ثرموداينمك الهواء   Thermodynamic of air

يعتبر بخار الماء من اهم مكونات الهواء ويقوم بدوره الرئيسي في عملية نقل الطاقة ، لذا ستتم دراسة خواص الهواء الجاف والرطب .

ثرموداينمك الهواء الجاف :- Thermodynamic of dry air

تخضع الغازات المكونة للهواء الجاف لقانون الغازات المثالي وحسب العلاقة التالية :

$$PV = nRT \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

حيث P تمثل ضغط الغاز بوحدات N/m^2

V حجم الغاز بوحدة m^3

n عدد المولات

R ثابت الغازات للمول الواحد $R = 8.313\ J/\mathrm{gm\,.\,mole\,.\,K}$

T درجة الحرارة

وبما إن $n = \frac{m}{M}$

حيث M الوزن الجزيئي

$$PV = \frac{m}{M}\,RT$$

$$\therefore P = \frac{m}{V} \cdot \frac{RT}{M}$$

$$\therefore P = \rho\,\frac{RT}{M} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

ρ كثافة الغاز

المعادلة رقم (2) تمثل ضغط الغاز ، ولكون الهواء الجوي يتكون من خليط من الغازات ، لذا فان المعادلة رقم (2) تكتب بالصيغة التالية :

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \cdots$$

ونعوض عن قيمة الضغط بما يساويها

$$\frac{\rho \mathrm{RT}}{\mathrm{M}} = f_1\frac{\rho RT}{M_1} + f_2\frac{\rho RT}{M_2} + f_3\frac{\rho RT}{M_3} + \cdots$$

حيث f تمثل النسبة المئوية الوزنية للغاز في وحدة الحجم من الهواء .

المعادلة الاخيرة يمكن إن تكتب بالصيغة التالية :-

$$\frac{\rho \mathrm{RT}}{\mathrm{M}} = \left(\frac{f_1}{M_1} + \frac{f_2}{M_2} + \frac{f_3}{M_3} + \cdots\right) \rho RT$$

بقسمة طرفي المعادلة على ρRT نحصل على :

$$\frac{1}{\mathrm{M}} = \frac{f_1}{M_1} + \frac{f_2}{M_2} + \frac{f_3}{M_3} + \cdots$$

وهذه المعادلة يمكن إن تكتب بالشكل التالي :

$$\frac{1}{\mathrm{M}} = \sum_{i=1}^{i} \frac{f_i}{M_i} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

حيث i يمثل عدد الغازات الرئيسية المكونة للهواء ، فيكون لدينا :-

$$\frac{1}{\mathrm{M}} = \underset{\text{نتروجين}}{\frac{0.78}{28}} + \underset{\text{اوكسجين}}{\frac{0.21}{32}} + \underset{\text{اركون}}{\frac{0.012}{40}} + \underset{CO_2}{\frac{0.005}{44}}$$

$$\mathrm{M} = 28.97$$

من المعادلة (*2*) نحصل على المعادلة (*4*)

$$P = \rho \frac{RT}{M} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

$$P = \rho r T \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

حيث $r = \frac{R}{M}$ ثابت الغاز للهواء للكيلوغرام

المعادلة (*4*) يمكن كتابتها بالشكل التالي :-

$$PV = rT \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

حيث $V = \frac{1}{\rho}$ حجم وحدة الكتل في الهواء الجوي ، *m=1* (الكتلة وحدة واحدة)

تغير الضغط الجوي مع الارتفاع :-

يتغير الضغط الجوي لأي مائع بمقدار dP مع الارتفاع

$$dP = -\rho g dz \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots . (6)$$

حيث إن الاشارة السالبة تعني إن الضغط يقل بالارتفاع . من المعادلة (4)

$$P = \rho r T \implies \rho = \frac{P}{\mathrm{rT}}$$

نعوضها في معادلة (6)

$$\therefore dP = -\frac{P}{rT} g dz$$

$$\frac{dP}{P} = -\frac{g}{rT} dz \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7)$$

وبتكامل المعادلة (7)على فرض إن درجة الحرارة T ثابتة نحصل على :-

$$\int \frac{dP}{P} = -\frac{g}{rT} \int \mathrm{dz}$$

$$\therefore \ln P = -\frac{g}{rT} Z + constant \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots . (*)$$

لإيجاد قيمة الثابت نطبق الشرط الحدودي التالي :-

$$at\ Z = 0 \qquad , \qquad P = P_\circ$$

حيث يمثل $P_\circ$ اعضم ارتفاع للضغط الجوي عند ارتفاع $Z = 0$

$$\therefore \ln P_\circ = 0 + constant$$

$$\therefore constant = \ln P_\circ$$

بتعويض قيمة الثابت في المعادلة $(*)$ نحصل على :

$$\ln P = -\frac{g}{rT} Z + \ln P_\circ$$

$$\therefore \ln P - \ln P_\circ = -\frac{g}{rT} Z$$

$$\ln \frac{P}{P_\circ} = -\frac{g}{rT} Z$$

$$\frac{P}{P_\circ} = e^{-\frac{g}{rT}Z}$$

$$\therefore P = P_\circ\, e^{-\frac{g}{rT}Z} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots .. (8)$$

