BAB III

PROSES TERMODINAMIKA

GAS SEMPURNA

Proses pemanasan dan ekspansi gas secara umum bisa didefinisikan sebagai *proses termodinamika*. Dari pengamatan, sebagai hasil dari aliran energi, perubahan terjadi pada berbagai sifat gas seperti tekanan, volume, temperatur, energi spesifik, enthalpi spesifik, dsb. Proses termodinamika bisa terjadi dalam berbagai keadaan, tetapi proses-proses berikut adalah beberapa dari proses termodinamika yang penting.

1. Proses volume konstan.
2. Proses tekanan konstan.
3. Proses hiperbolik.
4. Proses isothermal (proses temperatur konstan).
5. Proses adiabatik atau proses isentropik.
6. Proses politropik.
7. Proses ekspansi bebas.
8. Proses *Throttling*.

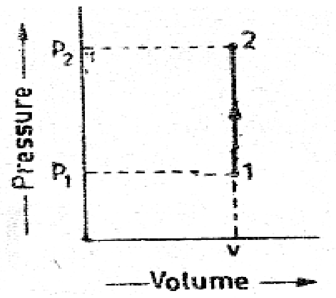
Catatan : 1. Proses yang disebutkan di atas juga bisa diaplikasikan pada proses pendinginan dan kompresi gas. Pendinginan merupakan pemanasan negatif, dan kompresi adalah ekspansi negatif.

2. Dalam proses termodinamika, salah satu hal yang ingin diketahui adalah mencari jumlah kerja yang dilakukan selama proses.

Proses Volume Konstan

Seperti telah disebutkan sebelumnya bahwa gas yang dipanaskan pada volume konstan, temperatur dan tekanannya akan naik. Karena tidak ada perubahan volume, maka tidak ada kerja yang dilakukan oleh gas.

Semua panas yang diberikan disimpan di dalam molekul gas dalam bentuk energi dalam. Perlu di catat bahwa proses ini diatur oleh hukum Gay Lussac.



Gambar 1. Proses volume konstan.

Seandainya ada m kg gas yang dipanaskan pada volume konstan dari temperatur awal T_1 ke temperatur akhir T_2. Proses ini ditunjukkan oleh diagram *p-v* pada gambar 1.

Kita tahu bahwa:

$$Q = \Delta U + W$$

Atau: $Q = \Delta U$ (karena $W = 0$)

Persamaan energi dalam adalah:

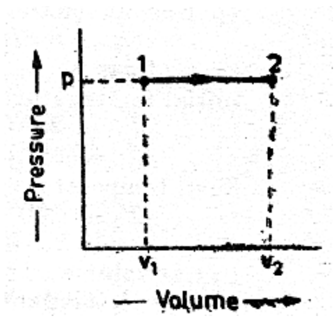
$$\Delta U = m.C_v\,(T_2 - T_1)$$

Jadi kalor yang diberikan:

$$Q = \Delta U = m.C_v\,(T_2 - T_1)$$

Proses Tekanan Konstan

Ketika gas dipanaskan pada tekanan konstan, temperatur dan volumenya akan meningkat. Karena ada perubahan volume, kalor yang diberikan dimanfaatkan untuk menaikkan energi dalam gas, dan juga untuk melakukan kerja luar. Perlu dicatat bahwa proses ini mengikuti hukum Charles.



Gambar 2. Proses tekanan konstan.

Seandainya ada m kg gas yang dipanaskan pada tekanan konstan dari temperatur awal T_1 ke temperatur akhir T_2. Proses ini ditunjukkan oleh diagram *p-v* pada gambar 2.

