કોષ્ટક 11.3 વાતાવરણના દબાણે અને ઓરડાના તાપમાને કેટલાક પદાર્થોની વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા

પદાર્થો	વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)	પદાર્થો	વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)
ઍલ્યુમિનિયમ	900.0	બરફ	2060
કાર્બન	506.5	કાચ	840
તાંબું	386.4	લોખંડ	450
સીસું	127.7	કેરોસીન	2118
ચાંદી	236.1	ખાદ્યતેલ	1965
ટંગસ્ટન	134.4	પારો	140
પાણી	4186.0		

અને ગરમ પાણીની બૅગમાં તાપક તરીકે પાણીનો ઉપયોગ થાય છે. પોતાની ઊંચી વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતાને કારણે ઉનાળામાં જમીન કરતાં પાણી ખૂબ જ ધીમી ગતિથી ગરમ થાય છે. જેને કારણે જ સમુદ્ર પરથી આવતા પવનો શીતળ હોય છે. હવે તમે કહી શકો છો કે, શા માટે રણ વિસ્તારમાં દિવસ દરમિયાન જમીન ઝડપથી ગરમ અને રાત્રે ઝડપથી ઠંડી પડે છે.

કોષ્ટક 11.4 કેટલાક વાયુઓ માટે મોલર વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા

વાયુ	C_p ($J\ mol^{-1}\ K^{-1}$)	C_v ($J\ mol^{-1}\ K^{-1}$)
He	20.8	12.5
H_2	28.8	20.4
N_2	29.1	20.8
O_2	29.4	21.1
CO_2	37.0	28.5

11.7 કૅલોરિમેટ્રી (CALORIMETRY)

તંત્ર અને તેના પરિસર વચ્ચે ઉષ્માનું આદાન-પ્રદાન અથવા વિનિમય થતો ન હોય તો તેવા તંત્રને અલગ કરેલું તંત્ર કહે છે. જ્યારે અલગ કરેલા તંત્રના જુદા જુદા ભાગો જુદાં જુદાં તાપમાને હોય ત્યારે ઊંચા તાપમાનવાળા ભાગમાંથી ઉષ્માના જથ્થાનું નીચા તાપમાનવાળા ભાગમાં વહન થાય છે. ઊંચા તાપમાને રહેલ ભાગે ગુમાવેલ ઉષ્મા, નીચા તાપમાને રહેલા ભાગે મેળવેલ ઉષ્મા બરાબર હોય છે.

કૅલોરિમેટ્રી એટલે ઉષ્માનું માપન. જો પરિસર વડે ઉષ્મા ગુમાવાતી ન હોય, તો ઊંચા તાપમાને રહેલી વસ્તુને બીજી નીચા તાપમાને રહેલી વસ્તુના સંપર્કમાં લાવવામાં આવે ત્યારે ગરમ વસ્તુએ ગુમાવેલ ઉષ્મા ઠંડી વસ્તુએ મેળવેલ ઉષ્મા બરાબર થાય છે. ઉષ્માનું માપન કરી શકાય એવી રચનાને **કૅલોરિમીટર** કહે છે. તે એક જ ધાતુ જેવી કે, તાંબું અથવા ઍલ્યુમિનિયમમાંથી બનાવેલ ધાતુપાત્ર અને તે જ ધાતુનું ભેળક ધરાવે છે. આ પાત્રને ગ્લાસવુલ જેવાં ઉષ્મારોધક દ્રવ્યો ધરાવતા લાકડાના આવરણમાં મૂકવામાં આવે છે. બહારનું આવરણ ઉષ્મા કવચ તરીકે વર્તે છે અને અંદરના પાત્રમાંથી થતો ઉષ્માવ્યય ઘટાડે છે. બાહ્ય આવરણમાં એક છિદ્ર (કાણું) હોય છે, જેનાં દ્વારા કૅલોરીમીટરમાં પારાવાળું થરમૉમીટર દાખલ કરવામાં આવે છે. 'મેળવેલ ઉષ્મા અને ગુમાવેલ ઉષ્મા સમાન હોય છે.' આ સિદ્ધાંતનો ઉપયોગ કરીને આપેલ ઘન પદાર્થની વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા નક્કી કરવાની રીત નીચે આપેલ ઉદાહરણ પુરું પાડે છે :

▶ *ઉદાહરણ 11.3* 0.047 kg દળ ધરાવતાં ઍલ્યુમિનિયમના એક ગોળાને પૂરતા સમય માટે ઊકળતું પાણી ધરાવતા પાત્રમાં મુકેલ છે. પરિણામે આ ગોળાનું તાપમાન 100 °C થાય છે. હવે આ ગોળાને તરત જ 20 °C તાપમાન ધરાવતા 0.25 kg પાણીભરેલા, 0.14 kg દળવાળા તાંબાના કૅલોરીમીટરમાં સ્થાનાંતરીત કરવામાં આવે છે. પાણીનું તાપમાન વધીને 23 °C સ્થિર તાપમાન થાય છે, તો ઍલ્યુમિનિયમની વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતાની ગણતરી કરો.

ઉકેલ આ ઉદાહરણના ઉકેલ માટે આપણે એ હકીકતનો ઉપયોગ કરીશું કે સ્થાયી અવસ્થામાં ઍલ્યુમિનિયમના ગોળાએ આપેલ ઉષ્મા, પાણી અને કૅલોરીમીટર વડે શોષાતી ઉષ્મા જેટલી હોય છે.

ઍલ્યુમિનિયમના ગોળાનું દળ (m_1) = 0.047 kg

ઍલ્યુમિનિયમના ગોળાનું પ્રારંભિક તાપમાન = 100 °C

અંતિમ તાપમાન = 23 °C

તાપમાનમાં થતો ફેરફાર (ΔT) = (100 °C − 23 °C) = 77 °C

ધારો કે ઍલ્યુમિનિયમના ગોળાની વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા s_{Al} છે.

ઍલ્યુમિનિયમના ગોળાએ ગુમાવેલ ઉષ્માનો જથ્થો

$= m_1 s_{Al}\ \Delta T = 0.047\ \text{kg} \times s_{Al} \times 77\ ^\circ\text{C}$

પાણીનું દળ $(m_2) = 0.25$ kg

કૅલોરીમીટરનું દળ $(m_3) = 0.14$ kg

પાણી અને કૅલોરીમીટરનું પ્રારંભિક તાપમાન $= 20\ ^\circ\text{C}$

મિશ્રણનું અંતિમ તાપમાન $= 23\ ^\circ\text{C}$

તાપમાનમાં થતો ફેરફાર $(\Delta T_2) = 23\ ^\circ\text{C} - 20\ ^\circ\text{C} = 3\ ^\circ\text{C}$

પાણીની વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા $(s_w) = 4.18 \times 10^3$ J kg^{-1} K^{-1}

તાંબાના કૅલોરીમીટરની વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા

$= s_{cu} = 0.386 \times 10^3$ J kg^{-1} K^{-1}

પાણી અને કૅલોરીમીટરે મેળવેલ ઉષ્માનો જથ્થો

$= m_2\, s_w\, \Delta T_2 + m_3\, s_{cu}\, \Delta T_2$

$= [m_2\, s_w + m_3\, s_{cu}]\ (\Delta T_2)$

$= [0.25\ \text{kg} \times 4.18 \times 10^3\ \text{J kg}^{-1}\ \text{K}^{-1} + 0.14\ \text{kg} \times 0.386 \times 10^3\ \text{J kg}^{-1}\ \text{K}^{-1}]\ (23\ ^\circ\text{C} - 20\ ^\circ\text{C})$

સ્થાયી અવસ્થા માટે ઍલ્યુમિનિયમનાં ગોળાએ ગુમાવેલ ઉષ્મા = પાણીએ મેળવેલી ઉષ્મા + કૅલોરીમીટર દ્વારા મેળવેલી ઉષ્મા

માટે, $0.047\ \text{kg} \times s_{Al} \times 77\ ^\circ\text{C}.$

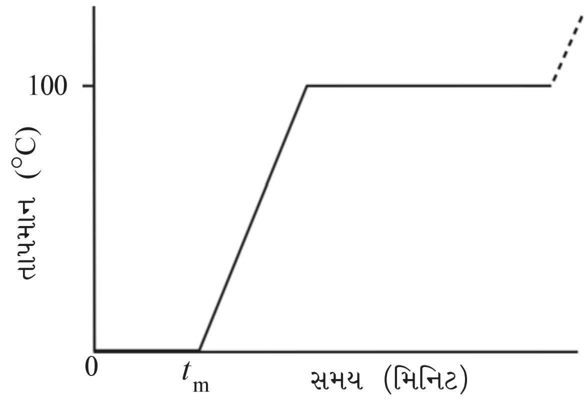
$= (0.25\ \text{kg} \times 4.18 \times 10^3\ \text{J kg}^{-1}\ \text{K}^{-1} + 0.14\ \text{kg} \times 0.386 \times 10^3\ \text{J kg}^{-1}\ \text{K}^{-1})(3\ ^\circ\text{C})$

$s_{Al} = 0.911\ \text{KJ Kg}^{-1}\ \text{K}^{-1}$ ◀

11.8 અવસ્થાનો ફેરફાર (CHANGE OF STATE)

સામાન્ય રીતે દ્રવ્ય ત્રણ અવસ્થાઓ ધરાવે છે : ઘન, પ્રવાહી અને વાયુ. આ અવસ્થાઓ પૈકીની એક અવસ્થામાંથી બીજી અવસ્થામાં રૂપાંતર થાય તેને અવસ્થા-ફેરફાર કહે છે. બે સામાન્ય અવસ્થા-ફેરફાર ઘનમાંથી પ્રવાહી અને પ્રવાહીમાંથી વાયુ (તેનાથી ઊલટું પણ) છે. જ્યારે પદાર્થ અને તેના પરિસર વચ્ચે ઉષ્માનો વિનિમય થાય ત્યારે આ ફેરફાર થાય છે. ગરમ કરવાથી કે ઠારણથી થતી અવસ્થા-ફેરફારના અભ્યાસ માટે નીચે આપેલી પ્રવૃત્તિ કરીએ :

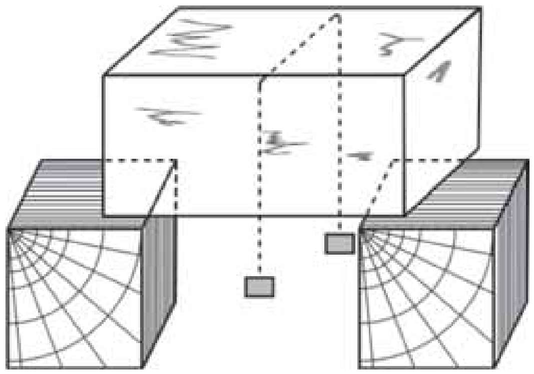
બરફના કેટલાક ટુકડા બીકરમાં લો. બરફનું તાપમાન (0 °C) નોંધો. અચળ ઉષ્મા પ્રાપ્તિસ્થાન વડે તેને ધીમે ધીમે ગરમ કરો. દરેક મિનિટે તાપમાન નોંધો. પાણી તથા બરફનાં મિશ્રણને સતત હલાવતાં રહો. તાપમાન અને સમય વચ્ચેનો આલેખ દોરો (આકૃતિ 11.9) મુજબ. તમે જોઈ શકો છો કે જ્યાં સુધી બીકરમાં બરફ હોય ત્યાં સુધી તાપમાનમાં ફેરફાર થશે નહિ. આ પ્રક્રિયામાં, તંત્રને સતત ઉષ્મા આપવા છતાં તેનાં તાપમાનમાં કોઈ જ ફેરફાર થતો નથી. અહીં, આપેલ ઉષ્મા ઘન (બરફ) અવસ્થામાંથી પ્રવાહી (પાણી) અવસ્થાનાં રૂપાંતરણમાં વપરાય છે.



આકૃતિ 11.9 બરફને ગરમ કરતાં તેની સ્થિતિમાં થતાં ફેરફાર દર્શાવતો તાપમાન વિરુદ્ધ સમયનો આલેખ (સ્કેલમાપ વગર)

ઘન અવસ્થામાંથી પ્રવાહી અવસ્થામાં થતાં રૂપાંતરને **ગલન** (**melting**) અને પ્રવાહી અવસ્થામાંથી ઘન અવસ્થામાં થતાં રૂપાંતરને **ઠારણ** (**fusion**) કહે છે. એવું અવલોકિત થયેલ છે કે સમગ્ર ઘન પદાર્થનો જથ્થો પીગળી ન જાય ત્યાં સુધી તાપમાન અચળ રહે છે. પદાર્થની **ઘનમાંથી પ્રવાહી અવસ્થાનાં રૂપાંતર દરમિયાન ઘન અને પ્રવાહી બંને અવસ્થાઓ ઉષ્મીય સંતુલનમાં સહઅસ્તિત્વ ધરાવે છે.** જે તાપમાને પદાર્થની ઘન અને પ્રવાહી અવસ્થાઓ એકબીજા સાથે **ઉષ્મીય સંતુલનમાં** હોય છે તે તાપમાનને પદાર્થનું **ગલનબિંદુ** (**melting point**) કહે છે. તે પદાર્થની એક લાક્ષણિકતા છે. તે દબાણ ઉપર પણ આધારિત છે. સામાન્ય વાતાવરણનાં દબાણે પદાર્થનાં ગલનબિંદુને **પ્રસામાન્ય ગલનબિંદુ** (**normal melting point**) કહે છે. હવે આપણે બરફના ગલનની પ્રક્રિયા સમજવા નીચેની પ્રવૃત્તિ કરીએ :

બરફનું એક ચોસલું લો. ધાતુનો એક તાર લો અને 5 kg દળના બે બ્લૉક તારના છેડાઓ પર બાંધો. આકૃતિ 11.10માં દર્શાવ્યા મુજબ ચોસલા પર તાર મૂકો. તમે જોઈ શકશો કે તાર બરફના ચોસલામાંથી પસાર થાય છે. વાસ્તવિકતા છે કે તારની નીચે રહેલા બરફમાં નીચા તાપમાને દબાણમાં વધારો થતાં બરફ પીગળે છે. જ્યારે તાર પસાર થઈ જાય છે ત્યારે તારની ઉપરનું પાણી પુનઃઠારણ પામે છે. આમ, તાર પસાર થવાથી બરફનું ચોસલું વિભાજિત થતું નથી. ઠારણની આ ઘટનાને **પુનઃઠારણ** (**regelation**) કહે છે. બરફ (snow) પર સ્કેટની નીચે પાણી બનવાથી જ સ્કેટિંગ શક્ય બને છે. દબાણના વધવાને કારણે પાણી બને છે અને આ પાણી લુબ્રિકેટ (ઊંજણ) તરીકે વર્તે છે.



આકૃતિ 11.10

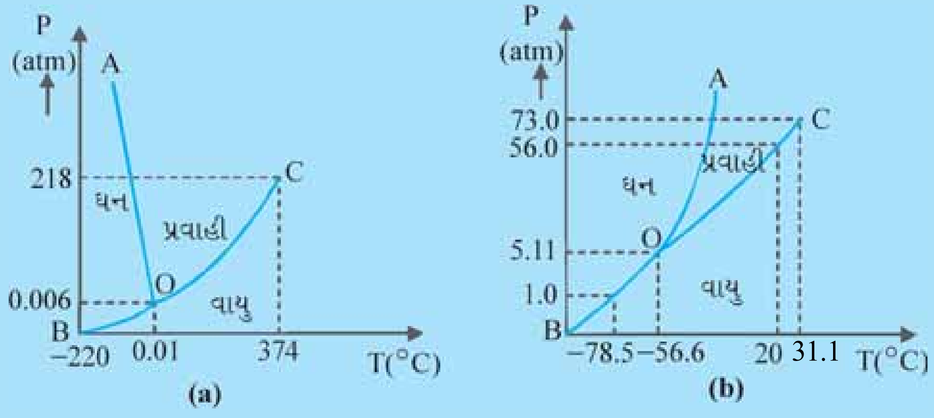
બધો જ બરફ પાણીમાં રૂપાંતર પામે ત્યાર બાદ જો તેને ગરમ કરવાનું આગળ ચાલુ રાખીએ તો આપણે જોઈ શકીએ છીએ કે, તાપમાન વધવાનું શરૂ થાય છે. તાપમાન 100 °C ની નજીક પહોંચે ત્યાં સુધી તેમાં વધારો થતો રહે છે અને તે સ્થિર બની જાય છે. આપેલી ઉષ્માનો જથ્થો, પ્રવાહી અવસ્થાને વરાળ અથવા વાયુ-અવસ્થામાં રૂપાંતર કરવામાં વપરાય છે.

પ્રવાહી-અવસ્થામાંથી વરાળ (અથવા વાયુ)માં થતા રૂપાંતરને **બાષ્પીકરણ (vaporisation)** કહે છે. જોઈ શકાયું છે કે પ્રવાહીનો સમગ્ર જથ્થો વરાળમાં રૂપાંતરિત થાય ત્યાં સુધી તાપમાન અચળ રહે છે. પ્રવાહીમાંથી વાયુ-અવસ્થાની રૂપાંતરણ પ્રક્રિયા દરમિયાન બંને અવસ્થાઓ ઉષ્મીય સંતુલનમાં સહઅસ્તિત્વ ધરાવે છે. જે તાપમાને પ્રવાહી અને વાયુ ઉષ્મીય સંતુલનમાં સહઅસ્તિત્વ ધરાવે છે. તેને પદાર્થનું **ઉત્કલનબિંદુ (boiling point)** કહે છે. પાણીની ઉકળવાની પ્રક્રિયા સમજાવા માટે હવે નીચે મુજબની પ્રવૃત્તિ કરીએ :

અડધાથી વધુ પાણી ભરેલો એક ગોળ તળિયાવાળો (રાઉન્ડ બૉટમ) ફ્લાસ્ક લો. તેને બર્નર પર મૂકો અને ફ્લાસ્કનાં બૂચમાં

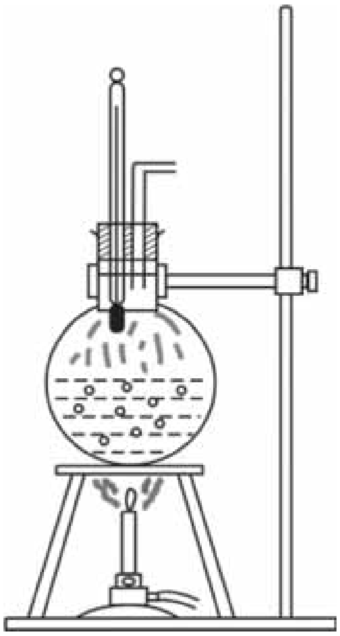
ત્રિબિંદુ (Triple Point)

પદાર્થ તેની અવસ્થામાં ફેરફાર અનુભવે તે દરમિયાન તેનું તાપમાન અચળ રહે છે. (અવસ્થા-ફેરફાર). પદાર્થ માટે તાપમાન T અને દબાણ P વચ્ચેના આલેખને તેનો ફેઝ ડાયગ્રામ અથવા $P - T$ ડાયગ્રામ કહે છે. નીચે આકૃતિમાં પાણી અને CO_2 માટેનો ફેઝ ડાયગ્રામ દર્શાવેલ છે. આ ફેઝ ડાયગ્રામ $P - T$ સમતલને ઘન વિસ્તાર, વાયુ વિસ્તાર અને પ્રવાહી વિસ્તાર એમ ત્રણ વિસ્તારોમાં વિભાગે છે. આ ક્ષેત્રો **ઊર્ધ્વીકરણ (સબ્લિમેશન) વક્ર** (BO), **ઠારણ (ફ્યુઝન) વક્ર (AO)** અને **બાષ્પાયન (વેપરાઈઝેશન) વક્ર (CO)** જેવા વક્રો વડે જુદા પડે છે. સબ્લિમેશન વક્ર (BO) પરનાં બિંદુઓ ઘન અને વાયુ સ્વરૂપો સહઅસ્તિત્વમાં ધરાવતાં હોય તેવી અવસ્થાઓ દર્શાવે છે. ફ્યુઝન વક્ર OA પરનાં બિંદુઓએ ઘન અને પ્રવાહી સ્વરૂપો સહઅસ્તિત્વમાં હોય તેવી અવસ્થાઓ દર્શાવે છે. વેપરાઈઝેશન વક્ર (CO) પરનાં બિંદુઓએ પ્રવાહી અને વાયુ-સ્વરૂપો સહ અસ્તિત્વમાં હોય તેવી અવસ્થાઓ દર્શાવે છે. દબાણ અને તાપમાનનાં જે મૂલ્યો માટે ફ્યુઝન વક્ર, વેપરાઈઝેશન વક્ર અને સબ્લિમેશન વક્ર મળે છે અને પદાર્થનાં ત્રણેય સ્વરૂપો સહઅસ્તિત્વમાં હોય તે બિંદુને તે પદાર્થનું **ત્રિબિંદુ** કહે છે. ઉદાહરણ તરીકે, પાણીના ત્રિબિંદુને તાપમાન 273.16 K અને દબાણ 6.11×10^{-3} *Pa* વડે દર્શાવાય છે.



દબાણ-તાપમાન ફેઝ ડાયગ્રામ (a) પાણી માટે અને (b) CO_2 માટે (સ્કેલમાપ વગર)

થરમૉમીટર તથા વરાળ નિષ્કાસ નળી પસાર કરીને તે બૂચને ફીટ કરો (આકૃતિ 11.11). ફ્લાસ્કમાં રહેલું પાણી ગરમ કરતાં સૌપ્રથમ પાણીમાં ઓગળેલ હવા, નાના પરપોટા સ્વરૂપે બહાર આવે છે. પછી તળિયે વરાળના પરપોટા રચાય છે. જે ઠંડા પાણીમાં ઊર્ધ્વગમન પામી ટોચ પર ઠારણ પામે છે અને અદૃશ્ય થઈ જાય છે. અંતે સમગ્ર પાણીના જથ્થાનું તાપમાન 100 °C પર પહોંચે ત્યારે વરાળના પરપોટા સપાટી પર પહોંચે છે. જેને પાણી ઊકળવા લાગ્યું તેમ કહેવાય છે. ફ્લાસ્કમાં રહેલી વરાળ જોઈ શકાતી નથી પરંતુ તે જેવી ફ્લાસ્કની બહાર નીકળે છે ત્યારે સૂક્ષ્મ પાણીનાં બુંદો રૂપે ઠારણ પામી ધૂંધ (foggy) સ્વરૂપે દેખાય છે.



આકૃતિ 11.11 *ઉત્કલન પ્રક્રિયા*

જો હવે વરાળ નિષ્કાસ નળીને થોડી સેકન્ડ માટે બંધ કરીને ફ્લાસ્કમાં દબાણ વધારવામાં આવે, તો તમે જોઈ શકશો કે પાણીનું ઉકળવાનું બંધ થાય છે. પાણીની ઉકળવાની પ્રક્રિયા ફરી શરૂ થાય તે પહેલાં તાપમાનમાં વધારો કરવા માટે વધુ ઉષ્માની જરૂર પડે છે. (જે દબાણના વધારા પર આધારિત છે.) આમ દબાણના વધારા સાથે ઉત્કલનબિંદુમાં વધારો થાય છે.

હવે આપણે બર્નરને દૂર કરીને પાણીને 80 °C સુધી ઠંડું થવા દો. થરમૉમીટર અને વરાળ નિષ્કાસ નળી દૂર કરો. ફ્લાસ્કને હવાચુસ્ત બૂચ વડે બંધ કરો. સ્ટૅન્ડ પર ફ્લાસ્કને ઊંધો મૂકો અને તેના પર બરફનું ઠંડું પાણી રેડો. આમ કરતાં ફ્લાસ્કની અંદર રહેલી પાણીની વરાળ ઠારણ પામે છે અને ફ્લાસ્કમાં રહેલા પાણીની સપાટી પરનું દબાણ ઘટે અને નીચા તાપમાને પાણી ફરીથી ઊકળે છે. આમ, દબાણમાં ઘટાડો થતાં તેના ઉત્કલનબિંદુમાં પણ ઘટાડો થાય છે.

આ પરથી સ્પષ્ટ થાય છે કે, શા માટે પહાડીક્ષેત્રોમાં રસોઈ કઠિન છે. વધુ ઊંચાઈએ વાતાવરણનું દબાણ નીચું હોવાને કારણે દરિયાની સપાટીની સરખામણીએ પાણીનું ઉત્કલનબિંદુ નીચું હોય છે. તેનાથી વિપરીત, પ્રેશરકુકરમાં દબાણમાં વધારો કરીને ઉત્કલનબિંદુમાં વધારો કરવામાં આવે છે. જેથી રસોઈ ઝડપી થાય છે. પ્રમાણભૂત વાતાવરણ દબાણે પદાર્થનાં ઉત્કલનબિંદુને **પ્રસામાન્ય ઉત્કલનબિંદુ (normal boiling point)** કહે છે.

જોકે, બધાં જ પદાર્થો ઘન, પ્રવાહી અને વાયુ એમ ત્રણેય અવસ્થાઓમાંથી પસાર થતાં નથી. કેટલાક એવા પદાર્થો છે જે સામાન્ય રીતે ઘન-અવસ્થામાંથી સીધા જ વાયુ અવસ્થામાં (તેનાથી વિપરીત પણ) રૂપાંતર થઈ જાય છે. પ્રવાહી અવસ્થામાં રૂપાંતર થયા વગર ઘન અવસ્થામાંથી વાયુ-અવસ્થામાં થતાં રૂપાંતરણને **ઊર્ધ્વપાતન (sublimation)** કહે છે અને આવા પદાર્થને ઊર્ધ્વપાતી પદાર્થ કહે છે. સૂકો બરફ (ઘન CO_2) ઊર્ધ્વપાતન પામે છે. આયોડિન પણ આવો જ પદાર્થ છે. ઊર્ધ્વપાતનની પ્રક્રિયા દરમિયાન પદાર્થની બંને ઘન અવસ્થા અને વાયુ અવસ્થા ઉષ્મીય સંતુલનમાં હોય છે.

11.8.1 ગુપ્ત ઉષ્મા (Latent Heat)

પરિચ્છેદ 11.8માં આપણે શીખ્યાં કે જ્યારે પદાર્થની અવસ્થામાં ફેરફાર થાય ત્યારે પદાર્થ અને તેના પરિસર વચ્ચે ચોક્કસ ઉષ્માનો જથ્થો વિનિમય પામે છે. પદાર્થની અવસ્થા-ફેરફાર દરમિયાન પદાર્થના એકમ દળ દીઠ વિનિમય પામતી ઉષ્માનાં જથ્થાને તે પ્રક્રિયા માટેની પદાર્થની ગુપ્ત ઉષ્મા કહે છે ઉદાહણ તરીકે, –10 °C તાપમાન ધરાવતા આપેલ જથ્થાનાં બરફને ઉષ્મા આપવામાં આવે તો બરફનું તાપમાન તેના ગલનબિંદુ (0 °C) સુધી પહોંચે ત્યાં સુધી વધે છે. આ તાપમાને વધુ ઉષ્મા આપતાં તાપમાનમાં વધારો થતો નથી પરંતુ બરફ પીગળવા લાગે છે અથવા પ્રવાહી અવસ્થામાં રૂપાંતર થાય છે. બધો જ બરફ પીગળી જાય પછી વધુ ઉષ્મા આપવામાં આવે, તો પાણીનાં તાપમાનમાં વધારો થાય છે. ઉત્કલનબિંદુએ પ્રવાહી વાયુ અવસ્થામાં રૂપાંતર દરમિયાન આવી જ પરિસ્થિતિનું નિર્માણ થાય છે. ઉકળતા પાણીને વધુ ઉષ્મા આપતા તાપમાનમાં વધારો થયા વગર વરાળમાં રૂપાંતરિત થાય છે.

