TERMODINAMIKA

Wardaya College – IR

I. Satuan Suhu

Didalam pelajaran fisika kita mengenal adanya beberapa satuan suhu berikut adalah data – data satuan suhu yang ada di dalam fisika:

1. Celsius
2. Kelvin
3. Reaumur
4. Fahrenheit

Untuk mengubah atau mengkonversi satuan suhu menjadi satuan yang lainnya kita harus mengetahui dahulu rumus umum konversi suhu dan juga perbandingan mereka.

Perbandingan Satuan Suhu:

C : K : R : F = 5 : 5 : 4 : 9

Contoh soal:

Di suhu berapakah nilai derajat Celsius sama dengan derajat Fahrenheit?

Jawab:

$$T_0°\text{C} = 0°\text{C}, T_0°\text{F} = 32°\text{F}, k_i(°\text{F}) = 9, k_i(°\text{C}) = 5$$

$$T_\text{F} = T_\text{C}$$

$$T_\text{F} = 32° + \frac{9}{5}T_i, T_\text{C} = \frac{5}{9}(T_i - 32°)$$

$$32° + \frac{9}{5}T_i° = \frac{5}{9}(T_i° - 32°) \rightarrow 32° + \frac{9}{5}T_i° = \frac{5}{9}T_i° - \frac{160}{9}°$$

$$\frac{448}{9}° = \left(\frac{5}{9} - \frac{9}{5}\right)T_i° \rightarrow T_i° = -40°$$

II. Pemuaian Termal/ Ekspansi Termal

Jika suatu benda mendapatkan energi kalor maka benda tersebut dapat memuai sesuai dengan koefisien muai benda tersebut.

(i). Pemuaian 1 Dimensi (Panjang)

Perbandingan antara perubahan panjang dengan panjang inisial dari benda dapat dinyatakan menjadi rumus berikut:

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta T$$

Dengan adanya rumus perubahan panjang maka kita dapat menghitung panjang akhir dari benda tersebut yaitu:

$$L_f = L_0 + \Delta L \rightarrow L_f = L_0 + L_0 \alpha \Delta T$$

$$L_f = L_0(1 + \alpha \Delta T)$$

(ii). Pemuaian 2 Dimensi (Luas)

Sama seperti pemuain panjang namun koefisien muai luas adalah β, dan nilai β adalah dua kalinya nilai koefisien muai panjang (β = 2α)

Maka rumus luas akhir setelah pemuaian adalah:

$$A_f = A_0(1 + \beta \Delta T)$$

(iii). Pemuaian 3 Dimensi (Volume)

$$V_f = V_0(1 + \gamma \Delta T), \gamma = 3\alpha$$

III. Energi Kalor

Kalor adalah energi yang mengalir dikarenakan adanya beda temperatur di dalam benda atau sistem tersebut. Rumus kalor dapat didefinisikan sebagai:

$$Q = mc\Delta T$$

Atau

$$Q = C\Delta T$$

Perlu diperhatikan bahwa C (c kapital) dan c (c kecil) adalah 2 unit yang berbeda, C (c kapital) adalah panas spesifik sedangkan c (c kecil) adalah kapasitas kalor suatu benda.

Jika suatu benda mengalami perubahan fasa maka rumus energi kalor untuk kondisi tersebut adalah:

$$Q = mL$$

Dimana L adalah kalor laten dari suatu benda yang mengalami perubahan fasa.

IV. Azas Black

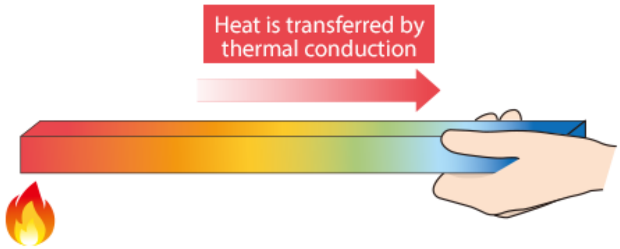
Azas Black menyatakan bahwa apabila kita mencampurkan 2 benda yang berbeda dengan suhu yang berbeda maka benda yang memiliki energi kalor lebih tinggi akan mengalirkan energinya ke benda yang energi kalornya lebih rendah hingga energi kalor dari kedua benda tersebut equivalen.

