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

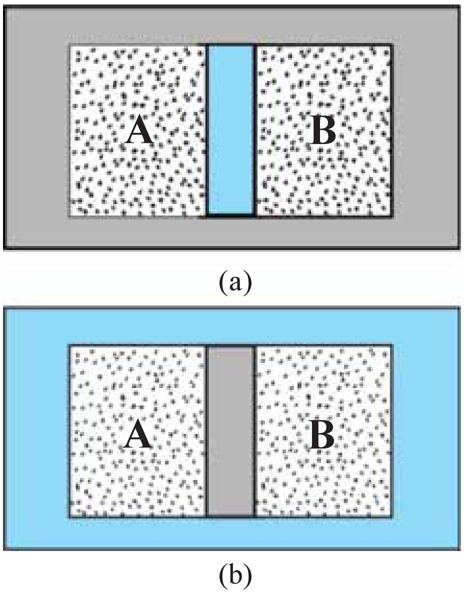
* *થરમૉડાયનેમિક્સમાં એવી ચલરાશિઓ પણ હોઈ શકે જે આપણી ઇન્દ્રિયો ખાસ અનુભવી શકતી ન હોય. દા.ત., એન્ટ્રોપી, એન્થાલ્પી વગેરે; અને તેઓ બધી સ્થૂળ ચલરાશિઓ છે.*

** *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)

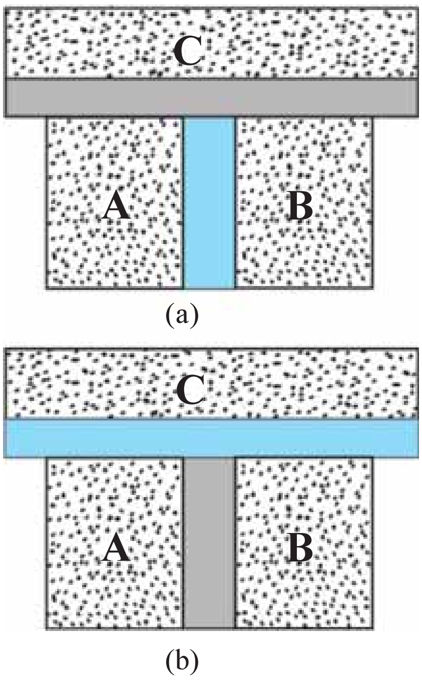
ધારો કે બે તંત્રો A અને B, સમોષ્મી (ઉષ્મા અવાહક) દીવાલ વડે છૂટા પાડેલા છે અને આ દરેક તંત્ર ત્રીજા તંત્ર C સાથે ઉષ્માવાહક દીવાલ વડે સંપર્કમાં છે (આકૃતિ 12.2(a)). આ તંત્રોની અવસ્થાઓ (એટલે કે તેમની સ્થૂળ ચલરાશિઓ) જ્યાં સુધી બંને તંત્રો A અને B, C સાથે તાપીય સંતુલનમાં ન આવે ત્યાં સુધી બદલાતી રહેશે. આમ થયા બાદ, ધારો કે A અને B વચ્ચેની ઉષ્મા અવાહક દીવાલની જગ્યાએ ઉષ્માવાહક દીવાલ મૂકવામાં આવે છે અને C ને A અને Bથી ઉષ્મા અવાહક દીવાલ વડે જુદું પાડવામાં આવે છે (આકૃતિ 12.2(b)). એવું જણાય છે કે A અને Bની 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.



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.



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 ઈતિહાસ (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).

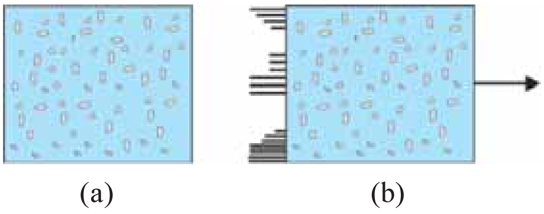
કોઈ તંત્રની આંતરિક ઊર્જા બદલવા માટેના કયા ઉપાયો (માર્ગ) છે ? આકૃતિ 12.4માં દર્શાવ્યા મુજબ ફરીથી, સરળતા ખાતર એક નળાકારમાં રહેલ ચોક્કસ દળ ધરાવતા વાયુનું તંત્ર ધારો. અનુભવ દર્શાવે છે કે વાયુની અવસ્થા (અને તેથી તેની આંતરિક ઊર્જા) બદલવા માટેના બે માર્ગ છે. એક માર્ગ એ છે કે આ વાયુ કરતાં ઊંચું તાપમાન ધરાવતા 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.