કોષ્ટક 11.5 **1 વાતાવરણ દબાણે કેટલાક પદાર્થોનાં અવસ્થા રૂપાંતરના તાપમાન અને ગુપ્તઉષ્માઓ**

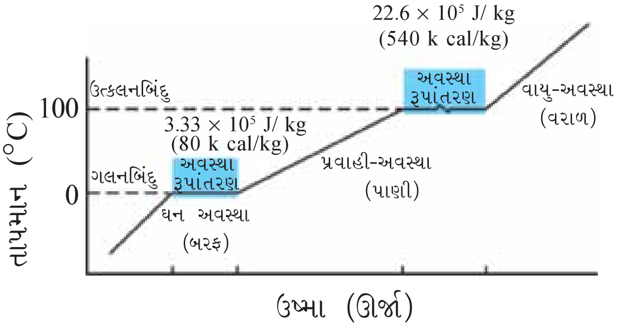
પદાર્થ	ગલનબિંદુ (°C)	L_f (10^5 J kg^{-1})	ઉત્કલનબિંદુ (°C)	L_v (10^5 J kg^{-1})
ઈથાઈલ આલ્કોહૉલ	–114	1.0	78	8.5
સોનુ	1063	0.645	2660	15.8
સીસું	328	0.25	1744	8.67
પારો	–39	0.12	357	2.7
નાઈટ્રોજન	–210	0.26	–196	2.0
ઑક્સિજન	–219	0.14	–183	2.1
પાણી	0	3.33	100	22.6

અવસ્થા-ફેરફાર દરમિયાન જરૂરી ઉષ્માનો આધાર રૂપાંતરણ ઉષ્મા અને અવસ્થા ફેરફાર પામતાં પદાર્થના દળ ઉપર રહેલો છે. આમ, એક અવસ્થામાંથી બીજી અવસ્થામાં રૂપાંતર પામતાં પદાર્થનું દળ m અને તે માટે જરૂરી ઉષ્માનો જથ્થો Q હોય તો,

$$Q = m\,L$$

અથવા $L = Q/m$ (11.13)

જ્યાં, Lને ગુપ્ત ઉષ્મા કહે છે અને તે પદાર્થની લાક્ષણિકતા છે. તેનો SI એકમ J kg^{-1} છે. Lનું મૂલ્ય દબાણ પર પણ આધારિત છે. સામાન્ય રીતે તેનું મૂલ્ય પ્રમાણભૂત વાતાવરણ દબાણે લેવામાં આવે છે. ઘન-પ્રવાહી અવસ્થા ફેરફાર માટેની ગુપ્તઉષ્માને **ગલન ગુપ્તઉષ્મા** (L_f) (**Latent heat of fusion**) કહે છે અને પ્રવાહી-વાયુ ફેરફાર માટે તેને **ઉત્કલન ગુપ્તઉષ્મા** (L_v)(**Latent heat of vaporisation**) કહે છે. ઘણી વાર તેને ગલનઉષ્મા અને બાષ્પાયન ઉષ્મા તરીકે ઉલ્લેખ કરવામાં આવે છે. આકૃતિ 11.12માં, પાણીના જથ્થા માટે તાપમાન વિરુદ્ધ ઉષ્માઊર્જાનો આલેખ દર્શાવેલ છે. કોષ્ટક 11.5માં કેટલાક પદાર્થોની ગુપ્તઉષ્મા તેમનાં ઠારણબિંદુઓ અને ઉત્કલનબિંદુઓ માટે આપેલ છે.



આકૃતિ 11.12 *1 વાતાવરણ દબાણે પાણી માટે તાપમાન વિરુદ્ધ ઉષ્માનો આલેખ (સ્કેલમાપ વગર)*

અહીં નોંધો કે જ્યારે અવસ્થા-ફેરફાર દરમિયાન ઉષ્મા ઉમેરવામાં (કે દૂર કરવામાં) આવે ત્યારે તાપમાન અચળ રહે છે. આકૃતિ 11.12 પરથી દર્શાવે છે કે, બધી જ અવસ્થા રેખાઓના ઢાળ સમાન નથી. જે સૂચવે છે કે જુદી જુદી અવસ્થા માટે વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતાનાં મૂલ્યો સમાન નથી. પાણીમાં ગલનગુપ્ત ઉષ્મા અને બાષ્પ ગુપ્તઉષ્મા અનુક્રમે $L_f = 3.33 \times 10^5$ J kg^{-1} અને $L_v = 22.6 \times 10^5$ J kg^{-1} છે એટલે કે 1 kg બરફને 0 °C તાપમાને પિગાળવા માટે 3.33×10^5 J ઉષ્મા અને 1 kg પાણીને 100 °C તાપમાને વરાળમાં ફેરવવા માટે 22.6×10^5 J ઉષ્માની જરૂર પડે છે. આથી 100 °C તાપમાને રહેલી વરાળ 100 °C તાપમાને રહેલા પાણી કરતાં 22.6×10^5 J kg^{-1} ઉષ્મા વધુ ધરાવે છે. આથી, ઉકળતા પાણી કરતાં સામાન્ય રીતે વરાળ વધુ ગંભીર રીતે દઝાડે છે.

▶ *ઉદાહરણ 11.4* જ્યારે એક પાત્રમાં 0 °C તાપમાને રહેલા 0.15 kg બરફને 50 °C તાપમાને રહેલા 0.30 kg પાણીમાં ભેળવવામાં આવે ત્યારે પરિણામી તાપમાન 6.7 °C થાય છે. બરફને ઓગાળવા માટે જરૂરી ઉષ્મા ગણો. (s_{water} = 4186 J kg^{-1} K^{-1})

ઉકેલ

પાણી વડે ગુમાવાતી ઉષ્મા $= ms_w\,(\theta_f - \theta_i)_w$

$= (0.30$ kg$)\,(4186$ J kg^{-1} $K^{-1})\,(50.0$ °C $- 6.7$ °C$)$

$= 54376.14$ J

બરફ પીગળવા માટે જરૂરી ઉષ્મા $= m_1 L_f = (0.15$ kg$)\,L_f$

બરફના પાણીના તાપમાનને અંતિમ તાપમાન સુધી લઈ જવા માટે જરૂરી ઉષ્મા $= m_1 s_w\,(\theta_f - \theta_i)_I$

$= (0.15$ kg$)\,(4186$ J kg^{-1} $K^{-1})\,(6.7$ °C $- 0$ °C$)$

$= 4206.93$ J

ગુમાવાતી ઉષ્મા = મેળવાતી ઉષ્મા

54376.14 J $= (0.15$ kg$)\,L_f + 4206.93$ J

$L_f = 3.34 \times 10^5$ J kg^{-1} ◀

> ▶ *ઉદાહરણ 11.5* એક કેલોરીમીટરમાં −12 °C તાપમાને રહેલા 3 kg બરફને વાતાવરણના દબાણે 100 °C તાપમાનવાળી વરાળમાં રૂપાંતરિત કરવા માટેની જરૂરી ઉષ્માની ગણતરી કરો. જ્યાં, બરફની વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા = 2100 J kg^{-1} K^{-1}, પાણીની વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા = 4186 J kg^{-1} K^{-1}, બરફની ગલનગુપ્ત ઉષ્મા = 3.35×10^5 J kg^{-1} અને વરાળની બાષ્પાયન ગુપ્તઉષ્મા = 2.256×10^6 J kg^{-1} આપેલ છે.

ઉકેલ આપણી પાસે,

બરફનું દળ $m = 3$ kg

બરફની વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા s_{ice} $= 2100$ J kg^{-1} K^{-1}

પાણીની વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા s_{water} $= 4186$ J kg^{-1} K^{-1}

બરફની ગલનગુપ્ત ઉષ્મા $L_{f\ ice}$ $= 3.35 \times 10^5$ J kg^{-1}

વરાળની બાષ્પાયન ગુપ્તઉષ્મા L_{steam} $= 2.256 \times 10^6$ J kg^{-1}

હવે, Q = −12 °C તાપમાને રહેલા 3 kg બરફને 100° C વરાળમાં રૂપાંતર કરવા માટે જરૂરી ઉષ્મા

Q_1 = −12 °C એ રહેલા 3 kg બરફનું તાપમાન 0 °Cમાં રૂપાંતર કરવા માટે જરૂરી ઉષ્મા

$= m\ s_{ice}\ \Delta T_1 = (3\ kg)\ (2100\ J\ kg^{-1}\ K^{-1})\ [0 - (-12)]\ °C = 75600\ J$

Q_2 = 0° C તાપમાને રહેલા 3 kg બરફને 0 °C તાપમાનવાળા પાણીમાં રૂપાંતરિત કરવા માટે જરૂરી ઉષ્મા

$= m\ L_{f\ ice} = (3\ kg)\ (3.35 \times 10^5\ J\ kg^{-1})$

$= 1005000\ J$

Q_3 = 0 °C એ રહેલા 3 kg પાણીને 100 °C વાળા પાણીમાં રૂપાંતરિત કરવા માટેની જરૂરી ઉષ્મા

$= ms_w\ \Delta T_2 = (3\ kg)\ (4186\ J\ kg^{-1}\ K^{-1})\ (100\ °C)$

$= 1255800\ J$

Q_4 = 100 °C વાળા 3 kg પાણીને 100 °C વાળી વરાળમાં રૂપાંતર કરવા માટે જરૂરી ઉષ્મા

$= m\ L_{stream} = (3\ kg)\ (2.256 \times 10^6\ J\ kg^{-1})$

$= 6768000\ J$

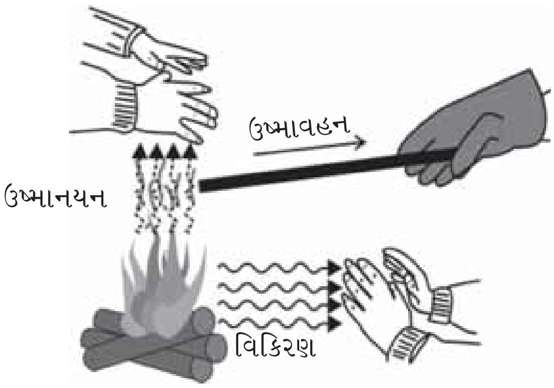
માટે, $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$

$= 75600J + 1005000\ J + 1255800J + 6768000\ J$

$= 9.1 \times 10^6\ J$ ◀

11.9 ઉષ્માનું પ્રસરણ (HEAT TRANSFER)

આપણે જાણીએ છીએ કે ઉષ્મા એ ઊર્જા છે અને તાપમાનમાં તફાવતને કારણે ઊર્જાનું એક તંત્રમાંથી બીજા તંત્રમાં અથવા તંત્રનાં એક ભાગમાંથી બીજા ભાગમાં પ્રસરણ થાય છે. જુદા જુદા કયા પ્રકારો દ્વારા આ ઊર્જાનું પ્રસરણ થઈ શકે ? ઉષ્મા સ્થાનાંતરની ત્રણ જુદી જુદી રીતો છે : ઉષ્માવહન, ઉષ્માનયન અને ઉષ્માવિકિરણ (આકૃતિ 11.13).



આકૃતિ **11.13** *ઉષ્માવહન, ઉષ્માનયન તથા ઉષ્માવિકિરણ દ્વારા તાપન*

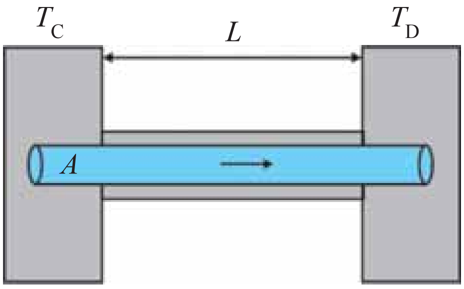
11.9.1 ઉષ્માવહન (Conduction)

પદાર્થના પાસપાસેના બે વિભાગો વચ્ચે તાપમાનના તફાવતને કારણે ઉષ્માના પ્રસરણ થવાની યાંત્રિક પ્રક્રિયાને ઉષ્માવહન કહે છે. ધારો કે ધાતુના સળિયાના એક છેડાને જ્યોતમાં મૂકીએ તો થોડી વારમાં જ સળિયાનો બીજો છેડો એટલો ગરમ થશે કે તમે ખુલ્લા હાથે તેને પકડી શકશો નહિ. અહીં, સળિયામાં ઉષ્માનું પ્રસરણ, ઉષ્માવહન દ્વારા સળિયાના ગરમ છેડેથી તેના જુદા જુદા ભાગોમાંથી પસાર થઈને બીજા છેડા સુધી થાય છે. વાયુઓની ઉષ્માવાહકતા ઓછી હોય છે. જ્યારે પ્રવાહીઓની ઉષ્માવાહકતા ઘન અને વાયુઓની વચ્ચે હોય છે.

માત્રાત્મક રીતે ઉષ્માવહન, 'કોઈ દ્રવ્યમાં આપેલ તાપમાનના તફાવત માટે ઉષ્માવહનના સમય-દર' વડે વર્ણવવામાં આવે છે. ધારો કે, લંબાઈ L અને નિશ્ચિત આડછેદનું ક્ષેત્રફળ A ધરાવતા એક ધાતુના સળિયાના બે છેડાઓ જુદાં જુદાં તાપમાને રાખેલા છે. ઉદાહરણ તરીકે સળિયાના છેડાઓને અનુક્રમે T_C અને T_D તાપમાન ધરાવતાં મોટા ઉષ્મા સંગ્રાહક સાથે ઉષ્મીય સંપર્કમાં રાખેલા (આકૃતિ 11.14) છે.

આદર્શ સ્થિતિ માટે સળિયાની બાજુઓ સંપૂર્ણપણે ઉષ્મીય અવાહક કરતાં સળિયાની બાજુઓ અને પરિસર વચ્ચે ઉષ્માવિનિમય થતો નથી.

થોડા સમય બાદ, સ્થાયી અવસ્થા મળશે. સળિયાનું તાપમાન T_C થી T_D સુધી ($T_C > T_D$) અંતર સાથે સમાન રીતે ઘટે છે. C પાસેનું ઉષ્માસંગ્રાહક અચળ દરે ઉષ્મા આપે છે. જે સળિયા દ્વારા પ્રસરણ પામી તે જ અચળ દરે D પાસે રહેલા સંગ્રાહકને આપે છે.



આકૃતિ 11.14 *બે છેડે T_C અને T_D ($T_C > T_D$) જેટલું તાપમાન જળવાઈ રહેતું હોય તેવા સળિયામાં ઉષ્માવહન દ્વારા સ્થાયી સ્થિતિમાં ઉષ્માનું વહન*

પ્રાયોગિક રીતે જોવા મળે છે કે, સ્થાયી અવસ્થામાં ઉષ્માવહનનો દર (અથવા ઉષ્માપ્રવાહ) H, તાપમાનના તફાવત ($T_C - T_D$) અને આડછેદનાં ક્ષેત્રફળ Aના સપ્રમાણમાં તથા સળિયાની લંબાઈ Lના વ્યસ્ત પ્રમાણમાં હોય છે.

$$H = KA\frac{T_C - T_D}{L} \tag{11.14}$$

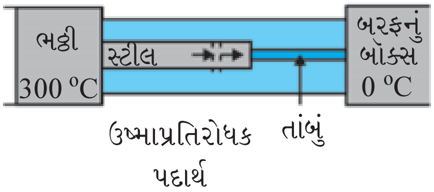
સપ્રમાણતા અચળાંક Kને દ્રવ્યની **ઉષ્માવાહકતા (Thermal Conductivity)** કહે છે. કોઈ દ્રવ્ય માટે Kનું મૂલ્ય જેટલું વધારે તેટલું વધારે ઝડપી ઉષ્માનું વહન. Kનો SI એકમ J s^{-1} m^{-1} K^{-1} અથવા W m^{-1} K^{-1} છે. કોષ્ટક 11.5માં જુદા જુદા પદાર્થોની ઉષ્માવાહકતાની યાદી આપેલ છે. આ મૂલ્યો તાપમાન સાથે બહુ ધીમે બદલાય છે. તેથી તાપમાનના સામાન્ય વિસ્તાર માટે તેને અચળ ગણી શકાય.

સારા ઉષ્માવાહકો જેમકે ધાતુઓની પ્રમાણમાં વધારે ઉષ્માવાહકતાની સરખામણી સારા ઉષ્મા અવાહકો જેવાં કે લાકડું, ગ્લાસવુલ વગેરેની ઉષ્માવાહકતા સાથે કરો. તમે નોંધ્યું હશે કે કેટલાંક રસોઈનાં વાસણોને તળિયે તાંબાનું આવરણ ચઢાવેલું હોય છે. તાંબું ઉષ્મા સુવાહક હોવાને કારણે તે વાસણના સમગ્ર તળિયામાં ઉષ્માનું વિતરણ સારી રીતે થાય છે અને ખોરાક એકસરખો રાંધી શકાય. તેનાથી વિપરીત પ્લાસ્ટિક ફોમ કે જે મોટે ભાગે હવાના કોટરો (Air Pockets - હવા-સંચયિકા) ધરાવતા હોવાથી વધુ સારા ઉષ્મા અવાહક હોય છે. યાદ કરો કે વાયુઓ મંદ ઉષ્માવાહક છે અને કોષ્ટક 11.5માં હવાની ઓછી ઉષ્માવાહકતા નોંધો. બીજા ઘણા કિસ્સાઓમાં ઉષ્મા સંગ્રહ અને પ્રસરણ મહત્ત્વનાં હોય છે. ઉનાળાના દિવસોમાં કૉંક્રીટથી બનેલ મકાનોની છત બહુ ઝડપથી ગરમ થઈ જાય છે, કારણ કે કૉંક્રિટની ઉષ્માવાહકતા ઘણી ઓછી હોતી નથી. (જોકે ધાતુઓની સરખામણીએ પૂરતી ઓછી છે.) માટે લોકો મોટે ભાગે મકાનની છત પર માટી અથવા ઉષ્મા પ્રતિરોધક ફોમનું આવરણ કરવાનું પસંદ કરે છે. જેથી ઉષ્માનું પ્રસરણ અટકે છે અને રૂમને ઠંડો રાખે છે. ઘણી પરિસ્થિતિઓમાં ઉષ્માનું પ્રસરણ અનિવાર્ય (ક્રાંતિક) (Critical) હોય છે. ઉદાહરણ તરીકે ન્યુક્લિયર રીએક્ટરમાં જટિલ ઉષ્મા પ્રસરણ તંત્ર પ્રસ્થાપિત કરવું જરૂરી છે. જેથી રીએક્ટરના કોર વિભાગમાં ન્યુક્લિયર સંલયન (ફીશન) દ્વારા ઉદ્‌ભવતી પ્રચંડ ઊર્જાને પૂરતી ઝડપે બહાર તરફ સંક્રમણ કરાવી શકાય અને કોર (મધ્યભાગ)ને વધુ પડતી ગરમ થતી અટકાવી શકાય.

કોષ્ટક 11.6 કેટલાંક દ્રવ્યોની ઉષ્માવાહકતાઓ

દ્રવ્યો	ઉષ્મા વાહકતા (J s^{-1} m^{-1} K^{-1})
ધાતુઓ	
ચાંદી	406
તાંબું	385
ઍલ્યુમિનિયમ	205
બ્રાસ (પિત્તળ)	109
સ્ટીલ	50.2
સીસું	34.7
પારો	8.3
અધાતુઓ	
અવાહક ઈંટ	0.15
કૉંક્રિટ	0.8
શરીરની ચરબી	0.20
ફેલ્ટ (ઉનનું કાપડ)	0.04
કાચ	0.8
બરફ	1.6
ગ્લાસવુલ	0.04
લાકડું	0.12
પાણી	0.8
વાયુઓ	
હવા	0.024
આર્ગોન	0.016
હાઇડ્રોજન	0.14

▶ *ઉદાહરણ 11.6* આકૃતિ 11.15માં દર્શાવ્યા મુજબનું તંત્ર સ્થાયી અવસ્થામાં છે. તો સ્ટીલ તાંબાના જંક્શનનું તાપમાન કેટલું હશે ? સ્ટીલના સળિયાની લંબાઈ = 15.0 cm. તાંબાના સળિયાની લંબાઈ = 10.0 cm. ભઠ્ઠીનું તાપમાન = 300 °C. બીજા છેડાનું તાપમાન 0 °C. સ્ટીલનાં સળિયાનાં આડછેદનું ક્ષેત્રફળ તાંબાના સળિયાના આડછેદનાં ક્ષેત્રફળ કરતાં બમણું છે. (સ્ટીલની ઉષ્માવાહકતા = 50.2 J s^{-1} m^{-1} K^{-1} અને તાંબાની ઉષ્માવાહકતા = 385 J s^{-1} m^{-1} K^{-1})



આકૃતિ 11.15

ઉકેલ સળિયાઓની ફરતે રહેલું ઉષ્માપ્રતિરોધક આવરણ સળિયાની બાજુ પરથી થતો ઉષ્માનો વ્યય ઘટાડે છે. તેથી ઉષ્માનું વહન માત્ર સળિયાની લંબાઈની દિશામાં થાય છે. સળિયાના કોઈ પણ આડછેદનો વિચાર કરો. સ્થાયી અવસ્થામાં કોઈ એક ભાગમાં દાખલ થતી ઉષ્મા તેમાંથી બહાર નીકળતી ઉષ્મા જેટલી જ હોય. નહિતર તે ભાગ ચોખ્ખી ઊર્જા મેળવે અથવા ગુમાવે અને તેનું તાપમાન સ્થાયી રહેશે નહિ. આમ, સ્થાયી અવસ્થામાં સ્ટીલ-તાંબાના સંયુક્ત સળિયાની લંબાઈ પરનાં દરેક બિંદુઓએ આડછેદમાંથી વહન પામતી ઉષ્માનો દર સળિયાના આડછેદમાંથી પસાર થતા ઉષ્માના દર જેટલો હોય છે. ધારો કે સ્થાયી સ્થિતિમાં સ્ટીલ-તાંબાના જંક્શનનું તાપમાન T છે તો,

$$\frac{K_1A_1(300-T)}{L_1} = \frac{K_2A_2(T-0)}{L_2}$$

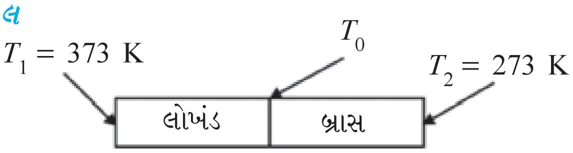
જ્યાં (1) અને (2) અનુક્રમે સ્ટીલ અને તાંબાના સળિયાનું સૂચન કરે છે. $A_1 = 2A_2$, $L_1 = 15.0$ cm, $L_2 = 10.0$ cm, $K_1 = 50.2$ J s^{-1} m^{-1} K^{-1}, $K_2 = 385$ J s^{-1} m^{-1} K^{-1} માટે,

$$\frac{50.2\times 2(300-T)}{15} = \frac{385\,T}{10}$$

જે પરથી, $T = 44.4$ °C

ઉદાહરણ 11.7 આકૃતિ 11.16માં દર્શાવ્યા મુજબ એક લોખંડના સળિયા ($L_1 = 0.1$ m, $A_1 = 0.02$ m^2, $K_1 = 79$ W m^{-1} K^{-1}) અને એક બ્રાસના સળિયા ($L_2 = 0.1$ m, $A_2 = 0.02$ m^2, $K_2 = 109$ W m^{-1} K^{-1})ના છેડાઓને એકબીજા સાથે જોડેલ છે. લોખંડ અને બ્રાસના મુક્ત છેડાઓનું તાપમાન અનુક્રમે 373 K અને 273 K જેટલું જાળવી રાખવામાં આવે છે. (i) બંને સળિયાના જંક્શનનું તાપમાન (ii) સંયુક્ત સળિયાની સમતુલ્ય ઉષ્માવાહકતા અને (iii) સંયુક્ત સળિયામાંથી પસાર થતાં ઉષ્માપ્રવાહ માટેનાં સૂત્રો મેળવો અને તેની ગણતરી પણ કરો.

ઉકેલ



આકૃતિ 11.16

$L_1 = L_2 = L = 0.1$ m, $A_1 = A_2 = A = 0.02$ m^2, $K_1 = 79$ W m^{-1} K^{-1}, $K_2 = 109$ W m^{-1} K^{-1}, $T_1 = 373$ K અને $T_2 = 273$ K આપેલ છે.

સ્થાયી અવસ્થા અંતર્ગત, લોખંડના સળિયામાં ઉષ્માપ્રવાહ (H_1) અને બ્રાસના સળિયામાં ઉષ્માપ્રવાહ (H_2) સમાન હોય છે.

માટે, $H = H_1 = H_2$

$$= \frac{K_1A_1(T_1-T_0)}{L_1} = \frac{K_2A_2(T_0-T_2)}{L_2}$$

$A_1 = A_2 = A$ અને $L_1 = L_2 = L$ હોવાથી આ સમીકરણ નીચે મુજબ હશે :

$$K_1(T_1 - T_0) = K_2(T_0 - T_2)$$

આમ, બે સળિયાના જંક્શનનું તાપમાન

$$T_0 = \frac{(K_1T_1 + K_2T_2)}{(K_1+K_2)}$$

આ સમીકરણનો ઉપયોગ કરતાં કોઈ પણ સળિયામાં ઉષ્માપ્રવાહ,

$$H = \frac{K_1A(T_1-T_0)}{L} = \frac{K_2A(T_0-T_2)}{L}$$

$$= \left(\frac{K_1K_2}{K_1+K_2}\right)\frac{A(T_1-T_2)}{L} = \frac{A(T_1-T_2)}{L\left(\frac{1}{K_1}+\frac{1}{K_2}\right)}$$

આ સમીકરણનો ઉપયોગ કરતાં $L_1 + L_2 = 2L$ લંબાઈના સંયુક્ત સળિયા માટે ઉષ્માપ્રવાહ અને સંયુક્ત સળિયાની સમતુલ્ય ઉષ્માવાહકતા K' નીચે મુજબ મળે :

$$H' = \frac{K'A(T_1-T_2)}{2L} = H$$

$$K' = \frac{2K_1K_2}{K_1+K_2}$$

(i) $$T_0 = \frac{(K_1T_1+K_2T_2)}{(K_1+K_2)}$$

$$= \frac{(79\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1})(373\text{ K}) + (109\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1})(273\text{ K})}{79\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1} + 109\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}}$$

$= 315$ K

(ii) $$K' = \frac{2K_1K_2}{K_1+K_2}$$

$$= \frac{2\times(79\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1})\times(109\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1})}{79\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}+109\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}}$$

$= 91.6$ W m^{-1} K^{-1}

(iii) $H' = H = \dfrac{K' A (T_1 - T_2)}{2L}$

$$= \frac{(91.6\ \mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}) \times (0.02\ \mathrm{m^2}) \times (373\ \mathrm{K} - 273\ \mathrm{K})}{2 \times (0.1\ \mathrm{m})}$$

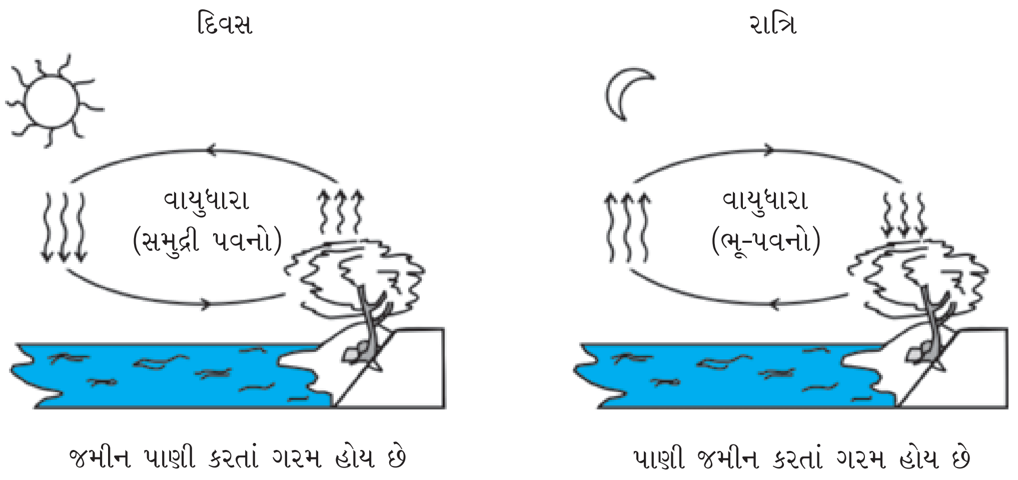
$= 916$ W ◀

11.9.2 ઉષ્માનયન (Convection)

દ્રવ્યની વાસ્તવિક ગતિ દ્વારા થતા ઉષ્મા સ્થાનાંતરના પ્રચલિત પ્રકારને ઉષ્માનયન કહે છે. તે માત્ર તરલ પદાર્થોમાં શક્ય છે. ઉષ્માનયન પ્રાકૃતિક કે પ્રેરિત હોઈ શકે. પ્રાકૃતિક ઉષ્માનયનમાં ગુરુત્વાકર્ષણ મહત્ત્વનો ભાગ ભજવે છે. તરલને તેના તળિયેથી ગરમ કરતાં ગરમ ભાગ વિસ્તરે છે અને તેથી તેની ઘનતા ઘટે છે. ઉત્પ્લાવક બળને કારણે તે ઉપર તરફ જાય છે અને ઉપરના ઠંડા ભાગને વિસ્થાપિત કરે છે. જે ફરી ગરમ થઈને ઉપર જાય છે અને તરલના ઠંડા ભાગને વિસ્થાપિત કરે છે. આ પ્રક્રિયા સતત ચાલ્યા કરે છે. ઉષ્મા સ્થાનાંતરનો આ પ્રકાર સ્પષ્ટ રીતે ઉષ્માવહન કરતાં જુદો છે. ઉષ્માનયનમાં તરલના જુદા જુદા ભાગોનું વહન જથ્થામાં થાય છે. પ્રેરિત ઉષ્માનયનમાં દ્રવ્યને પંપ અથવા અન્ય ભૌતિક સાધનો દ્વારા ગતિ કરાવવામાં આવે છે. ઘર વપરાશમાં પ્રણોદીત-વાયુ તાપન તંત્ર, માનવ રુધિરાભિસરણ તંત્ર અને વાહનોનાં ઍન્જિનમાં શીતક તંત્ર વગેરે પ્રેરિત ઉષ્માનયનનાં સામાન્ય ઉદાહરણો છે. માનવશરીરમાં હૃદય એક પંપ તરીકે કાર્ય કરે છે. જે રુધિરને શરીરના જુદા જુદા ભાગોમાં ભ્રમણ કરાવે છે. આ રીતે પ્રેરિત ઉષ્માનયન વડે ઉષ્માનું સ્થાનાંતર કરીને શરીરનું તાપમાન એકસરખું જાળવી રાખે છે.