Kita tahu bahwa kalor yang diberikan ke gas pada tekanan konstan:

$$Q = m.C_p\ (T_2 - T_1)$$

Kenaikan energi dalam adalah:

$$\Delta U = m.C_v\ (T_2 - T_1)$$

Dan kerja yang dilakukan selama proses:

W = luas daerah di bawah garis 1-2

$$W = p(v_2 - v_1) \qquad \text{(dalam satuan kerja)}$$

$$= \frac{p(v_2 - v_1)}{J} \qquad \text{(dalam satuan kalor)}$$

$$= \frac{pv_2 - pv_1}{J} = \frac{mRT_2 - mRT_1}{J}$$

$$= \frac{mR(T_2 - T_1)}{J} \qquad \text{(dalam satuan kalor)}$$

Catatan: Jika gas didinginkan pada tekanan konstan, maka akan berupa kompresi. Jelas bahwa selama pendinginan, temperatur dan volume berkurang dan kerja dikatakan 'dilakukan pada gas'. Dalam hal ini, kalor yang dilepaskan oleh gas:

$$Q = m.C_p\ (T_1 - T_2)$$

Penurunan energi dalam adalah:

$$\Delta U = m.C_v\ (T_1 - T_2)$$

Dan kerja yang dilakukan pada gas:

$$W = p(v_1 - v_2) \qquad \text{(dalam satuan kerja)}$$

$$= \frac{p(v_1 - v_2)}{J} \qquad \text{(dalam satuan kalor)}$$

$$= \frac{pv_1 - pv_2}{J}$$

$$= \frac{mR(T_1 - T_2)}{J} \qquad \text{(dalam satuan kalor)}$$

Proses Hiperbolik

Sebuah proses dimana gas dipanaskan atau diekspansikan sedemikian sehingga hasil kali tekanan dan volumenya (yaitu p X v) tetap konstan, disebut *proses hiperbolik*.

Proses hiperbolik mengikuti hukum Boyle yaitu pv = konstan. Jika kita menggambar grafik tekanan dan volume selama proses, akan didapatkan hiperbola segi empat. Hal ini terjadi hanya pada kasus secara teoritis, dan tidak terlalu penting dari tinjauan termodinamika. Aplikasi praktisnya adalah proses isothermal, yang akan dijelaskan berikut ini.

Proses Isothermal (Proses Temperatur Konstan)

Sebuah proses dimana temperatur zat tetap konstan selama ekspansi atau kompresi, disebut *proses isothermal* atau *proses temperatur konstan*. Hal ini terjadi jika zat tetap dalam persinggungan termal dengan lingkungannya, sehingga kalor yang dihisap atau dilepaskan dikompensasikan dengan kerja mekanik yang dilakukan oleh atau pada gas. Jadi jelas bahwa proses isothermal adalah:

1. tidak ada perubahan temperatur, dan
2. tidak ada perubahan energi dalam.

Kita tahu bahwa:

$$Q = \Delta U + W$$

$$Q = 0 + W \qquad \text{(karena } \Delta U = 0\text{)}$$

$$Q = W \qquad \text{(dalam satuan kerja)}$$

$$= \frac{W}{J} \qquad \text{(dalam satuan kalor)}$$

Sehingga selama ekspansi thermal:

Kalor yang ditambahkan = Kerja yang dilakukan oleh gas

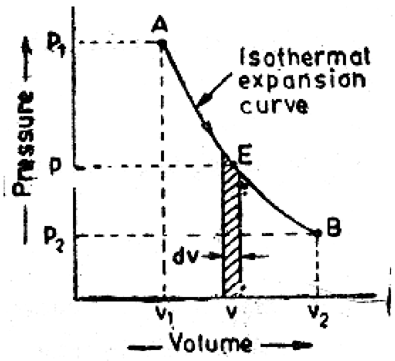
Dengan cara yang sama, selama kompresi isotermal:

Kalor yang dikeluarkan = Kerja yang dilakukan pada gas

Proses isotermal ini mengikuti hukum Boyle. Sehingga untuk gas sempurna persamaannya adalah pv = konstan.

Kerja Yang Dilakukan Selama Ekspansi Isothermal

Misalkan sejumlah gas sempurna diekspansikan secara isotermal, seperti yang ditunjukkan oleh garis *AB* pada gambar 3.



Gambar 3. Proses isotermal.

Jika: v_1 = volume awal gas

p_1 = tekanan awal gas

v_2 = Volume akhir gas

p_2 = tekanan akhir gas

Ambillah sebuah titik *E* pada kurva *AB*. p dan v adalah tekanan dan volume pada titik ini. Misalkan ada peningkatan sejumlah kecil volume sebesar dv. Perubahan ini sangat kecil, sehingga tekanan selama perubahan ini diasumsikan tetap. Kita tahu bahwa kerja selama perubahan ini adalah:

dW = Luas daerah pada daerah yang diarsir.