حيث $P_\circ$ تمثل مقدار الضغط الجوي عند الارتفاع $Z = 0$

P تمثل مقدار الضغط الجوي عند اي ارتفاع

إن المعادلة (8) يمكن الحصول عليها على اساس إن T ثابتة ، لكن من المعروف إن T تنخفض مع الارتفاع داخل الغلاف الجوي بمقدار ($6\,℃/km$) ويكون التغير حسب المعادلة التالية :-

$$T = T_\circ - \alpha Z$$

حيث α معامل الانحدار الحراري الشاقولي

في هذه الحالة وعند تكامل المعادلة (7) نحصل على :

$$\frac{dP}{\mathrm{P}} = -\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{r}} \frac{\mathrm{dz}}{(\mathrm{T}_\circ - \alpha \mathrm{Z})}$$

نضرب الطرف الايمن من المعادلة الاخيرة بـ $\frac{\alpha}{\alpha}$ لتوفير مشتقة المقام ، نحصل على :

$$\frac{dP}{\mathrm{P}} = \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{r}\alpha} \frac{-\alpha \mathrm{dz}}{(\mathrm{T}_\circ - \alpha \mathrm{Z})}$$

نكامل المعادلة اعلاه

$$\int \frac{dP}{\mathrm{P}} = \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{r}\alpha} \int \frac{-\alpha \mathrm{dz}}{(\mathrm{T}_\circ - \alpha \mathrm{Z})}$$

$$\ln P = \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{r}\alpha} \cdot \ln(\mathrm{T}_\circ - \alpha \mathrm{Z}) + constant \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (**)$$

لإيجاد قيمة الثابت في المعادلة الاخيرة نطبق الشرط الحدودي التالي :-

$$at\ Z = 0 \qquad , \qquad P = P_\circ$$

$$\ln P_\circ = \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{r}\alpha} \cdot \ln \mathrm{T}_\circ + constant$$

$$constant = \ln P_\circ - \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{r}\alpha} \cdot \ln \mathrm{T}_\circ$$

$$constant = \ln P_\circ - \ln T_\circ^{\frac{g}{r\alpha}}$$

نعوض عن قيمة الثابت في المعادلة (**)

$$\ln P = \frac{g}{r\alpha} \cdot \ln(T_\circ - \alpha Z) + \ln P_\circ - \ln T_\circ^{\frac{g}{r\alpha}}$$

$$\ln P - \ln P_\circ = \ln\ (T_\circ - \alpha Z)^{\frac{g}{r\alpha}} - \ln T_\circ^{\frac{g}{r\alpha}}$$

$$\ln \frac{P}{P_\circ} = \ln\left(\frac{T_\circ - \alpha Z}{T_\circ}\right)^{\frac{g}{r\alpha}}$$

$$\frac{P}{P_\circ} = \left(\frac{T_\circ - \alpha Z}{T_\circ}\right)^{\frac{g}{r\alpha}}$$

$$P = P_\circ\left(\frac{T_\circ - \alpha Z}{T_\circ}\right)^{\frac{g}{r\alpha}} \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots (9)$$

القانون الأول للثرموداينمك :-

يعبر القانون الاول للثرموداينمك عن حقيقة تجريبية وهي (المادة لا تفنى ولا تستحدث) وان الصورة الجبرية للقانون الاول هي :

$$dQ = du + dw \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots .. (10)$$

المعنى الفيزيائي للقانون :- (اذا اضيفت كمية من الحرارة لأي غاز بمقدار dQ فان قسما منها يعمل على زيادة الطاقة الداخلية بمقدار du والجزء المتبقي يؤدي إلى بذل شغل بواسطة الغاز مقداره dw)

مناقشة حدود المعادلة (10) :

اذا كان لدينا غاز بحجم V ومساحة سطحه A وتمدد هذا الغاز حيث ازيح سطحه نحو الخارج مسافة مقدارها dn فان الزيادة في حجم الغاز تعطى بالمعادلة :

$$dV = A\, dn$$

وبما إن

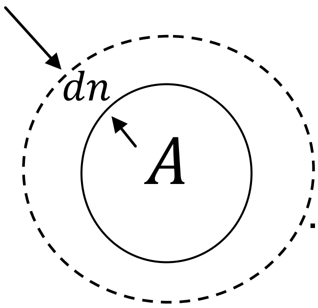
$$P = F/A$$

حيث F هي القوة المبذولة بواسطة الغاز لذا فان

$$A = F/P$$

$$\therefore dV = \frac{F}{P} dn$$

$$PdV = F\, dn$$



حيث dn عنصر الازاحة .