V. Mekanisme aliran Kalor

Ada 3 cara agar kita bisa menghantarkan energi kalor yaitu:

1. Konduksi

Konduksi artinya kita menghantarkan energi kalor dengan perantara benda padat. Perhatikan gambar dibawah ini:



Di gambar tersebut dinyatakan bahwa energi kalor mengalir dari suhu yang lebih tinggi menuju ke suhu yang lebih rendah. Laju energi kalor ini bisa dihitung menggunakan rumus berikut:

$$H = -kA\frac{dT}{dx}$$

Contoh soal:

Sebuah batang tembaga dengan suhu 120°C digabungkan dengan batang besi dengan suhu 60°C. Hitunglah suhu dimana tembaga dan besi menempel (Asumsikan luas dan panjang tembaga sama)

Jawab:

Karena kita menggabungan 2 benda tersebut maka laju konduksi didalamnya bisa diasumsikan sama.

$$H_{Cu} = H_{Fe}$$

$$-k_{Cu}A_{Cu}\frac{T_{Cu} - T_i}{L_{Cu}} = -k_{Fe}A_{Fe}\frac{T_i - T_{Fe}}{L_{Fe}}$$

Dikarenakan luas penampang dan panjang kedua benda tersebut sama maka:

$$k_{Cu}T_{Cu} - k_{Cu}T_i = k_{Fe}T_i - k_{Fe}T_{Fe}$$

$$k_{Cu}T_{Cu} + k_{Fe}T_{Fe} = (k_{Fe} + k_{Cu})T_i \rightarrow T_i = \frac{k_{Cu}T_{Cu} + k_{Fe}T_{Fe}}{k_{Fe} + k_{Cu}}$$

2. Konveksi

Konveksi adalah perpindahan kalor meggunakan medium cair, berikut adalah persamaan laju panas konveksi.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot (D\nabla H) - \nabla \cdot (vH) + R; \nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}$$

3. Radiasi

Radiasi adalah perpindahan kalor tanpa menggunakan media apapun karena didalam kasus ini panas dihantarkan sebagai gelombang elektromagnetik. Laju kalor dari radiasi dapat ditentukan menggunakan rumus Stefan – Boltzmann.

$$H = Ae\sigma T^4$$

Dimana e adalah emisivitas suatu benda dan interval nilai hanya berada pada rentang 0 sampai 1 dan sigma kecil adalah konstanta Stefan – Boltzmann.

VI. Persamaan Keadaan (Equation of State)

Persamaan keadaan dapat merupakan persamaan dalam materi termodinamika yang menggambarkan kondisi suatu benda dalam kondisi spesifik.

Persamaa keadaan biasanya berkorelasi dengan tekanan, suhu, dan volume benda dan dapat didenotasikan dalam bentuk fungsi sebagai berikut:

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

Dalam materi termodinamika dasar kita mengasumsikan semua gas dapat dinyatakan kondisinya menggunakan persamaan gas ideal.

Gas ideal aslinya tidak ada atau tidak nyata di dalam dunia ini namun kita bisa mengaproksimasikan kondisi gas ideal tersebut menggunakan suatu percobaan (gas inert dalam kondisi temperatur rendah).

