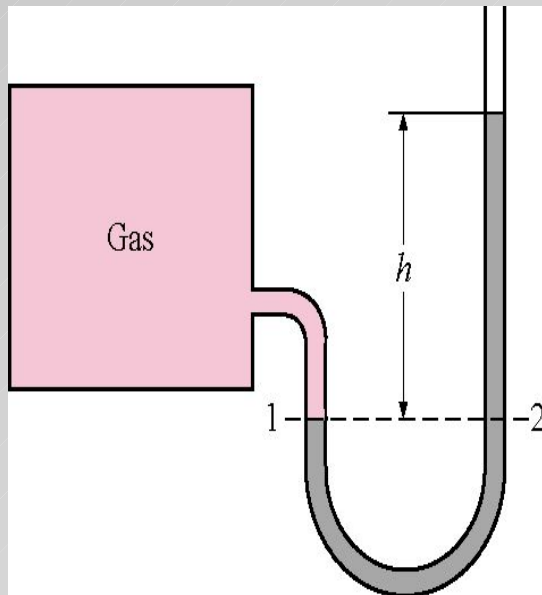
# Statika Fluida

## Hubungan Antar Tekanan



# Statika Fluida

## Manometer



- ▣ Perbedaan tekanan kecil sampai sedang diukur dengan sebuah manometer.
- ▣ Perbedaan ketinggian kolom fluida sebesar  $h$  menunjukkan perbedaan tekanan sebesar:

$$P_{\text{gas}} - P_{\text{atm}} = \Delta P = \rho g h \quad (\text{kPa})$$

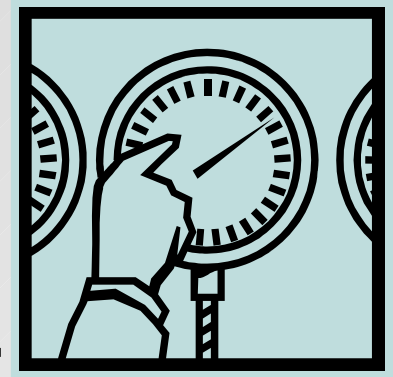
- ▣ dimana  $\rho$  adalah massa jenis fluida dan  $g$  adalah percepatan gravitasi lokal

- ▣ Tekanan atmosfer diukur dengan sebuah barometer dan ditentukan sebagai :

$$P_{\text{atm}} = \rho g h \quad (\text{kPa})$$

dimana  $h$  adalah tinggi kolom cairan di atas permukaan bebas

# Statika Fluida



## Aspek-aspek lainnya

- Gaya Hidrostatik pada permukaan datar dan lengkung
- Gaya apung (Buoyancy), Floatation, Stabilitas
- Hukum Archimedes
- Variasi tekanan pada fluida dengan gerakan benda kaku (rigid body)

# Kinematika Fluida

## Medan Kecepatan



# Kinematika Fluida

## Dimensi Aliran



# Kinematika Fluida

**Aliran Mantap dan Tak Mantap  
(Steady State Flow and Unsteady State Flow)**



# Kinematika Fluida

## Garis-garis Arus Aliran

Streamlines, streaklines, pathlines, timelines



# Kinematika Fluida

## Teorema Transport Reynolds

$$\frac{DB_{sys}}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho b dV + \int_{cs} \rho b \mathbf{V} \cdot \hat{\mathbf{n}} dA$$

**$B$**  = sembarang parameter fluida

**$b$**  = sembarang parameter fluida persatuan massa

# Dinamika Fluida

## Hukum Kedua Newton Sepanjang Streamline



# Dinamika Fluida

**Hukum Kedua Newton Normal terhadap Stremline**



# Dinamika Fluida

## Governing Equation

$$p + \frac{1}{2} \rho V^2 + \gamma z = \text{constant along streamline} \quad \mathbf{Bernoulli}$$

$$p + \rho \int \frac{V^2}{R} dn + \gamma z = \text{constant across streamline}$$

# Dinamika Fluida

**Tekanan Statik, Stagnasi, Dinamik, Total**



# Dinamika Fluida

**Tekanan Statik, Stagnasi, Dinamik, Total**



# Dinamika Fluida

## Penerapan Persamaan Bernoulli Free Jet



# Dinamika Fluida

## Keterbatasan Penerapan Persamaan Bernoulli

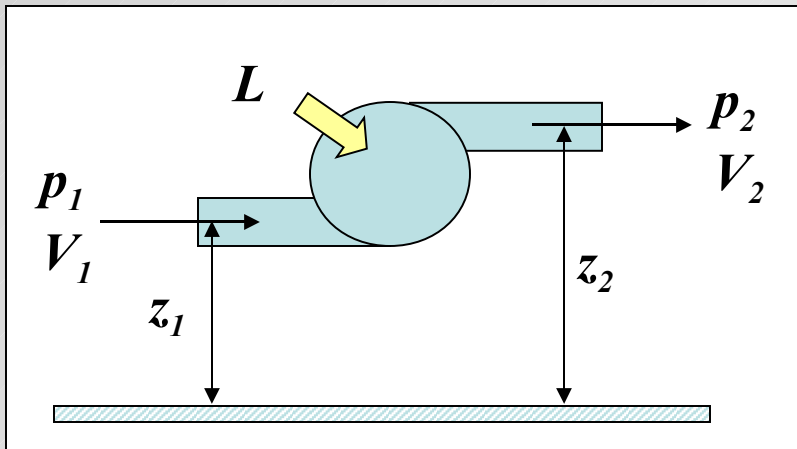
- Pengaruh-pengaruh Kompresibilitas
- Pengaruh-pengaruh unsteadiness
- Pengaruh Rotasi