$= p.dv$

Total kerja yang dilakukan selama ekspansi dari *A* ke *B* bisa dicari dengan mengintegralkan persamaan di atas dengan batas v_1 ke v_2 sehingga:

$$W = \int_{v_1}^{v_2} p.dv \qquad \text{(i)}$$

Karena ekspansi adalah isotermal ($pv = C$), sehingga:

$$pv = p_1v_1$$

$$p = p_1v_1/v$$

Substitusi harga *p* ini ke persamaan (i),

$$W = \int_{v_1}^{v_2} \frac{p_1v_1}{v} dv = p_1v_1 \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v}$$

$$= p_1v_1 \left[\ln v\right]_{v_1}^{v^2} = p_1v_1 \ln\frac{v_2}{v_1} \qquad \text{(ii)}$$

atau $W = p_1 v_1 \ln r$ (iii)

dimana: $r = \dfrac{v_2}{v_1}$ dan dikenal dengan rasio ekspansi.

Kita tahu bahwa: $p_2 v_2 = mRT$

Jadi kerja yang dilakukan:

$$W = mRT \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$= mRT \ln r$$

Karena $p_1 v_1 = p_2 v_2$ maka: $\dfrac{v_2}{v_1} = \dfrac{p_1}{p_2}$

Maka kerja yang dilakukan:

$$W = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2}$$

Catatan: 1. Rasio ekspansi, $r = \dfrac{\text{Volume pada akhir ekspansi}}{\text{Volume pada awal ekspansi}}$

2. Rasio kompresi, $r = \dfrac{\text{Volume pada awal kompresi}}{\text{Volume pada akhir kompresi}}$

3. Kalor yang diberikan selama proses ini bisa dicari dengan membagi kerja yang dilakukan dengan panas ekivalen. (yaitu: *W/J*).

Proses Adiabatik atau Proses Isentropik[1]

Sebuah proses dimana zat kerja tidak menerima atau memberikan kalor ke lingkungannya selama ekspansi atau kompresi disebut *proses adiabatik*. Ini bisa terjadi apabila zat kerja terisolasi secara termal. Jadi jelas bahwa proses adiabatik:

1. Tidak ada kalor yang masuk atau keluar dari gas.
2. temperatur gas berubah ketika kerja dilakukan dengan perubahan energi dalam.
3. perubahan energi dalam sama dengan kerja mekanik yang dilakukan.

Kita tahu bahwa:

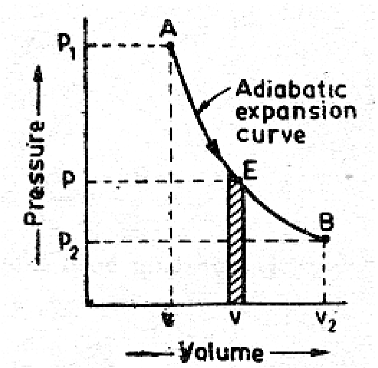
$Q = \Delta U + W$

$\therefore \quad 0 = \Delta U + W$

atau $\quad \Delta U = -W$ (dalam satuan kerja)

Tanda minus menunjukkan bahwa untuk kenaikan energi dalam, kerja mesti dilakukan pada gas dan sebaliknya.

Misalkan sejumlah gas sempurna diekspansikan secara adiabatik seperti ditunjukkan oleh gambar 4.



Gambar 4. Proses adiabatik.

Jika, v_1 = volume awal gas

p_1 = tekanan awal gas

v_2 = volume akhir gas

p_2 = tekanan akhir gas

Ambil sebuah titik pada kurva *AB* misal *E*. p dan v adalah tekanan dan volume pada titik *E*. Misalkan volume gas meningkat sebesar dv. Perubahan ini sangat kecil sehingga tekanan selama perubahan ini diasumsikan konstan.