પ્રાકૃતિક ઉષ્માનયન ઘણી પ્રચલિત ઘટનાઓ માટે જવાબદાર છે. દિવસ દરમિયાન જળાશયોનાં પાણી કરતાં જમીન ઝડપથી ગરમ થાય છે. કારણ કે પાણીની વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા ઊંચી છે અને તેથી શોષાયેલી ઉષ્મા મિશ્રિતધારાઓ દ્વારા પાણીના વિશાળ જથ્થામાં વિખેરાઈ જાય છે. ગરમ જમીનના સંપર્કમાં આવતી હવા ઉષ્માવહન વડે ગરમ થાય છે અને પ્રસરણ પામે છે. પરિણામે તેની આસપાસની ઠંડી હવા કરતાં તેની ઘનતા ઘટે છે. જેના પરિણામે ગરમ હવા (વાયુ ધારાઓ) ઉપર ચઢે છે અને ઠંડી હવા ગતિ કરીને (પવન) ખાલી પડેલી જગ્યા ભરી દે છે. આમ, મોટાં જળાશયોની નજીક સમુદ્રીય પવનલહેરો ઉદ્ભવે છે. ઠંડી હવા નીચે આવે છે અને એક તાપીય ઉષ્માનયન ચક્ર સ્થપાય છે. જે ઉષ્માને જમીનથી દૂર તરફ સ્થાનાંતરિત કરે છે. રાત્રિના સમયે જમીન ઉષ્મા ઝડપથી ગુમાવે છે અને પાણીની સપાટી જમીન કરતાં વધુ ગરમ હોય છે. જેને પરિણામે ચક્ર ઊલટાઈ જાય છે (આકૃતિ 11.17).

પ્રાકૃતિક ઉષ્માનયનનું એક બીજું ઉદાહરણ ઉત્તર પૂર્વથી વિષુવવૃત્ત તરફ વહેતા પૃથ્વી પરના સ્થાયી પૃષ્ઠીય પવનો જેને પારંપરિક પવન (Trade wind) કહે છે. જેની વ્યવહારિક સ્પષ્ટતા આ મુજબ છે. પૃથ્વીનાં વિષુવવૃત્તીય અને ધ્રુવીય ક્ષેત્રો અસમાન સૂર્યઉષ્મા મેળવે છે. વિષુવવૃત્ત પાસે પૃથ્વીની સપાટી નજીક રહેલી હવા ગરમ હોય છે. જ્યારે ધ્રુવો પાસે ઉપરના વાતાવરણમાં હવા ઠંડી હોય છે. અન્ય પરિબળો (factor)ની ગેરહાજરીમાં, ઉષ્માનયનના પ્રવાહો રચાય છે. હવા વિષુવવૃત્તીય પૃષ્ઠથી ઉપર જઈને ધ્રુવો તરફ ગતિ કરે છે. ત્યાંથી ધારાઓ નીચે તરફ આવી પુનઃ વિષુવવૃત્ત તરફ વહન કરે છે. જોકે પૃથ્વીના પરિભ્રમણને કારણે આ ઉષ્માનયન પ્રવાહોમાં ફેરફાર થાય છે. આના કારણે વિષુવવૃત્તની નજીક પૂર્વ તરફ ગતિ કરતી હવાની ઝડપ 1600 km/h જ્યારે ધ્રુવો પાસે તેની ઝડપ શૂન્ય હોય છે. જેનાં પરિણામે હવા ધ્રુવો પાસે નહિ, પરંતુ 30° N (ઉત્તર) અક્ષાંશ પાસે નીચે ઉતરે છે અને વિષુવવૃત્ત તરફ પાછી ફરે છે. જેને **પારંપરિક પવન (trade wind)** કહે છે.



આકૃતિ 11.17 ઉષ્માનયન-ચક્ર

11.9.3 ઉષ્માવિકિરણ (Radiation)

ઉષ્માવહન અને ઉષ્માનયનમાં વહન માધ્યમ તરીકે કેટલાંક દ્રવ્યોની જરૂર પડે છે. શૂન્યાવકાશમાં એકબીજાથી દૂર અલગ રહેલા પદાર્થો વચ્ચે ઉષ્માનું વહન આ પદ્ધતિઓ વડે થઈ શકતું નથી. પરંતુ ખૂબ જ દૂરના અંતરે રહેલા સૂર્યમાંથી પૃથ્વી ઉષ્મા મેળવે છે અને હવા ઉષ્માની અલ્પવાહક હોવા છતાં તેમાં ઉષ્માનયન રચાય તે પહેલાં આપણને ગરમીનો અનુભવ ઝડપથી થાય છે. ઉષ્મા પ્રસરણની ત્રીજી પદ્ધતિમાં માધ્યમની આવશ્યકતા હોતી નથી. તેને **ઉષ્માવિકિરણ (radiation)** કહે છે તથા વિદ્યુતચુંબકીય તરંગો દ્વારા ઉત્સર્જિત ઊર્જાને **વિકિરણઊર્જા (radiant energy)** કહે છે. વિદ્યુત ચુંબકીય તરંગોમાં વિદ્યુત અને ચુંબકીયક્ષેત્રનાં દોલનો અવકાશમાં સમય સાથે થતાં હોય છે. કોઈ પણ તરંગોની માફક વિદ્યુતચુંબકીય તરંગો જુદી જુદી તરંગલંબાઈ ધરાવે છે અને શૂન્યાવકાશમાં એક સમાન ઝડપથી ગતિ કરે છે, જેને પ્રકાશની ઝડપ કહે છે, જે $3 \times 10^8\ m\ s^{-1}$ છે. આ બાબતનો વિગતવાર વધુ અભ્યાસ હવે પછી કરશો. પરંતુ હવે તમે જાણો છો કે શા માટે વિકિરણ દ્વારા ઉષ્માનાં પ્રસરણ માટે માધ્યમની જરૂર નથી અને તે શા માટે ઝડપી છે. આ રીતે ઉષ્મા શૂન્યાવકાશમાં સૂર્યથી પૃથ્વી સુધી સ્થાનાંતર કરે છે. બધા જ પદાર્થો વિકિરણ ઊર્જાનું ઉત્સર્જન કરે છે પછી ભલે ને તે ઘન, પ્રવાહી અથવા વાયુ હોય. કોઈ પણ પદાર્થ તેનાં તાપમાનને કારણે જે વિદ્યુત ચુંબકીય તરંગોનું ઉત્સર્જન કરે છે - ગરમ લાલચોળ લોખંડના સળિયામાંથી અથવા વિદ્યુત ગોળાનાં ફિલામેન્ટમાંથી નીકળતાં વિકિરણોની જેમ - તેને ઉષ્મીય વિકિરણ કહે છે.

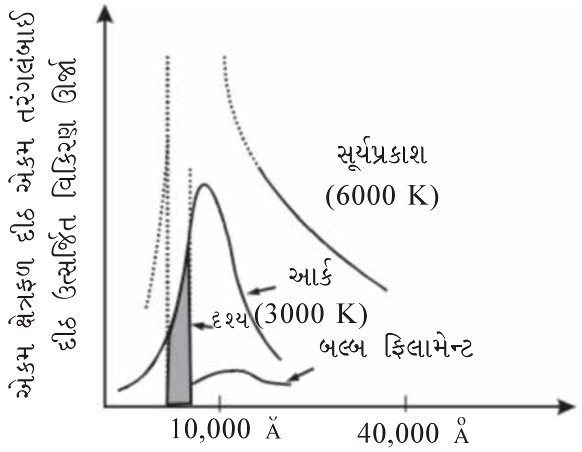
જ્યારે ઉષ્મીય વિકિરણો અન્ય પદાર્થ પર પડે છે ત્યારે તેનું આંશિક પરાવર્તન અને આંશિક શોષણ થાય છે વિકિરણ દ્વારા પદાર્થ ઉષ્માના જે જથ્થાનું શોષણ કરી શકે છે, તે પદાર્થના રંગ પર આધાર રાખે છે.

આપણે તે જોયું છે કે આછા હલકા રંગના પદાર્થ કરતાં કાળા રંગના પદાર્થો વિકિરણ ઊર્જાનું શોષણ અને ઉત્સર્જન વધુ સારી રીતે કરે છે. આ વાસ્તવિકતા આપણા દૈનિક જીવનમાં ઘણા બધા ઉપયોજનમાં જોઈ શકાય છે. આપણે ઉનાળામાં સફેદ અથવા આછા હલકા રંગનાં કપડાં પહેરીએ છીએ કે જેથી તે સૂર્યમાંથી ઓછી ઉષ્માનું શોષણ કરે. પરંતુ શિયાળા દરમિયાન આપણે ઘેરા રંગનાં કપડાં પહેરીએ છીએ કે જે સૂર્યમાંથી વધુ ઉષ્માનું શોષણ કરી આપણા શરીરને હુંફાળું રાખે. ખોરાક રાંધવાનાં વાસણોનાં તળિયા કાળા રંગનાં રાખવામાં આવે છે. જેથી તે ગૅસ સ્ટવના અગ્નિમાંથી મહત્તમ ઉષ્માનું શોષણ કરીને તેને રાંધવા માટેના શાકભાજીને આપે.

આ જ રીતે બે દીવાલવાળો ફ્લાસ્ક અથવા થર્મોસ બૉટલ એક એવી રચના છે કે જે બૉટલમાં ભરેલ વસ્તુ અને બહારના પરિસર વચ્ચે ઉષ્માનો વિનિમય લઘુતમ કરતી કાચની બે દીવાલોવાળું પાત્ર છે. જેની અંદર અને બહારની દીવાલો પર ચાંદીનો ઢોળ ચઢાવેલ હોય છે. અંદરની દીવાલ વડે વિકિરણ પરાવર્તન પામી બૉટલમાં રહેલ વસ્તુમાં પાછું ફરે છે. આ જ રીતે બહારની દીવાલ બહારથી આવતા કોઈ પણ વિકિરણોને પરાવર્તિત કરે છે. બે દીવાલોની વચ્ચેની જગ્યાને શૂન્યાવકાશિત કરી વહન અને નયન દ્વારા થતાં ઉષ્માનો વ્યય ઘટાડવામાં આવે છે અને ફ્લાસ્કને બુચ (cork) જેવા ઉષ્મા પ્રતિરોધક પર મૂકવામાં આવે છે. માટે જ આ સાધન ગરમ વસ્તુ (જેમકે, દૂધ)ને ઠંડી થતી રોકે છે તેમજ વૈકલ્પિક રીતે ઠંડી વસ્તુ (જેમકે, બરફ) સંગ્રહીત કરવા માટે ઉપયોગી છે.

11.9.4 કાળા પદાર્થનું વિકિરણ (Black body Radiation)

હજુ સુધી આપણે ઉષ્મીય વિકિરણમાં તરંગલંબાઈની વિગતો દર્શાવેલ નથી. કોઈ પણ તાપમાને થતા ઉષ્મીય વિકિરણ માટે અગત્યની બાબત તે છે કે, તે કોઈ એક (અથવા થોડી ઘણી) તરંગ-લંબાઈઓ નહિ પણ નાનીથી મોટી તરંગલંબાઈ ધરાવતો સળંગ વર્ણપટ ધરાવે છે. જોકે, વિકિરણ ઊર્જા જુદી જુદી તરંગલંબાઈઓ માટે બદલાય છે. આકૃતિ A1 માં કાળા પદાર્થ દ્વારા એકમ ક્ષેત્રફળ દીઠ એકમ તરંગલંબાઈ દીઠ ઉત્સર્જિત વિકિરણ ઊર્જા વિરુદ્ધ જુદાં જુદાં તાપમાને તરંગલંબાઈના પ્રાયોગિક વક્રો દર્શાવેલ છે.



આકૃતિ A1 : કાળા પદાર્થ માટે જુદાં જુદાં તાપમાને ઉત્સર્જિત ઊર્જા વિરુદ્ધ તરંગલંબાઈ

નોંધો કે મહત્તમ ઊર્જા માટે તરંગલંબાઈ λ_m તાપમાન વધે તેમ ઘટે છે. λ_m અને T વચ્ચેનો સંબંધ **વીન-સ્થાનાંતર નિયમ** તરીકે જાણીતો છે તે નીચે મુજબ દર્શાવાય છે :

$$\lambda_m T = \text{અચળ} \qquad \text{(A1)}$$

અચળાંકનું મૂલ્ય (વીન અચળાંક) 2.9×10^{-3} m K છે. આ નિયમ સમજાવે છે કે શા માટે લોખંડના ટુકડાને ગરમ જ્યોતમાં તપાવતા તેનો રંગ પ્રથમ આછો લાલ થાય છે, પછી લાલાશપડતો પીળો અને છેલ્લે સફેદ થાય છે. ચંદ્ર, સૂર્ય અને બીજા તારા જેવા અવકાશી પદાર્થોની સપાટીના તાપમાનનો અંદાજ કાઢવા માટે વીનનો નિયમ ઉપયોગી છે. ચંદ્રમાંથી આવતા 14 μm તરંગલંબાઈવાળા પ્રકાશની તીવ્રતા મહત્તમ મળે છે. વીનના નિયમ પરથી ચંદ્રની સપાટીનું તાપમાન 200 K અંદાજી શકાયું છે. સૂર્યના વિકિરણ ઊર્જા, $\lambda_m = 4753$ Å માટે મહત્તમ હોય છે. જેને અનુરૂપ તાપમાન $T = 6060\ K$ છે. યાદ રાખો કે, આ તાપમાન સૂર્યની સપાટીનું છે. તેના અંદરના ભાગનું નથી.

આકૃતિ A1માં કાળા પદાર્થના વિકિરણ વક્રોનું ખૂબ જ અર્થપૂર્ણ લક્ષણ એ છે કે વક્રો સાર્વત્રિક છે. તે ફક્ત તાપમાન ઉપર આધાર છે પણ પરિમાણ, આકાર અથવા કાળા પદાર્થના દ્રવ્ય પર આધારિત નથી. વીસમી સદીની શરૂઆતમાં કાળા પદાર્થનાં વિકિરણોની સૈદ્ધાંતિક સમજૂતીના પ્રયત્નોએ ભૌતિકવિજ્ઞાનમાં ક્વૉન્ટમ વાદની ક્રાંતિને ઉત્તેજન આપ્યું. જે તમે હવે પછીના અભ્યાસક્રમમાં શીખશો.

ખૂબ જ મોટાં અંતરો સુધી માધ્યમની ગેરહાજરીમાં (શૂન્યાવકાશમાં) ઊર્જાનું સ્થળાંતર વિકિરણ દ્વારા કરી શકાય છે. નિરપેક્ષ તાપમાન T એ પદાર્થમાંથી ઉત્સર્જિત કુલ વિદ્યુતચુંબકીય ઊર્જા તેના પરિમાણ, તેની ઉત્સર્જન-ક્ષમતા (ઉત્સર્જકતા) અને સૌથી મહત્ત્વનું તેનાં તાપમાન પર આધારિત હોય છે. સંપૂર્ણ ઉત્સર્જક પદાર્થ માટે એકમ સમયમાં ઉત્સર્જિત ઊર્જા (H) નીચે મુજબ આપી શકાય છે :

$$H = A\sigma T^4 \qquad \text{(A2)}$$

જ્યાં, A ક્ષેત્રફળ અને T પદાર્થનું નિરપેક્ષ તાપમાન છે. આ સંબંધ પ્રાયોગિક રીતે સ્ટિફન દ્વારા સાબિત થયો અને પછી સૈદ્ધાંતિક રીતે બૉલ્ટ્ઝમૅને સાબિત કર્યો જેને **સ્ટિફન બૉલ્ટ્ઝમૅન નિયમ** કહે છે અને અચળાંક σ ને સ્ટિફન બૉલ્ટ્ઝમૅન અચળાંક કહે છે. તેનું SI એકમમાં મૂલ્ય 5.67×10^{8} W m^2 K^4 છે. મોટા ભાગના પદાર્થો સમીકરણ A2 વડે મળતી ઉષ્માના દરનો કેટલોક જ ભાગ ઉત્સર્જિત કરે છે. દીવાની મેશ (Lamp Black) જેવા પદાર્થો આ મર્યાદાની ખૂબ જ નજીક ગણી શકાય. માટે પરિમાણરહિત ઉત્સર્જકતા તરીકે ઓળખાતો ગુણોત્તર eને વ્યાખ્યાયિત કરીને,

$$H = Ae\sigma T^4 \qquad \text{(A3)}$$

લખી શકાય છે :

અહીં સંપૂર્ણ ઉત્સર્જક માટે $e = 1$. ઉદાહરણ તરીકે ટંગસ્ટન બલ્બ માટે e = લગભગ 0.4 છે. આથી, ટંગસ્ટન બલ્બના 3000 K તાપમાને અને 0.3 cm^2 સપાટીનાં ક્ષેત્રફળમાંથી ઉત્સર્જિત ઊર્જાનો દર $H = 0.3 \times 10^{-4} \times 0.4 \times 5.06 \times 10^{-8} \times (3000)^4 = 60$ W.

T_s તાપમાનવાળા પરિસરમાં રાખેલ T તાપમાનવાળો પદાર્થ ઊર્જાનું ઉત્સર્જન કરે છે તે જ રીતે મેળવે છે. સંપૂર્ણ ઉત્સર્જક પદાર્થ માટે વિકિરણ ઊર્જા ગુમાવવાનો ચોખ્ખો દર

$$H = \sigma A(T^4 - T_s^4)$$

e ઉત્સર્જકતા ધરાવતા પદાર્થ માટે ઉપર્યુક્ત સંબંધ થોડા ફેરફાર સાથે નીચે મુજબ આપી શકાય :

$$H = e\sigma A(T^4 - T_s^4) \qquad \text{(A4)}$$

ઉદાહરણ તરીકે, આપણા શરીરમાંથી ઉત્સર્જિત ઉષ્માનો અંદાજ કાઢીએ. ધારો કે એક વ્યક્તિનાં શરીરની સપાટીનું ક્ષેત્રફળ 1.9 m^2 જેટલું છે અને ઓરડાનું તાપમાન 22 °C છે. આપણે જાણીએ છીએ તે મુજબ શરીરનું આંતરિક તાપમાન 37 °C જેટલું હોય છે. ચામડીનું તાપમાન 28 °C (ધારો કે) હોઈ શકે. વિદ્યુતચુંબકીય વિકિરણ ઉત્સર્જન માટે સંકળાયેલ ચામડીની ઉત્સર્જકતા 0.97 છે, તો ઊર્જા ગુમાવવાનો દર;

$$H = 5.67 \times 10^{-8} \times 1.9 \times 0.97 \times \{(301)^4 - (295)^4\}$$
$$= 66.4 \text{ W}$$

જે સ્થિર સ્થિતિમાં શરીર દ્વારા ઉત્પાદિત થતી ઊર્જાના દર (120 W) કરતાં અડધાથી વધુ છે. આ ઉષ્માવ્યય અસરકારક રીતે ઘટાડવા (સામાન્ય કપડાં કરતાં વધુ સારાં) આધુનિક આર્કટિક (ઉત્તર ધ્રુવ પ્રદેશના) કપડાંઓમાં પાતળું, ચળકાટવાળું ધાતુનું વધારાનું આવરણ હોય છે, જે ચામડીની આગળ હોવાથી શરીરનાં વિકિરણોને પરાવર્તિત કરે છે.

11.9.5 ગ્રીનહાઉસ અસર (Green House Effect)

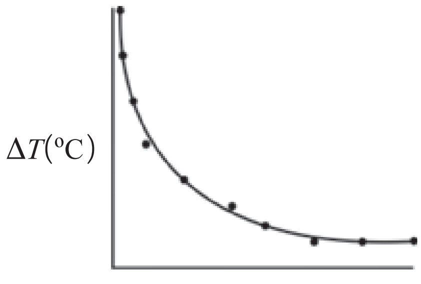
સૂર્યમાંથી મેળવેલ ઊર્જાનું પૃથ્વી શોષણ કરી ઉત્સર્જન કરે છે, તેથી તેની સપાટી ઉષ્મીય વિકિરણનો સ્રોત છે. આ વિકિરણોની તરંગલંબાઈ લાંબી તરંગલંબાઈના (ઇન્ફ્રારેડ) વિભાગમાં હોય છે. પરંતુ આ વિકિરણનો મોટો ભાગ ગ્રીનહાઉસ વાયુઓ જેવા કે, કાર્બન ડાયૉક્સાઇડ (CO_2), મીથેન (CH_4), નાઇટ્રસ ઑક્સાઇડ (N_2O), ક્લોરોફ્લોરો કાર્બન (CF_xCl_x) અને ટ્રોપોસ્ફિયરિક ઓઝોન (O_3) વડે શોષાય છે. આ ઉષ્મા વાતાવરણને ગરમ કરે છે અને ફરીથી પૃથ્વીને વધુ ઊર્જા આપે છે. પરિણામે પૃથ્વીની સપાટી હુંફાળી રહે છે. આને કારણે સપાટીનાં વિકિરણોની તીવ્રતા વધે છે. ઉપર વર્ણવેલ પ્રક્રિયાનું ચક્ર, શોષણ માટે વિકિરણ ન મળે ત્યાં સુધી ચાલુ રહે છે. અંતિમ પરિણામ સ્વરૂપે પૃથ્વીની સપાટી અને વાતાવરણ ગરમ થાય છે. જેને **ગ્રીનહાઉસ અસર** કહે છે. ગ્રીનહાઉસ અસર ન હોય તો પૃથ્વીનું તાપમાન −18 °C હોત.

માનવીય પ્રવૃત્તિઓને કારણે ગ્રીનહાઉસ વાયુની સાંદ્રતામાં વધારો થયો છે જે પૃથ્વીને વધુ ગરમ બનાવી રહી છે. આ વધારાને કારણે એક અંદાજ મુજબ આ શતાબ્દીની શરૂઆતથી પૃથ્વીના સરેરાશ તાપમાનમાં 0.3 થી 0.6 °C જેટલો વધારો થઈ રહ્યો છે. પરંતુ હવે પછીની શતાબ્દીના મધ્ય ભાગે આખી પૃથ્વીનું (ગ્લોબલ વિશ્વ વ્યાપક) તાપમાન આજના તાપમાન કરતાં 1 °C થી 3 °C જેટલું વધારે હશે. આ ગ્લોબલ વૉર્મિંગ માનવજીવન, વનસ્પતિઓ અને પ્રાણીઓ માટે મુસીબતનું કારણ બનશે. ગ્લોબલ વૉર્મિંગ (વિશ્વ વ્યાપક ગરમી)ને કારણે હિમશીલાઓ ઝડપથી પીગળશે, સમુદ્રની સપાટી વધશે અને વાતાવરણની રચના (ભાત) બદલાશે. ઘણા દરિયાકિનારાનાં શહેરો ડૂબી જવાનાં ભયસ્થાને છે. ગ્રીનહાઉસ અસરનાં વધારાને પરિણામે રણ વિસ્તારમાં વધારો થશે. સમગ્ર દુનિયા ગ્લોબલ વૉર્મિંગની અસરને લઘુતમ કરવા માટેના પ્રયત્નો કરે છે.

11.10 ન્યૂટનનો શીતનનો નિયમ (NEWTON'S LAW OF COOLING)

આપણે જાણીએ છીએ કે ગરમ પાણી કે ગરમ દૂધને ટેબલ પર મૂકી રાખવામાં આવે, તો તે ધીમે ધીમે ઠંડા પડવાની શરૂઆત કરે છે અને છેવટે પરિસરનાં તાપમાને પહોંચે છે. આપેલ પદાર્થ તેના પરિસર સાથે ઉષ્માનો વિનિમય કરીને કેવી રીતે ઠંડા પડે છે. તેનો અભ્યાસ કરવા નીચે મુજબની પ્રવૃત્તિ કરીએ :

ભેળક સાથેના કૅલોરિમીટરમાં કેટલુંક પાણી, ધારો કે 300 ml લઈ તેને બે છિદ્રોવાળાં ઢાંકણાં વડે બંધ કરો. થરમૉમીટરને એક છિદ્રમાંથી પસાર કરી તેમાં મૂકો. થરમૉમીટરનો બલ્બ (પારાવાળો ભાગ) પાણીમાં ડૂબે તેની ખાતરી કરો. થરમૉમીટરનું અવલોકન નોંધો. આ અવલોકન પરિસરનું તાપમાન T_1 છે. કૅલોરિમીટરમાં લીધેલા પાણીનું તાપમાન ઓરડાનાં તાપમાનથી વધુ (એટલે કે પરિસરનાં તાપમાન) એટલે કે 40 °C થાય ત્યાં સુધી ગરમ કરો. ઉષ્માપ્રાપ્તિસ્થાન દૂર કરી પાણીને ગરમ કરવાનું બંધ કરો. સ્ટૉપવૉચ શરૂ કરીને સમયના ચોક્કસ ગાળાઓ માટે, જેમકે, પ્રત્યેક મિનિટે ભેળક વડે પાણીને સતત હલાવતાં રહો અને થરમૉમીટરના અવલોકનો નોંધો. પાણીનું તાપમાન T_2 પરિસરના તાપમાનથી 5 °C વધુ થાય ત્યાં સુધી સતત તાપમાન નોંધો. ત્યાર બાદ તાપમાનનાં બધાં જ મૂલ્યો માટે $\Delta T = T_2 - T_1$ને Y-અક્ષ પર અને તેને અનુરૂપ સમય tને X-અક્ષ પર લઈ આલેખ દોરો (આકૃતિ 11.18).



આકૃતિ **11.18** *સમય સાથે ગરમ પાણીનું શીતન દર્શાવતો આલેખ*

આલેખ પરથી તમે તારવી શકો છો કે કેવી રીતે ગરમ પાણીનું શીતન પોતાના અને પરિસરનાં તાપમાનના તફાવત પર આધારિત છે. તમે તે પણ નોંધ લઈ શકો છો કે પ્રારંભમાં શીતનનો દર વધારે અને પદાર્થનું તાપમાન ઘટે તેમ તે ઘટે છે.

ઉપર્યુક્ત પ્રવૃત્તિ દર્શાવે છે કે ગરમ પદાર્થ તેની ઉષ્મા પરિસરમાં ઉષ્માવિકિરણ સ્વરૂપે ગુમાવે છે. ઉષ્મા ગુમાવવાનો દર પદાર્થ અને તેના પરિસર વચ્ચેનાં તાપમાનના તફાવત પર આધારિત છે. ન્યૂટન એવા પ્રથમ વૈજ્ઞાનિક હતા જેમણે બંધ પ્રણાલીની અંદર રહેલા પદાર્થ દ્વારા ગુમાવાતી ઉષ્મા તથા તેના તાપમાન વચ્ચેના સંબંધનો યોજનાબદ્ધ અભ્યાસ કર્યો.

ન્યૂટનના શીતનના નિયમ અનુસાર, કોઈ પદાર્થના ઉષ્મા ગુમાવવાનો દર $-dQ/dt$ પદાર્થ અને તેના પરિસર વચ્ચેનાં તાપમાનના તફાવત $\Delta T = (T_2 - T_1)$ને સપ્રમાણ હોય છે. આ નિયમ નાના તાપમાન તફાવત માટે જ પળાય છે. ઉપરાંત વિકિરણ દ્વારા ગુમાવાતી ઉષ્મા પદાર્થની સપાટીની પ્રકૃતિ અને ખુલ્લી સપાટીનાં ક્ષેત્રફળ પર આધારિત છે. માટે આપણે લખી શકીએ કે,

$$-\frac{dQ}{dt} = k(T_2 - T_1) \qquad (11.15)$$

જ્યાં, k સપ્રમાણતાનો ધન અચળાંક છે. જે પદાર્થની સપાટીની પ્રકૃતિ અને ક્ષેત્રફળ પર આધારિત છે. ધારો કે, T_2 તાપમાને પદાર્થનું દળ m અને વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા s છે. ધારો કે પરિસરનું તાપમાન T_1 છે. જો dt જેટલા સમયમાં તાપમાનમાં થતો નાનો ઘટાડો dT_2 હોય, તો ગુમાવાતી ઉષ્માનો જથ્થો,

$$dQ = ms\, dT_2$$

∴ ઉષ્મા ગુમાવવાનો દર,

$$\frac{dQ}{dt} = ms\frac{dT_2}{dt} \qquad (11.16)$$

સમીકરણ (11.15) અને (11.16) પરથી,

$$-ms\frac{dT_2}{dt} = k(T_2 - T_1)$$

$$\frac{dT_2}{T_2 - T_1} = -\frac{k}{ms}dt = -K dt \qquad (11.17)$$

જ્યાં, $K = k / m\, s$

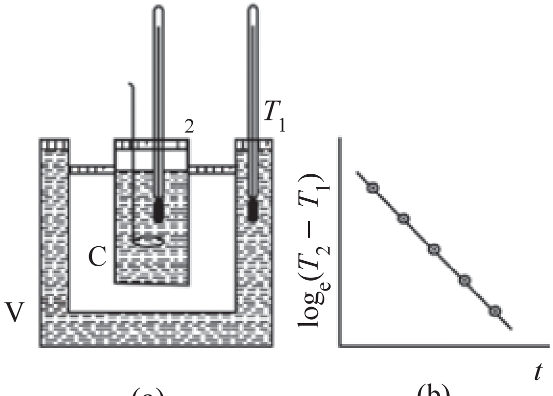
સંકલન કરતાં,

$$\log_e(T_2 - T_1) = -K\, t + c \qquad (11.18)$$

અથવા $T_2 = T_1 + C'\, e^{-Kt}$; જ્યાં, $C' = e^c$ (11.19)

સમીકરણ (11.19)ની મદદથી તાપમાનના ચોક્કસ વિસ્તાર માટે પદાર્થનાં શીતનના સમયની ગણતરી શક્ય છે.