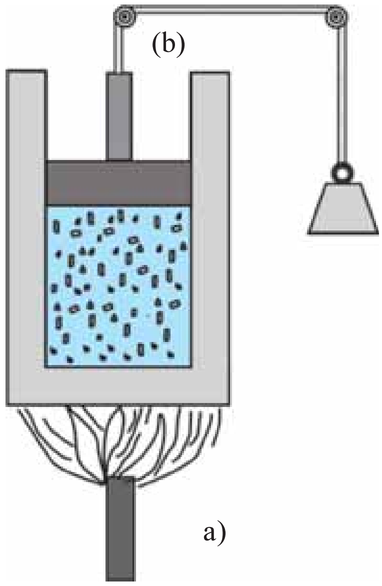
સારાંશ એ કે, થરમૉડાયનેમિક્સમાં ઉષ્મા અને કાર્ય એ અવસ્થા ચલો નથી. તે તંત્રમાં ઊર્જા વિનિમય દર્શાવે છે જે તેની આંતરિક ઊર્જામાં ફેરફાર કરે છે, જે અગાઉ દર્શાવ્યું તેમ અવસ્થા ચલરાશિ છે.

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.



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

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W \qquad (12.1)$$

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

$$\Delta Q - \Delta W = \Delta U \qquad (12.2)$$

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 $2 \times \frac{1}{2} k_B T = k_B T$ હોય છે. ત્રિપરિમાણમાં સરેરાશ ઊર્જા $3k_B T$ હોય છે. એક મોલ ઘન પદાર્થ માટે, કુલ ઊર્જા

$$U = 3k_B T \times N_A = 3\ RT$$

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

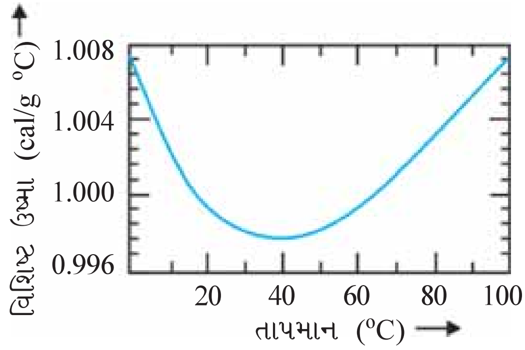
પદાર્થ	વિશિષ્ટ ઉષ્મા (J kg^{-1} K^{-1})	મોલર વિશિષ્ટ ઉષ્મા (J mol^{-1} K^{-1})
ઍલ્યુમિનિયમ	900.0	24.4
કાર્બન	506.5	6.1
તાંબું	386.4	24.5
સીસું	127.7	26.5
ચાંદી	236.1	25.5
ટંગસ્ટન	134.4	24.9

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

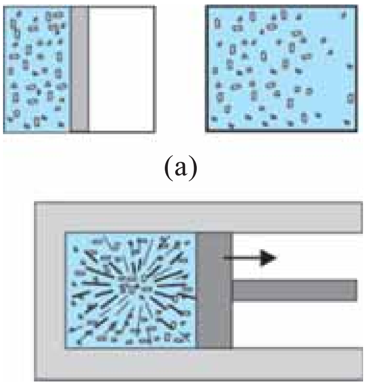
$$P\left(\frac{\Delta V}{\Delta T}\right)_P = R \qquad (12.11)$$

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.



(a)

(b)

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)

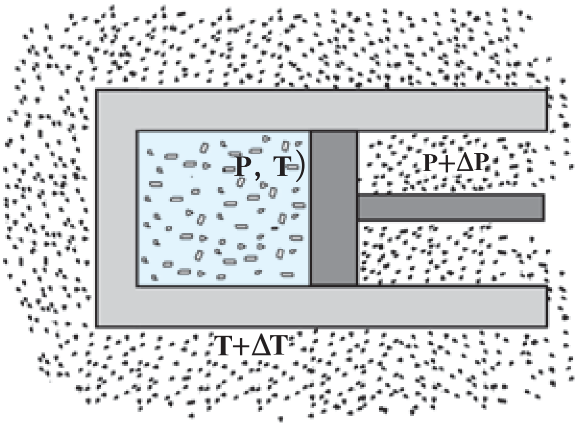
12.8.1 ક્વૉસાઈ સ્ટેટિક (અર્ધ-સ્થાયી) પ્રક્રિયા (Quasi-Static Process)

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 (ક્વૉસાઇ-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 ક્વૉસાઇ-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 (ક્વૉસાઇ-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 ક્વૉસાઇ-સ્ટેટિક પ્રક્રિયાની સન્નિકટતા છે. હવે પછી જ્યાં સુધી સ્પષ્ટ કહેવામાં ન આવે ત્યાં સુધી ક્વૉસાઇ 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 બૉઇલનો 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,

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

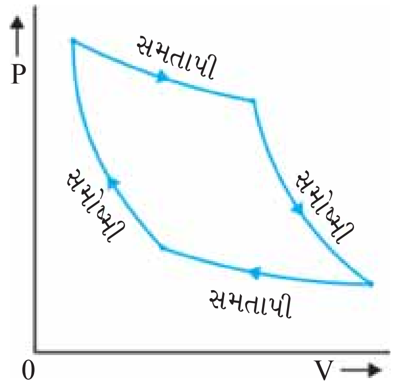
જ્યાં γ એ અચળ દબાણે અને અચળ કદે વિશિષ્ટ ઉષ્માઓ (સામાન્ય કે મોલર)નો ગુણોત્તર છે.