Kerja yang dilakukan selama perubahan ini:

$$dW = p.dv \qquad \text{(dalam satuan kerja)}$$

$$= \frac{p.dv}{J} \qquad \text{(dalam satuan kalor)}$$

Misalkan temperatur turun sebesar dT, maka penurunan energi dalam adalah:

$$dU = m.C_v.dT$$

karena $\quad dU + dW = 0$

[1] Proses adiabatik tanpa gesekan dikenal dengan proses isentropik.

jadi: $$m.C_v.dT + \frac{p.dV}{J} = 0$$

$$m.C_v.dT = -\frac{p.dV}{J} \qquad \text{(i)}$$

karena $pv = mRT$

Dengan mendiferensialkan persamaan ini, kita peroleh:

$$p.dv + v.dp = mR.dT \qquad \text{(ii)}$$

Kita tahu bahwa:

$$R = J\,(C_p - C_v)$$

Dengan mensubstitusikan harga *R* ke persamaan (ii),

$$p.dv + v.dp = mJ\,(C_p - C_v)\,dT$$

$$mJ\,(C_p - C_v)\,dT = p.dv + v.dp \qquad \text{(iii)}$$

Bagi persamaan (iii) dengan (i)

$$\frac{mJ(C_p - C_v)dT}{m.C_v.dT} = \frac{p.dv + v.dp}{-\frac{p.dv}{J}}$$

$$\frac{C_p - C_v}{C_v} = -1 - \left(\frac{v}{dv} \mathrm{X} \frac{dp}{p}\right)$$

atau

$$\frac{C_p}{C_v} - 1 = -1 - \left(\frac{v}{dv} \mathrm{X} \frac{dp}{p}\right)$$

$$\gamma = -\left(\frac{v}{dv} \mathrm{X} \frac{dp}{p}\right) \qquad \left(\because \frac{C_p}{C_v} = \gamma\right)$$

$$\therefore \qquad \gamma \mathrm{X} \frac{dv}{v} = -\frac{dp}{p}$$

$$\gamma \frac{dv}{v} + \frac{dp}{p} = 0$$

Dengan mengintegralkan kedua sisi persamaan:

$$\gamma.\ \ln v + \ln p = \text{konstan}$$

atau $\ln pv^{\gamma} = \ln C$

$$pv^{\gamma} = C$$

atau $p_1 v_1^{\gamma} = p_2 v_2^{\gamma} = ... = C$ (iv)

Persamaan di atas bisa juga dinyatakan dalam bentuk berikut:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma} \quad \text{(v)}$$

Dari persamaan umum gas:

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2}$$

atau $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \mathrm{X} \frac{v_2}{v_1}$ (vi)

Dengan menyamakan (v) dan (vi),

$$\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma} = \frac{T_1}{T_2} \mathrm{X} \frac{v_2}{v_1}$$

atau: $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma} \mathrm{X} \frac{v_1}{v_2}$

$\therefore$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma-1}$ (vii)

Dari persamaan adiabatik, kita juga tahu bahwa:

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad \text{(viii)}$$

Dari persamaan umum gas, kita tahu bahwa:

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2}$$

atau: $\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2} \mathrm{X} \frac{p_2}{p_1}$ (ix)

dengan menyamakan (viii) dan (ix):

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = \frac{T_1}{T_2} \mathrm{X} \frac{p_2}{p_1}$$

atau: $$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \mathrm{X} \frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{-\frac{1}{\gamma}+1}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \qquad \text{(x)}$$

Kerja yang dilakukan selama ekspansi adiabatik

Kerja selama kenaikan volume gas :

$$dW = p.dv$$

Total kerja selama ekspansi dari *A* dan *B* dicari dengan mengintegralkan persamaan di atas dengan batas v_1 ke v_2. Sehingga:

$$W = \int_{v_1}^{v_2} p.dv \qquad \text{(xi)}$$

Proses ekspansi adiabatik gas mengikuti persamaan:

$$pv^{\gamma} = p_1 v_1^{\gamma}$$

$$p = \frac{p_1 v_1^{\gamma}}{v^{\gamma}}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan ini ke persamaan (xi),

$$W = \int_{v_1}^{v_2} \frac{p_1 v_1^{\gamma}}{v^{\gamma}} dv = p_1 v_1^{\gamma} \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v^{\gamma}}$$