Berikut adalah persamaan gas ideal:

$$PV = nRT$$

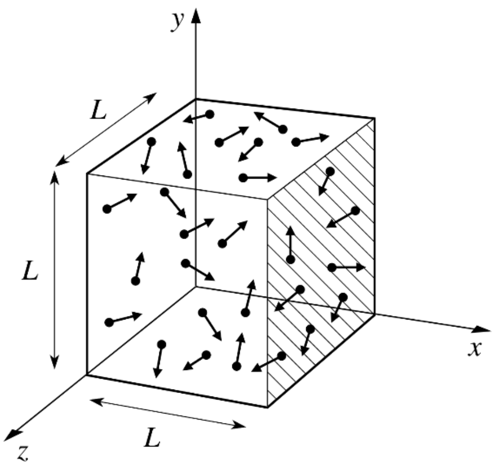
Persamaan gas ideal mengabaikan kompresibilitas suatu zat (Z). Apabila gas tersebut tidak ideal maka kita dapat menggunakan persamaan Van Der Waals,

$$\left(p + \frac{N^2 a}{V^2}\right)(V - nb) = Nk_b T$$

VII. Teori Kinetika Gas (TKG)

Molekul dalam fasa gas dapat bergerak dengan bebas dan memenuhi mekanika klasik newton, dalam kondisi ideal tumbukan antara gas dianggap elastis sempurna sehingga energi kinetik didalam gas tersebut dapat diasumsikan konstan dan juga gaya gravitasi antar molekul diabaikan. Berikut adalah derivasi rumus energi kinetik gas:

Asumsikan sebuah gas ideal di injeksikan ke suatu kubus dengan dimensi L



Dibawah asumsi bahwa gas tersebut ideal maka kita dapat mengambil kesimpulan bahwa:

1. Energi Kinetik gas akan tetap sama setelah tumbukan.

2. Tumbukan antara gas bersifat elastis

3. Tidak ada gaya gravitasi antar molekul.

4. Ukuran molekul gas kecil.

- Persamaan Momentum

$$\Delta p = mv_x - mv_x'$$

Karena tumbukan elastis sempurna maka $v_x' = -v_x$

$$\Delta p = mv_x - m(-v_x) \rightarrow \Delta p = 2mv_x$$

Perubahan momentum adalah Impuls(I):

$$I = F\Delta t = \Delta p \rightarrow F\Delta t = 2mv_x \ldots (1)$$

$$\Delta t = \frac{2L}{v_x} \ldots (2)$$

Menggabungkan persamaan 1 dan 2 maka didapatkan:

$$F_x = \frac{mv_x^2}{L}$$

Tekanan yang gas berikan kepada dinding kubus adalah:

$$P = \frac{F_x}{A} \rightarrow P = \frac{1}{L^2}\sum_{i=1}^{N}\frac{mv_{x_i}^2}{L}$$

N adalah banyak atau jumlah molekul didalam suatu kubus ($N = n \cdot N_A$)

$$P = \frac{1}{L^2}\sum_{i=1}^{N}\frac{mv_{x_i}^2}{L} \rightarrow P = \frac{m}{L^3}\sum_{i=1}^{N} v_{x_i}^2 \rightarrow P = \frac{Nm}{L^3}(v_x^2)_{av}$$

Didalam kubus molekul bergerak secara 3 – Dimensi (x,y,z) sehingga kita harus mencari kecepatan rerata tiap partikel dengan cara sebagai berikut (diasumsikan bahwa kecepatan pada setiap sumbu sama)

$$\left(v_{x,y,z}^2\right)_{av} = \left((v_x^2)_{av} + \left(v_y^2\right)_{av} + (v_z^2)_{av}\right) = \frac{1}{N}\left(\sum_{i=1}^{N} v_{x_i}^2 + \sum_{i=1}^{N} v_{y_i}^2 + \sum_{i=1}^{N} v_{z_i}^2\right)$$

$$P_{x,y,z} = \frac{1}{3}\left(P_x + P_y + P_z\right) \rightarrow P_{x,y,z} = \frac{m}{3L^3}\left(\sum_{i=1}^{N} v_{x_i}^2 + \sum_{i=1}^{N} v_{y_i}^2 + \sum_{i=1}^{N} v_{z_i}^2\right)$$