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

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

$$P_1 V_1^{\gamma} = P_2 V_2^{\gamma} = \text{અચળાંક} \qquad (12.14)$$

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.

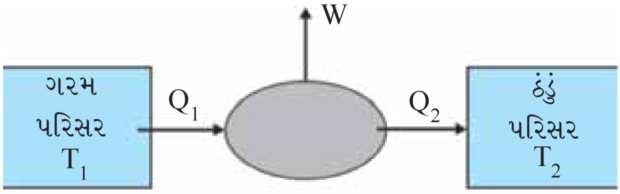
(1) તે **કાર્યકારી પદાર્થ**-ધરાવતા તંત્રનું બનેલું છે. દા.ત., પેટ્રોલ કે ડીઝલ એન્જિનમાં બળતણની બાષ્પ (વરાળ) અને વાયુનું મિશ્રણ, કે વરાળ યંત્રમાં વરાળ એ કાર્યકારી પદાર્થો છે.

(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.

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \tag{12.18}$$

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,

$$W = Q_1 - Q_2 \tag{12.19}$$

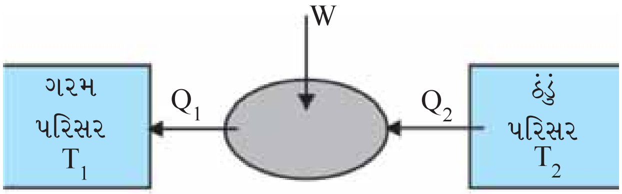
$$\text{તેથી, } \eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \tag{12.20}$$

$Q_2 = 0$ 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.

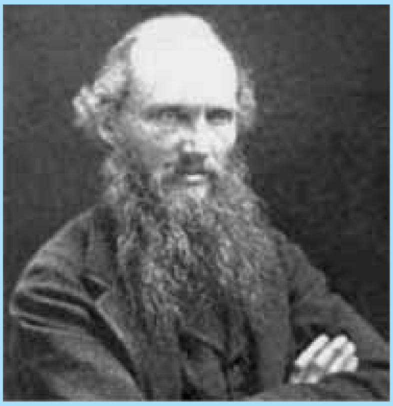
12.10 રેફ્રિજરેટરો અને હીટ (ઉષ્મા) પંપો (REFRIGERATORS AND HEAT PUMPS)

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 કેલ્વિન (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 કેલ્વિન 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,

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

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

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)

કૅલ્વિન-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

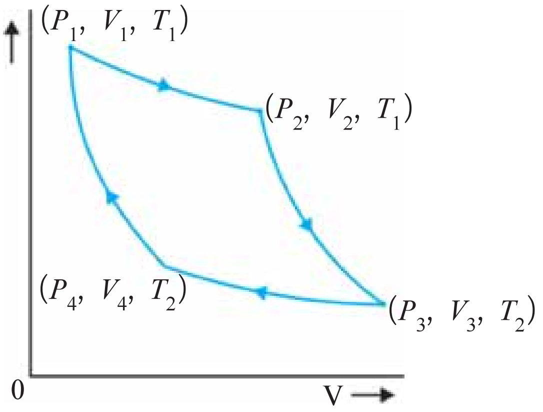
પ્રતિવર્તી તો જ હોય જો તે ક્વૉસાઇ-સ્ટેટિક (દરેક તબક્કામાં તંત્ર પરિસર સાથે સંતુલનમાં) હોય અને તેમાં કોઈ ઊર્જા વ્યય કરતી પ્રક્રિયાઓ ના હોય. દા.ત., એક આદર્શ વાયુનું, ખસી શકે તેવા પિસ્ટન ધરાવતા નળાકાર પાત્રમાં, ક્વૉસાઇ-સ્ટેટિક સમતાપી વિસ્તરણ એ પ્રતિવર્તી પ્રક્રિયા છે.

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.

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

(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

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

(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.

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

(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

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

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

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

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

કાર્નોટ એન્જિનની કાર્યક્ષમતા ηનું મૂલ્ય,

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

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

તબક્કો 2 → 3 સમોષ્મી પ્રક્રિયા હોવાથી,

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

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

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

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

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

સમીકરણ (12.29) અને (12.30) પરથી,

$$\frac{V_3}{V_4} = \frac{V_2}{V_1} \qquad (12.31)$$

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

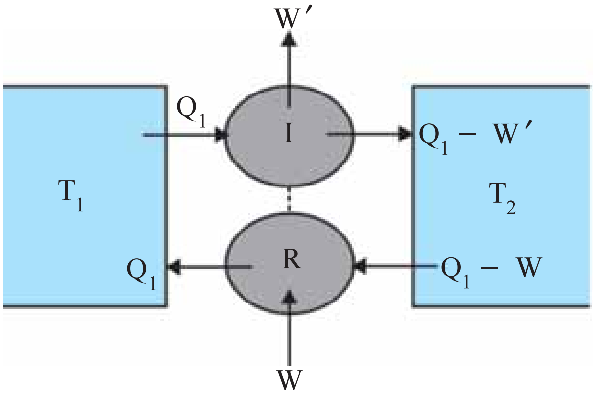
$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \ (\text{કાર્નોટ એન્જિન}) \qquad (12.32)$$