તાપમાન તફાવતના નાના ગાળા માટે ઉષ્માવહન, ઉષ્માનયન અને ઉષ્માવિકિરણની સંયુક્ત રીતે શીતનનો દર તાપમાનના ફેરફારને સપ્રમાણ હોય છે. કોઈ રેડિએટરમાંથી ઓરડામાં સ્થાનાંતર પામતી ઉષ્મા, ઓરડાની દીવાલો દ્વારા થતો ઉષ્માવ્યય અથવા ટેબલ પર મૂકેલ કપમાં રહેલી ચાના શીતનમાં સાચી પડતી સન્નિકટતા છે.



આકૃતિ **11.19** *ન્યૂટનના શીતનના નિયમની ચકાસણી*

આકૃતિ 11.19(a)માં દર્શાવેલ પ્રાયોગિક ગોઠવણી દ્વારા ન્યૂટનનો શીતનનો નિયમ ચકાસી શકાય છે. આ ગોઠવણીમાં બે દીવાલ ધરાવતા પાત્ર (V)ની બે દીવાલોની વચ્ચે પાણી ભરેલું હોય છે. ગરમ પાણી ભરેલું તાંબાનું કૅલોરિમીટર (C) બે

દીવાલ ધરાવતાં પાત્રની અંદર મૂકવામાં આવે છે. બૂચની અંદરથી પસાર કરેલાં બે થરમૉમીટરની મદદથી કૅલોરિમીટરમાં રહેલા પાણીનું તાપમાન T_2 અને બે દીવાલોની વચ્ચે રહેલા ગરમ પાણીનું તાપમાન T_1 નોંધી શકાય છે. કૅલોરિમીટરમાં રહેલા ગરમ પાણીનું તાપમાન સમયના સમાન ગાળા માટે નોંધવામાં આવે છે. $\log_e(T_2 - T_1)$ અને સમય (t) વચ્ચે આલેખ દોરવામાં આવે છે. આ આલેખની પ્રકૃતિ આકૃતિ 11.19(b)માં દર્શાવ્યા મુજબ ઋણ ઢાળ ધરાવતી સુરેખા છે, જે સમીકરણ (11.18)ને અનુમોદિત કરે છે.

ઉદાહરણ 11.8 20 °C ઓરડાનાં તાપમાને એક વાસણમાં ભરેલ ગરમ ભોજન બે મિનિટમાં 94 °Cથી 86 °C જેટલું ઠંડું થાય છે. તેનું તાપમાન 71 °Cથી 69 °C થવા માટે કેટલો સમય લાગશે ?

ઉકેલ 94 °C અને 86 °Cનું સરેરાશ તાપમાન 90 °C થશે જે ઓરડાનાં તાપમાન કરતાં 70 °C વધુ છે. આ સ્થિતિમાં વાસણ 2 મિનિટમાં 8 °C જેટલું ઠંડું થાય છે. સમીકરણ 11.17નો ઉપયોગ કરતાં,

$$\frac{\text{તાપમાનમાં થતો ફેરફાર}}{\text{સમય}} = K\Delta T$$

$$\frac{8\ ^\circ\text{C}}{2\ \text{min}} = K(70\ ^\circ\text{C})$$

69 °C અને 71 °Cનું સરેરાશ તાપમાન 70 °C છે, જે ઓરડાના તાપમાન કરતાં 50 °C વધુ છે. આ સ્થિતિ માટે પણ K મૂળ સ્થિતિ જેટલો સમાન છે.

$$\frac{2\ ^\circ\text{C}}{\text{સમય}} = K(50\ ^\circ\text{C})$$

ઉપરનાં બંને સમીકરણોનો ભાગાકાર કરતાં,

$$\frac{8\ ^\circ\text{C}/2\ \text{min}}{2\ ^\circ\text{C}/\text{સમય}} = \frac{K\ (70\ ^\circ\text{C})}{K\ (50\ ^\circ\text{C})}$$

$$\text{સમય} = 0.7\ \text{min}$$

$$= 42\ \text{s}$$

સારાંશ

1. ઉષ્મા એ ઊર્જાનું સ્વરૂપ છે. જે પદાર્થ અને તેની આસપાસનાં માધ્યમ વચ્ચેનાં તાપમાનના તફાવતને કારણે તેમની વચ્ચે વહન પામે છે. પદાર્થનું ગરમપણું માત્રાત્મકરૂપે તાપમાન સ્વરૂપે નિરૂપિત કરવામાં આવે છે.
2. તાપમાનમાપક રચના (થરમૉમીટર)માં કેટલાક માપી શકાય તેવા ગુણધર્મો (જેને તાપીય ગુણધર્મો કહે છે)નો ઉપયોગ કરવામાં આવે છે, જે તાપમાન સાથે ફેરફાર અનુભવે છે. જુદાં જુદાં થરમૉમીટરો જુદાં જુદાં તાપમાન માપક્રમ ધરાવે છે. તાપમાન માપક્રમ તૈયાર કરવા માટે બે નિયત બિંદુઓ નક્કી કરવામાં આવે છે અને તેને અનુરૂપ તાપમાનનાં બે યાદચ્છિક મૂલ્યો નક્કી કરવામાં આવે છે. આ બે સંખ્યાઓ માપક્રમના ઉદ્‌ગમ અને તેના એકમનાં પરિમાણ નિશ્ચિત કરે છે.
3. સેલ્સિયસ માપક્રમ (t_C) અને ફેરનહીટ (t_F) વચ્ચેનો સંબંધ
$$t_F = (9/5)\ t_C + 32$$
4. દબાણ (P), કદ (V) અને નિરપેક્ષ તાપમાન (T) વચ્ચેનો સંબંધ દર્શાવતું આદર્શવાયુ સમીકરણ,
$$PV = \mu RT$$
જ્યાં, μ મોલ સંખ્યા અને R સાર્વત્રિક વાયુ નિયતાંક છે.
5. નિરપેક્ષ તાપમાન માપક્રમમાં માપક્રમનું શૂન્ય એ તાપમાન નિરપેક્ષ શૂન્ય છે. આ એવું તાપમાન છે કે જ્યાં, કુદરતમાં રહેલા પદાર્થોમાં થતી આણ્વિક પ્રક્રિયાઓ લઘુતમ હોય છે. કેલ્વિન નિરપેક્ષ તાપમાન માપક્રમ (T)ના એકમનું પરિમાણ અને સેલ્સિયસ તાપમાન માપક્રમ (t_C)ના એકમના પરિમાણ સમાન હોય છે. પરંતુ મૂળ બિંદુઓમાં તફાવત હોય છે.
$$T_C = T - 273.15$$
6. રેખીય પ્રસરણાંક (α_l) અને કદ-પ્રસરણાંક (α_v)ને નીચે આપેલ સંબંધ વડે વ્યાખ્યાયિત કરાય છે :
$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha_l \Delta T \qquad \frac{\Delta V}{V} = \alpha_V \Delta T$$
જ્યાં, Δl અને ΔV અનુક્રમે લંબાઈ l અને કદ Vનાં ΔT તાપમાને થતાં ફેરફારો દર્શાવે છે. તેમની વચ્ચેનો સંબંધ :
$$\alpha_v = 3\ \alpha_l$$

7. પદાર્થની વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા નીચે મુજબ વ્યાખ્યાયિત કરાય છે :

$$S = \frac{1}{m}\frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

જ્યાં, m પદાર્થનું દળ અને ΔQ તેના તાપમાનમાં ΔT જેટલો ફેરફાર કરવા માટેની જરૂરી ઉષ્મા છે. પદાર્થની મોલર વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા નીચે મુજબ વ્યાખ્યાયિત કરાય છે :

$$C = \frac{1}{\mu}\frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

જ્યાં, μ પદાર્થની મોલ સંખ્યા છે.

8. ગલન ગુપ્ત ઉષ્મા (L_F), સમાન તાપમાન અને દબાણે એકમ દળ ધરાવતાં ઘન પદાર્થને પ્રવાહીમાં રૂપાંતર કરવા માટે જરૂરી ઉષ્મા છે.

   બાષ્પાયન ગુપ્ત ઉષ્મા (L_v), તાપમાન અને દબાણમાં ફેરફાર થયા વગર એકમ દળનાં પ્રવાહીને વાયુમાં રૂપાંતર કરવા માટે જરૂરી ઉષ્મા છે.

9. ઉષ્મા-પ્રસરણની ત્રણ રીતો છે : ઉષ્માવહન, ઉષ્માનયન અને ઉષ્માવિકિરણ.

10. ઉષ્માવહનમાં, પદાર્થના પાસપાસે રહેલા વિભાગો વચ્ચે ઉષ્માનું પ્રસરણ અણુઓનાં દોલનો મારફતે થાય છે. જેમાં દ્રવ્યનું વહન થતું નથી. L લંબાઈ અને A નિયમિત આડછેદનું ક્ષેત્રફળ ધરાવતાં સળિયાના બે છેડાનું તાપમાન T_C અને T_D જેટલું જાળવી રાખવામાં આવેલ હોય ત્યારે ઉષ્માવહનનો દર H :

$$H = KA\,\frac{T_C - T_D}{L}$$

જ્યાં, K સળિયાના દ્રવ્યની ઉષ્માવાહકતા છે.

11. ન્યૂટનનાં શીતનના નિયમ અનુસાર, પદાર્થમાં શીતનનો દર પરિસર સાપેક્ષે પદાર્થના વધારાનાં તાપમાનને સપ્રમાણ હોય છે. $\frac{dQ}{dt} = -k(T_2 - T_1)$

   જ્યાં, T_1 પરિસર માધ્યમનું તાપમાન અને T_2 પદાર્થનું તાપમાન છે.

ભૌતિકરાશી	સંજ્ઞા	પારિમાણિક સૂત્ર	એકમ	નોંધ
પદાર્થનો જથ્થો	μ	[mol]	mol	
સેલ્સિયસ તાપમાન	t_c	[K]	°C	$t_c = T - 273.15$
કેલ્વિન નિરપેક્ષ તાપમાન	T	[K]	K	
રેખીય પ્રસરણાંક	α_l	$[K^{-1}]$	K^{-1}	
કદ-પ્રસરણાંક	α_v	$[K^{-1}]$	K^{-1}	$\alpha_v = 3\,\alpha_l$
તંત્રને આપેલ ઉષ્મા	ΔQ	$[ML^2T^{-2}]$	J	Q ચલિત અવસ્થા માટે નથી.
વિશિષ્ટ ઉષ્મા	s	$[L^2T^{-2}K^{-1}]$	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$	
ઉષ્માવાહકતા	K	$[MLT^{-3}K^{-1}]$	$J\ s^{-1}K^{-1}$	$H = -KA\frac{dT}{dx}$

ગહન વિચારણાના મુદ્દાઓ

1. કૅલ્વિન તાપમાન (T) અને સેલ્સિયસ તાપમાન (t_c)ને સાંકળતો સંબંધ
$T = t_c + 273.15$
અને પાણીનાં ત્રિબિંદુ માટે $T = 273.16$ K સંબંધ યથાર્થ છે (પસંદગી મુજબ). આ પસંદગી મુજબ, સેલ્સિયસ માપક્રમ પર બરફનું ગલનબિંદુ અને પાણીનું ઉત્કલનબિંદુ (બંને 1 વાતાવરણ દબાણે) અનુક્રમે 0 °C અને 100 °Cની ખૂબ જ નજીક છે, પરંતુ યથાર્થ રીતે તેનાં જેટલા જ નથી. તાજેતરમાં આ નિયત બિંદુનાં આ મુલ્યો મૂળ સેલ્સિયસ માપક્રમમાં 0 °C અને 100 °Cના જેટલા છે (પસંદગી મુજબ) પરંતુ હવે નિયત બિંદુ તરીકે પાણીનાં ત્રિબિંદુને પસંદ કરવામાં આવે છે. કારણ કે તેનું તાપમાન અનન્ય હોય છે.
2. પ્રવાહી વાયુ સાથે સંતુલિત સ્થિતિમાં હોય ત્યારે સમગ્ર તંત્રમાં તેમનાં તાપમાન તથા દબાણ સમાન હોય છે. સંતુલનમાં રહેલી બે અવસ્થાઓ તેમના કદ માટે જુદી પડે છે (એટલે કે ઘનતા). સંતુલિત સ્થિતિમાં રહેલી ગમે તેટલી સંખ્યાની અવસ્થા માટે આ બાબત સાચી છે.
3. ઉષ્મા સ્થાનાંતરમાં હંમેશાં બે તંત્રો અથવા એક જ તંત્રના બે ભાગો વચ્ચે તાપમાનનો તફાવત સંકળાયેલ હોય છે. ઊર્જાનું સ્થાનાંતર જેમાં કોઈ પણ તાપમાનનો તફાવત સંકળાયેલ ના હોય તે ઉષ્મા ન હોય.
4. ઉષ્માનયનમાં તરલના ભાગોનાં અસમાન તાપમાનને કારણે દ્રવ્યનું વહન સંકળાયેલ છે. કોઈ નળીમાંથી પડી રહેલ પાણીની ધાર નીચે ગરમ સળિયો મૂકતાં થતો ઉષ્માનો ઘટાડો, સળિયાની સપાટી અને પાણી વચ્ચે ઉષ્માવહનને લીધે થાય છે, નહિ કે પાણીમાં ઉષ્માનયનની રીતે.

સ્વાધ્યાય

11.1 નિયૉન અને કાર્બન ડાયૉક્સાઇડનાં ત્રિબિંદુ અનુક્રમે 24.57 K અને 216.55 K છે. આ તાપમાન મૂલ્યોને સેલ્સિયસ અને ફેરનહીટ માપક્રમમાં દર્શાવો.

11.2 બે નિરપેક્ષ માપક્રમ A અને B પર પાણીનું ત્રિબિંદુ 200 A અને 350 B દ્વારા વ્યાખ્યાયિત કરેલ છે, તો T_A અને T_B વચ્ચે શું સંબંધ હોઈ શકે ?

11.3 કેટલાક થરમૉમીટરનો વિદ્યુતીય અવરોધ ઓહ્‌મમાં તાપમાન સાથે નીચે દર્શાવેલ અંદાજિત નિયમ અનુસાર બદલાય છે :
$$R = R_0 [1 + \alpha (T - T_0)]$$
પાણીનાં ત્રિબિંદુ (273.16 K) એ થરમૉમીટરનો અવરોધ 101.6 Ω અને સીસાનાં સામાન્ય ગલનબિંદુ (600.5 K) પર અવરોધ 165.5 Ω છે, તો થર્મોમીટરનો અવરોધ 123.4 Ω હોય ત્યારે તેનું તાપમાન કેટલું હશે ?

11.4 નીચેનાના જવાબ આપો :

(a) આધુનિક થરમૉમેટ્રીમાં પાણીનું ત્રિબિંદુ પ્રમાણિત નિયત બિંદુ છે. શા માટે ? બરફનું ગલનબિંદુ અને પાણીના ઉત્કલન બિંદુને પ્રમાણભૂત નિયતબિંદુ સ્વીકારવામાં (જેમ મૂળ સેલ્સિયસ માપક્રમમાં સ્વીકારેલ) ખોટું શું છે ?

(b) ઉપર દર્શાવ્યા મુજબ મૂળ સેલ્સિયસ માપક્રમમાં બે નિયત બિંદુઓને અનુરૂપ નક્કી કરેલ સંખ્યાઓ અનુક્રમે 0 °C અને 100 °C છે. નિરપેક્ષ માપક્રમ પર બેમાંથી એક નિયત બિંદુ પાણી માટેનું ત્રિબિંદુ લેવામાં આવે છે. જેમાં કૅલ્વિન પ્રમાણભૂત માપક્રમ પર તેને અનુરૂપ સંખ્યા 273.16 K નક્કી કરેલ છે. આ માપક્રમ પર (કૅલ્વિન) બીજું નિયત બિંદુ શું હશે ?

(c) નિરપેક્ષ તાપમાન (કૅલ્વિન માપક્રમ) Tનો સેલ્સિયસ માપક્રમ તાપમાન t_c સાથેનો સંબંધ નીચે મુજબ છે :
$$t_c = T - 273.15$$
શા માટે આપણે આ સંબંધમાં 273.16 ને બદલે 273.15 લીધા છે ?

(d) નિરપેક્ષ માપક્રમ પર પાણીનાં ત્રિબિંદુ માટે એવું કયું તાપમાન છે કે જેના માટે એકમ ગાળાનું પરિમાણ ફેરનહીટ માપક્રમ પરના એકમ ગાળાનાં પરિમાણ જેટલું જ હશે ?

11.5 બે આદર્શ વાયુ, થરમૉમીટર A અને Bમાં અનુક્રમે ઑક્સિજન અને હાઇડ્રોજનનો ઉપયોગ કરવામાં આવ્યો છે. મળતાં અવલોકનો નીચે મુજબ છે :

તાપમાન	દબાણ થરમૉમીટર A	દબાણ થરમૉમીટર B
પાણીનું ત્રિબિંદુ	1.250×10^5 Pa	0.200×10^5 Pa
સલ્ફરનું સામાન્ય ગલનબિંદુ	1.797×10^5 Pa	0.287×10^5 Pa

(a) સલ્ફરનું સામાન્ય ગલનબિંદુનું નિરપેક્ષ તાપમાન થરમૉમીટર *A* અને *B*નાં વાંચન મુજબ શું હશે ?
(b) થરમૉમીટર *A* અને *B* ના જવાબમાં થોડો તફાવત હોવાનું કારણ તમારા મંતવ્ય મુજબ શું હોઈ શકે ? (બંને થરમૉમીટર ક્ષતિરહિત છે.) બંને વાંચનાંકો વચ્ચેની વિસંગતતા ઘટાડવા માટે આ પ્રયોગમાં કઈ પદ્ધતિ (કાર્યપ્રણાલી) જરૂરી છે ?

11.6 1 m લાંબી સ્ટીલની પટ્ટીનું 27.0 °C તાપમાને ચોકસાઈપૂર્વક અંકન કરેલ છે. ગરમ દિવસે જ્યારે તાપમાન 45 °C હોય ત્યારે સ્ટીલનાં એક સળિયાની લંબાઈ આ પટ્ટી વડે માપતાં તે 63.0 cm મળે છે. તો આ દિવસે સળિયાની વાસ્તવિક લંબાઈ શું હશે ? આ જ સ્ટીલનાં સળિયાની લંબાઈ 27.0 °C તાપમાનવાળા દિવસે કેટલી હશે ? સ્ટીલ માટે રેખીય પ્રસરણાંક = 1.20×10^{-5} K^{-1}.

11.7 એક મોટા સ્ટીલનાં પૈડાને તે જ દ્રવ્યની બનેલી મોટી ધરી ઉપર બંધબેસતું કરવું છે. 27 °C તાપમાને ધરીનો બહારનો વ્યાસ 8.70 cm અને પૈડાના કેન્દ્રમાં રહેલ છિદ્ર (હૉલ)નો વ્યાસ 8.69 cm છે. સૂકા બરફ વડે ધરીને ઠંડી કરેલ છે. ધરીનાં કયા તાપમાને પૈડું તેના પર સરકવા લાગશે. જરૂરી તાપમાનના વિસ્તાર માટે સ્ટીલનો રેખીય પ્રસરણાંક અચળ રહે છે. તેમ સ્વીકારો $\alpha_{\text{સ્ટીલ}} = 1.20 \times 10^{-5}$ K^{-1}.

11.8 તાંબાની એક તકતીમાં છિદ્ર પાડેલ છે. જેનો 27.0 °C તાપમાને વ્યાસ 4.24 cm છે. આ તાંબાની તક્તીને 227 °C સુધી ગરમ કરવામાં આવે, તો છિદ્રનાં વ્યાસમાં થતો ફેરફાર કેટલો હશે ? તાંબાનો રેખીય પ્રસરણાંક = 1.70×10^{-5} K^{-1}

11.9 27 °C તાપમાને 1.8 m લાંબા પિત્તળના તારને બે દૃઢ આધારો વચ્ચે અલ્પ તણાવ સાથે જડિત કરેલ છે. જો તારને –39 °C તાપમાન સુધી ઠંડો પાડવામાં આવે તો તારમાં ઉદ્ભવતો તણાવ કેટલો હશે ? તારનો વ્યાસ 2.0 mm છે. પિત્તળ માટે રેખીય પ્રસરણાંક 2.0×10^{-5} K^{-1} અને યંગ મૉડ્યુલસ = 0.91×10^{11} Pa.

11.10 50 cm લંબાઈ અને 3.0 mm વ્યાસવાળા પિત્તળના સળિયાને તેટલી જ લંબાઈ અને તેટલા જ વ્યાસ ધરાવતાં સ્ટીલના સળિયા સાથે જોડવામાં આવે છે. સંયુક્ત સળિયાની મૂળ લંબાઈ 40 °C તાપમાને છે. જે તાપમાન 250 °C કરવામાં આવે, તો આ લંબાઈમાં થતો ફેરફાર કેટલો હશે ? શું જંક્શન પર ઉષ્મીય પ્રતિબળ ઉદ્ભવશે ? સળિયાના છેડાઓ પ્રસરણ પામવા માટે મુક્ત છે. (પિત્તળ માટે રેખીય પ્રસરણાંક = 2.0×10^{-5} K^{-1}, સ્ટીલ માટે રેખીય પ્રસરણાંક = 1.2×10^{-5} K^{-1}.

11.11 ગ્લિસરિન માટે કદ-પ્રસરણાંક 49×10^{-5} K^{-1} છે. જો તેનાં તાપમાનમાં 30 °C નો વધારો કરવામાં આવે, તો તેની ઘનતામાં થતો આંશિક ફેરફાર કેટલો હશે ?

11.12 8.0 kg દળના ઍલ્યુમિનિયમના એક બ્લૉકમાં છિદ્ર પાડવા માટે 10 kWનાં ડ્રિલમશીનનો ઉપયોગ કરવામાં આવે છે. 2.5 મિનિટમાં બ્લૉકનાં તાપમાનમાં કેટલો વધારો થશે ? 50 % પાવર ડ્રિલમશીનને ગરમ થવામાં અથવા પરિસરમાં વ્યય થાય છે તેમ ધારો. ઍલ્યુમિનિયમની વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા = 0.91 J g^{-1} K^{-1}.

11.13 2.5 kg દળના તાંબાના એક બ્લૉકને ભઠ્ઠીમાં 500 °C તાપમાન સુધી ગરમ કરવામાં આવે છે. ત્યાર બાદ તેને મોટા બરફના બ્લૉક ઉપર મૂકવામાં આવે છે. કેટલા મહત્તમ જથ્થાનો બરફ ઓગળશે ? (તાંબાની વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા = 0.39 J g^{-1} K^{-1}, પાણી માટે ગલન ગુપ્ત ઉષ્મા = 335 J g^{-1}).

11.14 ધાતુની વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતાનાં પ્રયોગમાં 150 °C તાપમાને રહેલા 0.20 kg દળવાળા ધાતુના બ્લૉકને તાંબાનાં કેલોરિમીટરમાં મૂકવામાં આવે છે. (પાણીનો જળતુલ્યાંક 0.025 kg) જેમાં 150 cm^3 પાણી 27 °C તાપમાને આવેલું છે. અંતિમ તાપમાન 40 °C થાય છે. ધાતુની વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતાની ગણતરી કરો. જો પરિસરમાં વ્યય થતી ઉષ્માને અવગણવામાં ન આવે તો કરેલ ગણતરી દ્વારા મળતો આપનો જવાબ ધાતુની વાસ્તવિક ઉષ્માધારિતાના મૂલ્યથી વધુ હશે કે ઓછો ?

11.15 ઓરડાનાં તાપમાને કેટલાક સામાન્ય વાયુઓ માટે મોલર વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતાનાં અવલોકનો નીચે આપેલા છે :

ગૅસ	મોલર વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા (C_v) (cal mol^{-1} K^{-1})
હાઇડ્રોજન	4.87
નાઇટ્રોજન	4.97
ઑક્સિજન	5.02
નાઇટ્રિક ઑક્સાઇડ	4.99
કાર્બન મૉનોક્સાઇડ	5.01
ક્લોરિન	6.17

આ વાયુઓ માટે આપેલ મોલર વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતાઓ એક પરમાણ્વિક વાયુની મોલર વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતાથી સ્પષ્ટ રીતે જુદી છે. પ્રતિકાત્મક રીતે એક પરમાણ્વિક વાયુની મોલર વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા 2.92 cal/mol K છે. આ તફાવતનું સ્પષ્ટીકરણ કરો. ક્લોરિન માટે આ મૂલ્ય વધુ (બાકીના કરતાં) છે. તે માટે તમે શું નિષ્કર્ષ તારવશો ?

11.16 કાર્બન ડાયૉક્સાઇડ માટેનાં $P - T$ ફેઝ ડાયગ્રામ પર આધારિત નીચેના પ્રશ્નોના જવાબ આપો :

(a) ક્યા તાપમાને અને દબાણે CO_2ના ઘન, પ્રવાહી અને વાયુ અવસ્થાઓ સંતુલિત સ્થિતિમાં સહ અસ્તિત્વમાં હશે ?

(b) દબાણના ઘટાડા સાથે CO_2ના ગલનબિંદુ અને ઉત્કલનબિંદુ પર શું અસર થશે ?

(c) CO_2 માટે ક્રાંતિક તાપમાન અને દબાણ શું છે ? તેનું મહત્ત્વ શું છે ?

(d) (i) $-70\ ^\circ C$ તાપમાને અને 1 વાતાવરણ દબાણે

(ii) $-60\ ^\circ C$ તાપમાને અને 10 વાતાવરણ દબાણે

(iii) $15\ ^\circ C$ તાપમાને અને 56 વાતાવરણ દબાણે

CO_2 ઘન, પ્રવાહી અને વાયુ પૈકી કઈ અવસ્થામાં હશે ?

11.17 CO_2ના $P - T$ ફેઝ ડાયગ્રામને આધારે નીચેના પ્રશ્નોના જવાબ આપો :

(a) 1 વાતાવરણ દબાણે અને $-60\ ^\circ C$ તાપમાને CO_2નું સમતાપી સંકોચન કરવામાં આવે છે. શું તે પ્રવાહી અવસ્થામાં જશે ?

(b) CO_2નું દબાણ 4 વાતાવરણ જેટલું અચળ રાખીને તેનું ઓરડાનાં તાપમાન સુધી ઠારણ કરાવવામાં આવે તો શું થાય ?

(c) 10 વાતાવરણ દબાણે અને $-65\ ^\circ C$ તાપમાને આપેલ જથ્થાનાં ઘન CO_2નું દબાણ અચળ રાખી ઓરડાનાં તાપમાને તેને ગરમ કરતાં થતાં ગુણાત્મક ફેરફારોનું વર્ણન કરો.

(d) CO_2ને $70\ ^\circ C$ સુધી ગરમ કરી સમતાપી સંકોચન કરવામાં આવે છે. અવલોકન માટે તમે તેનાં કયા ગુણધર્મોમાં ફેરફારની અપેક્ષા રાખશો ?

11.18 $101\ ^\circ F$ તાપમાન ધરાવતા એક બાળકને એન્ટિપાઇરિન (તાવ ઘટાડવા માટેની દવા) આપવામાં આવે છે. જેને કારણે તેના શરીરમાં પરસેવાનો બાષ્પાયનો સરેરાશ દર વધે છે. જો 20 મિનિટમાં તાવ $98\ ^\circ F$ સુધી નીચે આવી જાય છે તો દવા દ્વારા થતાં વધારાના બાષ્પાયનનો દર કેટલો હશે ? એમ સ્વીકારો કે ઉષ્માવ્યયનો એકમાત્ર રસ્તો બાષ્પાયન છે. બાળકનું દ્રવ્યમાન 30 kg છે. માનવશરીરની વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા આશરે પાણીની ઉષ્માધારિતા જેટલી જ છે. આ તાપમાને પાણીની બાષ્પાયન ગુપ્ત ઉષ્મા 580 cal g^{-1} છે.