$$P_{av} = \frac{1}{3} \cdot \frac{Nm}{V} \cdot \frac{1}{N}\left(\sum_{i=1}^{N} v_{x_i}^2 + \sum_{i=1}^{N} v_{y_i}^2 + \sum_{i=1}^{N} v_{z_i}^2\right)$$

$$P_{av} = \frac{Nm}{3V} v_{av}^2 \rightarrow PV = \frac{2}{3} N \cdot \frac{1}{2} m v_{av}^2$$

$$PV = \frac{2}{3} N(K.E_{av}(T)) \rightarrow \frac{3PV}{2N} = K.E_{av}(T)$$

Kita tahu dari persamaan gas ideal bahwa $PV = nRT$, maka:

$$\frac{3}{2} \cdot \frac{nRT}{N} = K.E_{av}(T) \rightarrow K.E(T) = \frac{3}{2} nRT$$

Kecepatan RMS(Root Mean Square) dapat didenotasikan sebagai berikut:

$$v_{RMS} = \sqrt{(v^2)_{av}}$$

Perlu diketahui bahwa $v_{av}^2 \neq (v^2)_{av}$

$$v_{av}^2 = \left(\frac{v_1 + v_2 + \cdots + v_n}{n}\right)^2, (v^2)_{av} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \cdots + v_n^2}{n}$$

Maka kecepatan RMS adalah:

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} v_i^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M_r}}$$

VIII. Termodinamika

Termodinamika berasal dari 2 suku kata yaitu “thermal” perubahan kondisi benda akibat energi yang dilepas atau diterima dan “dinamika” yang artinya bergerak, sehingga diambil kesimpulan bahwa termodinamika adalah gerak atau perubahan energi dalam suatu sistem.

Energi tersebut bisa dalam bentuk panas dan kerja, sehingga didapatkan persamaan berikut;

$$Q = \Delta U + W$$

Persamaan diatas adalah persamaan dari hukum termodinamik pertama yang berbunyi sebagai berikut:

“Energi tidak dapat diciptakan atau dihancurkan, energi hanya bisa diubah menjadi bentuk lain”

Perlu diketahui bahwa energi akan terkonservasi apabila sistem tersebut memiliki simetri, namun jika sistem tersebut tidak memiliki simetri maka energi tidak dapat terkonservasi sehingga hukum termodinamika 1 gagal. (Teorema Noether)

HUKUM TERMODINAMIKA 1.

Bentuk general dari hukum termodinamika 1 adalah:

$$Q = \Delta U + W$$

U adalah energi internal suatu sistem dank arena kita hanya membahas gas ideal maka U disini tidak menghitung adanya energi potensial dalam sistem nilai energi internal sistem bernilai 0 jika terjadi siklus tertutup/siklis. Berikut adalah rumus energi internal suatu sistem.

$$U = \frac{f}{2} NkT$$

f adalah derajat kebebasan.

- molekul monoatomik nilai f = 3
- molekul diatomik nilai f = 3, 5, atau 7
- molekul poliatomik nilai f = 5 – 7

Persamaan termodinamika 1 ($Q = \Delta U + W$) merupakan persamaan yang valid jika hanya terjadi perubahan fasa yang terbatas, apabila terjadi perubahan secara infinitesimal maka persamaan tersebut berubah menjadi:

$$dQ = dU + dW \rightarrow dQ = dU + pdV + Vdp$$

Kerja(W) didefinisikan sebagai berikut:

$$W = -\int F\,dx$$

Menggunakan substitusi $F = PA$.

$$W = -\int_{x_i}^{x'} PA\,dx$$

$$W = -P\int_{x_i}^{x'} A\,dx \rightarrow W = -PA[x]_{x_i}^{x'} = -P\Delta V$$

IX. Proses Termodinamika

Ada 4 tipe proses termodinamik yang pernah kita pelajari di SMA yaitu:

1. Proses Isotermal (Temperatur Konstan)

2. Proses Isobarik (Tekanan Konstan)

3. Proses Isovolume atau Isokhorik (Volume Konstant)

4. Proses Adiabatik (Sistem Terisolasi)

Sebelum kita membahas lebih dalam tentang proses termodinamika, kita harus mengerti dahulu kapasitansi panas dari suatu gas.