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

કે જો R એન્જિન તરીકે કાર્ય કરવાનું હોય, તો તે I કરતાં ઓછું કાર્ય ઊપજ (output) આપશે, જેથી આપેલ Q_1 માટે $W < W'$. R રેફ્રિજરેટર તરીકે કાર્ય કરતું હોવાથી, પરિણામ સ્વરૂપે $Q_2 = Q_1 - W > Q_1 - W'$. આમ, બધું મળીને ઉષ્મા પ્રાપ્તિસ્થાન કે બીજે ક્યાંય કોઈ પણ ફેરફાર વગર $I - R$નું જોડેલ તંત્ર ઠંડા પરિસરમાંથી $(Q_1 - W) - (Q_1 - W') = (W' - W)$ ઉષ્મા મેળવશે અને તેટલું જ કાર્ય એક ચક્ર દરમિયાન આપશે. આ સ્પષ્ટ પણે કેલ્વિન-પ્લાન્કના કથન મુજબ થરમૉડાયનેમિક્સના બીજા નિયમનું ઉલ્લંઘન કરે છે. આથી એવું વિધાન કે $\eta_I > \eta_R$ ખોટું છે. કોઈ પણ એન્જિનની કાર્યક્ષમતા કાર્નોટ એન્જિન કરતા વધુ



આકૃતિ 12.12 *અપ્રતિવર્તી એન્જિન (I)નું પ્રતિવર્તી રેફ્રિજરેટર (R) સાથે જોડાણ. જો W′ > W, તો W′ − W જેટલી ઉષ્માનું ઠારણ વ્યવસ્થામાંથી શોષણ થશે અને તે સંપૂર્ણપણે કાર્યમાં રૂપાંતરિત થશે, જે થરમૉડાયનેમિક્સના બીજા નિયમનું ઉલ્લંઘન છે.*

ન હોઈ શકે. આવું જ એક બીજું વિધાન કરી શકાય, જે દર્શાવે કે એક ચોક્કસ પદાર્થનો ઉપયોગ કરતું પ્રતિવર્તી એન્જિન, બીજા પદાર્થનો ઉપયોગ કરતા એન્જિન કરતાં વધુ કાર્યક્ષમ ન હોઈ શકે. સમીકરણ (12.32) દ્વારા દર્શાવેલી કાર્નોટ એન્જિનની મહત્તમ કાર્યક્ષમતા કાર્નોટ ચક્રની પ્રક્રિયાઓ કરતા તંત્રની પ્રકૃતિથી સ્વતંત્ર હોય છે. આમ, કાર્નોટ એન્જિનની કાર્યક્ષમતા ηની ગણતરીમાં આદર્શ વાયુને તંત્ર તરીકે લેવામાં આપણે બરોબર સાબિત થયા છીએ. આદર્શ વાયુનું અવસ્થા સમીકરણ સરળ છે, જે આપણને ηની ગણતરીમાં મદદરૂપ થાય છે, પરંતુ ηનું અંતિમ પરિણામ [સમીકરણ (12.32)] એ કોઈ પણ કાર્નોટ એન્જિન માટે સત્ય છે.

આ અંતિમ સૂચન દર્શાવે છે કે કાર્નોટ ચક્રમાં,

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \qquad (12.33)$$

એ તંત્રની પ્રકૃતિથી સ્વતંત્ર સાર્વત્રિક સમીકરણ છે. અહીંયાં Q_1 અને Q_2 અનુક્રમે કાર્નોટ એન્જિનમાં સમતાપી રીતે શોષાયેલી અને મુક્ત (વ્યય) થયેલી (ગરમમાંથી અને ઠંડા પરિસરમાંથી) ઉષ્મા છે. આથી, સમીકરણ (12.33)નો ઉપયોગ સાચા સાર્વત્રિક થરમૉડાયનેમિક તાપમાન માપક્રમ, કે જે કાર્નોટ ચક્રમાં ઉપયોગ કરેલ તંત્રના ચોક્કસ ગુણધર્મોથી સ્વતંત્ર હોય, તેને વ્યાખ્યાયિત કરવા માટે થઈ શકે. અલબત્ત, કાર્યકારી પદાર્થ તરીકે આદર્શ વાયુ હોય, તો આ સાર્વત્રિક તાપમાન એ પરિચ્છેદ 12.11માં દર્શાવેલ આદર્શ વાયુના તાપમાન જેટલું જ હોય.

