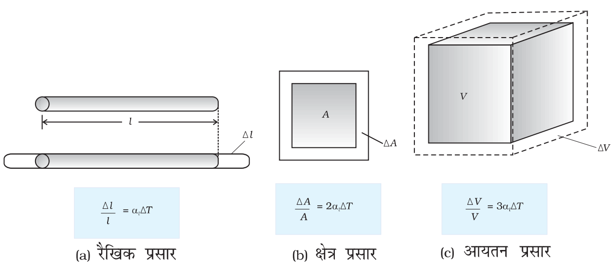
उष्ण जल से बाहर निकाल लेते हैं तो तापमापी में पारे का तल नीचे गिर जाता है। इसी प्रकार, गैसों के प्रकरण में, ठंडे कमरे में आंशिक रूप से फूला कोई गुब्बारा, उष्ण जल में रखे जाने पर अपनी पूरी आमाप तक फूल सकता है। इसके विपरीत, जब किसी पूर्णत: फूले किसी गुब्बारे को शीतल जल में डुबाते हैं तो वह भीतर की वायु के सिकुड़ने के कारण सिकुड़ना आरंभ कर देता है।

यह हमारा सामान्य अनुभव है कि अधिकांश पदार्थ तप्त होने पर प्रसारित होते हैं तथा शीतलन पर सिकुड़ते हैं। किसी वस्तु के ताप में परिवर्तन होने पर उसकी विमाओं में अंतर हो जाता है। किसी वस्तु के ताप में वृद्धि होने पर उसकी विमाओं में वृद्धि होने को तापीय प्रसार कहते हैं। लंबाई में प्रसार को **रैखिक प्रसार** कहते हैं। क्षेत्रफल में प्रसार को **क्षेत्र प्रसार** कहते हैं। आयतन में प्रसार को **आयतन प्रसार** कहते हैं (चित्र 11.5)।



चित्र 11.5 तापीय प्रसार।

यदि पदार्थ किसी लंबी छड़ के रूप में है, तो ताप में अल्प परिवर्तन, ΔT, के लिए लंबाई में भिन्नात्मक परिवर्तन, $\Delta l/l$, ΔT के अनुक्रमानुपाती होता है।

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha_l \ \Delta T \qquad (11.4)$$

जहाँ α_l को **रैखिक प्रसार गुणांक** कहते हैं तथा यह छड़ के पदार्थ का अभिलक्षण होता है। सारणी 11.1 में ताप परिसर 0°C से 100°C में कुछ पदार्थों के रैखिक प्रसार गुणांकों के प्रतिरूपी माध्य मान दिए गए हैं। इस सारणी से काँच तथा ताँबे के लिए α_l के मानों की तुलना कीजिए। हम यह पाते हैं कि समान ताप वृद्धि के लिए ताँबे में काँच की तुलना में पाँच गुना अधिक प्रसार होता है। सामान्यत:, धातुओं में अधिक प्रसार होता है तथा इनके लिए α_l के मान अपेक्षाकृत अधिक होते हैं।

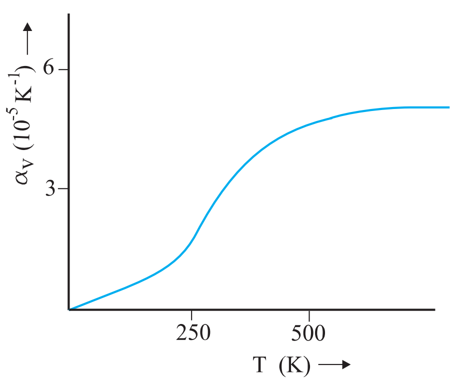
सारणी 11.1 कुछ पदार्थों के लिए रैखिक प्रसार गुणांकों के मान

पदार्थ	α_l (10^{-5} K^{-1})
एलुमिनियम	2.5
पीतल	1.8
लोहा	1.2
ताँबा	1.7
चाँदी	1.9
सोना	1.4
काँच (पायरेक्स)	0.32
लैड	0.29

इसी प्रकार, हम किसी ताप परिवर्तन, ΔT के लिए किसी पदार्थ के भिन्नात्मक आयतन परिवर्तन, $\frac{\Delta V}{V}$, पर विचार करते हैं तथा **आयतन प्रसार गुणांक,** a_V को इस प्रकार परिभाषित करते हैं

$$a_V = \left(\frac{\Delta V}{V}\right)\frac{1}{\Delta T} \qquad (11.5)$$

यहाँ भी α_V पदार्थ का अभिलक्षण है, परन्तु सही अर्थ में यह नियतांक नहीं है। व्यापक रूप में यह ताप पर निर्भर करता है (चित्र 11.6)। यह पाया गया है कि केवल उच्च ताप पर α_V नियतांक बन जाता है।



चित्र 11.6 ताप के फलन के रूप में ताँबे का आयतन प्रसार गुणांक।

सारणी 11.2 में 0-100 °C ताप परिसर में कुछ सामान्य पदार्थों के आयतन प्रसार गुणांकों के मान दिए गए हैं। आप यह देख सकते हैं कि इन पदार्थों (ठोस तथा द्रव) के तापीय प्रसार

कम हैं, तथा पायरेक्स काँच तथा इनवार (लोहे तथा निकेल की विशिष्ट मिश्र धातु) जैसे पदार्थों के α_V के मान विशेषकर निम्न हैं। इस सारणी से हम यह पाते हैं कि एल्कोहॉल (ऐथिल) के लिए α_v का मान पारे की तुलना में अधिक है, तथा समान ताप वृद्धि के लिए इसमें पारे की तुलना में अधिक वृद्धि होती है।

सारणी 11.2 कुछ पदार्थों के आयतन प्रसार गुणांक के मान

पदार्थ	α_v (K^{-1})
एलुमिनियम	7×10^{-5}
पीतल	6×10^{-5}
लोहा	3.55×10^{-5}
पैराफीन	58.8×10^{-5}
काँच (सामान्य)	2.5×10^{-5}
काँच (पायरेक्स)	1×10^{-5}
कठोर रबड़	2.4×10^{-4}
इनवार	2×10^{-6}
पारा	18.2×10^{-5}
जल	20.7×10^{-5}
एल्कोहॉल (ऐथिल)	110×10^{-5}

जल असंगत व्यवहार प्रदर्शित करता है; यह 0°C से 4°C के बीच गर्म किए जाने पर सिकुड़ता है। किसी दिए गए परिमाण के जल का आयतन, कक्ष ताप से 4°C तक ठंडा किए जाने पर, घटता है [चित्र 11.7(a)]। 4°C से कम ताप पर आयतन बढ़ता है अत: घनत्व घटता है [चित्र 11.7(b)]।

इसका अर्थ यह हुआ कि जल का घनत्व 4°C पर अधिकतम होता है। जल के इस गुण का एक महत्त्वपूर्ण पर्यावरणीय प्रभाव है : तालाबों तथा झीलों जैसे जलाशयों का शीर्ष भाग पहले जमता है। जैसे-जैसे झील 4°C तक ठंडी होती जाती है, पृष्ठ के समीप का जल अपनी ऊर्जा वातावरण को देता जाता है और संघनित होकर डूबता जाता है। तली का उष्ण, अपेक्षाकृत कम संघनित जल ऊपर उठता है। परन्तु, एक बार शीर्षभाग के ठंडे जल का ताप 4°C से नीचे पहुँच जाता है, यह जल कम संघनित बन जाता है, और पृष्ठ पर ही रहता है, जहाँ यह जम जाता है। यदि जल में यह गुण न होता, तो झील तथा तालाब तली से ऊपर की ओर जमते जिससे उसका अधिकांश जलीय जीवन (जल जीव-जन्तु तथा पौधे) नष्ट हो जाता।

सामान्य ताप पर ठोसों तथा द्रवों की अपेक्षा गैसों में अपेक्षाकृत अधिक प्रसार होता है। द्रवों के लिए, आयतन प्रसार गुणांक अपेक्षाकृत ताप पर निर्भर नहीं करता। परन्तु गैसों के लिए यह ताप पर निर्भर करता है। किसी आदर्श गैस के लिए किसी नियत दाब पर आयतन प्रसार गुणांक का मान आदर्श गैस समीकरण से प्राप्त किया जा सकता है :

$$PV = \mu RT$$

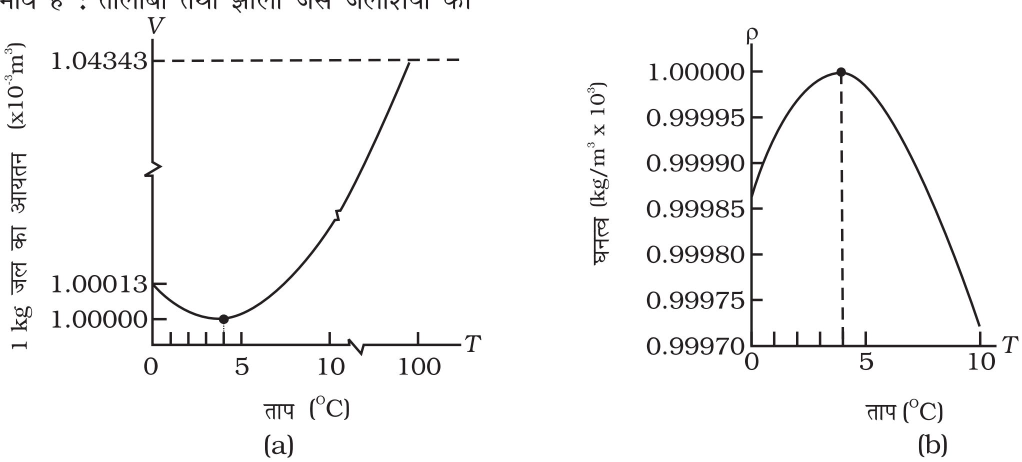
नियत ताप पर

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

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta T}{T}$$

अर्थात् $\alpha_v = \dfrac{1}{T}$ आदर्श गैस के लिए (11.6)

0°C, $\alpha_v = 3.7 \times 10^{-3}\ K^{-1}$, जो ठोसों तथा द्रवों की अपेक्षा अत्यधिक बड़ा है। समीकरण (11.6) α_v की ताप पर निर्भरता को दर्शाती है। इसका मान ताप में वृद्धि के साथ कम हो जाता है। नियत दाब तथा कक्ष ताप पर किसी गैस के लिए α_v का मान लगभग $3300 \times 10^{-6} K^{-1}$ है, जो कि प्रतिरूपी द्रवों के आयतन प्रसार गुणांक की तुलना में कई कोटि गुना बड़ा है।



चित्र 11.7 जल का तापीय प्रसार।

आयतन प्रसार गुणांक (α_v) तथा रैखिक प्रसार गुणांक (α_l) में एक सरल संबंध है। लंबाई l के किसी ऐसे घन की कल्पना कीजिए जिसमें ताप में ΔT की वृद्धि होने पर सभी दिशाओं में समान रूप से वृद्धि होती है। तब

$$\Delta l = \alpha_l \, l \, \Delta T$$

इसीलिए, $\Delta V = (l+\Delta l)^3 - l^3 \simeq 3l^2 \, \Delta l$ (11.7)