$\because$ الشغل = القوة × عنصرالازاحة

$$\because F\, dn = dw$$

$$\therefore P\, dV = dw$$

بالنسبة للحد du يعني إن اي زيادة في الطاقة الداخلية للغاز تؤدي إلى زيادة درجة حرارته وان التغير في درجة الحرارة يتناسب مع كمية الحرارة وفق المعادلة التالية :-

$$dT = \frac{dQ}{C}$$

حيث c هي السعة الحرارية وهي كمية الحرارة اللازمة للنظام لكي تتغير درجة حرارته بمقدار dT وتسمى ايضا السعة الحرارية النوعية للحرارة وتقاس بوحدات $J/Kg.K$ وهي ليست ثابته للغاز الواحد اي انها متغيرة وهذا التغير يعتمد على ما اذا كانت اضافة الحرارة يصاحبها انجاز شغل او لا

أ) في حالة عدم بذل شغل $dw = 0$ وهذا يعني ثبات الحجم V والسعة الحرارية تكتب بالصورة التالية :

$$C_v = \left(\frac{dQ}{dT}\right)_v$$

ولكون الشغل يساوي صفر فان كل الطاقة الحرارية dQ تذهب إلى طاقة داخلية

$$dQ = du + dw \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots .. (10)$$

$$dw = 0$$

$$\therefore\ dQ = du$$

$$\therefore du = C_v\, dT$$

ب) في حالة اضافة الحرارة للغاز مع بقاء ضغطه ثابت وهنا يعبر عن الحرارة النوعية بالمعادلة

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

$$dQ = C_P\, dT$$

في عملية ثبوت الضغط فان قسما من الطاقة الحرارية يستخدم لانجاز شغل من قبل الغاز لذا فان

$$C_P > C_v$$

بينما في حالة ثبات الحجم فان كل الطاقة الحرارية المضافة تستخدم في زيادة درجة الحرارة وبالتالي تكون C_v صغيرة .

إن قيم C_v و C_P للهواء الجاف هي :

$$C_P = 1004\, J/Kg.K \qquad , \qquad C_v = 717\ J/Kg.K$$

باستخدام الحقائق السابقة فان المعادلة (10) يمكن ان تكتب بالصورة التالية

$$C_P\, dT = C_v\, dT + P\, dV \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots .. (10-a)$$

للتعبير عن الحد الثاني من الطرف الايمن بدلالة درجة الحرارة

- معادلة الحالة للغاز المثالي في الحالة الابتدائية

$$PV = rT$$

- معادلة الحالة للغاز المثالي في الحالة النهائية $\quad P(V + dV) = r(T + dT)$

بطرح المعادلتين اعلاه ينتج :

$$P\, dV = r\, dT$$

وبالتعويض في المعادلة $(10-a)$ ينتج

$$C_P\, dT = C_v\, dT + r\, dT \ \} \ \div\ dT$$

$$C_P = C_v + r \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots .. (11)$$

في حالة صعود الهواء إلى طبقات الجو العليا بصورة اديباتيكية (عدم فقدان او اكتساب حرارة) هذا يؤدي إلى إن $dQ = 0$

ملاحظة :-

إن صعود الهواء اديباتيكيا يعني إن الهواء لا يفقد ولا يكتسب حرارة من الجو ولكن نلاحظ انخفاض درجة حرارة الهواء الجاف عند صعوده والسبب في ذلك يعود إلى تمدد هذا الغاز بسبب انخفاض الضغط في طبقات الجو العليا وبالتالي نقصان حرارته

$\therefore dQ = C_v dT + PdV$

من معادلة الحالة الابتدائية :

$$PV = rT$$

$$P\,dV + V\,dP = r\,dT$$

$$\therefore\ P\,dV = r\,dT - V\,dP$$

$$0 = dQ = C_v dT + r\,dT - V\,dP$$

$$C_v dT + r dT = V\,dP$$

$$(C_v + r)\,dT = V\,dP$$

بالتعويض من معادله (*11*) عن قيمة C_P

$$C_P\,dT = V\,dP$$

من معادلة الحالة

$$PV = rT$$

$$\therefore V = \frac{r}{P} T$$

$$C_P\,dT = \frac{r}{P} T\,dP$$

$$C_P\,dT = rT\frac{dP}{P} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (12)$$

Or $\frac{C_P\,dT}{r\,T} = \frac{dP}{P} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots .\, . \quad (13)$