11.19 થરમૉકોલના આઇસબૉક્સમાં ઉનાળાની ઋતુમાં ઓછી માત્રામાં રાંધેલા ખોરાકને સાચવવાની રીત સસ્તી અને કાર્યક્ષમ છે. 30 cmની બાજુવાળા સમઘન આઇસબૉક્સની જાડાઈ 5.0 cm છે. જો 4.0 kg બરફને તેમાં મુકવામાં આવે તો 6 કલાક બાદ તેમાં રહેલા બરફનાં જથ્થાનો અંદાજ મેળવો. બહારનું તાપમાન $45\ ^\circ C$ છે. થરમૉકોલની ઉષ્માવાહકતા 0.01 J s^{-1} m^{-1} K^{-1} છે.
(પાણીની ગલનગુપ્ત ઉષ્મા $= 335 \times 10^3$ J kg^{-1})

11.20 0.15 m^2 પાયાનું ક્ષેત્રફળ ધરાવતા પિત્તળનાં બોઇલરની જાડાઈ 1.0 cm છે. તેને ગૅસસ્ટવ પર મૂકતાં તે 6.0 kg/min ના દરથી પાણી ઉકાળે છે. બોઇલરનાં સંપર્કમાં રહેલી જ્યોતનાં તાપમાનનું અનુમાન કરો. પિત્તળની ઉષ્માવાહકતા = 109 J s^{-1} m^{-1} K^{-1}, પાણીની બાષ્પાયન ઉષ્મા $= 2256 \times 10^3$ J kg^{-1}.

11.21 સ્પષ્ટતા કરો શા માટે :

(a) વધુ પરાવર્તકતા ધરાવતો પદાર્થ ઓછો ઉત્સર્જક હોય છે.

(b) ખૂબ ઠંડીના દિવસોમાં પિત્તળનું ટમ્બલર, લાકડાની ટ્રે કરતાં વધુ ઠંડું લાગે છે.

(c) આદર્શ કાળા પદાર્થના વિકિરણ માટે જેનું અંકન કરવામાં આવ્યું છે, તેવું ઑપ્ટિકલ પાયરોમીટર (ઊંચા તાપમાન માપવા માટે) ખુલ્લામાં રાખેલ ગરમ લાલચોળ લોખંડના ટુકડાનું તાપમાન નીચું દર્શાવે છે. પરંતુ તે જ લોખંડના ટુકડાને ભઠ્ઠીમાં મૂકેલ હોય ત્યારે તાપમાનનું સાચું મૂલ્ય આપે છે.

(d) પૃથ્વી તેના વાતાવરણ વગર પ્રતિકૂળ રીતે ઠંડી થઈ જાય છે.

(e) બિલ્ડિંગને હુંફાળું રાખવા માટેનાં, ગરમ પાણીનાં ભ્રમણ પર આધારિત તાપયંત્રો કરતાં વરાળ પરિભ્રમણ પર આધારિત તાપયંત્રો વધુ કાર્યક્ષમ હોય છે.

11.22 એક પદાર્થ 5 minમાં $80\ ^\circ C$ થી $50\ ^\circ C$ સુધી ઠંડો થાય છે. તેને $60\ ^\circ C$ થી $30\ ^\circ C$ સુધી ઠંડો પાડવા માટે લાગતો સમય શોધો. પરિસરનું તાપમાન $20\ ^\circ C$ છે.

પ્રકરણ 12

થરમૉડાયનેમિક્સ (THERMODYNAMICS)

12.1 પ્રસ્તાવના
12.2 તાપીય સંતુલન
12.3 થરમૉડાયનેમિક્સનો શૂન્ય ક્રમનો નિયમ
12.4 ઉષ્મા, આંતરિક ઊર્જા અને કાર્ય
12.5 થરમૉડાયનેમિક્સનો પ્રથમ નિયમ
12.6 વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા (ક્ષમતા)
12.7 થરમૉડાયનેમિક અવસ્થા ચલ રાશિઓ અને અવસ્થા સમીકરણ
12.8 થરમૉડાયનેમિક પ્રક્રિયાઓ
12.9 ઉષ્મા એન્જિનો
12.10 રેફ્રિજરેટરો અને હીટ (ઉષ્મા) પંપો
12.11 થરમૉડાયનેમિક્સનો બીજો નિયમ
12.12 પ્રતિવર્તી અને અપ્રતિવર્તી પ્રક્રિયાઓ
12.13 કાર્નોટ એન્જિન
સારાંશ
ગહન વિચારણાના મુદ્દાઓ
સ્વાધ્યાય

12.1 પ્રસ્તાવના (INTRODUCTION)

આગળના પ્રકરણમાં આપણે દ્રવ્યના ઉષ્મીય ગુણધર્મોનો અભ્યાસ કર્યો. આ પ્રકરણમાં આપણે ઉષ્માઊર્જા (Thermal Energy)નું નિયમન કરતા નિયમોનો અભ્યાસ કરીશું. આપણે એવી પ્રક્રિયાઓનો અભ્યાસ કરીશું કે જેમાં કાર્યનું ઉષ્મામાં રૂપાંતરણ થતું હોય અને તેથી વિરુદ્ધ પણ થતું હોય. શિયાળામાં, જ્યારે આપણે આપણી હથેળીઓ એકબીજાની સાથે ઘસીએ ત્યારે આપણને ગરમાવો લાગે (અનુભવાય) છે. અહીં હથેળીમાં ઘસવા માટે થયેલ કાર્યથી ઉષ્મા ઉત્પન્ન થાય છે. બીજી બાજુ, વરાળયંત્ર (Steam Engine)માં બાષ્પ(વરાળ)ની 'ઉષ્મા'નો ઉપયોગ પિસ્ટનને ગતિ આપવાના ઉપયોગી કાર્યમાં થાય છે, જેને પરિણામે ટ્રેનનાં પૈડાં ફરે છે.

ભૌતિકવિજ્ઞાનમાં, આપણે ઉષ્મા, તાપમાન, કાર્ય વગેરેના સિદ્ધાંતો સમજીને (ધ્યાનપૂર્વક) વ્યાખ્યાયિત કરવા જોઈએ. ઐતિહાસિક રીતે, 'ઉષ્મા'ના યોગ્ય ખ્યાલો સુધી પહોંચવા માટે ઘણો સમય લાગ્યો છે. આધુનિક ખ્યાલ પહેલાં, ઉષ્માને સમાંગ અદૃશ્ય પ્રવાહી સ્વરૂપની માનવામાં આવતી હતી, જે દ્રવ્યમાં રહેલ છિદ્રોમાં ભરાતી હતી. ગરમ અને ઠંડા પદાર્થો એકબીજાના સંપર્કમાં આવે ત્યારે, આ પ્રવાહી (જેને કેલરિક કહેવાતું) ઠંડા પદાર્થથી ગરમ પદાર્થ તરફ વહેતું હતું ! આ તો જુદી જુદી ઊંચાઈ સુધી પાણીભરેલી બે ટાંકીઓને એક સમક્ષિતિજ પાઇપ વડે જોડવા જેવું થયું. જ્યાં સુધી બંને ટાંકીઓમાં પાણી એક સરખી ઊંચાઈ સુધી ન પહોંચે ત્યાં સુધી આ પ્રવાહ ચાલ્યા કરે છે. તે જ રીતે, ઉષ્માના 'કેલરિક' સ્વરૂપમાં 'કેલરિક સ્તરો' (એટલે કે તાપમાન) સમાન ન થાય ત્યાં સુધી ઉષ્મા વહે છે.

સમય જતાં, આધુનિક ખ્યાલ મુજબ ઉષ્માના ઊર્જા-સ્વરૂપની સરખામણીમાં ઉષ્માના પ્રવાહી સ્વરૂપનો ખ્યાલ પડતો મૂકવામાં આવ્યો. તેના અનુસંધાનમાં એક અગત્યનો પ્રયોગ 1798માં બેન્જામિન થોમસન (જે કાઉન્ટ રુમ્ફર્ડના નામે પણ જાણીતા છે.) દ્વારા કરવામાં આવ્યો. તેમણે અનુભવ્યું કે પિત્તળની તોપ બનાવવા તેમાં કાણું પાડવાની પ્રક્રિયા દરમિયાન ખૂબ જ ઉષ્મા ઉત્પન્ન થાય છે, જે પાણીને ઉકાળવા માટે પૂરતી હોય છે. વધુ સ્પષ્ટ રૂપે કહીએ તો, (શારડી (Drill)ને ફેરવવા માટે ઘોડાઓના ઉપયોગ દ્વારા) ઉત્પન્ન થયેલ ઉષ્મા ફક્ત કાર્ય પર આધાર રાખે છે, નહિ કે શારડીની તીક્ષ્ણતા (અણી) પર. કેલરિક સ્વરૂપ મુજબ, અણીદાર શારડી, કાણાઓમાંથી વધારે ઉષ્મા બહાર કાઢે, પરંતુ તેવું જણાયું નહિ ! આ અવલોકનોનું પ્રાકૃતિક અર્થઘટન એવું થાય કે ઉષ્મા એ ઊર્જાનો એક પ્રકાર છે અને આ પ્રયોગે ઉષ્માનું એકમાંથી બીજા પ્રકાર - કાર્યમાંથી ઉષ્મામાં રૂપાંતરણ દર્શાવ્યું.

થરમૉડાયનેમિક્સ એ ભૌતિકવિજ્ઞાનની એવી શાખા છે કે જે ઉષ્મા અને તાપમાનના સિદ્ધાંતો તથા ઉષ્મા અને ઊર્જાનાં બીજા પ્રકારો વચ્ચેના આંતરિક રૂપાંતરણોની સાથે સંકળાયેલ છે. થરમૉડાયનેમિક્સ એ સ્થૂળ વિજ્ઞાન છે. તે સ્થૂળ તંત્રો સાથે કામ પાર પાડે છે તથા તે દ્રવ્યની આણ્વીક રચના સુધી ઊંડાણમાં જતું નથી. હકીકતમાં, દ્રવ્યનું આણ્વીય સ્વરૂપ દઢ રીતે સ્થાપિત થયું તે પહેલાં ઓગણીસમી સદીમાં તેના સિદ્ધાંતો અને નિયમો ઘડાયા હતા. થરમૉડાયનેમિક અર્થઘટન તંત્રની થોડીક સ્થૂળ ચલરાશિઓને સાંકળે છે, જે આપણી સામાન્ય સમજ વડે પણ સૂચવાયેલા છે અને સીધા માપી શકાય છે. દા.ત., કોઈ વાયુનું સૂક્ષ્મ અર્થઘટન કરવા, વાયુને રચનારા મોટી સંખ્યાના અણુઓના સ્થાન અને વેગનાં મૂલ્યો જોઈએ. વાયુના ગતિવાદમાં આપેલ અર્થઘટન વિગતવાર નથી છતાં તે અણુઓનાં વેગનું વિતરણ ધરાવે છે. બીજી તરફ, વાયુનું થરમૉડાયનેમિક અર્થઘટન, વાયુના આણ્વીક અર્થઘટનને અવગણે છે. આની સરખામણીમાં, થરમૉડાયનેમિક્સમાં વાયુની અવસ્થા સ્થૂળ ચલરાશિઓ જેવી કે દબાણ, કદ, તાપમાન, દળ અને મિશ્રણ આપણી ઇન્દ્રિયો વડે મર્યાદામાં અનુભવી શકાય અને માપી શકાય છે.*

યંત્રશાસ્ત્ર અને થરમૉડાયનેમિક્સ વચ્ચેનો ભેદ મનમાં યાદ રાખવા જેવો છે. યંત્રશાસ્ત્રમાં, આપણું ધ્યાન મુખ્યત્વે બળો કે ટૉર્કની અસર હેઠળ ગતિ કરતા કણો કે પદાર્થો પર હોય છે. થરમૉડાયનેમિક્સને સંપૂર્ણ તંત્રની ગતિ સાથે કોઈ લેવાદેવા નથી. તેને તો પદાર્થની આંતરિક સ્થૂળ અવસ્થા સાથે લેવાદેવા હોય છે. જ્યારે એક ગોળી (બુલિટ)ને બંદૂકમાંથી છોડવામાં આવે ત્યારે બુલિટની યાંત્રિક અવસ્થા (સ્પષ્ટ કહીએ તો, ગતિ ઊર્જા) બદલાય છે, તેનું તાપમાન નહિ. જ્યારે બુલિટ લાકડામાં ઘૂસીને અટકે છે ત્યારે તેની ગતિઊર્જાનું ઉષ્મામાં રૂપાંતરણ થાય છે, જે બુલિટ તથા લાકડાના આજુબાજુના સ્તરોનું તાપમાન બદલે છે. તાપમાન બુલિટની આંતરિક (અસ્તવ્યસ્ત) ગતિઊર્જા સાથે સાંકળાયેલ છે, નહિ કે આખી બુલિટની ગતિ સાથે.

12.2 તાપીય સંતુલન (THERMAL EQUILIBRIUM)

યંત્રશાસ્ત્રમાં સંતુલનનો મતલબ એ કે તંત્ર પર લાગતું ચોખ્ખું બાહ્ય બળ અને ટૉર્ક શૂન્ય છે. થરમૉડાયનેમિક્સમાં 'સંતુલન' શબ્દનો અર્થ અન્ય સંદર્ભમાં કરવામાં આવે છે : જો તંત્રને દર્શાવતી સ્થૂળ ચલરાશિઓ સમય સાથે બદલાતી ન હોય, તો તંત્ર સંતુલનની અવસ્થામાં છે તેમ કહેવાય. દા.ત., જે પરિસરથી બિલકુલ અલિપ્ત (અલગ - Insulated) કરેલ હોય, તેવા બંધ દઢ પાત્રમાં રહેલો વાયુ, જેનાં દબાણ, કદ, તાપમાન, દળ, સમય સાથે બદલાતાં ન હોય, તે થરમૉડાયનેમિક સંતુલનની અવસ્થામાં છે તેમ કહેવાય.

સામાન્ય રીતે, તંત્ર સંતુલનની અવસ્થામાં છે કે નહિ તેનો આધાર પરિસર પર અને તંત્રને પરિસરથી અલગ કરતી દીવાલના પ્રકાર પર આધાર રાખે છે. જુદાં જુદાં બે પાત્રોમાં રહેલા વાયુઓ A અને B લો. પ્રાયોગિક રીતે આપણે જાણીએ છીએ કે, આપેલ દળના વાયુનું દબાણ અને કદ તેના બે સ્વતંત્ર ચલ તરીકે લઈ શકીએ. ધારો કે આ વાયુઓના દબાણ અને કદ અનુક્રમે (P_A, V_A) અને (P_B, V_B) છે. પહેલાં ધારો કે બંને તંત્રોને બાજુ બાજુમાં રાખ્યાં છે પરંતુ એક બાજુની ઊર્જા (ઉષ્મા)નું બીજી બાજુ વહન ન થવા દે તેવી **સમોષ્મી દીવાલ (Adiabatic-Wall)**-અવાહક દીવાલ (જે ખસેડી શકાય તેવી હોય)થી જુદા પાડેલ છે. આ તંત્રોને અન્ય પરિસરથી આવી જ સમોષ્મી દીવાલો વડે જુદા પાડેલ છે. આ પરિસ્થિતિ, આકૃતિ 12.1(a)માં દર્શાવી છે. આ પરિસ્થિતિમાં (P_A, V_A) મૂલ્યોની કોઈ પણ શક્ય જોડ (P_B, V_B) મૂલ્યોની કોઈ પણ શક્ય જોડ સાથે સંતુલનમાં રહે છે. હવે, ધારો કે સમોષ્મી (Adiabatic) દીવાલની જગ્યાએ **ઉષ્માવાહક (Diathermic)** દીવાલ મૂકવામાં આવે છે. જે એક બાજુથી બીજી બાજુ ઊર્જા (ઉષ્મા) વહન થવા દે. હવે એવું જણાય છે કે જ્યાં સુધી બંને તંત્ર સંતુલનની સ્થિતિમાં ન આવે ત્યાં સુધી A અને B તંત્રની સ્થૂળ ચલરાશિઓ આપોઆપ બદલાતી રહે છે. ત્યાર બાદ તેમની અવસ્થામાં કોઈ ફેરફાર થતો નથી. આ પરિસ્થિતિ આકૃતિ 12.1(b)માં દર્શાવી છે. બંને વાયુઓની ચલરાશિઓ દબાણ અને કદ બદલાઈને $(P_B{'}, V_B{'})$ અને $(P_A{'}, V_A{'})$ થાય છે કે જેથી A અને Bની નવી અવસ્થાઓ એકબીજા સાથે સંતુલનમાં આવે.** ત્યાર બાદ એક તરફથી બીજી તરફ ઊર્જાનો વિનિમય નથી થતો. ત્યાર બાદ આપણે કહી શકીએ કે તંત્ર A, તંત્ર B સાથે તાપીય સંતુલનમાં છે.

બે તંત્રોના તાપીય સંતુલનની પરિસ્થિતિની લાક્ષણિકતા શું છે ? તમારા અનુભવ પરથી જવાબ વિચારી જુઓ. તાપીય સંતુલનમાં, બંને તંત્રોના તાપમાન સમાન છે. હવે આપણે એ

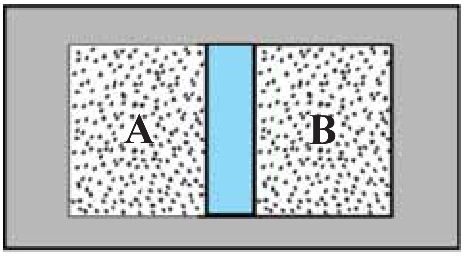
* *થરમૉડાયનેમિક્સમાં એવી ચલરાશિઓ પણ હોઈ શકે જે આપણી ઇન્દ્રિયો ખાસ અનુભવી શકતી ન હોય. દા.ત., એન્ટ્રોપી, એન્થાલ્પી વગેરે; અને તેઓ બધી સ્થૂળ ચલરાશિઓ છે.*

** *બંને ચલરાશિઓ બદલાવી જરૂરી નથી. તે અંકુશો (Constraints) પર આધારિત છે. દા.ત., જો વાયુઓ અચળ કદવાળા પાત્રોમાં હોય, તો તાપીય સંતુલન પ્રાપ્ત કરવા માટે ફક્ત વાયુઓના દબાણ જ બદલાત.*

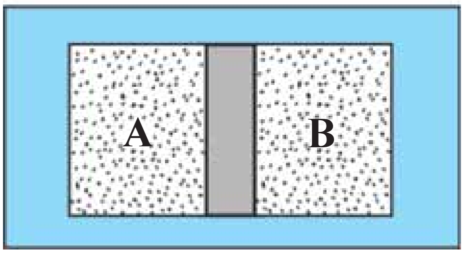
જોઈશું કે થરમૉડાયનેમિક્સમાં તાપમાનની વિભાવના (ખ્યાલ) સુધી કેવી રીતે આવવું ? થરમૉડાયનેમિક્સનો શૂન્ય ક્રમનો નિયમ તેનું સૂચન કરે છે.

12.3 થરમૉડાયનેમિક્સનો શૂન્ય ક્રમનો નિયમ (ZEROTH LAW OF THERMODYNAMICS)

ધારો કે બે તંત્રો *A* અને *B*, સમોષ્મી (ઉષ્મા અવાહક) દીવાલ વડે છૂટા પાડેલા છે અને આ દરેક તંત્ર ત્રીજા તંત્ર *C* સાથે ઉષ્માવાહક દીવાલ વડે સંપર્કમાં છે (આકૃતિ 12.2(a)). આ તંત્રોની અવસ્થાઓ (એટલે કે તેમની સ્થૂળ ચલરાશિઓ) જ્યાં સુધી બંને તંત્રો *A* અને *B*, *C* સાથે તાપીય સંતુલનમાં ન આવે ત્યાં સુધી બદલાતી રહેશે. આમ થયા બાદ, ધારો કે *A* અને *B* વચ્ચેની ઉષ્મા અવાહક દીવાલની જગ્યાએ ઉષ્માવાહક દીવાલ મૂકવામાં આવે છે અને *C* ને *A* અને *B*થી ઉષ્મા અવાહક દીવાલ વડે જુદું પાડવામાં આવે છે (આકૃતિ 12.2(b)). એવું જણાય છે કે *A* અને *B*ની અવસ્થાઓ હવે આગળ બદલાતી નથી, એટલે કે **તેઓ એકબીજા સાથે તાપીય સંતુલનમાં હોય છે**. આ અવલોકન **થરમૉડાયનેમિક્સના શૂન્ય ક્રમના નિયમનો** આધાર છે. જે દર્શાવે છે કે **'બે તંત્રો સ્વતંત્ર રીતે કોઈ ત્રીજા તંત્ર સાથે તાપીય સંતુલનમાં રહેલા હોય, તો તેઓ એકબીજા સાથે પણ તાપીય સંતુલનમાં હોય'.** થરમૉડાયનેમિક્સના પ્રથમ અને બીજા નિયમો સૂચવાયા અને તેમના ક્રમ આપવામાં આવ્યા ત્યારબાદ ઘણા સમય પછી ઈ.સ. 1931માં આર. એચ. ફાઉલરે આ નિયમ આપ્યો હતો.



(a)

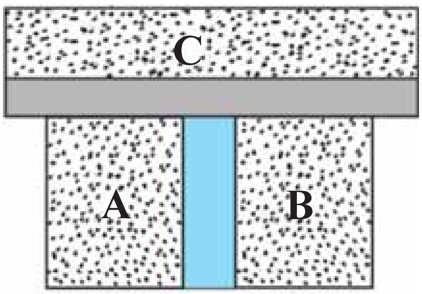


(b)

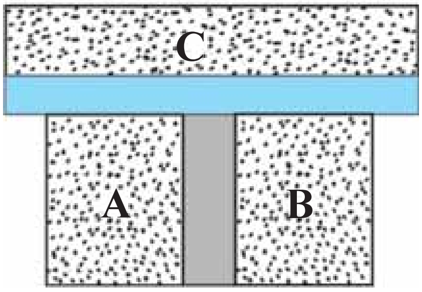
આકૃતિ 12.1 *(a) તંત્રો A અને B (બે વાયુઓ) જે ઉષ્માનું વહન ન થવા દે તેવી ઉષ્મા અવાહક દીવાલ વડે જુદા પાડેલ છે. (b) આ બંને તંત્રો A અને B ઉષ્માવાહક દીવાલ વડે જુદા પાડેલ છે. જે ઉષ્માને એક બાજુથી બીજી બાજુ વહેવા દે. આ કિસ્સામાં, સમય જતાં તાપીય સંતુલન મેળવી શકાય છે.*

શૂન્ય ક્રમનો નિયમ સ્પષ્ટ દર્શાવે છે કે જ્યારે બે તંત્રો *A* અને *B* તાપીય સંતુલનમાં હોય ત્યારે ત્યાં એવી કોઈ ભૌતિકરાશિ હોવી જોઈએ કે જેનું મૂલ્ય બંને માટે એક સમાન હોય. આ થરમૉડાયનેમિક્સ ચલરાશિ કે જેનું મૂલ્ય તાપીય સંતુલનમાં રહેલાં બંને તંત્રો માટે સમાન હોય તેને તાપમાન (T) કહે છે. આમ, જો *A* અને *B* બંને સ્વતંત્ર રીતે *C* સાથે સંતુલનમાં હોય, તો $T_A = T_C$ અને $T_B = T_C$. આ દર્શાવે છે કે $T_A = T_B$, એટલે કે તંત્રો *A* અને *B* પણ તાપીય સંતુલનમાં છે.

આપણે શૂન્ય ક્રમના નિયમ દ્વારા તાપમાનના ખ્યાલ સુધી પહોંચી ગયા છીએ. હવે પ્રશ્ન એ છે કે, જુદા જુદા પદાર્થોના તાપમાન સાથે તેનાં મૂલ્યો કેવી રીતે સાંકળવાં ? બીજા શબ્દોમાં, તાપમાનનો માપક્રમ કેવી રીતે રચવો ? થરમૉમેટ્રી કે જે આ પાયાના પ્રશ્ન સાથે સંકળાયેલ છે તેનો ઉલ્લેખ હવે પછીના પરિચ્છેદમાં આપણે કરીશું.



(a)



(b)

આકૃતિ 12.2 *(a) તંત્રો A અને Bને ઉષ્મા અવાહક દીવાલ વડે જુદા પાડેલ છે, જે દરેક ત્રીજા તંત્ર C સાથે ઉષ્માવાહક દીવાલ વડે સંપર્કમાં છે. (b) A અને B વચ્ચેની ઉષ્મા અવાહક દીવાલની જગ્યાએ ઉષ્માવાહક દીવાલ રાખવામાં આવે છે, જ્યારે Cને A અને Bથી ઉષ્મા અવાહક દીવાલ વડે અલગ કરવામાં (જુદી પાડવામાં) આવે છે.*

12.4 ઉષ્મા, આંતરિક ઊર્જા અને કાર્ય (HEAT, INTERNAL ENERGY AND WORK)

શૂન્ય ક્રમનો નિયમ આપણને તાપમાનના સિદ્ધાંત તરફ દોરી જાય છે, જે આપણી સામાન્ય બુદ્ધિનાં અવલોકનો સાથે

મળતો આવે છે. તાપમાન એ પદાર્થના 'ગરમપણાની' નિશાની છે. તે જ્યારે બે પદાર્થોને એકબીજાના સંપર્કમાં મૂક્યા હોય ત્યારે ઉષ્માવહનની દિશા નક્કી કરે છે. ઊંચા તાપમાને રહેલા પદાર્થ તરફથી નીચા તાપમાને રહેલા પદાર્થ તરફ ઉષ્મા વહે છે. જ્યારે તાપમાન સમાન થાય ત્યારે વહન અટકી જાય છે; હવે આ બંને પદાર્થો તાપીય સંતુલનમાં હોય છે. જુદા જુદા પદાર્થોનાં તાપમાન દર્શાવવા માટે તાપમાન માપક્રમ કેવી રીતે તૈયાર કરવા તે આપણે થોડા ઊંડાણપૂર્વક જોયું હતું. હવે આપણે ઉષ્મા અને તેવી બીજી રાશિઓ જેવી કે આંતરિક ઊર્જા અને કાર્યના ખ્યાલો સમજીશું.

તંત્રની આંતરિક ઊર્જાનો ખ્યાલ સમજવો અઘરો નથી. આપણે જાણીએ છીએ કે કોઈ પણ સ્થૂળ (Bulk) તંત્ર મોટી સંખ્યાના અણુઓ ધરાવે છે. આંતરિક ઊર્જા એ આ અણુઓની ગતિઊર્જા અને સ્થિતિઊર્જાનો સરવાળો જ છે. અગાઉ આપણે જણાવ્યું હતું કે, થરમૉડાયનેમિક્સમાં સમગ્રપણે તંત્રની ગતિઊર્જાનું મહત્ત્વ નથી. આથી આંતરિક ઊર્જા, જેની સાપેક્ષે તંત્રનું દ્રવ્યમાન કેન્દ્રની સ્થિર હોય તેવી નિર્દેશ ફ્રેમ (Frame of Reference)માં અણુઓની ગતિ અને સ્થિતિઊર્જાનો સરવાળો છે. આમ, તે ફક્ત તંત્રના અસ્તવ્યસ્ત ગતિ કરતા અણુઓ સાથે સંકળાયેલી (અવ્યવસ્થિત) ઊર્જા દર્શાવે છે. આપણે તંત્રની આંતરિક ઊર્જાને 'U' વડે દર્શાવીએ છીએ.

અહીં, થરમૉડાયનેમિક્સને લાગે વળગે છે ત્યાં સુધી, હજી આપણે આંતરિક ઊર્જાનો અર્થ સમજવા માટે અણુ સ્વરૂપનો ઉપયોગ કર્યો છે. U એ તંત્રની એક સ્થૂળ ચલરાશિ જ છે. અગત્યની વાત એ છે કે આંતરિક ઊર્જા તે ફક્ત તંત્રની અવસ્થા પર આધાર રાખે છે. આ અવસ્થા કેવી રીતે મેળવી તેના પર નહિ ! તંત્રની આંતરિક ઊર્જા U એ થરમૉડાયનેમિક 'અવસ્થા ચલ'નું ઉદાહરણ છે. તેનું મૂલ્ય ફક્ત તંત્રની આપેલ અવસ્થા પર જ આધાર રાખે છે; તેના ઇતિહાસ (ભૂતકાળ) પર નહિ, એટલે કે, આ અવસ્થા સુધી પહોંચવા માટે લીધેલા 'માર્ગ' પર નહિ. આમ, આપેલ દળના વાયુની આંતરિક ઊર્જા દબાણ, કદ અને તાપમાનનાં ચોક્કસ મૂલ્યો વડે દર્શાવેલ અવસ્થા પર આધાર રાખે છે. વાયુની આ અવસ્થા કેવી રીતે આવી તેના પર તે આધાર રાખતી નથી. દબાણ, કદ, તાપમાન અને આંતરિક ઊર્જા એ તંત્ર (વાયુ)ના થરમૉડાયનેમિક અવસ્થા ચલો છે. (જુઓ પરિચ્છેદ 12.7.) જો આપણે વાયુમાં નાનાં આંતર અણુબળો અવગણીએ તો તે, વાયુની આંતરિક ઊર્જા તેના અણુઓની અસ્તવ્યસ્ત ગતિ સાથે સંકળાયેલ ગતિઊર્જાઓના સરવાળા જેટલી જ હોય છે. આ પછીના પ્રકરણમાં આપણે જોઈશું કે વાયુમાં આ ગતિ ફક્ત રેખીય નથી હોતી (એટલે કે પાત્રના કદમાં એક બિંદુથી બીજા બિંદુ સુધીની ગતિ); તે અણુઓની ચક્રીય અને કંપન ગતિઓને પણ સમાવે છે (આકૃતિ 12.3).