समीकरण 11.7 में हमने (Δl) को l की तुलना में छोटा होने के कारण $(\Delta l)^2$ तथा $(\Delta l)^3$ के पदों को उपेक्षणीय मान लिया है। अतः

$$\Delta V = \frac{3V\,\Delta l}{l} = 3V\alpha_l \; \Delta T \qquad (11.8)$$

इससे हमें प्राप्त होता है

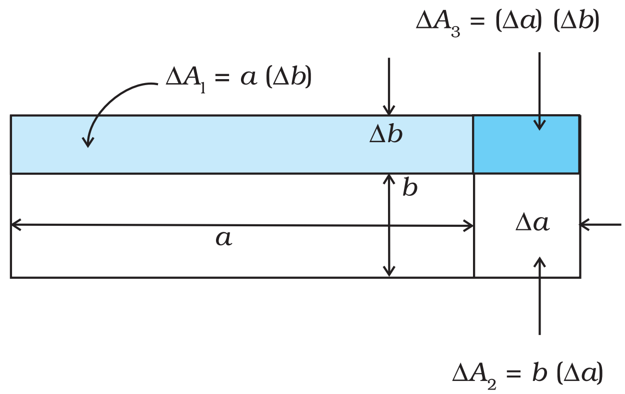
$$\alpha_v = 3\alpha_l \qquad (11.9)$$

क्या होता है, जब किसी छड़ के दोनों सिरों को दृढ़ता से जड़कर इसके तापीय प्रसार को रोका जाता है। स्पष्ट है कि सिरों के दृढ़ अवलंबों द्वारा प्रदत्त बाह्य बलों के कारण छड़ में संपीडन विकृति उत्पन्न हो जाती है जिसके तदनुरूपी छड़ में एक प्रतिबल उत्पन्न होता है जिसे **तापीय प्रतिबल** कहते हैं। उदाहरण के लिए 40 cm^2 अनुप्रस्थ काट के क्षेत्रफल की 5m लंबी स्टील की ऐसी छड़ के बारे में विचार कीजिए जिसके तापीय प्रसार को रोका जाता है, जबकि उसके ताप में 10°C की वृद्धि की गई है। स्टील का रैखिक प्रसार गुणांक $\alpha_{l(\text{स्टील})} = 1.2 \times 10^{-5}\ K^{-1}$ है। अतः यहाँ संपीडन विकृति $\frac{\Delta l}{l} = \alpha_{l(\text{स्टील})}\, \Delta T = 1.2{\times}10^{-5}{\times}10 = 1.2{\times}10^{-4}$। स्टील के लिए यंग प्रत्यास्थता गुणांक $Y_{(\text{स्टील})} = 2{\times}10^{11}\ N\ m^{-2}$। अतः छड़ में उत्पन्न तापीय प्रतिबल $\frac{\Delta F}{A} = Y_{\text{स्टील}} \left(\frac{\Delta l}{l}\right) = 2.4{\times}10^7\ N\ m^{-2}$, इसके तदनुरूपी बाह्य बल

$$\Delta F = AY_{\text{स्टील}} \left(\frac{\Delta l}{l}\right) = 2.4{\times}10^7{\times}40{\times}10^{-4} \simeq 10^5\ N$$

यदि बाह्य सिरों पर आबद्ध इस प्रकार की स्टील की दो पटरियों के भीतरी सिरे संपर्क में हैं तो इस परिमाण के बल पटरियों को सरलता से मोड़ सकते हैं।

उदाहरण 11.1 यह दर्शाइए कि किसी ठोस की आयताकार शीट का क्षेत्र प्रसार गुणांक, $(\Delta A/A)/\Delta T$, इसके रैखिक प्रसार गुणांक α_l का दो गुना होता है।



चित्र 11.8

हल किसी ठोस पदार्थ की आयताकार शीट जिसकी लंबाई a तथा चौड़ाई b (चित्र 11.8) है, पर विचार कीजिए। जब ताप में ΔT की वृद्धि की जाती है तो a में $\Delta a = \alpha_l a \Delta T$ तथा b में $\Delta b = \alpha_l b\, \Delta T$ की वृद्धि होती है। चित्र 11.8 के अनुसार क्षेत्रफल में वृद्धि

$$\Delta A = \Delta A_1 + \Delta A_2 + \Delta A_3$$
$$\Delta A = a\,\Delta b + b\Delta a + (\Delta a)\ (\Delta b)$$
$$= a\alpha_l b\,\Delta T + b\alpha_l\, a\,\Delta T + (\alpha_l)^2\, ab\,(\Delta T)^2$$
$$= \alpha_l\, ab\,\Delta T\,(2 + \alpha_l\,\Delta T) = \alpha_l\, A\,\Delta T\,(2 + \alpha_l\,\Delta T)$$

चूंकि $\alpha_l \simeq 10^{-5}\ K^{-1}$, तब सारणी 11.1 के अनुसार 2 की तुलना में गुणनफल, $\alpha_l\,\Delta T$ का मान बहुत छोटा है, अतः इसे उपेक्षणीय माना जा सकता है। अतः

$$\left(\frac{\Delta A}{A}\right)\frac{1}{\Delta T} \simeq 2\alpha_l$$

उदाहरण 11.2 कोई लोहार किसी बैलगाड़ी के लकड़ी के पहिए की नेमी पर लोहे की रिंग जड़ता है। 27°C पर नेमी तथा लोहे की रिंग के व्यास क्रमशः 5.243m तथा 5.231 m हैं। लोहे की रिंग को किस ताप तक तप्त किया जाए कि वह पहिए की नेमी पर ठीक बैठ जाए।

दिया गया है कि, $T_1 = 27°C$

$$L_{T1} = 5.231\ m$$
$$L_{T2} = 5.243\ m$$

अतः

$$L_{T2} = L_{T1}\ [1+\alpha_l\,(T_2 - T_1)]$$
$$5.243m = 5.231m\ [1 + 1.20 \times 10^{-5}\ K^{-1}\ (T_2 - 27°C)]$$

अथवा $T_2 = 218°C$

11.6 विशिष्ट ऊष्मा धारिता

किसी बर्तन में जल लेकर उसे किसी बर्नर पर गर्म करना आरंभ कीजिए। शीघ्र ही आप जल में बुलबुले ऊपर उठते देखेंगे। जैसे ही ताप में वृद्धि की जाती है, तो जल के कणों की गति में विक्षोभ होने तक वृद्धि होती जाती है और जल उबलने लगता है। वे कौन से कारक हैं जिन पर किसी पदार्थ का ताप बढ़ाने के लिए आवश्यक ऊष्मा की मात्रा निर्भर करती है? इस प्रश्न का उत्तर देने के लिए प्रथम चरण में, जल की कुछ मात्रा को गर्म करके उसके ताप में कुछ वृद्धि, जैसे 20°C कीजिए और उसमें लगा समय नोट कीजिए। पुनः इतना ही जल लेकर अब इसके ताप में ऊष्मा के उसी स्रोत द्वारा 40°C की ताप वृद्धि कीजिए और विराम घड़ी से समय नोट कीजिए। आप यह पाएंगे कि इस बार लगभग दो गुना समय लगता है। अतः समान मात्रा के जल के ताप में दो गुनी वृद्धि करने के लिए दो गुनी ऊष्मा की मात्रा की आवश्यकता होती है।

दूसरे चरण में, अब मान लीजिए आप दो गुना जल लेकर इसे गर्म करने के लिए उसी स्रोत का उपयोग करके इसके ताप में 20°C की ताप-वृद्धि करते हैं। आप यह पाएँगे कि इस बार फिर गर्म करने में पहले चरण की अपेक्षा लगभग दो गुना समय लगा है।

तीसरे चरण में, जल के स्थान पर, अब किसी तेल, जैसे सरसों का तेल, की समान मात्रा लेकर इसके ताप में भी 20°C की वृद्धि कीजिए। अब उसी विराम घड़ी द्वारा समय नोट कीजिए। आप यह पाएँगे कि इस बार पहले की अपेक्षा कम समय लगा है। अतः आवश्यक ऊष्मा की मात्रा समान मात्रा के जल के ताप में समान वृद्धि के लिए आवश्यक ऊष्मा की मात्रा से कम है।

उपरोक्त प्रेक्षण यह दर्शाते हैं कि किसी दिए गए पदार्थ को उष्ण करने के लिए आवश्यक ऊष्मा की मात्रा इसके द्रव्यमान m, ताप में परिवर्तन ΔT, तथा पदार्थ की प्रकृति पर निर्भर करती है। किसी पदार्थ के ताप में परिवर्तन, जबकि ऊष्मा की एक दी गई मात्रा को वह पदार्थ अवशोषित करता है अथवा बहिष्कृत करता है, एक राशि, जिसे उस पदार्थ की **ऊष्मा धारिता** कहते हैं, द्वारा अभिलक्षित की जाती है। किसी पदार्थ की ऊष्मा धारिता S को हम इस प्रकार परिभाषित करते हैं :

$$S = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \qquad (11.10)$$

यहाँ ΔQ पदार्थ के ताप में T से $T + \Delta T$ तक परिवर्तन करने के लिए आवश्यक ऊष्मा की मात्रा है।

आपने यह प्रेक्षण किया है कि जब विभिन्न पदार्थों के समान द्रव्यमानों को समान मात्रा में ऊष्मा प्रदान की जाती है, तो उनमें होने वाले परिणामी ताप परिवर्तन समान नहीं होते। इससे यह निष्कर्ष निकलता है कि किसी पदार्थ के एकांक द्रव्यमान में एकांक ताप-परिवर्तन के लिए वह पदार्थ ऊष्मा की एक निश्चित व अनन्य मात्रा का अवशोषण अथवा बहिष्करण करता है, इस मात्रा को पदार्थ की **विशिष्ट ऊष्मा धारिता** कहते हैं।

यदि m द्रव्यमान के किसी पदार्थ द्वारा ΔT ताप परिवर्तन के लिए ΔQ ऊष्मा की मात्रा अवशोषित अथवा बहिष्कृत करनी होती है तो उस पदार्थ की विशिष्ट ऊष्मा धारिता s को इस प्रकार व्यक्त किया जाता है

$$s = \frac{S}{m} = \frac{1}{m}\frac{\Delta Q}{\Delta T} \qquad (11.11)$$

विशिष्ट ऊष्मा धारिता किसी पदार्थ का वह गुण होता है जो इस पदार्थ द्वारा एक दिए गए परिमाण की ऊष्मा को अवशोषित (अथवा बहिष्कृत) करने पर (यदि प्रावस्था परिवर्तन नहीं है) उस पदार्थ के ताप में होने वाले परिवर्तन को निर्धारित करता है। इसे "ऊष्मा की वह मात्रा जो किसी पदार्थ का एकांक द्रव्यमान अपने ताप में एकांक परिवर्तन के लिए अवशोषित अथवा बहिष्कृत करता है" के रूप में परिभाषित किया जाता है। विशिष्ट ऊष्मा धारिता का SI मात्रक $J\,kg^{-1}\,K^{-1}$ है।

यदि पदार्थ की मात्रा का उल्लेख "द्रव्यमान m किलोग्रामों" में न करके मोल μ के पदों में किया जाता है तो हम किसी पदार्थ की ऊष्मा धारिता प्रति मोल को इस प्रकार व्यक्त करते हैं

$$C = \frac{S}{m} = \frac{1}{m}\frac{\Delta Q}{\Delta T} \qquad (11.12)$$

जहाँ C **मोलर विशिष्ट ऊष्मा धारिता** कहलाती है। S की भांति C भी पदार्थ की प्रकृति तथा इसके ताप पर निर्भर करता है। मोलर विशिष्ट ऊष्मा धारिता का SI मात्रक $J\,mol^{-1}\,K^{-1}$ है।

परन्तु, गैसों की विशिष्ट ऊष्मा धारिता के संबंध में C को परिभाषित करने के लिए अतिरिक्त प्रतिबंधों की आवश्यकता होती है। इस प्रकरण में दाब अथवा आयतन को नियत रखकर भी ऊष्मा स्थानांतर किया जा सकता है। यदि ऊष्मा स्थानांतरण के समय गैस का दाब नियत रखा जाता है, तो इसे **नियत दाब पर मोलर विशिष्ट ऊष्मा धारिता** कहते हैं और इसे C_p द्वारा निर्दिष्ट किया जाता है। इसके विपरीत, यदि ऊष्मा स्थानांतरण के समय गैस का आयतन नियत रखते हैं, तो इसे **नियत आयतन पर मोलर विशिष्ट ऊष्मा धारिता** कहते हैं और इसे C_v द्वारा निर्दिष्ट करते हैं। इसके विस्तृत वर्णन के लिए

11.3 वायुमण्डलीय दाब तथा कक्ष ताप पर कुछ पदार्थों की विशिष्ट ऊष्मा धारिताएँ

	(J kg^{-1} K^{-1})		(J kg^{-1} K^{-1})
एलुमिनियम	900.0	बर्फ	2060
कार्बन	506.5	काँच	840
ताँबा	386.4	आयरन	450
लैड	127.7	कैरोसीन	2118
चाँदी	236.1	खाद्य तेल	1965
टंगस्टन	134.1	पारा	140
जल	4186.0		

अध्याय 12 देखिए। सारणी 11.3 में वायुमण्डलीय दाब तथा कक्ष ताप पर कुछ पदार्थों की विशिष्ट ऊष्मा धारिता के मापे हुए मानों की सूची दी गई है जबकि सारणी 11.4 में कुछ गैसों की मोलर विशिष्ट ऊष्मा धारिता की सूची दी गई है। सारणी 11.3 से आप यह ध्यान में रख सकते हैं कि अन्य पदार्थों की तुलना में जल की विशिष्ट ऊष्मा धारिता उच्चतम होती है। यही कारण है कि स्वचालित वाहनों के रैडिएटरों में जल का उपयोग शीतलक के रूप में किया जाता है तथा सिकाई के लिए उपयोग होने वाली तप्त जल थैलियों में जल का उपयोग तापक के रूप में किया जाता है। उच्च विशिष्ट ऊष्मा धारिता होने के कारण गर्मियों में थल की अपेक्षा जल बहुत धीमी गति से गर्म होता है फलस्वरूप समुद्र की ओर से आने वाली पवनें शीतल होती हैं। अब आप यह बता सकते हैं कि मरुक्षेत्रों में पृथ्वी का पृष्ठ दिन के समय शीघ्र उष्ण तथा रात्रि के समय शीघ्र शीतल क्यों हो जाता है।