Kapasitansi panas adalah berapakah perubahan suhu yang terjadi apabila sistem tersebut diberikan energi kalor dengan kondisi tekanan yang tetap atau volume yang tetap. Pada volume yang tetap kita mendenotasikan kapasitansi panas sebagai C_V

dan pada tekanan yang tetap kita mendenotasikan kapasitansi panas sebagai C_P. Menggunakan hukum termodinamika pertama kita bisa menurukan relasi antara C_P dengan C_V.

$$dQ = dU + dW$$

$$nC_P dT = nC_V dT + PdV$$

Menggunakan persamaan gas ideal maka:

$$PdV = nRdT \to nC_P dT = nC_V dT + nRdT$$

Membagi semua ruas dengan ndT.

$$C_P = C_V + R$$

Persamaan diatas disebut sebagai persamaan Mayer. Rasio dari kedua kapasitansi panas ini menghasilkan suatu konstanta yang dilambangkan gamma (γ) atau kadang disebut sebagai konstanta Laplace.

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} \to \gamma = 1 + \frac{R}{C_V}$$

Gamma juga bisa didefinisikan dalam bentuk derajat kebebasan atau f

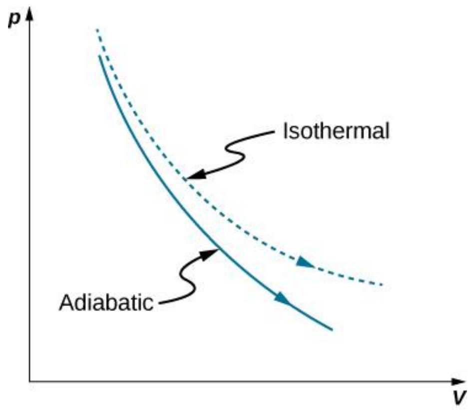
$$\gamma = \frac{f + 2}{f}$$

Derajat kebebasan atau f adalah jumlah gerakan yang dimiliki oleh suatu molekul khusus. Untuk sebuah molekul monoatomik nilai f nya adalah 3, untuk diatomic 3,5, dan 7 semakin besar suhu maka semakin besar derajat kebebasannya dan untuk poliatomik nilai f nya bervariasi dari 5 sampai 7.

Dalam materi kali ini kita hanya akan membahas kondisi khusus adiabatik. Adiabatik adalah kondisi dimana panas (Q) terisolasi dari sistem sehingga perubahan energi internal dan kerja yang dihasilkan oleh sistem bernilai sama.

$$\Delta U = -W$$

Berikut adalah gambar kurva relasi P – V kondisi adiabatis:



Perbedaan dari kondisi adiabatik dengan kondisi termodinamka yang lainnya adalah di persamaan gasnya, persamaan gas adiabatik melibatkan suatu faktor yang kita sudah bahas di atas yaitu faktor gamma. Dibawah ini adalah persamaan gas di kondisi adiabatik.

$$P_1 V_1^{\gamma} = P_2 V_2^{\gamma}$$

Kita juga bisa merubah format persamaan diatas menjadi:

$$P_1 V_1 \cdot V_1^{\gamma-1} = P_2 V_2 \cdot V_2^{\gamma-1}$$

$$nRT_1 V_1^{\gamma-1} = nRT_2 V_2^{\gamma-1}$$

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$$

Untuk mencari kerja di sistem adiabatik maka kita perlu mencari luas dibawah kurva P – V sehingga digunakan metode kalkulus yaitu integral.