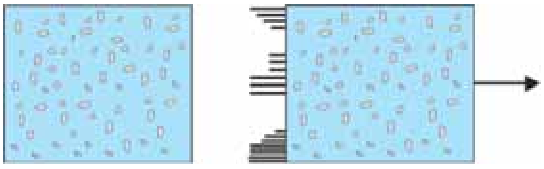
કોઈ તંત્રની આંતરિક ઊર્જા બદલવા માટેના કયા ઉપાયો (માર્ગ) છે ? આકૃતિ 12.4માં દર્શાવ્યા મુજબ ફરીથી, સરળતા ખાતર એક નળાકારમાં રહેલ ચોક્કસ દળ ધરાવતા વાયુનું તંત્ર ધારો. અનુભવ દર્શાવે છે કે વાયુની અવસ્થા (અને તેથી તેની આંતરિક ઊર્જા) બદલવા માટેના બે માર્ગ છે. એક માર્ગ એ છે કે આ વાયુ કરતાં ઊંચું તાપમાન ધરાવતા પદાર્થના સંપર્કમાં આ (વાયુ) નળાકારને મૂકો. આ તાપમાનના તફાવતના કારણે ઊર્જા (ઉષ્મા) ગરમ પદાર્થથી વાયુ તરફ વહન કરશે જેથી વાયુની આંતરિક ઊર્જા વધશે. બીજો માર્ગ એ છે કે પિસ્ટનને નીચે તરફ ધક્કો મારવો, એટલે કે આ તંત્ર પર કાર્ય કરવું, તે પણ વાયુની આંતરિક ઊર્જા વધારશે. અલબત્ત, આ બંને વસ્તુ ઊલટી દિશામાં પણ થઈ શકે. પરિસર નીચા તાપમાને હોય, તો ઉષ્મા વાયુમાંથી પરિસર તરફ વહેશે. તે જ રીતે, વાયુ પિસ્ટનને ઉપર ધકેલે અને પરિસર પર કાર્ય કરે. ટૂંકમાં, ઉષ્મા અને કાર્ય એ થરમૉડાયનેમિક તંત્રની અવસ્થાને બદલવા માટે અને તેની આંતરિક ઊર્જામાં ફેરફાર કરવા માટેના બે માર્ગ છે.

ઉષ્મા વિશેના ખ્યાલને આંતરિક ઊર્જા વિશેના ખ્યાલથી કાળજીપૂર્વક જુદા તારવવા જોઈએ. ઉષ્મા ચોક્કસપણે ઊર્જા તો છે, પરંતુ તે વહન પામતી ઊર્જા (જ) છે. આ કોઈ શબ્દોની રમત નથી. આ તફાવત મૂળભૂત રીતે ખૂબ અગત્યનો છે. થરમૉડાયનેમિક તંત્રની અવસ્થા તેની આંતરિક ઊર્જા વડે દર્શાવાય છે, ઉષ્મા વડે નહિ. એવું વિધાન કે **'કોઈ એક આપેલ અવસ્થામાં રહેલા વાયુમાં અમુક ચોક્કસ પ્રમાણમાં ઉષ્મા હોય છે.'** - અર્થ વગરનું છે, તે જ રીતે એવું વિધાન કે, **'કોઈ એક આપેલ અવસ્થામાં રહેલા વાયુમાં અમુક ચોક્કસ પ્રમાણમાં કાર્ય હોય છે.'** પણ અર્થ વગરનું છે. આની સામે, **'કોઈ એક આપેલ અવસ્થામાં રહેલા વાયુમાં ચોક્કસ પ્રમાણમાં આંતરિક ઊર્જા હોય છે.'** - તે વિધાન સંપૂર્ણ અર્થસભર, તે જ રીતે એવું વિધાન કે, **'તંત્રને અમુક ચોક્કસ પ્રમાણમાં ઉષ્મા આપવામાં આવી છે.'** અથવા **'તંત્ર દ્વારા અમુક ચોક્કસ પ્રમાણમાં કાર્ય થયું છે.'** –સંપૂર્ણ અર્થસભર છે.

સારાંશ એ કે, થરમૉડાયનેમિક્સમાં ઉષ્મા અને કાર્ય એ અવસ્થા ચલો નથી. તે તંત્રમાં ઊર્જા વિનિમય દર્શાવે છે જે તેની આંતરિક ઊર્જામાં ફેરફાર કરે છે, જે અગાઉ દર્શાવ્યું તેમ અવસ્થા ચલરાશિ છે.

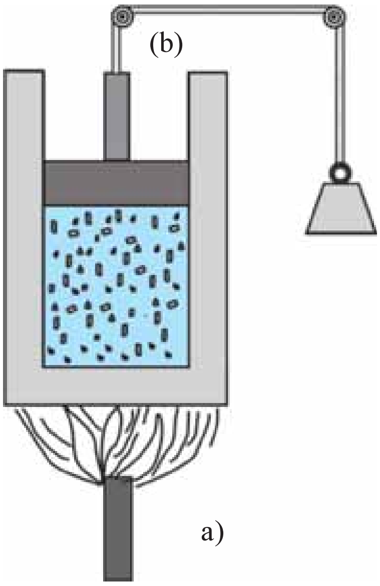
સામાન્ય વાતચીતમાં, આપણે ઉષ્મા અને આંતરિક ઊર્જા એકબીજાની જગ્યાએ ઉપયોગમાં લઈએ છીએ. તેમની વચ્ચેનો

ભેદ ક્યારેક ભૌતિકવિજ્ઞાનના પ્રારંભિક સ્તરનાં પુસ્તકોમાં અવગણેલ હોય છે. થરમૉડાયનેમિક્સની સાચી સમજણ માટે, આ ભેદ સમજવો ખૂબ જરૂરી છે.



(a) (b)

આકૃતિ **12.3** (a) *જ્યારે બૉક્સસ્થિર સ્થિતિમાં હોય ત્યારે, વાયુની આંતરિક ઊર્જા U એ તેના અણુઓની ગતિ અને સ્થિતિઊર્જાઓના સરવાળા જેટલી હોય છે. જુદા જુદા પ્રકારની ગતિ (રેખીય, ચક્રીય, કંપન)ને અનુલક્ષીને ગતિઊર્જાઓને Uમાં સમાવવાની છે.* (b) *જો આ આખું બૉક્સ કોઈ વેગ સાથે ગતિ કરતું હોય, તો બૉક્સની ગતિઊર્જા Uમાં સમાવવાની નથી.*



આકૃતિ **12.4** *ઉષ્મા અને કાર્ય એ તંત્રની ઊર્જાવહનના અલગ પ્રકારો છે જે તેની આંતરિક ઊર્જામાં ફેરફાર માટે જવાબદાર છે. (a) ઉષ્મા એ તંત્ર અને પરિસર વચ્ચે તાપમાનના તફાવતના કારણે થતું ઊર્જાનું વહન છે. (b) કાર્ય એ બીજી રીતે થતો (દા. ત., પિસ્ટનને ઉપર કે નીચે ખસેડીને કે તેની સાથે જોડાયેલા વજનને ઘટાડીને) ઊર્જાનો વિનિમય છે જે તાપમાનના તફાવત સાથે સંકળાયેલ નથી.*

12.5 થરમૉડાયનેમિક્સનો પ્રથમ નિયમ (FIRST LAW OF THERMODINAMICS)

આપણે જોયુ કે તંત્રની આંતરિક ઊર્જા U, બે પ્રકારના ઊર્જા વિનિમય દ્વારા બદલી શકાય : ઉષ્મા અને કાર્ય. ધારો કે,

ΔQ = પરિસર દ્વારા તંત્રને આપવામાં આવેલ ઉષ્મા

ΔW = તંત્ર દ્વારા પરિસર પર થયેલ કાર્ય

ΔU = તંત્રની આંતરિક ઊર્જામાં થતો ફેરફાર

આથી ઊર્જા સંરક્ષણના વ્યાપક સિદ્ધાંત મુજબ

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W \tag{12.1}$$

એટલે કે, તંત્રને આપવામાં આવેલી ઉષ્મા (ΔQ)નો થોડો ભાગ તંત્રની આંતરિક ઊર્જા (ΔU)માં, જ્યારે બાકીનો ભાગ પરિસર પર થતા કાર્ય (ΔW)માં જાય છે. સમીકરણ (12.1)ને **થરમૉડાયનેમિક્સનો પ્રથમ નિયમ** કહે છે. તે તંત્ર પર લગાડેલ ઊર્જા-સંરક્ષણનો વ્યાપક નિયમ છે જેમાં ઊર્જાનો પરિસર તરફ કે પરિસરમાંથી બહાર તરફ વિનિમય ગણતરીમાં લેવામાં આવે છે. આપણે સમીકરણ (12.1)ને બીજી રીતે લખીએ તો

$$\Delta Q - \Delta W = \Delta U \tag{12.2}$$

અહીં, તંત્ર પ્રારંભિક અવસ્થાથી અંતિમ અવસ્થા સુધી ઘણાબધા માર્ગે જઈ શકે. ઉદાહરણ તરીકે, વાયુની અવસ્થા (P_1, V_1) થી (P_2, V_2) સુધી બદલવા, આપણે દબાણ અચળ રાખીને પહેલાં વાયુનું કદ V_1 થી V_2 સુધી બદલી શકીએ. એટલે કે પહેલાં આપણે (P_1, V_2) સ્થિતિમાં જઈએ અને ત્યાર બાદ, કદ અચળ રાખીને વાયુનું દબાણ P_1 થી P_2 સુધી બદલીએ, જે વાયુને (P_2, V_2) સ્થિતિએ લઈ જાય. બીજી રીતે, આપણે પહેલાં કદ અચળ રાખીને ત્યાર બાદ દબાણ અચળ રાખી શકીએ. U અવસ્થા ચલ હોવાથી, ΔU ફક્ત પ્રારંભિક અને અંતિમ અવસ્થાઓ પર જ આધાર રાખે છે, નહિ કે વાયુએ એકથી બીજી અવસ્થા સુધી જવા માટે લીધેલા માર્ગ પર. તેમ છતાં, ΔQ અને ΔW, સામાન્ય રીતે, પ્રારંભિકથી અંતિમ અવસ્થાઓ સુધી જવા માટે લીધેલા માર્ગ પર આધાર રાખે છે. છતાં, થરમૉડાયનેમિક્સના પ્રથમ નિયમ, સમીકરણ (12.2), પરથી એ સ્પષ્ટ છે કે $\Delta Q - \Delta W$નું સંયોજન લીધેલા માર્ગથી સ્વતંત્ર છે. આ દર્શાવે છે કે જો તંત્રને એવી પ્રક્રિયામાંથી પસાર કરવામાં આવે કે તેમાં $\Delta U = 0$ (દા.ત., આદર્શ વાયુનું સમતાપી પ્રસરણ, પરિચ્છેદ 12.8 જુઓ), તો

$$\Delta Q = \Delta W$$

એટલે કે, તંત્રને આપવામાં આવેલી ઉષ્મા, તંત્ર દ્વારા પરિસર પર કાર્ય કરવામાં સંપૂર્ણપણે વપરાઈ જાય છે.

જો તંત્ર, ખસી શકે તેવા પિસ્ટન ધરાવતા નળાકારમાં રહેલા વાયુનું બનેલું હોય, તો પિસ્ટનને ખસેડવા માટે વાયુ

કાર્ય કરે છે. બળ એ દબાણ અને ક્ષેત્રફળનો ગુણાકાર હોવાથી, તથા ક્ષેત્રફળ અને સ્થાનાંતરનું ગુણાકાર કદ દર્શાવતો હોવાથી, તંત્ર દ્વારા અચળ દબાણ P માટે થયેલ કાર્ય

$$\Delta W = P\Delta V$$

જ્યાં ΔV એ વાયુના કદમાં થતો ફેરફાર છે. આમ, આ કિસ્સામાં, સમીકરણ (12.1) પરથી

$$\Delta Q = \Delta U + P\Delta V \qquad (12.3)$$

સમીકરણ (12.3)નો ઉપયોગ દર્શાવવા, ધારો કે 1 g પાણીને પ્રવાહી સ્વરૂપથી બાષ્પ (વરાળ) સ્વરૂપમાં લઈ જવા દરમિયાન આંતરિક ઊર્જામાં થતો ફેરફાર ધ્યાનમાં લઈએ. પાણીની માપેલ ગુપ્ત ઉષ્મા 2256 J/g છે. આથી, 1 g પાણી માટે ΔQ = 2256 J. વાતાવરણના દબાણે, 1 g પાણીનું કદ પ્રવાહી સ્વરૂપમાં 1 cm^3 અને વરાળ (બાષ્પ) સ્વરૂપમાં 1671 cm^3 હોય છે. આથી

$$\Delta W = P(V_g - V_l) = 1.013 \times 10^5 \times (1670) \times 10^{-6} = 169.2 \text{ J}$$

આમ, સમીકરણ (12.3) પરથી,

$$\Delta U = 2256 - 169.2 = 2086.8 \text{ J}$$

આપણે જોઈ શકીએ છીએ કે, પાણીના પ્રવાહી સ્વરૂપમાંથી વરાળ સ્વરૂપમાં રૂપાંતરણ દરમિયાન મોટા ભાગની ઉષ્મા તેની આંતરિક ઊર્જા વધારવામાં વપરાય છે.

12.6 વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા (ક્ષમતા) (SPECIFIC HEAT CAPACITY)

ધારો કે પદાર્થને આપવામાં આવેલી ઉષ્મા ΔQ, તેનું તાપમાન T થી $T + \Delta T$ જેટલું બદલે છે. આપણે પદાર્થની ઉષ્માધારિતાને આ રીતે વ્યાખ્યાયિત કરીએ છીએ, (પ્રકરણ 11 જુઓ.)

$$S = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \qquad (12.4)$$

આપણે માનીએ છીએ કે ΔQ અને તેથી, ઉષ્માધારિતા S એ પદાર્થના દળને સમપ્રમાણ હોવી જોઈએ. આ ઉપરાંત, તે તાપમાન પર પણ આધાર રાખતી હોઈ શકે, એટલે કે જુદાં જુદાં તાપમાને, તાપમાનમાં એકમ વધારો કરવા માટે જરૂરી ઉષ્મા જુદી જુદી હોઈ શકે. પદાર્થનો તેના જથ્થા (Amount)થી સ્વતંત્ર ગુણધર્મ વ્યાખ્યાયિત કરવા માટે આપણે Sને પદાર્થના kg માં દળ m વડે ભાગીએ તો

$$s = \frac{S}{m} = \left(\frac{1}{m}\right)\frac{\Delta Q}{\Delta T} \qquad (12.5)$$

s પદાર્થની વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા તરીકે ઓળખાય છે. તે પદાર્થની પ્રકૃતિ અને તેના તાપમાન પર આધાર રાખે છે. વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતાનો એકમ J kg^{-1} K^{-1} છે.

જો પદાર્થના જથ્થાને તેના મોલ μ (દળ mને kgના બદલે) વડે દર્શાવવામાં આવે, તો આપણે પદાર્થની મોલ દીઠ ઉષ્માધારિતા આ રીતે વ્યાખ્યાયિત કરી શકીએ.

$$C = \frac{S}{\mu} = \frac{1}{\mu}\frac{\Delta Q}{\Delta T} \qquad (12.6)$$

C ને પદાર્થની મોલર વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા કહે છે. sની જેમ, C પણ પદાર્થના જથ્થાથી સ્વતંત્ર છે. C પદાર્થની પ્રકૃતિ; તેના તાપમાન અને કઈ પરિસ્થિતિઓમાં ઉષ્મા આપવામાં આવી છે તેના પર આધાર રાખે છે. C નો એકમ J mol^{-1} K^{-1} છે. હવે પછી આપણે જોઈશું કે (વાયુઓની વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતાના સંદર્ભમાં), C કે s ને વ્યાખ્યાયિત કરવા માટે બીજી વધારાની શરતોની પણ જરૂર પડી શકે. C ને વ્યાખ્યાયિત કરવા પાછળનો હેતુ એ છે કે મોલર વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતાઓ વિશેના સામાન્ય અનુમાન કરી શકાય.

કોષ્ટક 12.1માં વાતાવરણના દબાણે અને ઓરડાના સામાન્ય તાપમાને માપેલ વિશિષ્ટ અને મોલર ઉષ્મા-ધારિતાઓની યાદી આપેલ છે.

પ્રકરણ 13માં આપણે જોઈશું કે વાયુઓની વિશિષ્ટ ઉષ્માનાં અનુમાનિત મૂલ્યો સામાન્યપણે પ્રાયોગિક મૂલ્યો સાથે મળતા આવે છે. ઘન પદાર્થોની મોલર વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતાનું અનુમાન કરવા માટેના ઊર્જા સમવિભાજનના નિયમનો આપણે અહીં પણ ઉપયોગ કરી શકીએ. ધારો કે એક ઘન પદાર્થના N અણુઓ, તેમના મધ્યમાન સ્થાનની આસપાસ કંપન કરે છે. એક પરિમાણના દોલકની સરેરાશ ઊર્જા $2 \times \frac{1}{2}k_BT = k_BT$ હોય છે. ત્રિપરિમાણમાં સરેરાશ ઊર્જા $3k_BT$ હોય છે. એક મોલ ઘન પદાર્થ માટે, કુલ ઊર્જા

$$U = 3k_BT \times N_A = 3\ RT$$

હવે, અચળ દબાણે $\Delta Q = \Delta U + P\,\Delta V \cong \Delta U$, કારણ કે ઘન પદાર્થ માટે ΔV અવગણ્ય હોય છે. આથી,

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{\Delta U}{\Delta T} = 3\ R \qquad (12.7)$$

કોષ્ટક 12.1 ઓરડાના તાપમાને અને વાતાવરણના દબાણે કેટલાક ઘન પદાર્થોની વિશિષ્ટ અને મોલર ઉષ્માધારિતાઓ

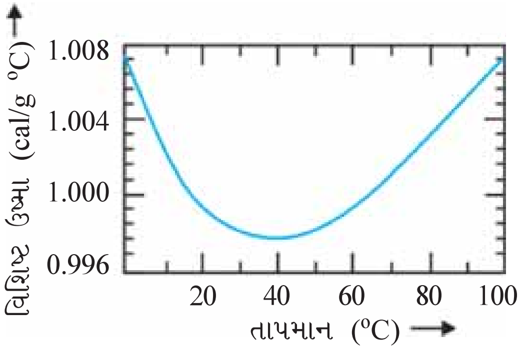
પદાર્થ	વિશિષ્ટ ઉષ્મા (J kg^{-1} K^{-1})	મોલર વિશિષ્ટ ઉષ્મા (J mol^{-1} K^{-1})
ઍલ્યુમિનિયમ	900.0	24.4
કાર્બન	506.5	6.1
તાંબું	386.4	24.5
સીસું	127.7	26.5
ચાંદી	236.1	25.5
ટંગસ્ટન	134.4	24.9

કોષ્ટક 12.1માં દર્શાવ્યા મુજબ, મોટે ભાગે પ્રાયોગિક રીતે મેળવેલ મૂલ્યો, સામાન્ય તાપમાને અનુમાનિત મૂલ્યો 3R સાથે

મળતાં આવે છે (કાર્બન એક અપવાદ છે). નીચા તાપમાને આ મૂલ્યો મળતાં આવતાં નથી.

પાણીની વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા (Specific Heat Capacity of Water)

ઉષ્માનો જૂનો એકમ કૅલરી હતો. પહેલાં 1 g પાણીનું તાપમાન 1 °C વધારવા માટે જરૂરી ઉષ્માના જથ્થાને કૅલરી કહેવાતી, વધુ ચોકસાઈપૂર્વકના માપન દ્વારા જાણવા મળ્યું હતું કે, પાણીની વિશિષ્ટ ઉષ્મા તાપમાન સાથે થોડી બદલાય છે. આકૃતિ 12.5માં આ ફેરફાર (બદલાવ) 0 થી 100 °C તાપમાનના ગાળા માટે દર્શાવ્યો છે.



આકૃતિ 12.5 તાપમાન સાથે પાણીની વિશિષ્ટ ઉષ્મામાં થતો ફેરફાર

આથી, કૅલરીની વધુ ચોક્કસ વ્યાખ્યા માટે, તાપમાનનો એકમ ગાળો દર્શાવવો જરૂરી છે. 1 g પાણીનું તાપમાન 14.5 °C થી 15.5 °C સુધી વધારવા માટે જરૂરી ઉષ્માના જથ્થાને એક કૅલરી તરીકે વ્યાખ્યાયિત કરવામાં આવે છે. ઉષ્મા એ ઊર્જાનો એક પ્રકાર હોવાથી, તેનો એકમ જૂલ J લખવો વધારે યોગ્ય છે. SI એકમ પદ્ધતિમાં, પાણીની વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા 4186 J kg^{-1} K^{-1}, એટલે કે 4.186 J g^{-1} K^{-1} છે. 1 કૅલરી ઉષ્મા ઉત્પન્ન કરવા માટે જરૂરી કાર્યને આપણે ઉષ્માનો યાંત્રિક તુલ્યાંક કહીએ છીએ, જે ખરેખર તો ઊર્જાના બે એકમો, કૅલરીથી જૂલના રૂપાંતરણનો એકમ છે. SI એકમ પદ્ધતિમાં, ઉષ્મા કાર્ય કે ઊર્જાનાં અન્ય કોઈ સ્વરૂપ માટે આપણે જૂલનો ઉપયોગ કરીએ છીએ, આથી યાંત્રિક તુલ્યાંક શબ્દ વધારાનો અને બિનજરૂરી છે.

આપણે અગાઉ નોંધ્યું તેમ કઈ પ્રક્રિયા કે શરત હેઠળ ઉષ્માનું વહન થાય છે તેના પર વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા આધાર રાખે છે. દા.ત., વાયુઓ માટે, આપણે બે વિશિષ્ટ ઉષ્માઓ વ્યાખ્યાયિત કરી શકીએ : **અચળ કદે વિશિષ્ટ ઉષ્મા અને અચળ દબાણે વિશિષ્ટ ઉષ્મા.** આદર્શ વાયુ માટે, આપણી પાસે સાદું સમીકરણ છે.

$$C_P - C_V = R \qquad (12.8)$$

જ્યાં C_P અને C_V એ અનુક્રમે અચળ દબાણ અને કદ માટે આદર્શ વાયુની મોલર વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા અને R એ સાર્વત્રિક વાયુનિયતાંક છે. આ સમીકરણ સાબિત કરવા, આપણે 1 મોલ વાયુ માટે સમીકરણ (12.3)નો ઉપયોગ કરીએ :

$$\Delta Q = \Delta U + P\,\Delta V$$

જો અચળ કદે ΔQ (ઉષ્માનું) શોષણ થતું હોય, તો $\Delta V = 0$

$$C_V = \left(\frac{\Delta Q}{\Delta T}\right)_V = \left(\frac{\Delta U}{\Delta T}\right)_V = \left(\frac{\Delta U}{\Delta T}\right) \qquad (12.9)$$

જ્યાં છેલ્લા પદમાં V લખવામાં આવતો નથી, કારણ કે આદર્શ વાયુ માટે U ફક્ત તાપમાન પર આધાર રાખે છે. (જે રાશિ અચળ રાખી હોય તેને Subscrip વડે દર્શાવાય છે) બીજી બાજુ, જો ΔQ અચળ દબાણે શોષાતી હોય તો,

$$C_P = \left(\frac{\Delta Q}{\Delta T}\right)_P = \left(\frac{\Delta U}{\Delta T}\right)_P + P\left(\frac{\Delta V}{\Delta T}\right)_P \qquad (12.10)$$

પ્રથમ પદમાંથી P દૂર શકીએ કારણ કે આદર્શ વાયુ માટે U ફક્ત T પર આધાર રાખે છે. હવે, એક મોલ આદર્શ વાયુ માટે,

$$PV = RT$$

જેના પરથી

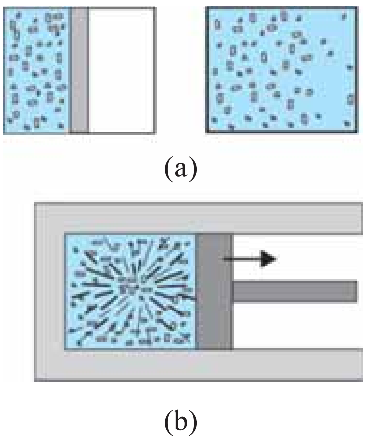
$$P\left(\frac{\Delta V}{\Delta T}\right)_P = R \qquad (12.11)$$

સમીકરણો (12.9)થી (12.11) પરથી આપણને સમીકરણ (12.8) મળે.

12.7 થરમૉડાયનેમિક અવસ્થા ચલરાશિઓ અને અવસ્થા સમીકરણ (THERMODYNAMIC STATE VARIABLES AND EQUATION OF STATE)

થરમૉડાયનેમિક તંત્રની દરેક **સંતુલિત અવસ્થા** અમુક સ્થૂળ ચલરાશિઓનાં ચોક્કસ મૂલ્યો વડે દર્શાવી શકાય છે; જેમને અવસ્થા ચલરાશિઓ પણ કહે છે. દા. ત., વાયુની સંતુલિત અવસ્થા તેના દબાણ, કદ, તાપમાન અને દળ (અને જો વાયુઓનું મિશ્રણ હોય તો તેમના બંધારણ) પરથી દર્શાવી શકાય છે. થરમૉડાયનેમિક તંત્ર હંમેશાં સંતુલનમાં નથી હોતું. ઉદાહરણ રૂપે, શૂન્યાવકાશમાં વાયુનું મુક્ત પ્રસરણ એ સંતુલન

અવસ્થા નથી (આકૃતિ 12.6(a)). ઝડપી પ્રસરણ દરમિયાન, વાયુનું દબાણ બધી જગ્યાએ સમાન ન પણ હોય. તે જ રીતે, રાસાયણિક પ્રક્રિયા દ્વારા વાયુના મિશ્રણમાં ધડાકો (ભડાકો) થાય (દા.ત., પેટ્રોલની વરાળ અને વાયુના મિશ્રણને તણખા દ્વારા પ્રજ્વલિત કરવામાં આવે) તે સંતુલન અવસ્થા નથી. અહીં પણ તેના તાપમાન અને દબાણ સમાન નથી (આકૃતિ 12.6(b)). સમય જતાં, વાયુ સમાન તાપમાન અને દબાણ પ્રાપ્ત કરે છે અને પરિસર સાથે તાપીય અને યાંત્રિક સંતુલનમાં આવે છે.



આકૃતિ 12.6 (a) *બૉક્સમાં આવેલ પડદો (દીવાલ) અચાનક દૂર કરવામાં આવે છે જેથી વાયુનું મુક્ત પ્રસરણ થાય છે.* (b) *વાયુઓના મિશ્રણમાં રાસાયણિક પ્રક્રિયા દ્વારા ધડાકો થાય છે. બંને પરિસ્થિતિમાં, વાયુ સંતુલિત અવસ્થામાં નથી અને તેને અવસ્થા ચલરાશિઓ વડે દર્શાવી શકાય નહિ.*

ટૂંકમાં, થરમૉડાયનેમિક અવસ્થા ચલરાશિઓ તંત્રની સંતુલિત અવસ્થા દર્શાવે છે. જુદા જુદા અવસ્થા ચલો એકબીજાથી સ્વતંત્ર હોવા જરૂરી નથી. અવસ્થા ચલરાશિઓને જોડતું સમીકરણ, અવસ્થા સમીકરણ કહેવાય છે. ઉદાહરણ તરીકે, આદર્શ વાયુ માટે, આદર્શ વાયુ સમીકરણ એ અવસ્થા સમીકરણ છે.

$$P\ V = \mu\ R\ T$$

આથી, ચોક્કસ જથ્થાના વાયુ માટે, એટલે કે આપેલ μ માટે ફક્ત બે સ્વતંત્ર ચલરાશિઓ હોય છે, જેમકે, P અને V અથવા T અને V. અચળ તાપમાને દબાણ-કદનો વક્ર **સમતાપી (Isotherm)** કહેવાય છે. વાસ્તવિક વાયુઓનાં અવસ્થા સમીકરણો વધુ જટિલ હોઈ શકે.