11.4 कुछ गैसों की मोलर विशिष्ट ऊष्मा धारिताएँ

	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 ऊष्मामिति

किसी निकाय को वियुक्त निकाय तब कहा जाता है जब उस निकाय तथा उसके परिवेश के बीच कोई ऊष्मा विनिमय अथवा ऊष्मा स्थानांतर नहीं होता। जब किसी वियुक्त निकाय के विभिन्न भाग भिन्न-भिन्न ताप पर होते हैं, तब ऊष्मा की कुछ मात्रा उच्च ताप के भाग से निम्न ताप वाले भाग को स्थानांतरित हो जाती है। उच्च ताप के भाग द्वारा लुप्त ऊष्मा निम्न ताप के भाग द्वारा ऊष्मा लब्धि के बराबर होती है।

ऊष्मामिति का अर्थ ऊष्मा मापन है। जब कोई उच्च ताप की वस्तु किसी निम्न ताप की वस्तु के संपर्क में लाई जाती है, तो उच्च ताप की वस्तु द्वारा लुप्त ऊष्मा निम्न ताप की वस्तु द्वारा ऊष्मा लब्धि के बराबर होती है, बशर्ते कि निकाय से ऊष्मा का कोई भाग भी परिवेश में पलायन न करे। ऐसी युक्ति जिसमें ऊष्मा मापन किया जा सके उसे **ऊष्मामापी** कहते हैं। यह धातु के एक बर्तन तथा उसी पदार्थ जैसे ताँबा अथवा एल्युमिनियम के विडोलक से मिलकर बना होता है। इस बर्तन को एक लकड़ी के आवरण के भीतर, जिसमें ऊष्मारोधी पदार्थ जैसे काँच तंतु भरा होता है, रखा जाता है। बाहरी आवरण ऊष्मा कवच की भांति कार्य करता है तथा यह भीतरी बर्तन से ऊष्मा-हानि को कम कर देता है। बाहरी आवरण में एक छिद्र बनाया जाता है जिससे होते हुए पारे का तापमापी बर्तन के भीतर पहुँचता है। निम्नलिखित उदाहरण द्वारा आपको किसी दिए गए ठोस पदार्थ की विशिष्ट ऊष्मा धारिता ज्ञात करने की ऐसी विधि मिल जाएगी जिसमें लुप्त ऊष्मा = ऊष्मा लब्धि के सिद्धांत का उपयोग किया जाता है।

▶ ***उदाहरण 11.3*** 0.047 kg द्रव्यमान के किसी ऐलुमिनियम के गोले को काफी समय के लिए उबलते जल से भरे बर्तन में रखा गया है ताकि गोले का ताप 100°C हो जाए। इसके पश्चात् गोले को तुरन्त 0.14 kg द्रव्यमान के ताँबे के ऊष्मामापी, जिसमें 20°C का 0.25 kg जल भरा है, में स्थानांतरित किया जाता है। जल के ताप में वृद्धि होती है तथा यह 23°C पर स्थायी अवस्था ग्रहण कर लेता है। ऐलुमिनियम की विशिष्ट ऊष्मा धारिता परिकलित कीजिए।

इस उदाहरण को हल करते समय हम इस तथ्य का उपयोग करेंगे कि स्थायी अवस्था में ऐलुमिनियम के गोले द्वारा दी गई ऊष्मा जल तथा ऊष्मामापी द्वारा अवशोषित ऊष्मा के बराबर होती है।

ऐलुमिनियम के गोले का द्रव्यमान (m_1) = 0.047 kg

ऐलुमिनियम के गोले का आरंभिक ताप = 100°C

अंतिम ताप = 23°C

ताप में परिवर्तन (ΔT) = (100°C - 23°C) = 77°C

मान लीजिए, ऐलुमिनियम की विशिष्ट ऊष्मा धारिता = s_{Al}

ऐलुमिनियम के गोले द्वारा लुप्त ऊष्मा की मात्रा =

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

जल का द्रव्यमान (m_2) = 0.25 kg

ऊष्मामापी का द्रव्यमान (m_3) = 0.14 kg

जल तथा ऊष्मामापी का आरंभिक ताप = 20°C

मिश्रण का अंतिम ताप = 23°C

ताप में परिवर्तन (ΔT_2) = 23°C–20°C = 3°C

जल की विशिष्ट ऊष्मा धारिता (s_w)

= 4.18×10^3 J kg^{-1} °C^{-1}

ताँबे के ऊष्मामापी की विशिष्ट ऊष्मा धारिता

= 0.386×10^3 J kg^{-1} °C^{-1}

जल तथा ऊष्मामापी द्वारा ऊष्मालब्धि की मात्रा

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

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

= 0.25 kg ×4.18 × 10^3 J kg^{-1} °C^{-1} + 0.14 kg × 0.386 × 10^3 J kg^{-1} °C^{-1}) (23°C – 20°C)

स्थायी अवस्था में ऐलुमिनियम के गोले द्वारा लुप्त ऊष्मा = जल द्वारा ऊष्मा लब्धि + ऊष्मामापी द्वारा ऊष्मा लब्धि

0.047 kg × s_{Al} × 77°C

= (0.25 kg × 4.18 × 10^3 J kg^{-1} °C^{-1}+ 0.14 kg × 0.386 × 10^3 J kg^{-1} °C^{-1})(3°C)

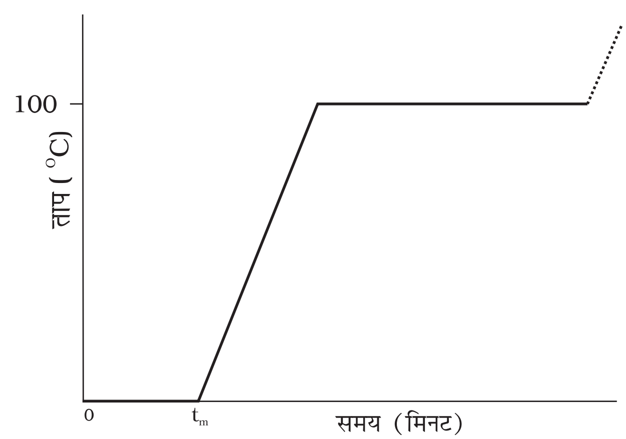
s_{Al} = 0.911 kJ kg^{-1} °C^{-1} ◀

11.8 अवस्था परिवर्तन

सामान्य रूप में द्रव्य की तीन अवस्थाएँ हैं : ठोस, द्रव तथा गैस। इन अवस्थाओं में से किसी एक अवस्था से दूसरी अवस्था में संक्रमण को अवस्था परिवर्तन कहते हैं। दो सामान्य अवस्था परिवर्तन ठोस से द्रव तथा द्रव से गैस (तथा विलोमत:) हैं। ये परिवर्तन तब ही हो सकते हैं जबकि पदार्थ तथा उसके परिवेश के बीच ऊष्मा का विनिमय होता है। तापन अथवा शीतलन पर अवस्था परिवर्तन का अध्ययन करने के लिए आइए निम्नलिखित क्रियाकलाप करते हैं।

क्रियाकलाप 11.1

एक बीकर में कुछ हिम क्यूब लीजिए। हिम का ताप (0°C) नोट कीजिए। इसे धीरे-धीरे किसी अचल ऊष्मा स्रोत पर गर्म करना आरंभ कीजिए। हर एक मिनट के पश्चात् ताप नोट कीजिए। जल तथा हिम के मिश्रण को निरंतर विडोलित करते रहिए। समय और ताप के बीच ग्राफ आलेखित कीजिए (चित्र 11.9)। आप यह पाएँगे कि जब तक बीकर में हिम उपस्थित है तब तक ताप में कोई परिवर्तन नहीं होता। उपरोक्त प्रक्रिया में, निकाय को ऊष्मा की सतत आपूर्ति होने पर भी उसके ताप में कोई परिवर्तन नहीं होता। यहाँ संभरण की जा रही ऊष्मा का उपयोग ठोस (हिम) से द्रव (जल) में अवस्था परिवर्तन किए जाने में हो रहा है।

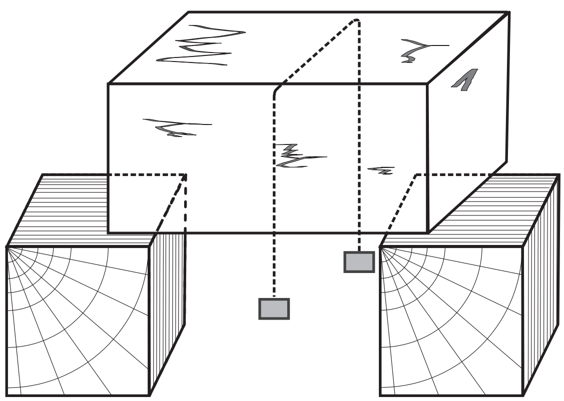


चित्र 11.9 हिम को गर्म करने पर अवस्था में हुए परिवर्तनों को ताप और समय के बीच ग्राफ आलेखित करके दर्शाना (पैमाने के अनुसार नहीं)।

ठोस से द्रव में अवस्था परिवर्तन को **गलन** (अथवा पिघलना) तथा द्रव से ठोस में अवस्था परिवर्तन को **संगलन** कहते हैं। यह पाया गया है कि ठोस पदार्थ की समस्त मात्रा के पिघलने तक ताप नियत रहता है अर्थात् **ठोस से द्रव में अवस्था परिवर्तन की अवधि में पदार्थ की दोनों अवस्थाएँ ठोस तथा द्रव तापीय साम्य में सहवर्ती होती हैं।** वह ताप जिस पर किसी पदार्थ की ठोस तथा द्रव अवस्थाएँ परस्पर तापीय साम्य में होती हैं उसे उस पदार्थ का **गलनांक** कहते हैं। यह किसी पदार्थ का अभिलक्षण होता है। यह दाब पर भी निर्भर करता है। मानक वायुमण्डलीय दाब पर किसी पदार्थ के गलनांक को **प्रसामान्य गलनांक** कहते हैं। हिम के गलने की प्रक्रिया को समझने के लिए आइए निम्नलिखित क्रियाकलाप करें।

क्रियाकलाप 11.2

एक हिम शिला लीजिए। एक धातु का तार लेकर उसके दोनों सिरों से समान भार जैसे 5 kg के बाट बाँधिए। चित्र 11.10 में दर्शाए अनुसार इस तार को हिम शिला के ऊपर रखिए। आप यह देखेंगे कि तार हिमशिला में से पार हो जाता है। ऐसा होने का कारण यह है कि तार के ठीक नीचे दाब में वृद्धि के कारण हिम निम्न ताप पर पिघल जाता है। जब तार वहाँ से गुजर जाता है, तो तार के ऊपर का जल पुन: हिमीभूत हो जाता है। इस प्रकार तार हिम शिला से पार हो जाता है तथा शिला विभक्त नहीं होती। पुनर्हिमीभवन की इस परिघटना को **पुनर्हिमायन** कहते हैं। हिम पर 'स्केट' के नीचे जल बनने के कारण ही 'स्केटिंग' करना संभव हो पाता है। दाब में वृद्धि के कारण जल बनता है जो स्नेहक की भांति कार्य करता है।



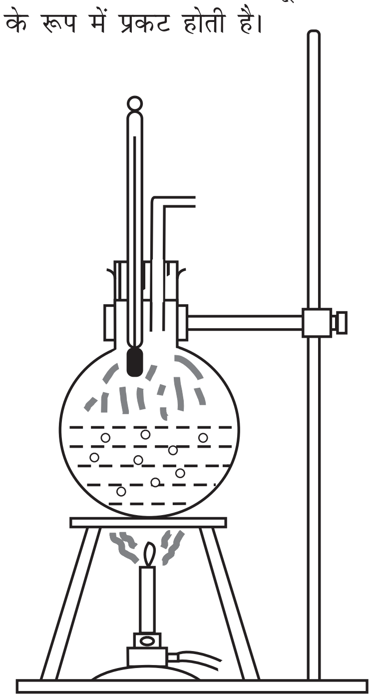
चित्र 11.10

जब समस्त हिम जल में रूपांतरित हो जाता है और इसके पश्चात् जैसे ही हम और आगे गर्म करना चालू रखते हैं तो हम यह पाते हैं कि ताप में वृद्धि होनी आरंभ हो जाती है। ताप में यह वृद्धि निरंतर लगभग 100°C तक होती है और यहाँ फिर ताप स्थिर हो जाता है। अब फिर जल को आपूर्त ऊष्मा का उपयोग जल को द्रव अवस्था से वाष्प अथवा गैसीय अवस्था में रूपांतरित करने में होता है।