સારાંશ

1. થરમૉડાયનેમિક્સનો શૂન્ય ક્રમનો નિયમ દર્શાવે છે કે *બે તંત્ર ત્રીજા તંત્ર સાથે તાપીય સંતુલનમાં હોય તો તે બંને પણ એકબીજા સાથે તાપીય સંતુલનમાં હોય.* શૂન્ય ક્રમનો નિયમ તાપમાનના ખ્યાલ તરફ દોરી જાય છે.

2. તંત્રની આંતરિક ઊર્જા તંત્રના આણ્વીક ઘટકોની ગતિઊર્જા અને સ્થિતિઊર્જાઓના સરવાળા જેટલી હોય છે. તે તંત્રની સમગ્રપણે ગતિઊર્જાને નથી સમાવતી. ઉષ્મા અને કાર્ય એ તંત્રમાં ઊર્જા વિનિમયના બે પ્રકાર છે : તંત્ર અને પરિસર વચ્ચે તાપમાનના તફાવતના કારણે થતો ઊર્જાનો વિનિમય એ ઉષ્મા છે. કાર્ય એ બીજી રીતે થતો ઊર્જાનો વિનિમય છે. જેમકે, વાયુ ધરાવતા નળાકાર પાત્રમાં પિસ્ટન સાથે લગાડેલા વજનમાં વધારો કે ઘટાડો કરીને તેના સ્થાનમાં ફેરફાર કરવો.

3. થરમૉડાયનેમિક્સનો પહેલો નિયમ એ ઊર્જા-સંરક્ષણનો સામાન્ય નિયમ છે જે કોઈ પણ તંત્ર કે જેમાંથી અથવા જેના તરફ પરિસરમાંથી (ઉષ્મા કે કાર્ય દ્વારા) ઊર્જાનો વિનિમય થતો હોય. તે દર્શાવે છે કે,

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W$$

જ્યાં, ΔQ એ તંત્રને આપેલી ઉષ્મા છે. ΔW એ તંત્ર વડે થયેલું કાર્ય અને ΔU એ તંત્રની આંતરીક ઊર્જામાં થતો ફેરફાર છે.

4. પદાર્થની વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા, વ્યાખ્યા મુજબ

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

જ્યાં m એ પદાર્થનું દળ અને ΔQ એ તેનું તાપમાન ΔT જેટલું બદલવા માટે જરૂરી ઉષ્મા છે. પદાર્થની મોલર વિશિષ્ટ ઉષ્માધારિતા વ્યાખ્યા મુજબ,

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

જ્યાં, μ એ પદાર્થના મોલની સંખ્યા છે. ઘન પદાર્થ માટે, ઊર્જા સમવિભાજનના નિયમ મુજબ

$$C = 3\ R$$

જે સામાન્ય તાપમાને પ્રયોગો સાથે લગભગ મળતું આવે છે. ઉષ્માનો જૂનો એકમ કૅલરી છે. 1 g પાણીનું તાપમાન 14.5 °C થી 15.5 °C સુધી વધારવા માટે જરૂરી ઉષ્માને 1 કૅલરી કહે છે. 1 cal = 4.186 J.

5. આદર્શ વાયુ માટે અચળ દબાણ અને કદે મોલર વિશિષ્ટ ઉષ્મા ઘનતાઓ,

$$C_p - C_v = R$$

સમીકરણનું સમાધાન કરે છે, જ્યાં R એ સાર્વત્રિક વાયુ-નિયતાંક છે.

6. થરમૉડાયનેમિક તંત્રની સંતુલન અવસ્થાઓને અવસ્થા ચલરાશિઓ વડે દર્શાવી શકાય છે. અવસ્થા ચલરાશિનું મૂલ્ય ફક્ત તેની ચોક્કસ અવસ્થા પર આધાર રાખે છે. આ અવસ્થા સુધી આવવા માટે તેણે લીધેલા માર્ગ પર નહિ. દબાણ (P), કદ (V), તાપમાન (T) અને દળ (m) એ અવસ્થા ચલરાશિઓનાં ઉદાહરણો છે. ઉષ્મા અને કાર્ય-અવસ્થા ચલરાશિઓ નથી. અવસ્થા સમીકરણ (જેમકે, વાયુનું અવસ્થા સમીકરણ $PV = \mu RT$) એ જુદી જુદી અવસ્થા ચલરાશિઓને સાંકળતું સમીકરણ છે.

7. ક્વૉસાઇ-સ્ટેટિક પ્રક્રિયા એટલી બધી ધીમી હોય છે કે જેથી સમગ્ર પ્રક્રિયા દરમિયાન તંત્ર-પરિસર સાથે તાપીય અને યાંત્રિક સંતુલનમાં રહે છે. ક્વૉસાઇ-સ્ટેટિક પ્રક્રિયામાં, પરિસરના દબાણ અને તાપમાન તંત્ર કરતાં નહિવત્ પ્રમાણમાં જ જુદાં હોય છે.