$$= p_1 v_1^{\gamma} \left[\frac{v^{-\gamma+1}}{\gamma+1}\right]_{v_1}^{v_2}$$

$$= \frac{p_1 v_1^{\gamma}}{1\text{-}\gamma} \left[v_2^{1-\gamma} - v_1^{1-\gamma}\right]$$

$$= \frac{p_1 v_1^{\gamma}.v_2^{1-\gamma} - p_1 v_1^{\gamma}.v_1^{1-\gamma}}{1\text{-}\gamma}$$

karena : $p_1 v_1^{\gamma} = p_2 v_2^{\gamma}$

$$= \frac{p_2 v_2 - p_1 v_1}{1-\gamma}$$

$$= \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{\gamma - 1}$$ ... untuk ekspansi

$$= \frac{p_2 v_2 - p_1 v_1}{\gamma - 1}$$ ... untuk kompresi

Catatan: Persamaan di atas untuk kerja yang dilakukan bisa juga dinyatakan dengan:

(a) Kita tahu bahwa: $p_1 v_1 = mRT_1$ dan $p_2 v_2 = mRT_2$

Dengan mensubstitusikan harga-harga ini ke persamaan untuk ekspansi,

$$W = \frac{mRT_1 - mRT_2}{\gamma - 1}$$

$$= \frac{mR(T_1 - T_2)}{\gamma - 1}$$ ... untuk ekspansi

$$= \frac{mR(T_2 - T_1)}{\gamma - 1}$$ ... untuk kompresi

(b) Kita tahu bahwa kerja yang dilakukan selama ekspansi adalah:

$$W = \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{\gamma - 1}$$

$$= \frac{p_1 v_1}{\gamma - 1}\left[1 - \frac{p_2 v_2}{p_1 v_1}\right]$$

$$= \frac{RT_1}{\gamma - 1}\left[1 - \frac{p_2 v_2}{p_1 v_1}\right]$$ (karena $p_1 v_1 = mRT_1$)

Proses Politropik

Proses Politropik dikenal juga sebagai hukum umum untuk ekspansi dan kompresi gas, dan diberikan oleh persamaan:

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

Dimana n adalah indeks politropik, yang harganya dari nol hingga tak berhingga, bergantung pada bagaimana terjadinya ekspansi atau kompresi.

Berbagai persamaan untuk proses politropik bisa dilakukan dengan merubah indek γ menjadi n pada proses adiabatik.

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{n\text{-}1} \quad \text{dan} \quad \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{n-1}{n}}$$

dengan cara yang sama:

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}}$$

Selanjutnya, persamaan untuk kerja yang dilakukan selama proses politropik bisa dilakukan dengan merubah indeks γ dengan n pada persamaan kerja untuk proses adiabatik.

Kerja yang Diserap atau Dilepaskan Selama Proses Politropik

Ketika gas sempurna diekspansikan atau dikompresikan sesuai dengan proses politropik (pv^n = konstan), sebagian kalor selalu diserap atau dibuang antara gas dengan lingkungan melalui dinding silinder gas tersebut.

Misalkan sejumlah gas sempurna diekspansikan secara politropik. Katakan:

m = massa gas

p_1 = tekanan awal gas

v_1 = volume awal gas

T_1 = temperatur awal gas

p_2, v_2, T_2 = bersesuaian dengan kondisi akhir gas.

Kita tahu kerja yang dilakukan gas selama proses politropik:

$$W = \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{J(n-1)} = \frac{mR(T_1 - T_2)}{J(n-1)} \qquad \text{(dalam satuan kalor)}$$