द्रव से वाष्प (अथवा गैस) में अवस्था परिवर्तन को **वाष्पन** कहते हैं। यह पाया गया है कि समस्त द्रव के वाष्प में रूपांतरित होने तक ताप नियत रहता है। अर्थात्, ठोस से वाष्प में अवस्था परिवर्तन की अवधि में पदार्थ की दोनों अवस्थाएँ द्रव तथा गैस तापीय साम्य में सहवर्ती होती हैं। वह ताप जिस पर किसी पदार्थ की द्रव तथा वाष्प दोनों अवस्थाएँ तापीय साम्य में परस्पर सहवर्ती होती हैं उसे उस पदार्थ का **क्वथनांक** कहते हैं। जल के क्वथन की प्रक्रिया को समझने के लिए आइए निम्नलिखित क्रियाकलाप करें।

क्रियाकलाप 11.3

आधे से अधिक जल से भरा एक गोल पेंदी का फ्लास्क लीजिए। चित्र 11.11 में दर्शाए अनुसार फ्लास्क के मुख पर लगी कार्क के वेधों से होकर भीतर जाते हुए एक तापमापी तथा एक भाप निकास कार्क में लगाइए और फ्लास्क को बर्नर के ऊपर रखिए। जैसे ही जल गर्म होता है, तो पहले यह देखिए कि वह वायु, जो जल में विलीन थी, छोटे-छोटे बुलबुलों के रूप में बाहर आएगी। तत्पश्चात् भाप के बुलबुले फ्लास्क की तली में बनेंगे, परन्तु जैसे ही वे शीर्षभाग के पास के शीतल जल की ओर ऊपर उठते हैं, संघनित होकर अदृश्य हो जाते हैं। अंतत: जैसे ही समस्त जल का ताप 100°C पर पहुँचता है, भाप के बुलबुले पृष्ठ पर पहुँचते हैं और **क्वथन** होने लगता है। फ्लास्क के भीतर भाप दिखाई नहीं देती, परन्तु जैसे ही फ्लास्क से बाहर निकलती है, यह जल की अत्यंत छोटी बूँदों के रूप में संघनित होकर धुंध के रूप में प्रकट होती है।



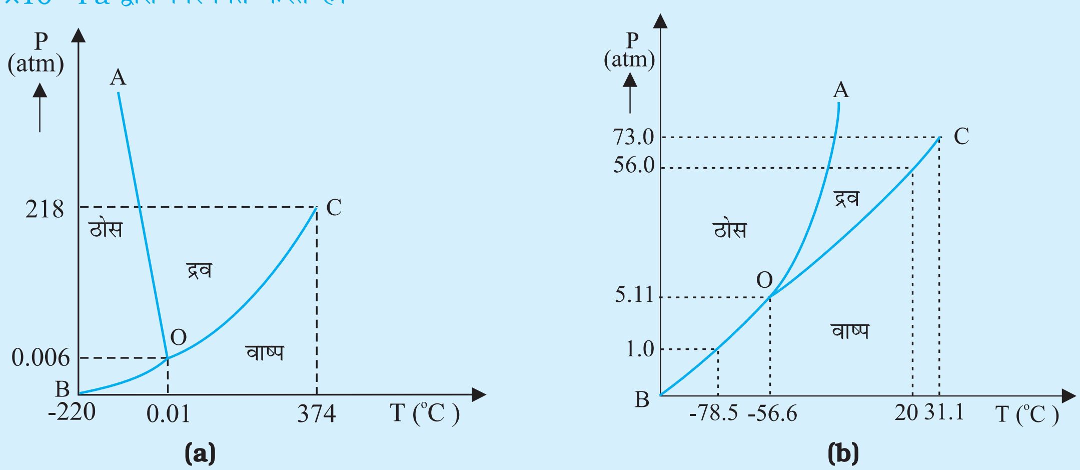
चित्र 11.11 क्वथन प्रक्रिया।

अब यदि कुछ सेकंडों के लिए भाप निकास को बंद कर दें, ताकि फ्लास्क के भीतर दाब में वृद्धि हो, तब आप यह देखेंगे कि क्वथन रुक जाता है। जल में क्वथन प्रक्रिया पुन: आरंभ होने तक जल के ताप में वृद्धि करने के लिए (दाब पर निर्भर करते हुए) और ऊष्मा की आवश्यकता होती है। इस प्रकार दाब में वृद्धि के साथ क्वथनांक में वृद्धि हो जाती है।

आइए अब हम बर्नर को हटा लेते हैं तथा जल को लगभग 80°C तक ठंडा होने देते हैं। फ्लास्क से तापमापी तथा भाप निकास हटाकर फ्लास्क के मुँह को वायुरुद्ध कर्क से कस कर

त्रिक बिंदु

किसी पदार्थ का ताप उसकी अवस्था परिवर्तन (प्रावस्था परिवर्तन) की अवधि में नियत रहता है। किसी पदार्थ के ताप T तथा दाब P के बीच आलेखित ग्राफ को प्रावस्था आरेख अथवा $P-T$ आरेख कहते हैं। नीचे दिखाए गए चित्र में जल तथा CO_2 के प्रावस्था आरेख दर्शाए गए हैं। इस प्रकार का प्रावस्था आरेख $P-T$ तल को ठोस क्षेत्र, वाष्प क्षेत्र तथा द्रव क्षेत्र में विभाजित करता है। इन क्षेत्रों को वक्रों जैसे **ऊर्ध्वपातन वक्र** (BO), **संगलन वक्र** (AO) तथा **वाष्पन वक्र** (CO) द्वारा पृथक किया जाता है। ऊर्ध्वपातन वक्र BO के बिंदु उस अवस्था को निरूपित करते हैं जिस पर ठोस तथा वाष्प प्रावस्थाएँ सहवर्ती होती हैं। संगलन वक्र AO के बिंदु उस अवस्था का निरूपण करते हैं जिसमें ठोस तथा द्रव प्रावस्थाएँ सहवर्ती होती हैं। वाष्पन वक्र CO के बिंदु उस अवस्था को निरूपित करते हैं जिसमें द्रव तथा वाष्प प्रावस्थाएँ सहवर्ती होती हैं। वह ताप तथा दाब जिस पर संगलन वक्र, वाष्पन वक्र तथा ऊर्ध्वपातन वक्र मिलते हैं तथा किसी पदार्थ की तीनों प्रावस्थाएँ सहवर्ती होती हैं उस पदार्थ का **त्रिक बिंदु** कहलाता है। उदाहरण के लिए, जल के त्रिक बिंदु को ताप 273.16K तथा दाब 6.11×10^{-3} Pa द्वारा निरूपित करते हैं।



(a) जल तथा (b) CO_2 के लिए दाब-ताप प्रावस्था आरेख (पैमाने के अनुसार नहीं)

बंद कर देते हैं। अब फ्लास्क को स्टैंड पर उलटा करके रखते हैं और फ्लास्क पर हिमशीतित जल उड़ेलते हैं। ऐसा करने पर फ्लास्क के भीतर की जलवाष्प संघनित होकर फ्लास्क के भीतर जल के पृष्ठ पर दाब को कम कर देती है। अब निम्न ताप पर जल में पुनः क्वथन आरंभ हो जाता है। इस प्रकार दाब में कमी होने पर क्वथनांक घट जाता है।

इससे यह स्पष्ट हो जाता है कि पहाड़ी क्षेत्रों में भोजन पकाना क्यों कठिन होता है। उच्च तुंगता पर वायुमण्डलीय दाब निम्न होता है, जिसके कारण वहाँ पर समुद्र तट की तुलना में जल का क्वथनांक घट जाता है। इसके विपरीत, दाब कुकर के भीतर दाब में वृद्धि करके क्वथनांक बढ़ाया जाता है। इसीलिए पाकक्रिया तेज होती है। मानक वायुमण्डलीय दाब पर किसी पदार्थ के क्वथनांक को **प्रसामान्य क्वथनांक** कहते हैं।

परन्तु, सभी पदार्थ इन तीनों अवस्थाओं – ठोस, द्रव तथा गैस से नहीं गुजरते। कुछ पदार्थ ऐसे भी हैं जो सामान्यतः सीधे ठोस से वाष्प अवस्था में और विलोमतः पहुँच जाते हैं। किसी पदार्थ का ठोस अवस्था से वाष्प अवस्था में, बिना द्रव अवस्था से गुजरे, पहुँचना **ऊर्ध्वपातन** कहलाता है तथा ऐसे पदार्थ को **ऊर्ध्वपातन** पदार्थ कहते हैं। शुष्क हिम (ठोस CO_2) का ऊर्ध्वपातन होता है, आयोडीन भी इसी प्रकार का पदार्थ है। ऊर्ध्वपातन की प्रक्रिया के समय किसी पदार्थ की दोनों अवस्थाएँ – ठोस तथा वाष्प अवस्था तापीय साम्य में सहवर्ती होती हैं।

11.8.1 गुप्त ऊष्मा

अनुभाग 11.8 में हमने यह सीखा है कि जब कोई पदार्थ अवस्था परिवर्तन की स्थिति में होता है तो पदार्थ तथा उसके परिवेश के बीच ऊष्मा की एक निश्चित मात्रा स्थानांतरित होती है। किसी पदार्थ की अवस्था परिवर्तन की अवधि में, ऊष्मा की मात्रा का प्रति एकांक द्रव्यमान स्थानांतरण, उस पदार्थ की इस

सारणी 11.4 1 atm दाब पर विभिन्न पदार्थों के अवस्था परिवर्तन के ताप तथा गुप्त ऊष्माएँ

पदार्थ	गलनांक (^{0}C)	L_f (10^5J kg^{-1})	क्वथनांक (^{0}C)	L_v (10^5J kg^{-1})
ऐथिल ऐल्कोहॉल	–114	1.0	78	8.5
सोना	1063	0.645	2660	15.8
लैड	328	0.25	1744	8.67
पारा	–39	0.12	357	2.7
नाइट्रोजन	–210	0.26	–196	2.0
ऑक्सीजन	–219	0.14	–183	2.1
जल	0	3.33	100	22.6

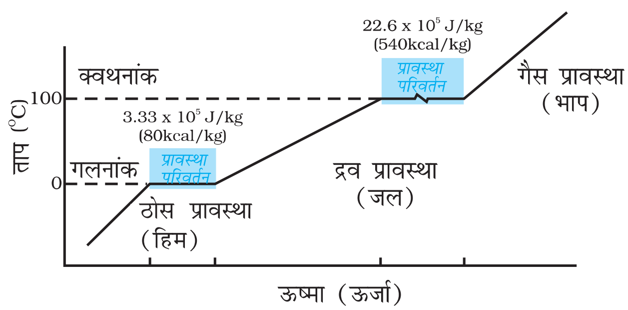
प्रक्रिया के लिए **गुप्त ऊष्मा** कहलाती है। उदाहरण के लिए, यदि –10°C के किसी दिए गए परिमाण के हिम को गर्म किया जाए तो उसका ताप इसके गलनांक (0°C) तक बढ़ता है। इस ताप पर और ऊष्मा देने पर ताप में वृद्धि नहीं होती, परन्तु हिम पिघलने लगती है अर्थात् अवस्था परिवर्तन होता है। जब समस्त हिम पिघल जाती है, तो और ऊष्मा देने पर जल के ताप में वृद्धि होती है। इसी प्रकार की स्थिति क्वथनांक पर द्रव-गैस अवस्था परिवर्तन के समय होती है। उबलते जल को और ऊष्मा प्रदान करने पर ताप में वृद्धि नहीं होती; वाष्पन हो जाता है।

अवस्था परिवर्तन के समय आवश्यक ऊष्मा का परिमाण जिस पदार्थ की अवस्था में परिवर्तन हो रहा है उसके द्रव्यमान तथा रूपांतरण-ऊष्मा पर निर्भर करता है। इस प्रकार, यदि m उस पदार्थ का द्रव्यमान है जिसका एक अवस्था से दूसरी अवस्था में परिवर्तन हो रहा है, तब आवश्यक ऊष्मा का परिमाण

$$Q = mL$$

अथवा $L = Q/m$ (11.13)