થરમૉડાયનેમિક ચલરાશિઓ બે પ્રકારની હોય છે : **એક્સ્ટેનસિવ (વિસ્તૃત) અને ઇન્ટેન્સિવ (ગાઢ) :** એક્સ્ટેન્સિવ ચલરાશિઓ તંત્રનું 'પરિમાણ' (Size) દર્શાવે છે. ઇન્ટેન્સિવ ચલરાશિઓ જેમ કે દબાણ અને તાપમાન પરિમાણ નથી દર્શાવતા. કઈ ચલરાશિ એક્સ્ટેન્સિવ કે ઇન્ટેન્સિવ છે તે નક્કી કરવા, સંતુલનમાં રહેલું કોઈ તંત્ર લો અને ધારો કે તે એકસરખા બે ભાગમાં વહેંચાયેલું છે. બંને ભાગ માટે જે ચલરાશિઓનાં મૂલ્યો બદલાય નહિ તે ઇન્ટેન્સિવ કહેવાય. જે ચલરાશિઓનાં મૂલ્યો દરેક ભાગમાં અડધા થાય તેને એક્સ્ટેન્સિવ કહેવાય. તે સહેલાઈથી જોઈ શકાય. દા.ત., આંતરિક ઊર્જા U, કદ V, કુલ દળ M એ એક્સ્ટેન્સિવ ચલરાશિઓ છે. દબાણ P, તાપમાન T અને ઘનતા ρ એ ઇન્ટેન્સિવ ચલરાશિઓ છે. ચલરાશિઓના આ વર્ગીકરણનો ઉપયોગ કરીને થરમૉડાયનેમિક સમીકરણોની સાતત્યતા સારી રીતે ચકાસી શકાય છે. દા.ત.,

$$\Delta Q = \Delta U + P\ \Delta V$$

સમીકરણમાં બંને બાજુની રાશિઓ એક્સ્ટેન્સિવ* છે. (ઇન્ટેન્સિવ રાશિ, જેમ કે P, અને એક્સ્ટેન્સિવ રાશિ, ΔVનો ગુણાકાર એક્સ્ટેન્સિવ હોય છે.)

12.8 થરમૉડાયનેમિક પ્રક્રિયાઓ (THERMODYNAMIC PROCESSES)

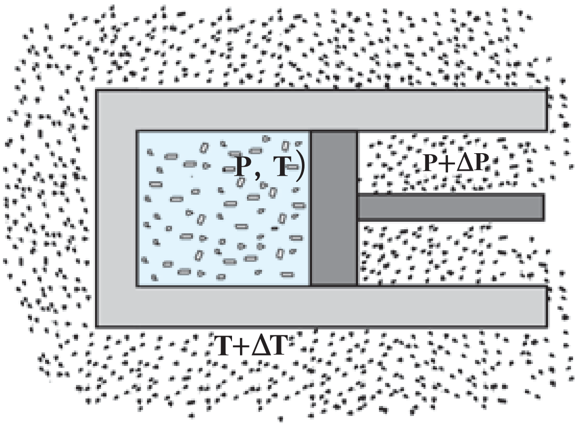
12.8.1 ક્વૉસાઈ સ્ટેટિક (અર્ધ-સ્થાયી) પ્રક્રિયા (Quasi-Static Process)

ધારો કે, એક વાયુ પરિસર સાથે તાપીય અને યાંત્રિક સંતુલનમાં છે. આ પરિસ્થિતિમાં વાયુનું દબાણ, બાહ્ય દબાણ જેટલું અને તેનું તાપમાન, પરિસરના તાપમાન જેટલું હોય છે. ધારો કે, બાહ્ય દબાણ અચાનક ઘટાડવામાં આવે છે (ધારો કે, વાયુપાત્રમાં ખસી શકે તેવા પિસ્ટન પરનું વજન ઊંચકી લઈને). આ પિસ્ટન બહારની તરફ પ્રવેગી ગતિ કરશે. આ પ્રક્રિયા દરમિયાન, વાયુ એવી અવસ્થાઓમાંથી પસાર થશે કે જે સંતુલિત ન હોય. અસંતુલિત અવસ્થાઓને ચોક્કસ રીતે વ્યાખ્યાયિત કરી શકાય તેવા દબાણ અને તાપમાન હોતા નથી. એ જ રીતે, જો વાયુ અને તેના પરિસર વચ્ચે તાપમાનનો દેખીતો તફાવત હોય, તો ત્યાં ઉષ્માનું ઝડપથી આદાન-પ્રદાન (વિનિમય) થશે જે દરમિયાન વાયુ અસંતુલિત અવસ્થાઓમાંથી પસાર થશે. સમય જતાં આ વાયુ એ પરિસરના સુવ્યાખ્યાયિત તેવા (Well Defined) તાપમાન અને દબાણ સાથે સંતુલિત સ્થિતિમાં આવશે. શૂન્યાવકાશમાં વાયુનું વિસ્તરણ અને રાસાયણિક પ્રક્રિયા દ્વારા વાયુઓના મિશ્રણમાં વિસ્ફોટ થવો, જે પરિચ્છેદ 12.7માં દર્શાવ્યું છે તેમ, તે તંત્ર અસંતુલિત અવસ્થાઓમાંથી પસાર થતું હોવાનાં ઉદાહરણો છે.

તંત્રની અસંતુલિત અવસ્થાઓ સાથે કામ પાર પાડવું અઘરું છે. આથી, એવી આદર્શ પ્રક્રિયા વિચારવી યોગ્ય કહેવાશે કે જેમાં દરેક સ્થિતિમાં તંત્ર સંતુલિત અવસ્થામાં હોય. આવી પ્રક્રિયા, સૈદ્ધાંતિક રીતે, અત્યંત ધીમી હોય છે

* *અગાઉ જણાવ્યું હતું તે મુજબ, Q એ અવસ્થા ચલરાશિ નથી. આમ છતાં, ΔQ સ્પષ્ટરૂપે તંત્રના દળના સમપ્રમાણમાં છે અને તેથી એક્સ્ટેન્સિવ છે.*

અને તેથી તેને અર્ધસ્થાયી (ક્વૉસાઈ-સ્ટેટિક) કહે છે. તંત્ર તેની ચલરાશિઓ (P, T, V) એટલી ધીમે ધીમે બદલે છે કે જેથી તે દરેક વખતે પરિસર સાથે તાપીય અને યાંત્રિક સંતુલનમાં રહે. અર્ધસ્થાયી પ્રક્રિયામાં દરેક તબક્કામાં, તંત્રના દબાણ અને બાહ્ય દબાણ વચ્ચેનો તફાવત અતિસૂક્ષ્મ (Infinitesimally Small) છે. જ્યારે તંત્ર અને પરિસર વચ્ચે તાપમાનનો તફાવત હોય ત્યારે પણ આ સત્ય છે. વાયુને એક અવસ્થા (P, T)થી બીજી અવસ્થા (P', T') સુધી ક્વૉસાઈ-સ્ટેટિક પ્રક્રિયા દ્વારા લઈ જવા માટે, આપણે બાહ્ય દબાણને બહુ જ નાના પ્રમાણમાં એવી રીતે બદલીએ કે જેથી તંત્ર તેના પરિસર સાથે સંતુલન કરી શકે અને આ પ્રક્રિયા અત્યંત ધીમેથી કરતાં કરતાં તંત્રને દબાણ P' સુધી લાવી શકાય. તે જ રીતે, તાપમાન બદલવા માટે આપણે તંત્ર અને પરિસર સ્રોત (Reservoirs-ઉષ્મા પ્રાપ્તિસ્થાન) વચ્ચે અતિસૂક્ષ્મ તાપમાનનો તફાવત રાખીએ અને તે રીતે T થી T' સુધીના વધતા ક્રમના તાપમાનોવાળાં ઉષ્મા પ્રાપ્તિસ્થાનો પસંદ કરતા જઈએ, તો તંત્ર તાપમાન T' સુધી પહોંચે.



આકૃતિ 12.7 *અર્ધસ્થાયી (ક્વૉસાઈ-સ્ટેટિક) પ્રક્રિયામાં બહારના ઉષ્મા પ્રાપ્તિસ્થાન (પરિસર)નું તાપમાન અને બહારનું દબાણ તંત્રના તાપમાન અને દબાણથી અત્યંત સૂક્ષ્મ પ્રમાણમાં અલગ હોય છે.*

અર્ધસ્થાયી પ્રક્રિયા એ દેખીતી રીતે વૈચારિક (Hypothetical) નમૂનો (Construct) છે. હકીકતમાં, જે પ્રક્રિયાઓ અત્યંત ધીમી હોય અને પિસ્ટન પ્રવેગી ગતિ ધરાવતો ન હોય, તાપમાનનો મોટો તફાવત (Gradient) ન હોય વગેરે. લગભગ આદર્શ ક્વૉસાઈ-સ્ટેટિક પ્રક્રિયાની સન્નિકટતા છે. હવે પછી જ્યાં સુધી સ્પષ્ટ કહેવામાં ન આવે ત્યાં સુધી ક્વૉસાઈ સ્ટેટિક પ્રક્રિયાઓ ધ્યાનમાં લઈશું.

જે પ્રક્રિયામાં અંત સુધી તંત્રનું તાપમાન અચળ રહેતું હોય તેને **સમતાપી પ્રક્રિયા (Isothermal Process)** કહેવાય. અચળ તાપમાને રહેલા મોટા પ્રાપ્તિસ્થાન (Reservoir)માં મૂકેલ ધાતુના નળાકાર પાત્રમાં વાયુનું પ્રસરણ એ સમતાપી પ્રક્રિયાનું ઉદાહરણ છે. (મોટા પ્રાપ્તિસ્થાનમાંથી તંત્રમાં આવેલી ઉષ્મા સામાન્ય રીતે મોટા પ્રાપ્તિસ્થાનના તાપમાન પર અસર કરતી નથી, કારણ કે તેની ઉષ્માધારિતા ખૂબ મોટી હોય છે.) **સમદાબ (Isobaric) પ્રક્રિયા**માં દબાણ અચળ હોય છે જ્યારે **સમકદ (Isochoric)** પ્રક્રિયામાં કદ અચળ હોય છે.

અંતમાં જો તંત્રને પરિસરથી (અવાહક દ્વારા) અલગ કરવામાં આવે, તો તંત્ર અને પરિસર વચ્ચે ઉષ્માનું વહન થતું નથી. આ પ્રક્રિયા **સમોષ્મી (Adiabatic)** કહેવાય છે. કોષ્ટક 12.2માં આ પ્રક્રિયાઓની ખાસિયતોની યાદી આપેલ છે.

કોષ્ટક 12.2 કેટલીક ખાસ થરમૉડાયનેમિક પ્રક્રિયાઓ

પ્રક્રિયાનો પ્રકાર	ખાસિયત (Feature)
સમતાપી	અચળ તાપમાન
સમદાબ	અચળ દબાણ
સમકદ	અચળ કદ
સમોષ્મી	તંત્ર અને પરિસર વચ્ચે ઉષ્માવહન નહિ ($\Delta Q = 0$)

આપણે હવે આ પ્રક્રિયાઓનો ઊંડાણપૂર્વક અભ્યાસ કરીએ :

સમતાપી પ્રક્રિયા (Isothermal Process)

સમતાપી પ્રક્રિયા (T અચળ) માટે આદર્શ વાયુ સમીકરણ પરથી,

$$PV = \text{અચળ}$$

એટલે કે, આપેલ દળના વાયુનું દબાણ તેના કદના વ્યસ્ત પ્રમાણમાં બદલાય છે. આ બૉઈલનો નિયમ છે.

ધારો કે એક આદર્શ વાયુ સમતાપી રીતે (T તાપમાને) પ્રારંભિક અવસ્થા (P_1, V_1)થી અંતિમ અવસ્થા (P_2, V_2) સુધી જાય છે. વચ્ચેના કોઈ તબક્કે P દબાણે તેનું કદ Vથી $V + \Delta V$ (ΔV નાનું) સુધી બદલાય છે.

$$\Delta W = P \,\Delta\, V$$

$\Delta V \rightarrow 0$ લેતાં અને સંપૂર્ણ પ્રક્રિયા દરમિયાન રાશિ ΔWનો સરવાળો કરતાં,

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

$$= \mu RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = \mu RT \ln \frac{V_2}{V_1} \qquad (12.12)$$

અહીંયાં બીજા પદમાં આપણે આદર્શ વાયુ સમીકરણ $PV = \mu RT$નો ઉપયોગ કર્યો છે અને અચળાંકોને સંકલનની બહાર લીધા છે. આદર્શ વાયુ માટે, આંતરિક ઊર્જા ફક્ત તાપમાન પર આધાર રાખે છે. આથી, સમતાપી પ્રક્રિયામાં આદર્શ વાયુની આંતરિક ઊર્જામાં કોઈ ફરક પડતો નથી. થરમૉડાયનેમિક્સનો પ્રથમ નિયમ સૂચવે છે કે, વાયુને આપવામાં આવેલી ઉષ્મા, વાયુ વડે થયેલાં કાર્ય જેટલી હોય છે : $Q = W$. સમીકરણ (12.12) પરથી નોંધો કે $V_2 > V_1$ માટે $W > 0$; અને $V_2 < V_1$ માટે $W < 0$. એટલે કે, સમતાપી પ્રસરણમાં વાયુ ઉષ્મા શોષે છે અને કાર્ય કરે છે જ્યારે સમતાપી સંકોચનમાં પરિસર વડે વાયુ પર કાર્ય થાય છે અને વાયુ ઉષ્મા ગુમાવે છે.

સમોષ્મી પ્રક્રિયા (Adiabatic Process)

સમોષ્મી પ્રક્રિયામાં પરિસરથી તંત્ર અલિપ્ત (અલગ કરેલું) હોય છે અને શોષેલી કે ગુમાવેલી ઉષ્મા શૂન્ય હોય છે. સમીકરણ (12.1) પરથી, આપણે જોઈ શકીએ કે વાયુ વડે થયેલું કાર્ય તેની આંતરિક ઊર્જામાં ઘટાડો કરે છે (અને તેથી આદર્શ વાયુના તાપમાનમાં પણ). કોઈ પણ સાબિતી વગર આપણે લખી શકીએ (જેનાં પરિણામો તમે ઉચ્ચ અભ્યાસક્રમોમાં ભણશો) કે આદર્શ વાયુ માટે સમોષ્મી પ્રક્રિયામાં,

$$PV^{\gamma} = \text{અચળ} \qquad (12.13)$$

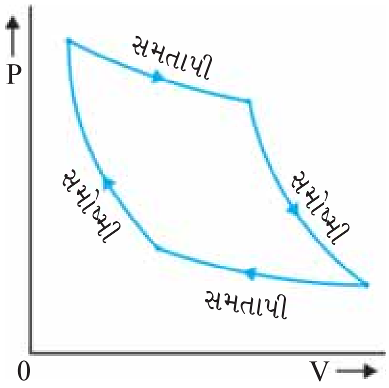
જ્યાં γ એ અચળ દબાણે અને અચળ કદે વિશિષ્ટ ઉષ્માઓ (સામાન્ય કે મોલર)નો ગુણોત્તર છે.

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$$

આથી, જો આદર્શ વાયુ સમોષ્મી રીતે (P_1, V_1) અવસ્થાથી (P_2, V_2) સુધી જાય તો,

$$P_1V_1^{\gamma} = P_2V_2^{\gamma} = \text{અચળાંક} \qquad (12.14)$$

આકૃતિ 12.8માં આદર્શ વાયુ માટે P–Vના બે સમોષ્મી અને બે સમતાપી વક્રો દર્શાવ્યા છે.



***આકૃતિ 12.8** આદર્શ વાયુની સમોષ્મી અને સમતાપી પ્રક્રિયાઓના P–V વક્રો*

અગાઉની જેમ આપણે આદર્શ વાયુની (P_1, V_1, T_1) અવસ્થાથી (P_2, V_2, T_2) અવસ્થા સુધીના સમોષ્મી ફેરફાર માટે થયેલ કાર્ય ગણી શકીએ

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

$$= \text{અચળાંક} \times \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^{\gamma}} = \text{અચળાંક} \times \left[\frac{V^{-\gamma+1}}{1-\gamma}\right]_{V_1}^{V_2}$$

$$= \frac{\text{અચળાંક}}{(1-\gamma)} \times \left[\frac{1}{V_2^{\gamma-1}} - \frac{1}{V_1^{\gamma-1}}\right] \qquad (12.15)$$

સમીકરણ (12.14) પરથી, અચળાંકનું મૂલ્ય $P_1V_1^{\gamma}$ કે $P_2V_2^{\gamma}$ છે.

$$W = \frac{1}{1-\gamma}\left[\frac{P_2V_2^{\gamma}}{V_2^{\gamma-1}} - \frac{P_1V_1^{\gamma}}{V_1^{\gamma-1}}\right]$$

$$= \frac{1}{1-\gamma}[P_2V_2 - P_1V_1] = \frac{\mu R(T_1 - T_2)}{\gamma - 1} \qquad (12.16)$$

અપેક્ષા મુજબ જો વાયુ દ્વારા સમોષ્મી પ્રક્રિયામાં કાર્ય થતું હોય ($W > 0$), તો સમીકરણ (12.16) પરથી $T_2 < T_1$, બીજી બાજુ જો વાયુ પર કાર્ય થયું હોય ($W < 0$), તો $T_2 > T_1$ મળે, એટલે કે વાયુનું તાપમાન વધે છે.

સમકદ પ્રક્રિયા (Isochoric Process)

સમકદ પ્રક્રિયામાં V અચળ હોય છે. વાયુ પર કે વાયુ વડે કાર્ય થતું નથી. સમીકરણ (12.1) પરથી, વાયુ વડે શોષાયેલી ઉષ્મા સંપૂર્ણપણે તેની આંતરિક ઊર્જા અને તાપમાન બદલવામાં વપરાય છે. આપેલ જથ્થાની ઉષ્મા માટે તાપમાનમાં થતો ફેરફાર અચળ કદે વાયુની વિશિષ્ટ ઉષ્મા પરથી શોધી શકાય છે.

સમદાબ પ્રક્રિયા (Isobaric Process)

સમદાબ પ્રક્રિયામાં P અચળ હોય છે. વાયુ વડે થયેલું કાર્ય,

$$W = P(V_2 - V_1) = \mu R(T_2 - T_1) \qquad (12.17)$$

તાપમાન સાથે આંતરિક ઊર્જા પણ બદલાય છે. શોષાયેલી ઉષ્મા થોડીક આંતરિક ઊર્જાના વધારામાં અને થોડીક કાર્ય કરવામાં જાય છે. આપેલ જથ્થાની ઉષ્મા માટે તાપમાનમાં થતો ફેરફાર અચળ દબાણે વાયુની વિશિષ્ટ ઉષ્મા પરથી શોધી શકાય છે.

ચક્રીય પ્રક્રિયા (Cyclic Process)

ચક્રીય પ્રક્રિયામાં તંત્ર તેની પ્રારંભિક અવસ્થા સુધી પાછું આવે છે. આંતરિક ઊર્જા અવસ્થા ચલરાશિ હોવાથી ચક્રીય પ્રક્રિયા

માટે $\Delta U = 0$. સમીકરણ (12.1) પરથી શોષાયેલી ઉષ્મા તંત્ર વડે થયેલા કાર્ય જેટલી હોય છે.

12.9 ઉષ્મા એન્જિનો (HEAT ENGINES)

ઉષ્મા એન્જિન એવું સાધન છે કે જેના દ્વારા તંત્ર ચક્રીય પ્રક્રિયા કરે, જેના પરિણામે ઉષ્માનું કાર્યમાં રૂપાંતર થાય છે.

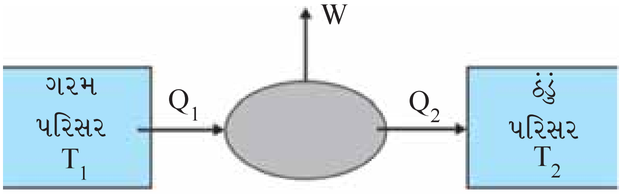
(1) તે **કાર્યકારી પદાર્થ**-ધરાવતા તંત્રનું બનેલું છે. દા.ત., પેટ્રોલ કે ડીઝલ એન્જિનમાં બળતણની બાષ્પ (વરાળ) અને વાયુનું મિશ્રણ, કે વરાળ યંત્રમાં વરાળ એ કાર્યકારી પદાર્થો છે.

(2) કાર્યકારી પદાર્થ ઘણીબધી પ્રક્રિયાઓમાંથી પસાર થઈને એક ચક્ર પૂરું કરે છે. આમાંની કેટલીક પ્રક્રિયાઓમાં તે કોઈ ઊંચા તાપમાન T_1 પર રહેલા બહારના પરિસરમાંથી કુલ ઉષ્મા Q_1 શોષે છે.

(3) ચક્રની કેટલીક પ્રક્રિયાઓમાં કાર્યકારી પદાર્થ કુલ Q_2 ઉષ્મા, નીચા તાપમાન T_2 એ રહેલા બહારના પરિસરમાં મુક્ત કરે છે.

(4) ચક્ર દરમિયાન તંત્ર વડે થયેલ કાર્ય (W) કોઈ વ્યવસ્થા દ્વારા પરિસર સુધી પહોંચે છે. (દા.ત., કાર્યકારી પદાર્થ ખસી શકે તેવા પિસ્ટન ધરાવતા નળાકાર પાત્રમાં હોઈ શકે જે યાંત્રિકઊર્જાને ધોરિયા (Shaft) દ્વારા બહારનાં પૈડાં સુધી પહોંચાડે.)

ઉષ્મા એન્જિનનાં મૂળભૂત લક્ષણોની રૂપરેખા આકૃતિ 12.9માં દર્શાવી છે.



આકૃતિ 12.9 ઉષ્મા એન્જિનની વ્યવસ્થાનું નિદર્શન. T_1 તાપમાને રહેલા પરિસરમાંથી એન્જિન Q_1 ઉષ્મા મેળવે છે. T_2 તાપમાને રહેલા ઠંડા પરિસરમાં Q_2 ઉષ્મા મુક્ત કરે છે અને બહારના વિસ્તારમાં કાર્ય W પહોંચાડે છે.

કોઈ હેતુ માટે ઉપયોગી કાર્ય કરવા માટે આ ચક્ર વારે ઘડીએ પુનરાવર્તિત કરવામાં આવે છે. થરમૉડાયનેમિક્સની શાખાના મૂળ ઉષ્મા એન્જિનના અભ્યાસમાં રહેલ છે. એક મૂળભૂત પ્રશ્ન ઉષ્મા એન્જિનની કાર્યક્ષમતા સાથે જોડાયેલ છે. આ ઉષ્મા એન્જિનની કાર્યક્ષમતા (η), આ રીતે વ્યાખ્યાયિત થાય છે.

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \qquad (12.18)$$

જ્યાં, Q_1 એ આપેલી ઉષ્મા એટલે કે એક સંપૂર્ણ ચક્ર દરમિયાન તંત્રએ શોષેલી ઉષ્મા અને W એ સંપૂર્ણ ચક્ર દરમિયાન પરિસર પર થયેલ કાર્ય છે. એક ચક્ર દરમિયાન અમુક જથ્થાની ઉષ્મા (Q_2) પરિસરમાં પણ મુક્ત થઈ હોઈ શકે. આમ, એક ચક્ર માટે થરમૉડાયનેમિક્સના પ્રથમ નિયમ મુજબ,

$$W = Q_1 - Q_2 \qquad (12.19)$$

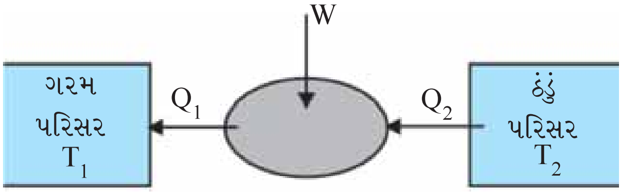
$$\text{તેથી, } \eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \qquad (12.20)$$

$Q_2 = 0$ માટે $\eta = 1$, એટલે કે ઉષ્માનું કાર્યમાં રૂપાંતર કરવાની એન્જિનની કાર્યક્ષમતા 100 % હશે. નોંધો કે થરમૉડાયનેમિક્સનો પ્રથમ નિયમ એટલે કે, ઊર્જા સંરક્ષણનો નિયમ આવા એન્જિનને નકારતો નથી. પરંતુ અનુભવ દર્શાવે છે કે, વાસ્તવિક ઉષ્મા એન્જિનો સાથે સંકળાયેલા જુદા જુદા પ્રકારના વ્યય દૂર કરીએ તોપણ $\eta = 1$ હોય તેવું આદર્શ એન્જિન કદી શક્ય નથી. પ્રકૃતિના નૈસર્ગિક સિદ્ધાંત મુજબ એ દેખાઈ આવે છે કે, ઉષ્મા એન્જિનની કાર્યક્ષમતાની એક સૈદ્ધાંતિક મર્યાદા છે, જે થરમૉડાયનેમિક્સનો બીજો નિયમ કહેવાય છે (પરિચ્છેદ 12.11).

ઉષ્માનું કાર્યમાં રૂપાંતર કરવા માટેની કાર્યપ્રણાલી જુદા જુદા ઉષ્મા એન્જિનો માટે અલગ પ્રકારની હોય છે. સામાન્ય રીતે એના બે પ્રકાર છે : તંત્રને (જેમકે વાયુ કે વાયુઓના મિશ્રણ) બાહ્ય ભઠ્ઠી (Furnace) દ્વારા ગરમ કરવામાં આવે, વરાળ એન્જિનની જેમ; અથવા ઉષ્માક્ષેપક (Exothermic) રાસાયણિક પ્રક્રિયા દ્વારા અંદરથી જ ગરમ કરવામાં આવે, જેમકે આંતરિક બળતણ એન્જિન (Internal Combustion Engine). એક ચક્ર દરમિયાન સંકળાયેલા વિવિધ પદ (તબક્કા) (Steps) પણ એક એન્જિનથી બીજા એન્જિન માટે જુદા હોઈ શકે.

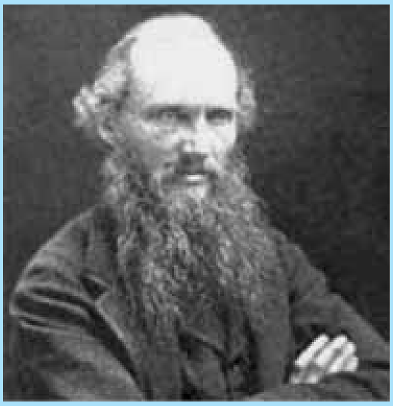
12.10 રેફ્રિજરેટરો અને હીટ (ઉષ્મા) પંપો (REFRIGERATORS AND HEAT PUMPS)

રેફ્રિજરેટર, ઉષ્મા એન્જિનથી ઊલટું છે. અહીં કાર્યકારી પદાર્થ, T_2 તાપમાને રહેલા ઠંડા પરિસરમાંથી Q_2 ઉષ્મા મેળવે (ખેંચે) છે. થોડુંક બાહ્ય કાર્ય W તેના પર કરવામાં આવે છે અને T_1 તાપમાને રહેલા ગરમ પરિસરમાં Q_1 ઉષ્મા મુક્ત કરવામાં આવે છે.



આકૃતિ 12.10 હીટ એન્જિનથી ઊલટું રેફ્રિજરેટર કે હીટ પંપની રૂપરેખા

થરમૉડાયનેમિક્સના પ્રણેતાઓ (Pioneers of Thermodynamics)



લૉર્ડ કૅલ્વિન (વિલિયમ થોમસન) Lord Kelvin (William Thomson) (1824-1907) આયર્લૅન્ડના બેલફાસ્ટમાં જન્મેલા, જે ઓગણીસમી સદીના બ્રિટિશ વિજ્ઞાનીઓમાંના આગલી હરોળના (Foremost) વિજ્ઞાની છે. જેમ્સ જૂલ (1818-1889), જુલિયસ મેયર (1814-1878) અને હરમન હેલ્મહોલ્ટ્ઝ (1821-1894) એ નિર્દેશ કરેલ ઊર્જા-સંરક્ષણના નિયમના વિકાસમાં તેમનો ખૂબ અગત્યનો ફાળો છે. તેમણે જાણીતી જૂલ-થોમસન અસર (શૂન્યાવકાશમાં વાયુના પ્રસરણ દરમિયાન તે ઠંડો પડે) માટે જૂલ સાથે કાર્ય કર્યું હતું. તેમણે નિરપેક્ષ શૂન્ય તાપમાનનો સિદ્ધાંત આપ્યો હતો અને નિરપેક્ષ તાપમાન માપક્રમ દર્શાવ્યો હતો, જે તેમના માનમાં કૅલ્વિન માપક્રમ કહેવાય છે. સાદી કાર્નોટ (1796-1832)ના કાર્ય પરથી થોમસને થરમૉડાયનેમિક્સનો બીજો નિયમ આપ્યો. થોમસન બહુમુખી પ્રતિભાવાળા ભૌતિકશાસ્ત્રી હતા, જેમનું અગત્યનું પ્રદાન વિદ્યુતચુંબકીય સિદ્ધાંત અને જલ ગતિશાસ્ત્ર (Hydrodynamics)માં પણ છે.