Kenaikan energi dalam:

$$\Delta U = m.C_v\,(T_2 - T_1) \qquad \text{(dalam satuan kalor)}$$

Berdasarkan persamaan energi umum:

$$Q = W + \Delta U = \frac{mR(T_1 - T_2)}{J(n-1)} + m.C_v(T_2 - T_1)$$

$$= \frac{mR(T_1 - T_2)}{J(n-1)} + m.\frac{R}{J(\gamma - 1)} X(T_2 - T_1)$$ (karena $C_v = \frac{R}{J(\gamma-1)}$)

$$= m\frac{R}{J}(T_1 - T_2)\left[\frac{1}{n-1} - \frac{1}{\gamma - 1}\right]$$

$$= m\frac{R}{J}(T_1 - T_2)\left[\frac{(\gamma-1)-(n-1)}{(n-1)(\gamma-1)}\right]$$

$$= m\frac{R}{J} X \frac{(T_1 - T_2)(\gamma - n)}{(n-1)(\gamma-1)}$$

$$= \frac{(\gamma - n)}{(\gamma - 1)} X \frac{mR(T_1 - T_2)}{J(n-1)}$$

Catatan: 1. Persamaan di atas untuk kalor juga bisa dinyatakan dengan:

(a). $Q = \frac{(\gamma - n)}{(\gamma - 1)} \text{X kerja yang dilakukan}$

(b). $= \frac{(\gamma - n)}{(\gamma - 1)} X \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{J(n-1)}$

(c). $= \frac{(\gamma - n)}{(\frac{C_p}{C_v} - 1)} Xm(C_p - C_v)\frac{T_1 - T_2}{(n-1)}$

$$= \frac{(\gamma - n)}{(\frac{C_p - C_v}{C_v})} Xm(C_p - C_v)\frac{T_1 - T_2}{(n-1)}$$

$$= \frac{(\gamma - n)}{n-1} Xm.C_v(T_1 - T_2)$$

2. Dalam persamaan di atas, harga kerja yang dilakukan harus dalam satuan kalor.

3. Persamaan di atas memberikan harga kalor, yang dilewatkan ke gas melalui dinding silinder ketika gas berekspansi. Ini terjadi jika harga n lebih kecil dari harga γ. Jika n lebih besar dari γ, maka kalor dilepaskan oleh gas.

4. dengan cara yang sama, selama kompresi, kerja yang dilakukan akan negatif, yaitu kerja diberikan ke gas. Dan kalor akan dilepaskan oleh gas. Ini terjadi hanya jika n lebih kecil dari harga γ.

5. Persamaan untuk kerja yang dilakukan bisa juga ditulis dengan:

$$W = \frac{p_1v_1 - p_2v_2}{J(n-1)} = \frac{p_1v_1\left(1 - \frac{p_2v_2}{p_1v_1}\right)}{J(n-1)}$$

$$= \frac{p_1v_1(1 - r^{n-1})}{J(n-1)}$$

dimana $\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n = r^n$ dan $\frac{p_2v_2}{p_1v_1} = r^n \mathrm{X} \frac{1}{r} = r^{n-1}$

Laju Penyerapan atau Pelepasan Kalor per Satuan Volume

Dari sebelumnya kita sudah dapatkan bahwa untuk proses politropik:

$$Q = \frac{(\gamma - n)}{(\gamma - 1)} \mathrm{X} W$$

Dimana W adalah kerja yang dilakukan selama proses politropik dalam satuan kalor.

Jika dQ adalah sejumlah kecil kalor yang diserap atau dilepaskan selama perubahan kecil tekanan dan volume, maka:

$$dQ = \frac{(\gamma - n)}{(\gamma - 1)} \mathrm{X} \frac{p.dv}{J}$$ ... dalam satuan kalor

Jadi laju penyerapan atau pelepasan kalor per satuan volume:

$$\frac{dQ}{dv} = \frac{(\gamma - n)}{(\gamma - 1)} \mathrm{X} \frac{p}{J}$$ ... dalam satuan kalor

$$= \frac{(\gamma - n)}{(\gamma - 1)} \mathrm{X} p$$ ... dalam satuan kerja

Dan laju penyerapan atau pelepasan kalor per detik:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{dv} \mathrm{X} \frac{dv}{dt} = \frac{(\gamma - n)}{(\gamma - 1)} \mathrm{X} \frac{p}{J} \mathrm{X} \frac{dv}{dt}$$

dimana dv/dt adalah volume sapuan piston/detik.