यहाँ L को गुप्त ऊष्मा कहते हैं तथा यह पदार्थ का अभिलक्षण है। इसका SI मात्रक J kg^{-1} है। L का मान दाब पर भी निर्भर करता है। प्राय: इसके मान का उद्धरण मानक वायुमण्डलीय दाब पर किया जाता है। ठोस-द्रव अवस्था परिवर्तन के लिए गुप्त ऊष्मा को **संगलन की गुप्त ऊष्मा** (L_f) कहते हैं, तथा द्रव-गैस अवस्था परिवर्तन के लिए गुप्त ऊष्मा को **वाष्पन की गुप्त ऊष्मा** (L_v) कहते हैं। इसे हम प्राय: संगलन ऊष्मा तथा वाष्पन ऊष्मा कहते हैं। चित्र 11.12 में जल के किसी परिमाण के लिए ताप तथा ऊष्मा ऊर्जा के बीच ग्राफ का आलेख दर्शाया गया है। सारणी 11.4 में कुछ पदार्थों की गुप्त ऊष्मा, गलनांक तथा क्वथनांक दिए गए हैं।



चित्र 11.12 जल के लिए ताप तथा ऊष्मा के बीच ग्राफ आलेखन (पैमाने के अनुसार नहीं)।

ध्यान दीजिए कि जब अवस्था परिवर्तन के समय ऊष्मा दी (अथवा ली) जाती है, तो ताप नियत रहता है। ध्यान से देखिए कि चित्र 11.12 में प्रावस्था रेखाओं की प्रवणताएँ समान नहीं हैं जो यह संकेत देता है कि विभिन्न अवस्थाओं की विशिष्ट ऊष्मा धारिताएँ समान नहीं हैं। जल के लिए, संगलन तथा वाष्पन की गुप्त ऊष्माएँ क्रमश: $L_f = 3.33\times10^5$ J kg^{-1} तथा $L_v = 22.6\times10^5$ J kg^{-1} हैं। अर्थात् 1 kg हिम को 0°C पर गलन के लिए 3.33×10^5 J ऊष्मा चाहिए तथा 1 kg जल को 100°C पर भाप में परिवर्तन होने के लिए 22.6×10^5 J ऊष्मा चाहिए। अत: 100°C के जल की अपेक्षा 100°C की भाप में 22.6×10^5 J kg^{-1} ऊष्मा अधिक होती है। यही कारण है कि उबलते जल की तुलना में उसी ताप की भाप प्राय: अधिक गंभीर जलन देती है।

उदाहरण 11.4 जब 0°C के 0.15 kg हिम को किसी पात्र में भरे 50°C के 0.30 kg जल में मिलाया जाता है तो मिश्रण का परिणामी ताप 6.7°C हो जाता है। हिम के संगलन की ऊष्मा परिकलित कीजिए। ($s_{जल}$ = 4186 J kg^{-1} ^{0}C^{-1})

हल :

जल द्वारा लुप्त ऊष्मा = $ms_w (\theta_f - \theta_i)_w$

= (0.30 kg) (4186 J kg^{-1} °C^{-1}) (50.0°C – 6.7°C)

= 54376.14 J

हिम के गलन के लिए आवश्यक ऊष्मा

= $m_2 L_f$ = (0.15 kg) L_f

हिम जल के ताप को अंतिम ताप तक बढ़ाने के लिए आवश्यक ऊष्मा = $m_I s_w (\theta_f - \theta_i)_I$

= (0.15 kg) (4186 J kg^{-1} °C^{-1}) (6.7°C – 0°C)

= 4206.93 J

लुप्त ऊष्मा = ऊष्मा लब्धि

54376.14 J = (0.15 kg) L_f + 4206.93 J

L_f = 3.34×10^5 J kg^{-1}

उदाहरण 11.5 किसी ऊष्मामापी में भरे –12°C के 3 kg हिम को वायुमण्डलीय दाब पर 100°C की भाप में परिवर्तित करने के लिए आवश्यक ऊष्मा परिकलित कीजिए। दिया गया है हिम की विशिष्ट ऊष्मा धारिता = 2100 J kg^{-1} ^{0}C^{-1}, जल की विशिष्ट ऊष्मा धारिता = 4186 J kg^{-1} ^{0}C^{-1}, हिम के संगलन की गुप्त ऊष्मा = 3.35×10^5 J kg^{-1} तथा भाप की गुप्त ऊष्मा = 2.256×10^6 J kg^{-1}.

हल : दिया है

हिम का द्रव्यमान m = 3 kg

हिम की विशिष्ट ऊष्मा धारिता, $s_{हिम}$

= 2100 J kg^{-1} ^{0}C^{-1}

जल की विशिष्ट ऊष्मा धारिता, $s_{जल}$

= 4186 J kg^{-1} ^{0}C^{-1}

हिम के संगलन की गुप्त ऊष्मा, $L_{f\,हिम}$

= 3.35×10^5 J kg^{-1}

भाप की गुप्त ऊष्मा, $L_{भाप}$

= 2.256×10^6 J kg^{-1}

अब, Q = –12°C के 3 kg हिम को 100°C की भाप में परिवर्तित करने के लिए आवश्यक ऊष्मा

Q_1 = –12°C के 3 kg हिम को 0°C के हिम में परिवर्तित करने के लिए आवश्यक ऊष्मा

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

Q_2 = 0°C के 3 kg हिम को 0°C के जल में संगलित करने के लिए आवश्यक ऊष्मा

= $m\, L_{f\,हिम}$ = (3 kg) (3.35×10^5 J kg^{-1})

= 1005000 J

Q_3 = 0°C के 3 kg जल को 100°C के जल में परिवर्तित करने के लिए आवश्यक ऊष्मा

= $ms_w \Delta T_2$

= (3kg) (4186J kg^{-1} °C^{-1}) (100°C)

= 1255800 J

Q_4 = 100°C के 3 kg जल को 100°C की भाप में परिवर्तित करने के लिए आवश्यक ऊष्मा

= $m\, L_{भाप}$ = (3 kg) (2.256×10^6 J kg^{-1})

= 6768000 J

अतः, $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$

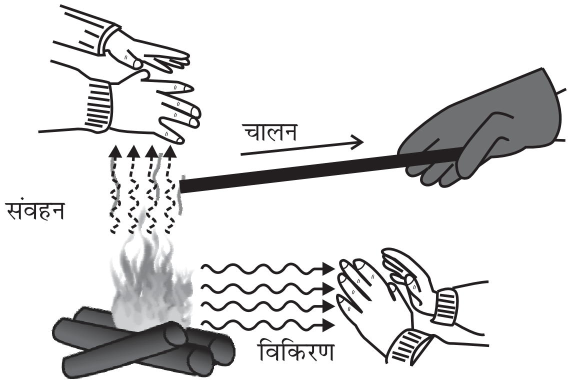
= 75600 J + 1005000J

+ 1255800 J + 6768000 J

= 9.1×10^6 J

11.9 ऊष्मा स्थानांतरण

हमने देखा है कि ताप में अंतर के कारण एक निकाय से दूसरे निकाय में अथवा किसी निकाय के एक भाग से उसके दूसरे भाग में ऊर्जा के स्थानांतरण को ऊष्मा कहते हैं। इस ऊर्जा स्थानांतर के विविध साधन क्या हैं? ऊष्मा स्थानांतरण की सुस्पष्ट तीन विधियाँ हैं: चालन, संवहन तथा विकिरण (चित्र 11.13)।

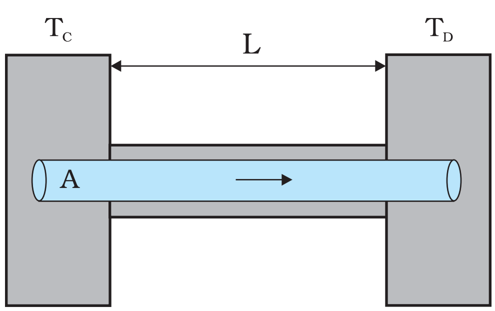


चित्र 11.13 चालन, संवहन तथा विकिरण द्वारा तापन।

11.9.1

किसी वस्तु के दो संलग्न भागों के बीच उनके तापों में अंतर के कारण ऊष्मा स्थानांतरण की क्रियाविधि को **चालन** कहते हैं। मान लीजिए किसी धातु की छड़ का एक सिरा आग की ज्वाला में रखा है। शीघ्र ही छड़ का दूसरा सिरा इतना गर्म हो जाएगा कि आप उसे अपने नंगे हाथों से पकड़ नहीं सकेंगे। यहाँ छड़ में ऊष्मा स्थानांतरण चालन द्वारा छड़ के तप्त सिरे से छड़ के विभिन्न भागों से होकर दूसरे सिरे तक होता है। गैसें हीन ऊष्मा चालक होती हैं तथा द्रवों की चालकता ठोसों तथा गैसों के बीच की होती है।

मात्रात्मक रूप में, ऊष्मा चालन का वर्णन "किसी पदार्थ में किसी दिए गए तापांतर के लिए ऊष्मा प्रवाह की दर" द्वारा किया जाता है। L लंबाई तथा A एकसमान अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल की धातु की किसी ऐसी छड़ पर विचार कीजिए जिसके दोनों सिरों के बीच तापांतर स्थापित किया गया है। उदाहरण के लिए, ऐसा छड़ के सिरों को क्रमश: T_C तथा T_D ताप के ऊष्मा भंडारों के संपर्क में रखकर किया जा सकता है (चित्र 11.14)। अब हम एक ऐसी आदर्श स्थिति की कल्पना करते हैं जिसमें छड़ के पार्श्व पूर्णत: ऊष्मारोधी हैं ताकि पार्श्वों तथा परिवेश के बीच ऊष्मा का विनिमय नहीं होता।



चित्र 11.14 किसी छड़ जिसके दो सिरों को T_C तथा T_D तापों पर ($T_C > T_D$) स्थापित किया गया है, में चालन द्वारा स्थायी अवस्था ऊष्मा प्रवाह।

कुछ समय के पश्चात् स्थायी अवस्था आ जाती है; छड़ का ताप दूरी के साथ एकसमान रूप से T_C से T_D तक घटता है; ($T_C > T_D$)। C पर ऊष्मा भण्डार एक नियत दर पर ऊष्मा की आपूर्ति करता है, जो छड़ से स्थानांतरित होकर उसी दर से D पर स्थित ऊष्मा भंडार में पहुँच जाती है। प्रयोगों द्वारा यह पाया जाता है कि इस स्थायी अवस्था में, ऊष्मा प्रवाह की दर H तापांतर ($T_C - T_D$) तथा अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल, A के अनुक्रमानुपाती और छड़ की लंबाई L के व्युत्क्रमानुपाती होती है:

$$H = KA\,\frac{T_C - T_D}{L} \qquad (11.14)$$

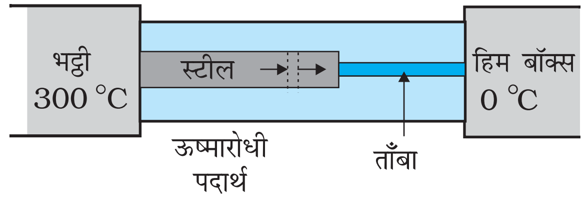
आनुपातिकता स्थिरांक K को पदार्थ की
कहते हैं। किसी पदार्थ के लिए K का मान जितना अधिक होता है उतनी ही शीघ्रता से वह ऊष्मा चालन करता है। K का SI मात्रक $J\ s^{-1}\ m^{-1}\ K^{-1}$ अथवा $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ है। सारणी 11.5 में विभिन्न पदार्थों की ऊष्मा चालकता के मान दिए गए हैं। इन मानों में ताप के साथ अल्प अंतर होता है, परन्तु सामान्य ताप परिसर में इन मानों को अचर मान सकते हैं।