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P\, dV$$

Dikarenakan nilai $P_1 V_1^{\gamma} = C$ maka:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} C V^{-\gamma}\, dV \rightarrow W = C \int_{V_1}^{V_2} V^{-\gamma}\, dV$$

$$W = \frac{C}{1-\gamma}\left(V_2^{1-\gamma} - V_1^{1-\gamma}\right) \rightarrow W \frac{1}{1-\gamma}(P_2 V_2 - P_1 V_1)$$

X. Siklus Termodinamika (Otto)

Dalam bahasan siklus termodinamika kita hanya membahas siklus Otto. Didalam bahasan 2 siklus ini mesin/pengubah panas dianggap ideal. Mesin ideal adalah mesin yang mengubah energi dengan efisiensi 100%, berikut adalah rumus efisiensi untuk mesin secara global.

$$e = \frac{W}{Q_H} \rightarrow e = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H}$$

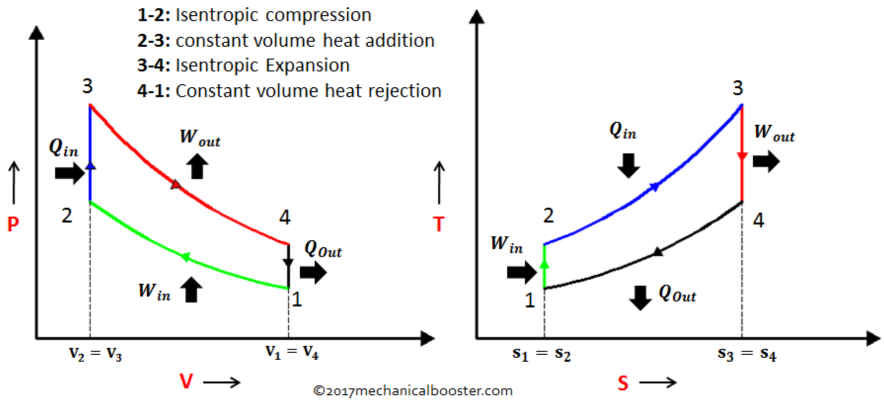
Berbeda dengan mesin apabila kita membicarakan kulkas maka kita menggunakan koefisien performansi dan berikut adalah rumusnya:

$$K = \frac{Q_C}{W} \rightarrow K = \frac{Q_C}{Q_H - Q_C}$$

Apa itu Q_C dan Q_H? Q_C adalah energi yang dilepaskan dari reservoir dingin sedangkan Q_H adalah energi yang dilepaskan oleh reservoir panas.

1. Siklus Otto

Diagram Siklus Otto:



P-V and T-S Diagram of Otto Cycle

Di dalam siklus Otto ada 2 tipe proses termodinamika yaitu:

1. Proses Isentropic (Adiabatik)
2. Proses Isokhorik

Berikut adalah derivasi rumus untuk mencari efisiensi siklus Otto:

1. Proses Adiabatik

Adiabatik Kompresi (1 – 2)

$$T_2 V_2^{\gamma-1} = T_1 V_1^{\gamma-1}$$

Adiabatik Ekspansi (3 – 4)

$$T_4 V_4^{\gamma-1} = T_3 V_3^{\gamma-1}$$

$V_4 = V_1$ dan $V_3 = V_2$

Efisiensi:

$$e = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} \rightarrow e = 1 - \frac{Q_C}{Q_H}$$

$$e = 1 - \frac{nRT_1 - nRT_4}{nRT_3 - nRT_2} \rightarrow e = 1 - \frac{T_1 - T_4}{T_3 - T_2}$$

Menggunakan persamaan adiabatik diatas kita dapat mengambil konklusi bahwa:

$$e = 1 - \left(\frac{V_f}{V_i}\right)^{1-\gamma}$$

Dimana V_f adalah volume akhir dan V_i adalah volume awal.