Indeks Politropik

Pada proses politropik:

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n$$

Dengan menjadikan logaritmik di kedua sisi persamaan:

$$\log p_1 + n \log v_1 = \log p_2 + n \log v_2$$

Atau :

$$n \log v_1 - n \log v_2 = \log p_2 - \log p_1$$

$$n (\log v_1 - \log v_2) = \log p_2 - \log p_1$$

$$n \log\left(\frac{v_1}{v_2}\right) = \log\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

$$n = \frac{\log\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}{\log\left(\frac{v_1}{v_2}\right)}$$

Catatan: Dengan cara yang sama, kita bisa mencari indeks adiabatik:

$$\gamma = \frac{\log\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}{\log\left(\frac{v_1}{v_2}\right)}$$

Proses Ekspansi Bebas

Ekspansi bebas terjadi bila suatu fluida diperbolehkan berekspansi secara tiba-tiba ke dalam ruang vakum melalui *orifice* yang berdimensi besar. Pada proses ini, tidak ada kalor yang diberikan atau dilepaskan dan tidak ada kerja eksternal yang dilakukan. Sehingga total kalor pada fluida tetap. Jenis ekspansi ini disebut juga *ekspansi kalor total tetap*. Maka jelas, bahwa proses ekspansi bebas berlaku:

$$Q = 0, \ W = 0 \ \text{ dan } \Delta U = 0$$

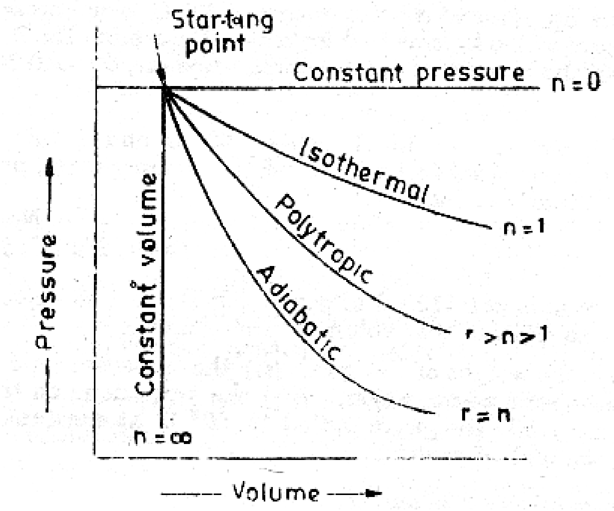
Proses Throttling

Jika gas sempurna mengalami ekspansi ketika melewati lobang sempit, seperti pipa kecil atau katup yang terbuka sedikit, proses ini disebut *proses throttling*. Selama proses ini tidak ada panas yang diberikan atau dilepaskan dan juga tidak ada kerja eksternal dilakukan. Pada proses ini juga tidak ada perubahan temperatur, sehingga kalor total fluida tetap.

Selama proses *throttling*, ekspansi gas sempurna berada pada kondisi kalor total yang konstan, dan mirip dengan proses ekspansi bebas. Karenanya pada proses *throttling* berlaku:

$$Q = 0,\ \ W = 0 \ \text{ dan } \Delta U = 0$$

Hukum Umum Ekspansi dan Kompresi



Gambar 4. Kurva untuk berbagai harga *n*.

Hukum umum ekspansi dan kompresi gas sempurna adalah pv^n = konstan. Persamaan ini memberikan hubungan antara tekanan dan volume sejumlah gas. Harga *n* bergantung pada kondisi alami gas, dan kondisi dimana perubahan (yaitu: ekspansi atau kompresi) itu terjadi. Harga *n* berkisar dari nol hingga tak berhingga. Tetapi harga-harga berikut penting jika ditinjau dari sudut pandang termodinamika.

1. Jika n = 0, artinya pv^0 = konstan, atau p = konstan. Dengan kata lain, untuk ekspansi atau kompresi gas sempurna pada *tekanan konstan*, n = 0.
2. Jika n = 1, artinya pv = konstan, yaitu ekspansi atau kompresi adalah isotermal atau hiperbolik.

3. Jika *n* terletak antara 1 dan *n*, ekspansi atau kompresi adalah *politropik*, yaitu pv^n = konstan.
4. Jika $n = \gamma$, ekspansi atau kompresi adalah *adiabatik*, yaitu pv^γ = konstan.
5. Jika $n = \infty$, ekspansi atau kompresi pada volume konstan, atau v = konstan.