अच्छे ऊष्मा चालकों (धातुओं) की अपेक्षाकृत अधिक ऊष्मा चालकताओं की तुलना कुछ अच्छे ऊष्मारोधी पदार्थों, जैसे लकड़ी तथा काँच तंतु, की अपेक्षाकृत कम ऊष्मा चालकताओं से कीजिए। आपने यह पाया होगा कि खाना पकाने के कुछ बर्तनों की पेंदी पर ताँबे का विलेपन होता है। ऊष्मा का अच्छा चालक होने के कारण ताँबा बर्तन की पेंदी पर ऊष्मा वितरण को उन्नत करता है जिससे भोजन समान रूप से पकता है। इसके विपरीत, प्लास्टिक फेन, मुख्यत: वायु की कोटरिका होने के कारण, अच्छे ऊष्मारोधी होते हैं। याद कीजिए गैसें अल्प चालक होती हैं तथा सारणी 11.5 से वायु की निम्न ऊष्मा चालकता नोट कीजिए। बहुत से अन्य अनुप्रयोगों में ऊष्मा धारण तथा स्थानांतरण महत्वपूर्ण होते हैं। हमारे देश में, कंक्रीट की छतों वाले घर गर्मियों में बहुत गर्म हो जाते हैं, इसका कारण यह है कि कंक्रीट की ऊष्मा चालकता (यद्यपि धातुओं की तुलना काफी कम है।) फिर भी बहुत कम नहीं है। इसीलिए, प्राय: लोग छतों पर फेन-रोधन कराना पसंद करते हैं ताकि ऊष्मा स्थानांतरण को रोककर कमरे को शीतल रखा जा सके। कुछ स्थितियों में ऊष्मा स्थानांतरण क्रांतिक होता है। उदाहरण के लिए नाभिकीय रिएक्टरों में सुविस्तृत ऊष्मा-स्थानांतर निकायों को स्थापित करने की आवश्यकता होती है ताकि नाभिकीय रिएक्टर के क्रोड में नाभिकीय विखंडन द्वारा उत्पन्न विशाल ऊर्जा का काफी तेज़ी से बाहर पारगमन किया जा सके तथा क्रोड अतितप्त होने से बचा रहे।

सारणी 11.5 कुछ पदार्थों की ऊष्मा चालकताएँ

पदार्थ	ऊष्मा चालकता ($J\ s^{-1}\ m^{-1}\ K^{-1}$)
धातुएँ	
चाँदी	406
ताँबा	385
ऐलुमिनियम	205
पीतल	109
स्टील	50.2
लैड	34.7
पारा	8.3
अधातुएँ	
ऊष्मारोधी ईंट	0.15
कंक्रीट	0.8
शरीर-वसा	0.20
नमदा	0.04
काँच	0.8
हिम	1.6
काँच तंतु	0.04
लकड़ी	0.12
जल	0.8
गैसें	
वायु	0.024
ऑर्गन	0.016
हाइड्रोजन	0.14

उदाहरण 11.6 चित्र 11.15 में दर्शाए गए निकाय की स्थायी अवस्था में स्टील-ताँबा संधि का ताप क्या है? स्टील छड़ की लंबाई = 15.0 cm, ताँबे की छड़ की लंबाई = 10.0 cm, भट्ठी का ताप = 300°C, दूसरे सिरे का ताप = 0°C; स्टील की छड़ की अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल ताँबे की छड़ की अनुप्रस्थ काट के क्षेत्रफल का दो गुना है। (स्टील की ऊष्मा चालकता = 50.2 J $s^{-1}\ m^{-1}\ K^{-1}$; ताँबे की ऊष्मा चालकता = 385 J $s^{-1}m^{-1}K^{-1}$)



चित्र 11.15

हल : छड़ों को चारों ओर से घेरे रखने वाले ऊष्मारोधी पदार्थ छड़ों के पार्श्व से होने वाली ऊष्मा क्षति को कम कर देते हैं। इसीलिए, ऊष्मा केवल छड़ की लंबाई के अनुदिश ही प्रवाहित होती है। छड़ की किसी भी अनुप्रस्थ काट पर विचार कीजिए। स्थायी अवस्था में छड़ के किसी अवयव में प्रवेश करने वाली ऊष्मा उससे बाहर निष्कासित होने वाली ऊष्मा के बराबर होनी चाहिए, वरना अवयव द्वारा ऊष्मा की नेट लब्धि अथवा हानि होगी तथा इसका ताप स्थायी नहीं रहेगा। इस प्रकार स्थायी अवस्था में छड़ की किसी अनुप्रस्थ काट से प्रवाहित होने वाली ऊष्मा की दर संयुक्त स्टील-ताँबा छड़ की लंबाई के अनुदिश सभी बिंदुओं पर समान है। मान लीजिए स्टील-ताँबा संधि का स्थायी अवस्था में ताप T है, तब

$$\frac{K_1 A_1 (300 - T)}{L_1} = \frac{K_2 A_2 (T - 0)}{L_2}$$

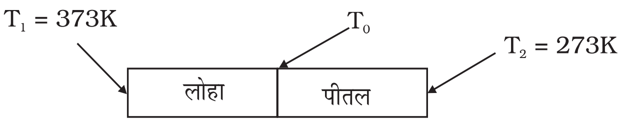
यहाँ, 1 तथा 2 क्रमशः स्टील तथा ताँबे को संदर्भित करते हैं। $A_1 = 2A_2$, $L_1 = 15.0$ cm, $L_2 = 10.0$ cm, $K_1 = 50.2\ J\ s^{-1}\ m^{-1}\ K^{-1}$, $K_2 = 385\ J\ s^{-1}\ m^{-1}\ K^{-1}$, के लिए

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

अर्थात् $T = 44.4$ °C ◀

उदाहरण 11.7 चित्र 11.16 में दर्शाए अनुसार लोहे की किसी छड़ ($L_1 = 0.1$m, $A_1 = 0.02\ m^2$, $K_1 = 79\ W\ m^{-1}K^{-1}$) को किसी पीतल की छड़ ($L_2 = 0.1$m, $A_2 = 0.02\ m^2$, $K_2 = 109\ W\ m^{-1}\ K^{-1}$) के साथ सिरे से सिरे को मिलाकर डाला गया है। लोहे की छड़ तथा पीतल की छड़ के स्वतंत्र सिरों को क्रमशः 373 K तथा 273 K पर स्थापित किया गया है। (i) दोनों छड़ों की संधि पर ताप, (ii) संयुक्त छड़ की तुल्य ऊष्मा चालकता, तथा (iii) संयुक्त छड़ में ऊष्मा प्रवाह की दर के लिए व्यंजक निकालिए तथा परिकलित कीजिए।

हल



चित्र 11.16

दिया गया है,

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

स्थायी अवस्था की शर्तों के अधीन, लोहे की छड़ से ऊष्मा प्रवाह की दर (H_1) ताँबे की छड़ से ऊष्मा प्रवाह की दर (H_2) के समान है।

अत:, $\quad H = H_1 = H_2$

$$= \frac{K_1 A_1 (T_1 - T_0)}{L_1} = \frac{K_2 A_2 (T_0 - T_2)}{L_2}$$

चूंकि $A_1 = A_2 = A$ तथा $L_1 = L_2 = L$

अत: उपरोक्त समीकरण होगा

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

अत: दोनों छड़ों की संधि का ताप T_0 होगा

$$T_0 = \frac{K_1 T_1 + K_2 T_2}{K_1 + K_2}$$

T_0 के इस मान का प्रतिस्थापन करने से किसी भी छड़ से ऊष्मा प्रवाह की दर H का मान प्राप्त होता है:

$$H = \frac{K_1 A (T_1 - T_0)}{L} = \frac{K_2 A (T_0 - T_2)}{L}$$

$$= \left(\frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2}\right) \frac{A(T_1 - T_0)}{L} = \frac{A(T_1 - T_2)}{L\left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}\right)}$$

यदि लंबाई $L_1 + L_2 = 2L$ की संयुक्त छड़ की तुल्य ऊष्मा चालकता K है तथा इससे होकर जाने वाली ऊष्मा प्रवाह की दर H' हो, तो उपरोक्त समीकरण का उपयोग करने पर

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

तथा $\quad K = \dfrac{2K_1 K_2}{K_1 + K_2}$

इस प्रकार,

(i) $\quad T_0 = \dfrac{K_1 T_1 + K_2 T_2}{K_1 + K_2}$

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

$= 315\ \text{K}$

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

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

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

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

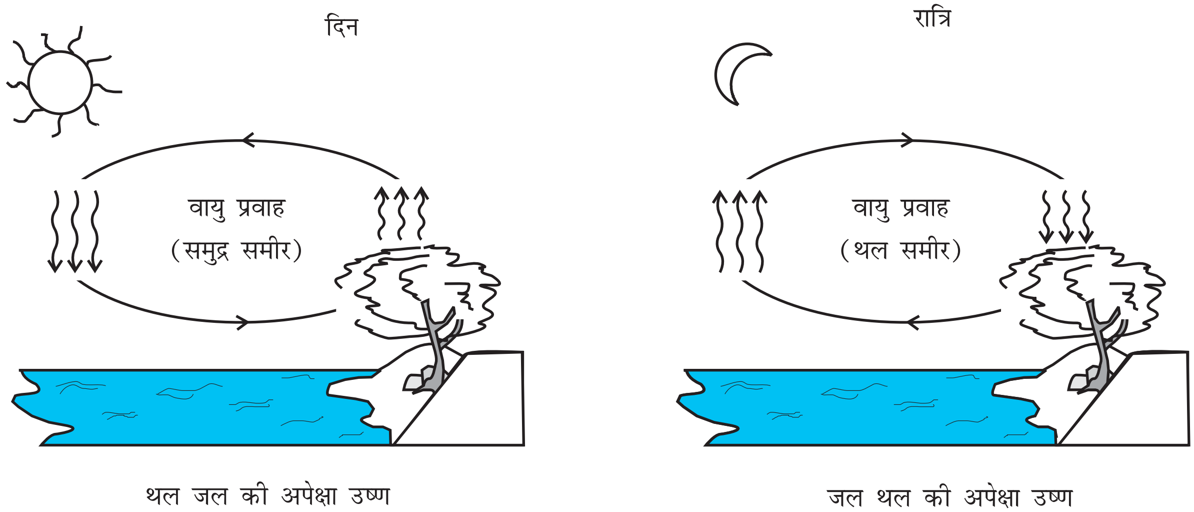
$$= \frac{(91.6\ \text{W m}^{-1}\ \text{K}^{-1}) \times (0.02\ \text{m}^2) \times (373\,\text{K} - 273\,\text{K})}{2 \times (0.1\ \text{m})}$$

$= 916.1\ \text{W}$ ◀

11.9.2 संवहन

संवहन वह विधि है जिसमें पदार्थ की वास्तविक गति द्वारा ऊष्मा स्थानांतरण होता है। यह केवल तरलों में ही संभव है। संवहन प्राकृतिक हो सकता है अथवा प्रणोदित भी हो सकता है। प्राकृतिक संवहन में गुरुत्व एक महत्वपूर्ण भूमिका निभाती है। जब किसी तरल को नीचे से गर्म किया जाता है, तो गर्म भाग में प्रसार होता है, फलस्वरूप उसका घनत्व घट जाता है। उत्प्लावना के कारण यह ऊपर उठता है तथा ऊपरी शीतल भाग इसे प्रतिस्थापित कर देता है। यह पुन: तप्त होता है, ऊपर उठता है तथा तरल के शीतल भाग द्वारा प्रतिस्थापित होता है। यह प्रक्रिया चलती रहती है। स्पष्ट रूप से ऊष्मा स्थानांतर की यह विधि चालन से भिन्न होती है। संवहन में तरल के विभिन्न भागों का स्थूल अभिगमन होता है। प्रणोदित संवहन में पदार्थ को किसी पम्प अथवा किसी अन्य भौतिक साधन द्वारा गति करने के लिए विवश किया जाता है। घरों में प्रणोदित वायु तापन निकाय, मानव परिसंचरण तंत्र तथा स्वचालित वाहनों के इंजनों के शीतलन निकाय प्रणोदित संवहन निकायों के सामान्य उदाहरण हैं। मानव शरीर में हृदय एक पम्प की भांति कार्य करता है जो रुधिर का शरीर के विभिन्न भागों में संचरण करता है, तथा इस प्रकार प्रणोदित संवहन द्वारा ऊष्मा स्थानांतरित करके शरीर में एकसमान ताप स्थापित करता है।

प्राकृतिक संवहन बहुत सी सुपरिचित परिघटनाओं के लिए उत्तरदायी है। दिन के समय बड़े जलाशयों की तुलना में थल शीघ्र तप्त हो जाता है। ऐसा दो कारणों से होता है – पहला जल की विशिष्ट ऊष्मा धारिता उच्च है तथा दूसरा मिश्रित धाराएँ अवशोषित ऊष्मा को विशाल आयतन के जल के सब भागों में विसारित कर देती हैं। तप्त थल के संपर्क वाली वायु चालन