રુડૉલ્ફ ક્લૉસિયસ (Rudolf Clausius) (1822-1888) પોલૅન્ડમાં જન્મેલા, જે થરમૉડાયનેમિક્સના બીજા નિયમના શોધક તરીકે જાણીતા છે. કાર્નોટ અને થોમસનનાં કાર્યના આધારે, ક્લૉસિયસે એન્ટ્રોપીનો અગત્યનો સિદ્ધાંત તારવ્યો જે તેમને થરમૉડાયનેમિક્સના બીજા નિયમ તરફ દોરી ગયો, જે દર્શાવે છે કે અલગ કરેલા તંત્રની એન્ટ્રોપી ક્યારેય ઘટી ના શકે. ક્લૉસિયસે વાયુઓના ગતિવાદ પર પણ કાર્ય કર્યું હતું અને અણુઓના પરિમાણ, ઝડપ, મુક્ત ગતિપથ વગેરે વિશે ભરોસાપાત્ર પરિણામો મેળવ્યાં હતાં.

હીટ પંપ એ રેફ્રિજરેટર જેવો જ છે. આપણે કયો શબ્દ વાપરવો એ સાધનના હેતુ પર આધાર રાખે છે. જો થોડીક જગ્યા, જેમ કે ચેમ્બરનો અંદરનો ભાગ ઠંડો કરવો હોય અને બહારનું પરિસર ઊંચા તાપમાને હોય તો તે માટેના સાધનને આપણે રેફ્રિજરેટર કહીએ છીએ. જો હેતુ અમુક જગ્યામાં (બહારનું વાતાવરણ ઠંડું હોય ત્યારે ઈમારતના ઓરડામાં) ઉષ્મા દાખલ કરવાનો હોય તો તે માટેના સાધનને હીટપંપ કહે છે.

રેફ્રિજરેટરમાં કાર્યકારી પદાર્થ (મોટા ભાગે, વાયુ સ્વરૂપમાં) નીચેના તબક્કાઓમાંથી પસાર થાય છે : (a) વાયુનું ઊંચા દબાણથી નીચા દબાણ તરફ અચાનક વિસ્તરણ, જે તેને ઠંડો કરે છે અને તેને બાષ્પ-પ્રવાહી મિશ્રણમાં રૂપાંતરિત કરે છે, (b) જે વિસ્તારનું તાપમાન ઘટાડવાનું છે તેમાંથી ઠંડા પ્રવાહી વડે ઉષ્માનું શોષણ, જેથી પ્રવાહીનું બાષ્પમાં રૂપાંતર થાય છે. (c) તંત્ર પર બહારથી થતા કાર્ય વડે બાષ્પનું તાપમાન વધારવું અને (d) બાષ્પ દ્વારા પરિસરમાં ઉષ્મા મુક્ત કરવી, જેથી ફરીથી તે પોતાની પ્રારંભિક અવસ્થામાં આવે અને આ ચક્ર પૂરું થાય.

રેફ્રિજરેટરનો પરફોર્મન્સ (કાર્ય સિદ્ધિ) ગુણાંક (α) (Coefficient of Performance) આ રીતે દર્શાવાય,

$$\alpha = \frac{Q_2}{W} \qquad (12.21)$$

જ્યાં, Q_2 એ ઠંડા પ્રાપ્તિસ્થાનમાંથી મેળવેલ ઉષ્મા છે અને W એ રેફ્રિજરન્ટ એટલે કે તંત્ર પર થયેલ કાર્ય છે. (હીટ પંપ માટે αને Q_1/W વડે વ્યાખ્યાયિત કરાય છે.) નોંધો કે વ્યાખ્યા મુજબ η ક્યારેય 1 કરતાં વધારે થઈ શકતો નથી, જ્યારે α, 1 કરતાં વધુ હોઈ શકે. ઊર્જા-સંરક્ષણ મુજબ ઉષ્ણ (ગરમ) પરિસરમાં મુક્ત થયેલ ઉષ્મા

$$Q_1 = W + Q_2$$

એટલે, $$\alpha = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} \qquad (12.22)$$

હીટ એન્જિનમાં, ઉષ્મા સંપૂર્ણ રીતે કાર્યમાં રૂપાંતરિત થઈ શકતી નથી; તે જ રીતે રેફ્રિજરેટરમાં જ્યાં સુધી તંત્ર પર બાહ્ય કાર્ય થાય નહિ ત્યાં સુધી તે કાર્ય કરી શકતું નથી. એટલે કે, સમીકરણ (12.21)માં પરફોર્મન્સ ગુણાંક અનંત થઈ શકે નહિ.

12.11 થરમૉડાયનેમિક્સનો બીજો નિયમ (SECOND LAW OF THERMODYNAMICS)

થરમૉડાયનેમિક્સનો પહેલો નિયમ ઊર્જા-સંરક્ષણનો સિદ્ધાંત છે. સામાન્ય અનુભવ દર્શાવે છે કે એવી કેટલીય પ્રક્રિયાઓ છે કે જે પહેલા નિયમનું પાલન કરતી હોય અને છતાં તેમનું અવલોકન ન કર્યું હોય. દા.ત., ટેબલ પર પડેલ પુસ્તકને ક્યારેય કોઈએ એની જાતે ટેબલ પર ઉંચે કૂદકા મારતું ન

જોયું હોય. જો ઊર્જા-સંરક્ષણના નિયમનું જ એક માત્ર બંધન (Restriction) હોત તો કદાચ આમ શક્ય બનત. ટેબલ કદાચ અચાનક ઠંડું થાય, જેથી તેની આંતરિક ઊર્જા તેટલા પ્રમાણમાં પુસ્તકની યાંત્રિકઊર્જામાં રૂપાંતરિત થાય. જે ત્યાર બાદ મેળવેલ યાંત્રિકઊર્જાને સમતુલ્ય સ્થિતિઊર્જા જેટલી ઊંચાઈ સુધી કૂદકો મારે. પરંતુ આવું ક્યારેય થતું નથી. નિઃશંક તે ઊર્જા-સંરક્ષણના સિદ્ધાંતનું સમાધાન કરતું હોવા છતાં, પ્રકૃતિનો બીજો કોઈ પાયાનો સિદ્ધાંત આમ થવા દેતો નથી. આ સિદ્ધાંત, જે થરમૉડાયનેમિક્સના પહેલા નિયમનું પાલન કરતી ઘણી પ્રક્રિયાઓ થવા દેતો નથી, તેને થરમૉડાયનેમિક્સનો બીજો નિયમ કહે છે.

થરમૉડાયનેમિક્સનો બીજો નિયમ હીટ એન્જિનની કાર્યક્ષમતા અને રેફ્રિજરેટરના પરફૉર્મન્સ ગુણાંક માટેની મૂળભૂત મર્યાદાઓ દર્શાવે છે. સાદી ભાષામાં તે દર્શાવે છે કે હીટ એન્જિનની કાર્યક્ષમતા ક્યારેય 1 જેટલી ન હોઈ શકે. સમીકરણ (12.20) મુજબ, ઠંડા પરિસરમાં મુક્ત કરવામાં આવેલી ઉષ્મા ક્યારે પણ શૂન્ય ન કરી શકાય. રેફ્રિજરેટર માટે બીજો નિયમ દર્શાવે છે કે, પરફૉર્મન્સ ગુણાંક ક્યારે પણ અનંત ન હોઈ શકે. સમીકરણ (12.21) મુજબ, આનો મતલબ એ કે બાહ્ય કાર્ય (W) ક્યારે પણ શૂન્ય ન હોઈ શકે. નીચે આપેલ બે વિધાનોમાં, પહેલું કેલ્વિન અને પ્લાન્કનું છે, જે મુજબ આદર્શ હીટ એન્જિન શક્ય નથી અને બીજું ક્લૉસિયસનું છે, જે મુજબ આદર્શ રેફ્રિજરેટર કે હીટ પંપ શક્ય નથી, એ ઉપરનાં અવલોકનોના સંક્ષિપ્ત સારાંશ છે.

થરમૉડાયનેમિક્સનો બીજો નિયમ (Second Law of Thermodynamics)

કેલ્વિન-પ્લાન્કનું કથન

એવી કોઈ પ્રક્રિયા શક્ય નથી જેના એકમાત્ર પરિણામરૂપે ઉષ્મા પ્રાપ્તિસ્થાન (પરિસર)માંથી ઉષ્માનું શોષણ થઈ પૂરેપૂરી ઉષ્માનું કાર્યમાં રૂપાંતર થાય.

ક્લૉસિયસનું કથન

એવી પ્રક્રિયા શક્ય નથી કે જેના એકમાત્ર પરિણામરૂપે ઉષ્માનો વિનિમય (વહન) ઠંડા પદાર્થથી ગરમ પદાર્થ તરફ થાય.

એ સાબિત કરી શકાય કે ઉપરનાં બંને વિધાનો સમતુલ્ય છે.

12.12 પ્રતિવર્તી અને અપ્રતિવર્તી પ્રક્રિયાઓ (REVERSIBLE AND IRREVERSIBLE PROCESSES)

કોઈ પ્રક્રિયા વિચારો કે જેમાં થરમૉડાયનેમિક તંત્ર પ્રારંભિક અવસ્થા iથી અંતિમ અવસ્થા f સુધી જાય છે. આ પ્રક્રિયા દરમિયાન તંત્ર પરિસરમાંથી Q જેટલી ઉષ્મા શોષે (મેળવે) છે અને તેના પર W કાર્ય કરે છે. શું આપણે આ પ્રક્રિયાને ઊલટાવીને તંત્ર અને પરિસર બંનેને ક્યાંય પણ અન્ય કોઈ અસર વગર તેમની પ્રારંભિક અવસ્થાઓ સુધી લઈ જઈ શકીએ ? અનુભવ દર્શાવે છે કે કુદરતની મોટા ભાગની પ્રક્રિયાઓ માટે આ શક્ય નથી. કુદરતની સ્વતઃ (Spontaneous) પ્રક્રિયાઓ અપ્રતિવર્તી હોય છે. કેટલાંક ઉદાહરણો આપી શકાય. સગડી (ભઠ્ઠી) પર મૂકેલા વાસણ (પાત્ર)નું તળિયું તેના બીજા ભાગોથી વધુ ગરમ હશે. જ્યારે વાસણને લઈ લેવામાં આવે ત્યારે ઉષ્મા તેના તળિયાથી બીજા ભાગો તરફ જાય છે; જેથી પાત્ર સમાન તાપમાને પહોંચે (જે સમય જતાં પરિસરના તાપમાન સુધી ઠંડું પડે છે). આ પ્રક્રિયાને ઊલટાવી ન શકાય; વાસણનો કોઈ ભાગ આપમેળે ઠંડો પડે અને તળિયું ગરમ થાય એવું નહિ બને. જો એમ થાય તો તે થરમૉડાયનેમિક્સના બીજા નિયમનું ઉલ્લંઘન કરશે. તણખો કરીને સળગાવેલું પેટ્રોલ અને હવાનું મિશ્રણ ઊલટાવી ન શકાય. રસોડામાં ગૅસ સિલિન્ડરમાંથી ગળતો (ચુવાતો/Leaking) ગૅસ આખા ઓરડામાં પ્રસરે છે. પ્રસરવાની આ પ્રક્રિયા જાતે ઊલટાઈ જઈને ગૅસને પાછો સિલિન્ડરમાં ભરી દેશે નહિ. પરિસર સાથે તાપીય સંપર્કમાં રહેલા પ્રવાહીને સતત (ચક્રીય રીતે) હલાવતાં થયેલ કાર્ય ઉષ્મામાં રૂપાંતર પામશે, જેથી પરિસરની આંતરિક ઊર્જા વધે. આ પ્રક્રિયા તદ્દન ઊલટાવી શકાય નહિ; નહિતર તેના પરિણામે ઉષ્માનું સંપૂર્ણપણે કાર્યમાં રૂપાંતર થાય, જે થરમૉડાયનેમિક્સના બીજા નિયમનું ઉલ્લંઘન કરે. અપ્રતિવર્તીપણું એ, અપવાદ નહિ પણ કુદરતનો નિયમ છે.

અપ્રતિવર્તીપણું મુખ્યત્વે બે કારણે ઉદ્ભવે છે : એક, ઘણી પ્રક્રિયાઓ (જેમકે મુક્ત વિસ્તરણ અથવા વિસ્ફોટક રાસાયણિક પ્રક્રિયા) તંત્રને અસંતુલિત અવસ્થાઓ સુધી દોરી જાય છે; બીજું, મોટા ભાગની પ્રક્રિયાઓ ઘર્ષણ, શ્યાનતા અને બીજી ઊર્જા વ્યય કરતી (Dissipative) ઘટનાઓ (દા.ત., ગતિ કરતો કોઈ પદાર્થ રોકાય ત્યાં સુધીમાં તેની યાંત્રિકઊર્જાને જમીન અને પદાર્થમાં ઉષ્માના રૂપમાં ગુમાવતો જાય, પ્રવાહીમાં ચક્રીય ગતિ કરતું પાંખિયું શ્યાનતાના કારણે રોકાય અને તેની યાંત્રિકઊર્જાને ગુમાવીને પ્રવાહીની આંતરિક ઊર્જાનો વધારો કરે). ઊર્જાનો વ્યય કરતી ઘટનાઓ દરેક જગ્યાએ હાજર હોય છે અને તેમને ન્યૂનતમ કરી શકાય છે, પરંતુ બિલકુલ દૂર કરી શકાતી નથી. મોટા ભાગની પ્રક્રિયાઓ જેમની સાથે આપણે કાર્ય કરીએ છીએ તે અપ્રતિવર્તી હોય છે.

જે પ્રક્રિયાને ઊલટાવી શકાય કે જેથી બંને તંત્ર અને પરિસર વિશ્વમાં બીજે ક્યાંય કોઈ ફેરફાર વગર તેમની પ્રારંભિક અવસ્થાઓ સુધી પહોંચે તો આ પ્રક્રિયા (અવસ્થા $i \rightarrow$ અવસ્થા f)ને પ્રતિવર્તી કહેવાય. અગાઉની ચર્ચા મુજબ, પ્રતિવર્તી પ્રક્રિયા એક આદર્શવાદ છે. કોઈ પ્રક્રિયા

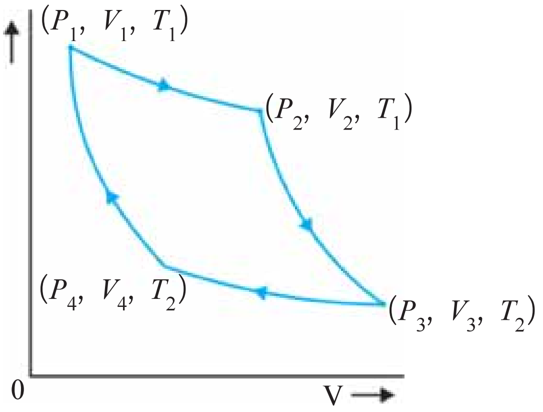
પ્રતિવર્તી તો જ હોય જો તે ક્વૉસાઇ-સ્ટેટિક (દરેક તબક્કામાં તંત્ર પરિસર સાથે સંતુલનમાં) હોય અને તેમાં કોઈ ઊર્જા વ્યય કરતી પ્રક્રિયાઓ ના હોય. દા.ત., એક આદર્શ વાયુનું, ખસી શકે તેવા પિસ્ટન ધરાવતા નળાકાર પાત્રમાં, ક્વૉસાઇ-સ્ટેટિક સમતાપી વિસ્તરણ એ પ્રતિવર્તી પ્રક્રિયા છે.

થરમૉડાયનેમિક્સમાં શા માટે પ્રતિવર્તીપણું એ પાયાનો સિદ્ધાંત છે ? આપણે જોયું તેમ, થરમૉડાયનેમિક્સનો એક હિતસંબંધ એ પણ છે કે, ઉષ્માનું કાર્યમાં રૂપાંતર કેટલી કાર્યક્ષમતાથી થાય છે. થરમૉડાયનેમિક્સનો બીજો નિયમ દર્શાવે છે કે 100 % કાર્યક્ષમતાવાળું હીટ એન્જિન હોવાની શક્યતા નથી. પરંતુ T_1 અને T_2 તાપમાન ધરાવતા બે પરિસરો વચ્ચે કાર્ય કરતા હીટ એન્જિનની મહત્તમ કાર્યક્ષમતા કેટલી હોઈ શકે ? એ જણાય છે કે આદર્શ રીતે થતી પ્રતિવર્તી પ્રક્રિયાઓ માટે હીટ એન્જિનની કાર્યક્ષમતા મહત્તમ હોય છે. બાકીના બીજા એન્જિન જેમાં અપ્રતિવર્તી પ્રક્રિયાઓ સંકળાયેલી હોય (જે વાસ્તવમાં જોવા મળતા એન્જિનમાં હોય છે) તેમની કાર્યક્ષમતા આ મૂલ્યથી ઓછી હોય છે.

12.13 કાર્નોટ એન્જિન (CARNOT ENGINE)

ધારો કે આપણી પાસે ગરમ પરિસર T_1 તાપમાને અને ઠંડું પરિસર T_2 તાપમાને છે. આ બે પરિસર વચ્ચે કાર્ય કરતા હીટ એન્જિનની મહત્તમ કાર્યક્ષમતા કેટલી હોઈ શકે અને આ મહત્તમ કાર્યક્ષમતા મેળવવા માટે કઈ પ્રક્રિયાઓનું ચક્ર ધ્યાનમાં લેવું જોઈએ ? 1824માં ફ્રેન્ચ એન્જિનિયર સાડી કાર્નોટે (Sadi Carnot) આ પ્રશ્ન પર પ્રથમ ધ્યાન કેન્દ્રિત કર્યું. અગત્યનું એ હતું કે ઉષ્મા અને થરમૉડાયનેમિક્સના પાયાના ખ્યાલો ચોક્સાઈથી સ્થાપિત થયા નહોતા, એ પહેલાં કાર્નોટને સાચો જવાબ મળ્યો.

આપણી અપેક્ષા હોઈ શકે કે બે તાપમાન વચ્ચે કાર્ય કરતું આદર્શ એન્જિન પ્રતિવર્તી એન્જિન હોવું જોઈએ. અગાઉના વિભાગમાં દર્શાવ્યું તેમ અપ્રતિવર્તીપણું એ ઊર્જા વ્યય કરતી પ્રક્રિયાઓ સાથે સંકળાયેલું છે અને તે કાર્યક્ષમતા ઘટાડે છે. જે પ્રક્રિયા અર્ધસ્થાયી (ક્વૉસાઇ-સ્ટેટિક) અને ઊર્જાવ્યય કરતી ન હોય તે પ્રતિવર્તી હોય. આપણે જોયું હતું કે જે પ્રક્રિયામાં તંત્ર અને પરિસર વચ્ચે ચોક્કસ તાપમાનનો તફાવત હોય તે ક્વૉસાઇ-સ્ટેટિક ન હોય. આનો મતલબ એ કે બે તાપમાન વચ્ચે કાર્ય કરતાં પ્રતિવર્તી હીટ એન્જિનમાં, ઉષ્માનું શોષણ (ગરમ પરિસરમાંથી) સમતાપી અને વ્યય (ઠંડા પરિસર તરફ) પણ સમતાપી હોવા જોઈએ. આમ, આપણે પ્રતિવર્તી હીટ એન્જિનના બે તબક્કા જાણી લીધા : T_1 તાપમાને સમતાપી પ્રક્રિયા દ્વારા ગરમ પરિસરમાંથી Q_1 ઉષ્માનું શોષણ અને T_2 તાપમાને Q_2 ઉષ્માનો વ્યય. ચક્ર પૂરું કરવા માટે, આપણે તંત્રને T_1થી T_2 તાપમાને લઈ જવું પડે અને ત્યાર બાદ પાછું તાપમાન T_2 થી T_1 પર. એવી કઈ પ્રતિવર્તી પ્રક્રિયાઓ છે જેમનો આપણે આ માટે ઉપયોગ કરી શકીએ ? સામાન્ય પ્રતિક્રિયા તો એમ કહે છે કે આ માટે આપણે સમોષ્મી પ્રતિવર્તી પ્રક્રિયાઓનો ઉપયોગ કરી શકીએ, જેમાં પરિસરમાંથી કોઈ પણ પ્રકારની ઉષ્માનો વિનિમય થતો નથી. જો આપણે બીજી કોઈ પ્રક્રિયાનો ઉપયોગ કરીએ કે જે સમોષ્મી ના હોય, ધારો કે સમકદ (Isochoric) પ્રક્રિયા તો તંત્રને એક તાપમાનથી બીજા તાપમાન સુધી લઈ જવા માટે આપણને T_2થી T_1 સુધીના તાપમાનની મર્યાદામાં આવેલાં પરિસરોની એક શ્રેણીની જરૂર પડે જેથી દરેક અવસ્થામાં પ્રક્રિયા ક્વૉસાઇ-સ્ટેટિક રહે. (ફરીથી યાદ રહે કે પ્રક્રિયા ક્વૉસાઇ-સ્ટેટિક અને પ્રતિવર્તી હોવા માટે, તંત્ર અને પરિસર વચ્ચે ચોક્કસ તાપમાનનો તફાવત ન હોવો જોઈએ). પરંતુ આપણે એવું પ્રતિવર્તી એન્જિન વિચાર્યું છે કે જે ફક્ત બે તાપમાન વચ્ચે કાર્ય કરે છે. આમ સમોષ્મી પ્રક્રિયા આ એન્જિન માટે તંત્રના તાપમાનને T_1 થી T_2 અને T_2 થી T_1 સુધી લઈ જવી જોઈએ.



આકૃતિ 12.11 *હીટ એન્જિન માટેનું કાર્નોટ ચક્ર જેમાં આદર્શ વાયુ કાર્યકારી પદાર્થ તરીકે કાર્ય કરે છે.*

બે તાપમાન વચ્ચે કાર્ય કરતું પ્રતિવર્તી હીટ એન્જિન, કાર્નોટ એન્જિન કહેવાય. આકૃતિ 12.11માં દર્શાવ્યા મુજબ કાર્નોટ ચક્રમાં આવું એન્જિન એક ચક્ર દરમિયાન આપેલા શ્રેણીબદ્ધ તબક્કાઓમાં કાર્ય કરતું હોવું જોઈએ. આપણે કાર્નોટ એન્જિનના કાર્યકારી પદાર્થ તરીકે આદર્શ વાયુ લીધેલો છે.

(a) તબક્કો 1 $\rightarrow$ 2 વાયુનું સમતાપી વિસ્તરણ જે તેને (P_1, V_1, T_1) થી (P_2, V_2, T_1) અવસ્થા સુધી લઈ જાય છે.

T_1 તાપમાને રહેલા પરિસરમાંથી વાયુ વડે શોષાયેલી ઉષ્મા (Q_1)ને સમીકરણ (12.12)માં દર્શાવી છે. તે વાયુ વડે પરિસર

પર થયેલા કાર્ય ($W_{1 \to 2}$) જેટલી છે.

$$W_{1 \to 2} = Q_1 = \mu\ R\ T_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \tag{12.23}$$

(b) તબક્કો 2 → 3 (P_2, V_2, T_1) થી (P_3, V_3, T_2) સુધી વાયુનું સમોષ્મી પ્રસરણ.

સમીકરણ (12.16) પરથી વાયુ વડે થયેલું કાર્ય

$$W_{2 \to 3} = \frac{\mu R(T_1 - T_2)}{\gamma - 1} \tag{12.24}$$

(c) તબક્કો 3 → 4 (P_3, V_3, T_2) થી (P_4, V_4, T_2) સુધી વાયુનું સમતાપી સંકોચન.

T_2 તાપમાને રહેલા પરિસરમાં વાયુ વડે મુક્ત થયેલ ઉષ્મા (Q_2), સમીકરણ (12.12) વડે દર્શાવી છે. તે પણ પરિસર વડે વાયુ પર થયેલ કાર્ય ($W_{3 \to 4}$) જેટલી છે.

$$W_{3 \to 4} = Q_2 = \mu R T_2 \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right) \tag{12.25}$$

(d) તબક્કો 4 → 1 (P_4, V_4, T_2) થી (P_1, V_1, T_1) સુધી વાયુનું સમોષ્મી સંકુચન

(સમીકરણ (12.16) પરથી) વાયુ પર થયેલ કાર્ય

$$W_{4 \to 1} = \mu R\left(\frac{T_1 - T_2}{\gamma - 1}\right) \tag{12.26}$$

સમીકરણ (12.23) થી (12.26) પરથી, એક ચક્ર દરમિયાન વાયુ વડે થયેલ કુલ કાર્ય

$$W = W_{1 \to 2} + W_{2 \to 3} - W_{3 \to 4} - W_{4 \to 1}$$

$$= \mu R T_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) - \mu R T_2 \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right) \tag{12.27}$$

કાર્નોટ એન્જિનની કાર્યક્ષમતા ηનું મૂલ્ય,

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

$$= 1 - \left(\frac{T_2}{T_1}\right)\frac{\ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right)}{\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)} \tag{12.28}$$

તબક્કો 2 → 3 સમોષ્મી પ્રક્રિયા હોવાથી,

$$T_1 V_2^{\gamma - 1} = T_2 V_3^{\gamma - 1}$$

તેથી $$\frac{V_2}{V_3} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{1/(\gamma - 1)} \tag{12.29}$$

તે જ રીતે, તબક્કો 4 → 1 સમોષ્મી પ્રક્રિયા હોવાથી,

$$T_2 V_4^{\gamma - 1} = T_1 V_1^{\gamma - 1}$$

તેથી, $$\frac{V_1}{V_4} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{1/(\gamma - 1)} \tag{12.30}$$

સમીકરણ (12.29) અને (12.30) પરથી,

$$\frac{V_3}{V_4} = \frac{V_2}{V_1} \tag{12.31}$$

સમીકરણ (12.31)નો ઉપયોગ સમીકરણ (12.28)માં કરતાં,

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad \text{(કાર્નોટ એન્જિન)} \tag{12.32}$$

આપણે અગાઉ જોયું હતું કે, કાર્નોટ એન્જિન એ પ્રતિવર્તી એન્જિન છે. ફક્ત તે જ એવું શક્ય પ્રતિવર્તી એન્જિન છે કે જે જુદાં જુદાં તાપમાને રહેલા બે પરિસર વચ્ચે કાર્ય કરે છે. આકૃતિ (12.11)માં દર્શાવેલ કાર્નોટ એન્જિનનો દરેક તબક્કો ઊલટાવી શકાય છે. આમાં T_2 તાપમાને રહેલા ઠંડા પરિસરમાંથી ઉષ્મા Q_2 લઈ તંત્ર પર W જેટલું કાર્ય કરી અને ગરમ પરિસરમાં ઉષ્મા Q_1 મુક્ત કરવામાં આવે છે. આ પ્રતિવર્તી રેફ્રિજરેટર છે.

હવે આપણે એક અગત્યનું પરિણામ (ઘણી વાર કાર્નોટનું પ્રમેય કહેવાય છે) સ્થાપિત કરીશું કે (a) અનુક્રમે T_1 અને T_2 તાપમાને રહેલા ગરમ અને ઠંડાં પરિસરો વચ્ચે કાર્ય કરતાં કોઈ પણ હીટ એન્જિનની કાર્યક્ષમતા કાર્નોટ એન્જિન કરતા વધુ ન હોઈ શકે, અને (b) કાર્નોટ એન્જિનની કાર્યક્ષમતા કાર્યકારી પદાર્થની પ્રકૃતિ પર આધાર રાખતી નથી.

પરિણામ (a) સાબિત કરવા તે જ ઉષ્મા પ્રાપ્તિસ્થાન (source) (ગરમ પરિસર) અને ઠારણ વ્યવસ્થા (sink) (ઠંડું પરિસર) વચ્ચે કાર્ય કરતું પ્રતિવર્તી (કાર્નોટ) એન્જિન R અને અપ્રતિવર્તી એન્જિન I વિચારો. આપણે, I અને Rને એવી રીતે જોડીએ છીએ કે I હીટ એન્જિન તરીકે વર્તે અને R રેફ્રિજરેટર તરીકે વર્તે. ધારો કે ઉષ્મા પ્રાપ્તિસ્થાનમાંથી I, Q_1 જેટલી ઉષ્મા શોષે છે, W' જેટલું કાર્ય કરે (આપે) છે અને ઠારણ વ્યવસ્થામાં $Q_1 - W'$ જેટલી ઉષ્મા મુક્ત કરે છે. આપણે એવી ગોઠવણી કરીએ કે, ઠારણ વ્યવસ્થામાંથી Q_2 ઉષ્મા લઈ અને $W = Q_1 - Q_2$ જેટલું જરૂરી કાર્ય તેના પર થવા દઈને, R તેટલી જ ઉષ્મા Q_1 ઉષ્મા પ્રાપ્તિસ્થાનને પાછી આપે. હવે ધારો કે $\eta_R < \eta_I$, એટલે