8. T તાપમાને આદર્શ વાયુના કદ V_1 થી V_2 સુધીના સમતાપી વિસ્તરણ દરમિયાન શોષાયેલી ઉષ્મા (Q), વાયુ વડે થયેલા કાર્ય (W) જેટલી હોય છે, જે આ સમીકરણ વડે અપાય છે.

$$Q = W = \mu RT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

9. આદર્શ વાયુ માટે સમોષ્મી પ્રક્રિયા દરમિયાન

PV^{γ} = અચળ

જ્યાં, $$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$$

આદર્શ વાયુ દ્વારા અવસ્થા (P_1, V_1, T_1)થી (P_2, V_2, T_2) સુધીના સમોષ્મી ફેરફાર દરમિયાન થયેલ કાર્ય,

$$W = \frac{\mu R(T_1 - T_2)}{\gamma - 1}$$

10. હીટ એન્જિન એવું સાધન છે કે જેમાં તંત્ર ચક્રીય પ્રક્રિયા દરમિયાન ઉષ્માનું કાર્યમાં રૂપાંતર કરે છે. જો ઉષ્મા પ્રાપ્તિસ્થાન (source)માંથી શોષેલ ઉષ્મા Q_1 હોય, ઠારણ વ્યવસ્થા (sink)માં મુક્ત (વ્યય) કરેલ ઉષ્મા Q_2 હોય અને એક ચક્ર દરમિયાન થયેલ કાર્ય W હોય, તો

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

11. રેફ્રિજરેટર કે હીટ પંપમાં તંત્ર ઠારણ-વ્યવસ્થામાંથી ઉષ્મા Q_1 શોષે છે અને Q_2 જેટલી ઉષ્મા ગરમ પરિસરમાં મુક્ત કરે છે, જ્યારે તંત્ર પર થયેલું કાર્ય W હોય છે. રેફ્રિજરેટરનો પરફોર્મન્સ ગુણાંક આ રીતે મળે છે

$$\alpha = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

12. થરમૉડાયનેમિક્સના પહેલા નિયમ સાથે સુસંગત કેટલીક પ્રક્રિયાઓને થરમૉડાયનેમિક્સનો બીજો નિયમ સમર્થન આપતો નથી. તેનાં વિધાનો :

કૅલ્વિન-પ્લાન્કનું વિધાન

એવી કોઈ પ્રક્રિયા શક્ય નથી કે જેના એકમાત્ર પરિણામરૂપે પરિસરમાંથી ઉષ્મા શોષાય અને બધી જ ઉષ્માનું કાર્યમાં રૂપાંતર થાય.

ક્લૉસિયસનું વિધાન

એવી કોઈ પ્રક્રિયા શક્ય નથી કે જેના એકમાત્ર પરિણામરૂપે આપોઆપ (જાતે) ઉષ્માનું ઠંડા પદાર્થથી ગરમ પદાર્થ તરફ વહન થાય. સાદી ભાષામાં, બીજા નિયમનો મતલબ એ કે કોઈ પણ હીટ એન્જિનની કાર્યક્ષમતા ηનું મૂલ્ય 1 જેટલું ન હોઈ શકે અને કોઈ પણ રેફ્રિજરેટરનો પરફોર્મન્સ ગુણાંક α અનંત ન હોઈ શકે.

13. જો તંત્ર અને પરિસર તેમની પ્રારંભિક અવસ્થાઓ સુધી બહારના વિશ્વમાં કોઈ પણ ફેરફાર વગર પાછા આવી શકે તો તે પ્રક્રિયા પ્રતિવર્તી કહેવાય. કુદરતમાં સ્વૈચ્છિક (આપોઆપ) થતી પ્રક્રિયાઓ અપ્રતિવર્તી હોય છે. આદર્શરૂપ પ્રતિવર્તી પ્રક્રિયા એ ક્વૉસાઇ-સ્ટેટિક પ્રક્રિયા છે, જેમાં ઘર્ષણ, શ્યાનતા વગેરે ઊર્જા-વ્યયનાં પરિબળો હોતાં નથી.

14. કાર્નોટ એન્જિન એ બે તાપમાનો T_1 (ઉષ્મા પ્રાપ્તિસ્થાન - source) અને T_2 (ઠારણ-વ્યવસ્થા - sink) વચ્ચે કાર્ય કરતું પ્રતિવર્તી એન્જિન છે. કાર્નોટ ચક્ર બે સમતાપી પ્રક્રિયાઓ અને બે સમોષ્મી પ્રક્રિયાઓના જોડાણથી પૂર્ણ થાય છે. કાર્નોટ એન્જિનની કાર્યક્ષમતા

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

વડે દર્શાવાય છે.

બે તાપમાનો વચ્ચે કાર્ય કરતા કોઈ પણ એન્જિનની કાર્યક્ષમતા કાર્નોટ એન્જિન કરતાં વધુ ન હોઈ શકે.