चित्र 11.17 *संवहन चक्र।*

द्वारा गर्म होती है तथा तप्त होकर वायु फैलती है, जिससे परिवेश की शीतल वायु की तुलना में इसका घनत्व कम हो जाता है। फलस्वरूप उष्ण वायु ऊपर उठती है (वायु धाराएँ), तथा रिक्त स्थान को भरने के लिए अन्य वायु गति करती हैं (पवनें) – जिससे बड़े जलाशयों के निकट **समुद्र समीर** उत्पन्न हो जाती हैं। ठंडी वायु नीचे आती हैं तथा एक तापीय संवहन चक्र बन जाता है, जो ऊष्मा को थल से दूर स्थानांतरित कर देता है। रात्रि में थल की ऊष्मा का ह्रास अधिक शीघ्रता से होता है तथा जलीय पृष्ठ थल की तुलना में उष्ण होती है। परिणामस्वरूप चक्र उत्क्रमित हो जाता है (चित्र 11.17)।

प्राकृतिक संवहन का एक अन्य उदाहरण उत्तर पूर्व से विषुवत् वृत्त की ओर पृथ्वी पर बहने वाली स्थायी पृष्ठीय पवनें हैं, जिन्हें व्यापारिक पवनें कहते हैं। इनके बहने की यथोचित व्याख्या इस प्रकार है : पृथ्वी के विषुवतीय क्षेत्रों तथा ध्रुवीय क्षेत्रों को सूर्य की ऊष्मा समान मात्रा में प्राप्त नहीं होती। विषुवत वृत्त के समीप पृथ्वी के पृष्ठ पर वायु तप्त होती है जबकि ध्रुवों के ऊपरी वायुमण्डलीय वायु शीतल होती है। किसी अन्य कारक की अनुपस्थिति में, संवहन धाराएँ प्रवाहित होने लगेंगी जिसमें वायु विषुवतीय पृष्ठ से ऊपर उठकर ध्रुवों की ओर बहेगी, फिर नीचे की ओर जाएगी तथा बहती हुई पुनः विषुवत वृत्त की ओर जाएगी। परन्तु, पृथ्वी की घूर्णन गति इस संवहन धारा में संशोधन कर देती है जिसके कारण विषुवत वृत्त के समीप की वायु की पूर्व की ओर चाल 1600 km/h होती है जबकि ध्रुवों के समीप यह चाल शून्य होती है। परिणामस्वरूप यह वायु ध्रुवों पर नीचे की ओर न फैलकर 30°N (उत्तर) अक्षांश पर फैलती है और विषुवत वृत्त पर लौट आती है। इसे **व्यापारिक पवनें** कहते हैं।

11.9.3 विकिरण

चालन तथा संवहन को परिवहन माध्यम के रूप में किसी पदार्थ की आवश्यकता होती है। ऊष्मा स्थानांतरण की ये विधियाँ निर्वात से पृथक दो वस्तुओं के बीच क्रियाशील नहीं हो सकतीं। परन्तु विशाल दूरी होने पर भी पृथ्वी सूर्य से ऊष्मा प्राप्त कर लेती है, तथा हम पास की आग की उष्णता शीघ्र ही अनुभव कर लेते हैं, यद्यपि वायु अल्प चालक है तथा इतने कम समय में संवहन धाराएँ भी स्थापित नहीं हो पातीं। ऊष्मा स्थानांतरण की तीसरी विधि को किसी माध्यम की आवश्यकता नहीं होती। इस विधि को **विकिरण** कहते हैं, तथा विद्युत चुंबकीय तरंगों द्वारा इस प्रकार विकरित ऊर्जा को **विकिरण ऊर्जा** कहते हैं। किसी विद्युत चुंबकीय तरंग में वैद्युत तथा चुंबकीय क्षेत्र दिक तथा काल में दोलन करते हैं। अन्य किसी तरंग की भांति विद्युत चुंबकीय तरंगों की विभिन्न तरंगदैर्घ्य हो सकती हैं तथा वे निर्वात में समान चाल, जिसे प्रकाश की चाल कहते हैं अर्थात् $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ से चल सकती हैं। इन तथ्यों के बारे में विस्तार से आप बाद में फिर कभी सीखेंगे, परन्तु अब आप यह जान गए हैं कि विकिरण द्वारा ऊष्मा स्थानांतरण के लिए माध्यम का होना क्यों आवश्यक नहीं है तथा यह इतनी तीव्र गति से क्यों होता है। विकिरण द्वारा ही सूर्य से ऊष्मा निर्वात (शून्य अंतरिक्ष) से होकर पृथ्वी तक पहुँचती है। सभी तप्त पिण्ड चाहे वे ठोस, द्रव अथवा गैस हों, विकिरण ऊर्जा उत्सर्जित करते हैं। किसी पिण्ड द्वारा उसके ताप के कारण उत्सर्जित विद्युत चुंबकीय विकिरणों जैसे लाल तप्त लोहा से विकिरण अथवा तंतु लैम्प से प्रकाश को **ऊष्मा विकिरण** कहते हैं।

जब यह ऊष्मा विकिरण अन्य पिण्डों पर पड़ता है तो इसका आंशिक परावर्तन तथा आंशिक अवशोषण होता है। ऊष्मा का वह परिमाण जिसे कोई पिण्ड विकिरण द्वारा अवशोषित कर सकता है, उस पिण्ड के वर्ण (रंग) पर निर्भर करता है।

हम यह पाते हैं कि कृष्ण पिण्ड विकिरण ऊर्जा का अवशोषण तथा उत्सर्जन हलके वर्णों के पिण्डों की अपेक्षा अधिक करते हैं। इस तथ्य के हमारे दैनिक जीवन में अनेक अनुप्रयोग हैं। हम गर्मियों में श्वेत अथवा हलके वर्णों के वस्त्र पहनते हैं ताकि वे सूर्य की कम से कम ऊष्मा अवशोषित करें। परन्तु सर्दियों में हम गहरे वर्ण के वस्त्र पहनते हैं जो सूर्य की अधिक ऊष्मा को अवशोषित करके हमें उष्ण रखते हैं। खाना पकाने के बर्तनों की पेंदी को काला पोत दिया जाता है ताकि आग से वह अधिकतम ऊष्मा अवशोषित करके पकाई जाने वाली सब्जी को दें।

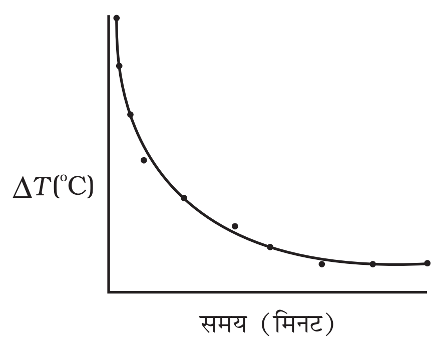
इसी प्रकार, ड्यूआर फ्लास्क अथवा थर्मस बोतल एक ऐसी युक्ति है जो बोतल की अंतर्वस्तु तथा बाहरी परिवेश के बीच ऊष्मा स्थानांतरण को निम्नतम कर देती है। यह दोहरी दीवारों का काँच का बर्तन होता है जिसकी भीतरी तथा बाहरी दीवारों पर चाँदी का लेप होता है। भीतरी दीवार से विकिरण परावर्तित होकर बोतल की अंतर्वस्तु में वापस लौट जाते हैं। इसी प्रकार बाहरी दीवार भी बाहर से आने वाले किन्हीं भी विकिरणों को वापस परावर्तित कर देती है। दीवारों के बीच के स्थान को निर्वातित करके चालन तथा संवहन द्वारा होने वाले ऊष्मा क्षय को घटाया जाता है तथा फ्लास्क को ऊष्मा रोधी जैसे कार्क पर टिकाया जाता है। इसीलिए यह युक्ति तप्त अंतर्वस्तु (जैसे दूध) को ठंडा होने से बचाने में उपयोगी है, अथवा वैकल्पिक रूप से ठंडी अंतर्वस्तुओं (जैसे हिम) का भंडारण करने में भी उपयोगी है।

11.10 न्यूटन का शीतलन नियम

हम सभी यह जानते हैं कि तप्त जल अथवा दूध मेज पर यदि रखा छोड़ दें तो वह धीरे-धीरे शीतल होना आरंभ कर देता है। अंततः वह परिवेश के ताप पर पहुँच जाता है। कोई दी गई वस्तु अपने परिवेश से ऊष्मा का विनिमय करके कैसे शीतल हो सकती है, इसका अध्ययन करने के लिए आइए निम्नलिखित क्रियाकलाप करें।

क्रियाकलाप 11.4

एक विडोलक सहित ऊष्मामापी में कुछ जल, मान लें 300 mL लीजिए और इसे दो छिद्र वाले ढक्कन से ढक दीजिए। ढक्कन के एक छिद्र में तापमापी लगाइए तथा यह सुनिश्चित कीजिए कि तापमापी का बल्ब जल में डूब जाए। तापमापी का पाठ्यांक नोट कीजिए। यह पाठ्यांक T_1 परिवेश का ताप है। ऊष्मामापी के जल को इतना गर्म कीजिए कि इसका ताप कक्ष ताप (अर्थात् परिवेश के ताप) से लगभग 40°C अधिक तक पहुँच जाए। तत्पश्चात् ऊष्मा स्रोत को हटाकर जल को गर्म करना बंद कीजिए। विराम घड़ी चलाइए तथा प्रत्येक नियत समय अंतराल जैसे 1 मिनट के पश्चात् विडोलक से धीरे-धीरे विडोलित करते हुए तापमापी के पाठ्यांक नोट कीजिए। जल का ताप परिवेश के ताप से लगभग 5°C अधिक रहने तक पाठ्यांक नोट करते रहिए। मान लीजिए यह पाठ्यांक (T_2) है। तत्पश्चात् ताप $\Delta T = T_2 - T_1$ को y अक्ष के अनुदिश लेकर इसके प्रत्येक मान के लिए तदनुरूपी t के मान को x-अक्ष के अनुदिश लेकर ग्राफ आलेखित करिए (चित्र 11.18)।



चित्र 11.18 *समय के साथ तप्त जल के शीतलन को दर्शाने वाला वक्र।*

ग्राफ से आप यह निष्कर्ष निकालेंगे कि किस प्रकार तप्त जल का शीतलन उसके अपने तथा अपने परिवेश के तापों के बीच अंतर पर निर्भर करता है। आप यह भी नोट करेंगे कि आरंभ में शीतलन की दर उच्च है तथा वस्तु के ताप में कमी होने पर यह दर घट जाती है।

उपरोक्त क्रियाकलाप यह दर्शाता है कि कोई तप्त पिण्ड ऊष्मा विकिरण के रूप में अपने परिवेश को ऊष्मा खो देता है। यह ऊष्मा-क्षय की दर पिण्ड तथा उसके परिवेश के तापों के अंतर पर निर्भर करती है। न्यूटन ऐसे पहले वैज्ञानिक थे जिन्होंने किसी दिए गए अंतःक्षेत्र के भीतर रखे किसी पिण्ड द्वारा लुप्त ऊष्मा तथा उसके ताप के बीच संबंध का योजनाबद्ध अध्ययन किया।

न्यूटन के शीतलन नियम के अनुसार किसी पिण्ड के ऊष्मा क्षय की दर, $-\mathrm{d}Q/\mathrm{d}t$ पिण्ड तथा उसके परिवेश के तापों के अंतर $\Delta T = (T_2 - T_1)$ के अनुक्रमानुपाती होती है। यह नियम केवल लघु तापांतर के लिए ही वैध है। विकिरण द्वारा ऊष्मा-क्षय पिण्ड के पृष्ठ की प्रकृति तथा खुले पृष्ठ के

क्षेत्रफल पर भी निर्भर करता है। अत: हम लिख सकते हैं कि

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

यहाँ k एक धनात्मक नियतांक है जो पिण्ड के पृष्ठ के क्षेत्रफल तथा उसकी प्रकृति पर निर्भर करता है। मान लीजिए m द्रव्यमान तथा विशिष्ट ऊष्मा धारिता s का कोई पिण्ड T_2 ताप पर है। मान लीजिए परिवेश का ताप T_1 है। मान लीजिए पिण्ड का ताप एक लघु समय अंतराल dt में dT_2 कम हो जाता है, तब लुप्त ऊष्मा का परिमाण