نكامل المعادلة (13)

$$\frac{C_P}{r}\int_{T_\circ}^{T}\frac{dT}{T} = \int_{P_\circ}^{P}\frac{dP}{P}$$

حيث $P_\circ$ الضغط في بداية الغلاف الجوي

P الضغط في اي موقع داخل الغلاف الجوي

$$\frac{C_P}{r}\ln T = \ln P$$

$$\frac{C_P}{r}\ \ln\frac{T}{T_\circ} = \ln\frac{P}{P_\circ}$$

$$\ln\left(\frac{T}{T_\circ}\right)^{\frac{C_P}{r}} = \ln\frac{P}{P_\circ}$$

$$\left(\frac{T}{T_\circ}\right)^{\frac{C_P}{r}} = \frac{P}{P_\circ}$$

Or

$$\frac{T}{T_\circ} = \left(\frac{P}{P_\circ}\right)^{\frac{r}{C_P}}$$

$$\frac{T}{T_\circ} = \left(\frac{P}{P_\circ}\right)^{k} \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (14)$$

حيث $k = \frac{r}{C_P}$

المعادلة (14) تسمى معادلة بوازون للعمليات الاديباتيكية

لحد الان تم معرفة ثلاثة من المتغيرات الثرموديناميكية وهي الضغط ودرجة الحرارة والحجم النوعي ، اما المتغير الرابع في ثرموداينمك الغلاف الجوي فهو درجة الحرارة الاجهادية او درجة الحرارة الجهدية وتعرف على انها درجة الحرارة لكمية من الهواء اذا بدأت بدرجة حرارة T وضغط P ثم تغير ضغطها بالزيادة او النقصان وبعملية اديباتيكية إلى ضغط مقداره $1000\ m\ par$
وبذلك تكون معادلة بوازون بالصورة التالية :

$$\frac{T}{\theta} = \left(\frac{P}{1000}\right)^{k}$$

$$\therefore\ \theta = T\left(\frac{1000}{P}\right)^{k} \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (15)$$

حيث θ هي درجة الحرارة الجهدية ، وتكون قيمة θ ثابتة في العمليات الاديباتيكية

الانتروبي Entropy :-

هو مقياس لعدم الانتظام ، فان جزيئات اي نظام في حالة حركة عشوائية لذا فان تزويد هذا النظام بكمية من الحرارة قدرها dQ عند درجة حرارة T ستزيد من الحركة العشوائية لهذه الجزيئات ويقال إن النظام اكتسب انتروبي موجب قدره $d\phi$ حيث

$$d\phi = \frac{dQ}{T}$$

للربط بين Q و ϕ

$$\because \; dQ = du + dw \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10)$$

المعادلة اعلاه يمكن إن تكتب بالشكل التالي

$$dQ = C_v \, dT + P \, dV$$

$$= C_v \, dT + r \, dT - V \, dP$$

$$= (C_v + r) dT - V \, dP$$

$$dQ = C_P \, dT - V \, dP$$

$$\because \; d\phi = \frac{dQ}{T}$$

$$d\phi = \frac{1}{T} [C_P \, dT - V \, dP]$$

$$d\phi = C_P \frac{dT}{T} - \frac{V}{T} dP$$

$$= C_P \frac{dT}{T} - \frac{rT}{T} \frac{dP}{P}$$

$$= C_P \frac{dT}{T} - r \frac{dP}{P}$$

$$\because \; k = \frac{r}{C_P} \implies r = kC_P$$

$$\therefore d\phi = C_P \frac{dT}{T} - kC_P \frac{dP}{P}$$

$$d\phi = C_P \left(\frac{dT}{T} - k \frac{dP}{P} \right) \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots . (*)$$

إن الكمية $\left(\frac{dT}{T} - k\frac{dP}{P}\right)$ من المعادلة اعلاه يمكن ربطها بدرجة الحرارة الاجهادية θ وكما يلي

$$\theta = T\left(\frac{1000}{P}\right)^k$$

$$\frac{\theta}{T} = \left(\frac{1000}{P}\right)^k$$

باخذ لوغارتم الطرفين

$$\log\frac{\theta}{\mathrm{T}} = \mathrm{k}\log\left(\frac{1000}{P}\right)$$

$$\log\theta - \log\mathrm{T} = \mathrm{k}\log 1000 - \mathrm{k}\log\mathrm{P}$$

بتفاضل المعادلة اعلاه

$$\frac{d\theta}{\theta} - \frac{dT}{T} = 0 - k\frac{dP}{P}$$

$$\frac{d\theta}{\theta} = \frac{dT}{T} - k\frac{dP}{P}$$

وبتعويض المعادلة اعلاه بالمعادلة $(*)$

$$d\phi = C_P\frac{d\theta}{\theta}$$

لايجاد قيمة ϕ نكامل المعادلة اعلاه

$$\phi = C_P \ln\theta + constant \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots . (16)$$