15. જો $Q > 0$ તંત્રમાં ઉષ્મા આવે છે.
જો $Q < 0$ તંત્ર ઉષ્મા ગુમાવે છે.
જો $W > 0$ તંત્ર વડે કાર્ય થાય છે.
જો $W < 0$ તંત્ર પર કાર્ય થાય છે.

જથ્થો	સંજ્ઞા	પરિમાણ	એકમ	નોંધ
કદ-પ્રસરણાંક	α_v	$[K^{-1}]$	K^{-1}	$\alpha_v = 3\alpha_l$
તંત્રને આપેલી ઉષ્મા	ΔQ	$[ML^2T^{-2}]$	J	Q એ અવસ્થા ચલ નથી.
વિશિષ્ટ ઉષ્મા	s	$[L^2T^{-2}K^{-1}]$	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$	
ઉષ્માવાહકતા (Thermal Conductivity)	K	$[MLT^{-3}K^{-1}]$	$J\ s^{-1}K^{-1}$	$H = -KA\frac{dt}{dx}$

ગહન વિચારણાના મુદ્દાઓ (Point to Ponder)

1. પદાર્થનું તાપમાન તેની આંતરિક ઊર્જા સાથે સંકળાયેલું હોય છે; તેના દ્રવ્યમાન કેન્દ્રની ગતિની ગતિઊર્જા સાથે નહિ. બંદૂકમાંથી છૂટેલી ગોળી (બુલિટ) તેની ઝડપના કારણે ઊંચા તાપમાને નથી હોતી.
2. થરમૉડાયનેમિક્સમાં સંતુલનનો મતલબ એ કે જે પરિસ્થિતિમાં તંત્રની થરમૉડાયનેમિક અવસ્થા દર્શાવતી ચલરાશિઓ સમય પર આધારિત ન હોય. યંત્રશાસ્ત્રમાં સંતુલનનો મતલબ એ કે તંત્ર પર લાગતું કુલ (ચોખ્ખું) બળ અને ટૉર્ક શૂન્ય હોય.
3. થરમૉડાયનેમિક સંતુલનની અવસ્થામાં તંત્રનાં સૂક્ષ્મ (microscopic) ઘટકો (કણો) સંતુલિત સ્થિતિમાં (યંત્રશાસ્ત્રની ભાષામાં) હોતાં નથી.
4. જ્યારે તંત્રને ઉષ્મા આપવામાં આવે ત્યારે તંત્ર કઈ પ્રક્રિયામાંથી પસાર થાય છે તેના પર મોટા ભાગે ઉષ્માધારિતા આધાર રાખે છે.
5. સમતાપી ક્વૉસાઈ-સ્ટેટિક પ્રક્રિયામાં વાયુનું તાપમાન બહારના પરિસર જેટલું હોય તોપણ તંત્રની દરેક અવસ્થામાં ઉષ્મા કાં તો શોષાય છે કે તંત્રમાંથી મુક્ત થાય છે. તંત્ર અને પરિસર વચ્ચેના અતિસૂક્ષ્મ તાપમાનના તફાવતના કારણે આમ થતું હોય છે.

સ્વાધ્યાય

12.1 એક મિનિટમાં 3.0 લિટરના દરથી પસાર થતા પાણીને ગિઝર 27 °C થી 77 °C સુધી ગરમ કરે છે. જો ગિઝર, ગૅસ બર્નર પર કાર્ય કરતું હોય અને બળતણ (combustion) ઉષ્મા 4.0×10^4 J/g હોય, તો બળતણના વપરાશનો દર કેટલો હશે ?

12.2 અચળ દબાણે રહેલા 2.0×10^{-2} kg નાઈટ્રોજન (ઓરડાના તાપમાને)નું તાપમાન 45 °C જેટલું વધારવા માટે કેટલી ઉષ્મા આપવી પડશે ? (N_2નો અણુભાર = 28 ; R = 8.3 J mol^{-1} K^{-1})

12.3 સમજાવો :

(a) T_1 અને T_2 તાપમાન ધરાવતા બે પદાર્થોને તાપીય સંપર્કમાં લાવતાં તેમનું સરેરાશ તાપમાન $(T_1 + T_2)/2$ હોવું જરૂરી નથી.

(b) રાસાયણિક કે ન્યુક્લિઅર પ્લાન્ટમાં રહેલા કુલન્ટ (એટલે કે પ્લાન્ટના જુદા જુદા ભાગને અતિશય ગરમ થતાં રોકે તેવું પ્રવાહી)ની વિશિષ્ટ ઉષ્મા વધુ હોવી જોઈએ.

(c) કાર ચલાવતી વખતે તેના ટાયરમાં દબાણ વધે છે.

(d) દરિયાકિનારે આવેલ બંદરનું (Harbour) વાતાવરણ સમાન અક્ષાંશ ધરાવતા જંગલમાં આવેલા શહેર કરતાં ગરમ (ઉષ્ણ) હોય છે.