# Perubahan Energi Fluida

## Fluida Incompressible

- perubahan energi dalam biasanya dapat diabaikan karena pengaruhnya sangat kecil dibandingkan dengan kerja yang dilakukan oleh mesin fluida
- Kesetimbangan energi (*energi balance*) dinyatakan sebagai:

$$\dot{m} \left( \frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) + L = \dot{m} \left( \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right)$$



$\dot{m}$  = massa mengalir perunit waktu (kg/s)  
 $L$  = kerja perunit waktu atau daya (W)  
 $V$  = kecepatan (m/s)  
 $p$  = tekanan (Pa = N/m<sup>2</sup>)  
 $z$  = ketinggian (m)

# Perubahan Energi Fluida

## Fluida Incompressible

### Komponen Energi:

- head tekanan

kerja yang dilakukan aliran volumetrik ( $m/\rho$ ) terhadap tekanan ( $p$ )

- head kecepatan

kerja kinetik aliran massa fluida

- head ketinggian

kerja untuk mengatasi perbedaan potensial

### Head Total:

$$H_t = \left( \frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \right) = \left( \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z \right)$$

**Kerja Mesin Fluida : untuk mengatasi perbedaan head total**

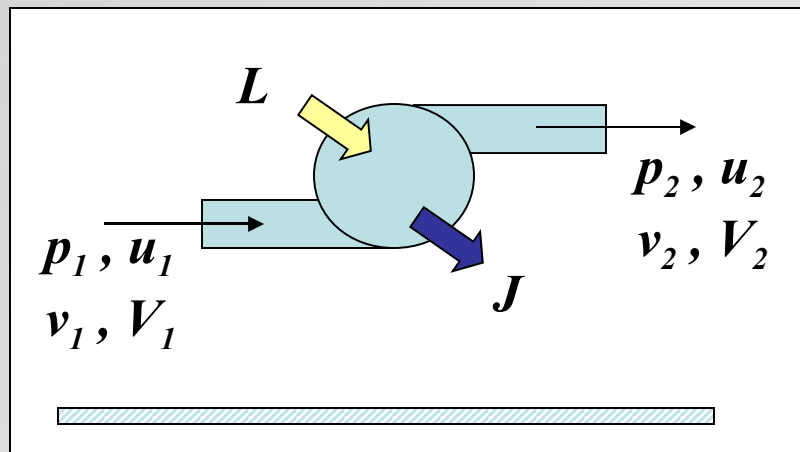
$$L = \dot{m}g\Delta H_t$$

# Perubahan Energi Fluida

## Fluida Compressible

- perubahan energi dalam tidak dapat diabaikan karena berkaitan erat dengan kerja ( $p\upsilon$ ) pada fluida yang mengalir
- pengaruh perbedaan ketinggian biasanya sangat kecil dan biasanya diabaikan
- Kesetimbangan energi (*energi balance*) dinyatakan sebagai:

$$\dot{m} \left( u_1 + p_1 v_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) + L = \dot{m} \left( u_2 + p_2 v_2 + \frac{V_2^2}{2} \right) + J$$



$\dot{m}$  = massa mengalir perunit waktu (kg/s)  
 $L$  = kerja perunit waktu atau daya (W)  
 $V$  = kecepatan (m/s)  
 $v$  = volume spesifik (m<sup>3</sup>/kg)  
 $p$  = tekanan (Pa = N/m<sup>2</sup>)  
 $u$  = energi dalam perunit massa (J/kg)  
 $J$  = perpindahan panas perunit waktu (J/s)

# Perubahan Energi Fluida

## Fluida Compressible

**Entalpi Total:**

$$i_t = \left( u + pv + \frac{V^2}{2} \right)$$

**Proses Termodinamika yang Terlibat:**

- Hubungan antara  $p$  dan  $v$  untuk fluida compressible umumnya ditentukan oleh proses kompresinya (untuk mesin kerja/kompresor) atau proses ekspansinya (untuk mesin tenaga/turbin)
- Terdapat 3 macam kemungkinan proses:
  1. Proses Adiabatik
  2. Proses Isotermik
  3. Proses Politropik

# Perubahan Energi Fluida

## Fluida Compressible

### Proses Adiabatik

- Proses berjalan tanpa adanya perpindahan panas sama sekali, tidak ada panas yang keluar atau masuk ke dalam fluida
  - proses berjalan dengan sangat cepat
  - mesin fluida diisolir sedemikian rupa panas sukar berpindah atau tertahan

### Persamaan Proses:

$$pv^k = \text{konstan}$$

### Perbedaan Head Total:

$$\Delta H_{t,ad} = \frac{1}{g} \left( \frac{k}{k-1} p_2 v_2 \right) \left( 1 - \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)$$

# Perubahan Energi Fluida

## Fluida Compressible

### Proses Isotermik

- Proses berjalan dengan perpindahan panas sedemikian rupa sehingga suhunya tetap.
- pendinginan sempurna

### Persamaan Proses:

$$pv = \text{konstan}$$

### Perbedaan Head Total:

$$\Delta H_{t,iso} = \frac{1}{g} p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1}$$

# Perubahan Energi Fluida

## Fluida Compressible

### Proses Politropik

- Proses berjalan dengan perpindahan panas dan perubahan temperatur sehingga dapat dikatakan terletak antara proses adiabatik dan isotermik
  - Proses yang dalam praktek mendekati keadaan sebenarnya

### Persamaan Proses:

$$pv^n = \text{konstan}$$

### Perbedaan Head Total:

$$\Delta H_{t,pol} = \frac{1}{g} \left( \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \right) \left( \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

# Efisiensi

Dalam proses perubahan energi tidak dapat dihindari *kehilangan energi dalam bentuk panas*

Efisiensi mesin didefinisikan sebagai *perbandingan daya keluaran dengan daya masuk*