12.4 ખસી શકે તેવો પિસ્ટન ધરાવતા એક નળાકાર પાત્રમાં પ્રમાણભૂત તાપમાન અને દબાણે 3 મોલ હાઈડ્રોજન રહેલો છે. નળાકાર પાત્રની દીવાલો ઉષ્મા અવાહક પદાર્થની બનેલી છે અને પિસ્ટન પર રેતીનો ઢગલો કરીને અવાહક બનાવ્યો છે. જો વાયુને તેના કદ કરતાં અડધા કદ સુધી સંકોચિત કરવામાં આવે તો વાયુનું દબાણ કેટલા પ્રમાણમાં બદલાશે ?

12.5 એક વાયુને સંતુલિત અવસ્થા A થી સમોષ્મી રીતે સંતુલિત અવસ્થા B સુધી લઈ જવા માટે, તંત્ર પર થયેલ કાર્ય 22.3 J જેટલું છે. જો તંત્રને A થી B સ્થિતિ સુધી એવી રીતે લઈ જવામાં આવે કે જેથી તેમાં શોષાયેલી ચોખ્ખી ઉષ્મા 9.35 કૅલરી હોય, તો બીજા કિસ્સામાં તંત્ર વડે કેટલું ચોખ્ખું કાર્ય થયું હશે ? (1 કૅલરી = 4.19 J લો.)

12.6 એકસરખી ક્ષમતા ધરાવતાં બે નળાકાર પાત્રો A અને Bને એકબીજાં સાથે સ્ટૉપકૉક (બંધ કરી શકાય તેવા કૉક) વડે જોડેલા છે. Aમાં વાયુ પ્રમાણભૂત તાપમાન અને દબાણે રહેલો છે. B સંપૂર્ણ રીતે ખાલી (evacuated) છે. આખું તંત્ર તાપીય રીતે અલિપ્ત (અલગ) કરેલું છે. સ્ટૉપકૉકને અચાનક ખોલવામાં આવે છે. નીચેનાના જવાબ આપો :

(a) A અને Bમાં અંતિમ દબાણ કેટલું હશે ?

(b) વાયુની આંતરિક ઊર્જામાં કેટલો ફેરફાર થયો હશે ?

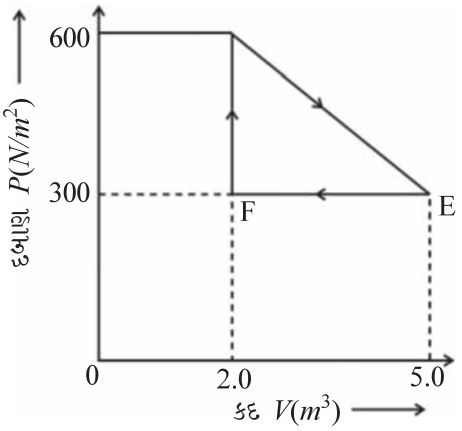
(c) વાયુના તાપમાનમાં કેટલો ફેરફાર થયો હશે ?

(d) શું તંત્રની વચ્ચેની અવસ્થાઓ (અંતિમ સંતુલિત અવસ્થામાં સ્થિર થતાં પહેલાં) તેના P - V - T સપાટી પર હશે ?

12.7 એક વરાળયંત્ર એક મિનિટમાં 5.4×10^8 J કાર્ય આપે છે અને તેના બોઇલરમાંથી એક મિનિટમાં 3.6×10^9 J ઉષ્મા પૂરી પાડે છે. એન્જિનની કાર્યક્ષમતા કેટલી હશે ? એક મિનિટમાં કેટલી ઉષ્મા વેડફાતી હશે ?

12.8 એક ઇલેક્ટ્રિક હીટર, તંત્રને 100 *W*ના દરથી ઉષ્મા પૂરી પાડે છે. જો તંત્ર એક સેકન્ડમાં 75 જૂલના દરથી કાર્ય કરતું હોય, તો તેની આંતરિક ઊર્જાનો વધવાનો દર કેટલો હશે ?

12.9 આકૃતિ 12.13માં દર્શાવ્યા મુજબ એક થરમૉડાયનેમિક તંત્રને તેની પ્રારંભિક અવસ્થાથી વચગાળાની (intermediate) અવસ્થા સુધી રેખીય પ્રક્રિયા દ્વારા લઈ જવામાં આવે છે.



આકૃતિ **12.13**

ત્યાર બાદ તેનું કદ E થી F સુધી સમદાબ પ્રક્રિયા દ્વારા ઘટાડીને મૂળ મૂલ્ય સુધી લાવવામાં આવે છે. વાયુ દ્વારા D થી Eથી F સુધીમાં થયેલ કુલ કાર્ય ગણો.

12.10 એક રેફ્રિજરેટરમાં રાખેલ ખોરાકને 9 °C તાપમાને સાચવવાનો છે. જો ઓરડાનું તાપમાન 36 °C હોય, તો પરફોર્મન્સ-ગુણાંક (કાર્ય સિદ્ધિ ગુણાંક) શોધો.