$dQ = ms\, dT_2$

∴ ऊष्मा क्षय की दर

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

समीकरणों (11.15) तथा (11.16) से हमें प्राप्त होता है

$$-m\,s\frac{dT_2}{dt}=k(T_2-T_1)$$

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

यहाँ $K = k/(ms)$

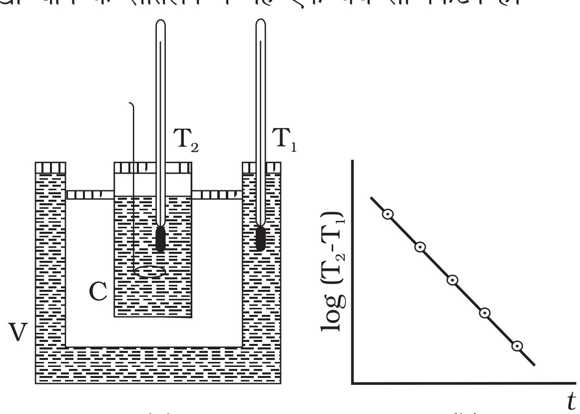
समाकलित करने पर

$\log_e (T_\circ - T_1) = - Kt + c$ (11.18)

अथवा $T_2 = T_1 + C' e^{-Kt}$; यहाँ $C' = e^c$ (11.19)

समीकरण (11.19) की सहायता से एक विशिष्ट ताप परिसर के आद्योपांत शीतलन का समय परिकलित किया जा सकता है।

लघु तापांतरों के लिए, चालन, संवहन तथा विकिरण के संयुक्त प्रभाव के कारण शीतलन की दर तापांतर के अनुक्रमानुपाती होती है। किसी विकिरक से कमरे में ऊष्मा स्थानांतरण, कमरे की दीवारों से पार होकर ऊष्मा-क्षति अथवा मेज पर प्याले में रखी चाय के शीतलन में यह एक वैध सन्निकटन है।



(a) (b)

चित्र 11.19 न्यूटन के शीतलन नियम का सत्यापन।

चित्र 11.19(a) में दर्शायी गई प्रायोगिक व्यवस्था की सहायता से न्यूटन के शीतलन नियम का सत्यापन किया जा सकता है। इसमें दोहरी दीवारों वाला एक बर्तन (V) जिसकी दीवारों के बीच जल भरा होता है, लिया जाता है। इस दोहरी दीवारों वाले बर्तन में तप्त जल से भरा ताँबे का ऊष्मामापी (C) रखते हैं। इसमें दो तापमापियों का उपयोग किया जाता है, जिसमें तापमापी T_1 के द्वारा दोहरी दीवारों के बीच भरे उष्ण जल का ताप, तथा तापमापी T_2 के द्वारा ऊष्मामापी में भरे जल का ताप मापते हैं। ऊष्मामापी के तप्त जल का ताप एक नियमित अंतराल के पश्चात् मापा जाता है। समय t तथा $\log_e (T_2-T_1)$ के बीच ग्राफ आलेखित किया जाता है जिसकी प्रकृति चित्र 11.19(b) में दर्शाए अनुसार ऋणात्मक प्रवणता की एक सरल रेखा होती है। यह समीकरण 11.18 की पुष्टि करती है।

उदाहरण 11.8 किसी बर्तन में भरे तप्त भोजन का ताप 2 मिनट में 94°C से 86°C हो जाता है जबकि कक्ष-ताप 20°C है। 71°C से 69°C तक ताप के गिरने में कितना समय लगेगा?

हल : 94°C तथा 86°C का माध्य 90°C है जो कक्ष-ताप से 70°C अधिक है। इन अवस्थाओं में बर्तन का ताप 2 मिनट में 8°C घट जाता है।

अत:, समीकरण (11.17) से,

$$\frac{\text{तापांतर}}{\text{समय}}=K\Delta T$$

$$\frac{8°C}{2\ \text{मिनट}}=K(70°C)$$

69°C तथा 71°C का माध्य 70°C है, जो कक्ष-ताप से 50°C अधिक है। इस अवस्था में K मूल अवस्था के समान है, अत:

$$\frac{2°C}{\text{समय}}=K(50°C)$$

दोनों समीकरणों को विभाजित करने पर

$$\frac{8°C/2\ \text{मिनट}}{2°C/\text{समय}}=\frac{K(70°C)}{K(50°C)}$$

समय = 0.7 min. = 42 s

सारांश

1. ऊष्मा ऊर्जा का एक रूप है जो किसी पिण्ड तथा उसके परिवर्ती माध्यम के बीच उनमें तापांतर के कारण प्रवाहित होती है। किसी पिण्ड की तप्तता की कोटि मात्रात्मक रूप में ताप द्वारा निरूपित होती है।

2. किसी ताप मापन युक्ति (तापमापी) में मापन योग्य किसी ऐसे गुण (जिसे तापमापीय गुण कहते हैं) का उपयोग किया जाता है, जिसमें ताप के साथ परिवर्तन होता है। विभिन्न तापमापी में भिन्न-भिन्न ताप मापक्रम बनते हैं। कोई ताप मापक्रम बनाने के लिए दो नियत बिंदुओं का चयन किया जाता है तथा उन्हें कुछ यादृच्छिक ताप मान दिए जाते हैं। ये दो संख्याएँ मापक्रम के मूल बिंदु तथा उसके मात्रक की आमाप को निश्चित करती हैं।

3. सेल्सियस ताप (t_C) तथा फारेनहाइट ताप (t_F) में यह संबंध होता है : $t_F = (9/5)\ t_C + 32$

4. दाब (P), आयतन (V) तथा परम ताप (T) में संबंध दर्शाने वाली आदर्श गैस समीकरण इस प्रकार व्यक्त की जाती है:

$$PV = \mu RT$$

यहाँ μ मोल की संख्या तथा R सार्वत्रिक गैस नियतांक है।

5. परम ताप मापक्रम में, मापक्रम का शून्य, ताप के परम शून्य को व्यक्त करता है। यह वह ताप है जिस पर प्रत्येक पदार्थ में न्यूनतम संभावित आण्विक सक्रियता होती है। केल्विन परम ताप मापक्रम (T) के मात्रक का आकार सेल्सियस ताप मापक्रम (t_c) के मात्रक के आकार के बराबर होता है परन्तु इनके मूल बिंदुओं में अंतर होता है:

$$t_C = T - 273.15$$

6. रैखिक प्रसार गुणांक (α_l) तथा आयतन प्रसार गुणांक (α_V) को इस प्रकार परिभाषित किया जाता है:

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha_l \Delta T$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \alpha_V \Delta T$$

यहाँ Δl तथा ΔV ताप में ΔT का परिवर्तन होने पर क्रमशः लंबाई l तथा आयतन V में परिवर्तन को निर्दिष्ट करते हैं। इनमें निम्नलिखित संबंध है:

$$\alpha_V = 3\ \alpha_l$$

7. किसी पदार्थ की विशिष्ट ऊष्मा धारिता को इस प्रकार परिभाषित किया जाता है:

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

यहाँ m पदार्थ का द्रव्यमान तथा ΔQ पदार्थ के ताप में ΔT का परिवर्तन करने के लिए आवश्यक ऊर्जा की मात्रा है। किसी पदार्थ की मोलर विशिष्ट ऊष्मा धारिता को इस प्रकार परिभाषित किया जाता है:

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

यहाँ μ पदार्थ के मोल की संख्या है।

8. संगलन की गुप्त ऊष्मा (L_f) ऊष्मा की वह मात्रा है जो किसी पदार्थ के एकांक द्रव्यमान को समान ताप तथा दाब पर ठोस अवस्था से द्रव अवस्था में परिवर्तित करने के लिए आवश्यक होती है। वाष्पन की गुप्त ऊष्मा (L_v) ऊष्मा

की वह मात्रा है जो किसी पदार्थ के एकांक द्रव्यमान को ताप व दाब में बिना कोई परिवर्तन किए द्रव अवस्था से वाष्प अवस्था में परिवर्तित करने के लिए आवश्यक होती है।

9. ऊष्मा-स्थानांतरण की तीन विधियाँ हैं - चालन, संवहन तथा विकिरण।

10. चालन में किसी पिण्ड के आस-पास के भागों के बीच ऊष्मा का स्थानांतरण आण्विक संघट्टनों द्वारा संपन्न होता है परन्तु इसमें द्रव्य का प्रवाह नहीं होता। किसी L लंबाई तथा A अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल की छड़, जिसके दोनों सिरों के तापों को T_C तथा T_D पर स्थापित किया गया है, द्वारा प्रवाहित ऊष्मा की दर

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

यहाँ K छड़ के पदार्थ की ऊष्मा चालकता है।

11. न्यूटन के शीतलन नियम के अनुसार किसी पिण्ड के शीतलन की दर परिवेश के ऊपर वस्तु के ताप-आधिक्य के अनुक्रमानुपाती होती है

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

यहाँ T_1 परिवेशी माध्यम का ताप तथा T_2 पिण्ड का ताप है।

राशि	प्रतीक	विमाएँ	मात्रक	टिप्पणी
पदार्थ की मात्रा	μ	(मोल)	मोल (mol)	
सेल्सियस ताप	t_c	[K]	°C	
केल्विन परम ताप	T	[K]	K	$t_c = T - 273.15$
रैखिक प्रसार गुणांक	α_l	$[K^{-1}]$	K^{-1}	
आयतन प्रसार गुणांक	α_v	$[K^{-1}]$	K^{-1}	$\alpha_v = 3\alpha_l$
किसी निकाय को आपूर्त ऊष्मा	ΔQ	$[ML^2 T^{-2}]$	J	Q अवस्था चर नहीं है
विशिष्ट ऊष्मा धारिता	s	$[L^2 T^{-2} K^{-1}]$	$J\,kg^{-1}\,K^{-1}$	
ऊष्मा चालकता	K	$[MLT^{-3} K^{-1}]$	$J\,s^{-1}\,m^{-1}K^{-1}$	$H = -KA\frac{dT}{dx}$

विचारणीय विषय

1. केल्विन ताप (T) तथा सेल्सियस ताप t_c को जोड़ने वाला संबंध इस प्रकार है:

$$T = t_c + 273.15$$

तथा जल के त्रिक बिंदु के लिए (चयन द्वारा) $T = 273.16$ K का निर्धारण यथार्थ संबंध है। इस चयन के साथ सेल्सियस मापक्रम पर हिम का गलनांक तथा जल का क्वथनांक (दोनों 1 atm दाब पर) क्रमशः 0 °C तथा 100 °C के अत्यधिक निकट हैं परन्तु यथार्थ रूप से इनके बराबर नहीं हैं। मूल सेल्सियस ताप मापक्रम में पिछले नियत बिंदु (चयन द्वारा) तथ्यतः 0 °C तथा 100 °C थे, परन्तु अब नियत बिंदुओं के चयन के लिए जल के त्रिक बिंदु को अच्छा माना जाता है क्योंकि इसका ताप अद्वितीय है।

2. जब कोई द्रव वाष्प के साथ साम्य में होता है तो समस्त निकाय का दाब तथा ताप समान होता है तथा साम्यावस्था में दोनों प्रावस्थाओं के मोलर आयतनों में अंतर (घनत्वों में अंतर) होता है। यह सभी निकायों पर लागू होता है चाहे उसमें कितनी भी प्रावस्थाएँ साम्य में हों।

3. ऊष्मा स्थानांतरण में सदैव दो निकायों अथवा एक ही निकाय के दो भागों के बीच तापांतर सम्मिलित होता है। ऐसा ऊर्जा स्थानांतरण जिसमें किसी भी रूप में तापांतर सम्मिलित नहीं होता, वह ऊष्मा नहीं है।

4. संवहन में किसी तरल के भीतर उसके भागों में असमान ताप होने के कारण द्रव्य का प्रवाह सम्मिलित होता है। किसी टोंटी से गिरते जल के नीचे रखी किसी तप्त छड़ की ऊष्मा का क्षय छड़ के पृष्ठ तथा जल के बीच चालन के कारण होता है जल के भीतर संवहन द्वारा नहीं होता।

अभ्यास

11.1 निऑन तथा CO_2 के त्रिक बिंदु क्रमशः 24.57 K तथा 216.55 K हैं। इन तापों को सेल्सियस तथा फारेनहाइट मापक्रमों में व्यक्त कीजिए।

11.2 दो परम ताप मापक्रमों A तथा B पर जल के त्रिक बिंदु को 200 A तथा 350 B द्वारा परिभाषित किया गया है। T_A तथा T_B में क्या संबंध है?

11.3 किसी तापमापी का ओम में विद्युत प्रतिरोध ताप के साथ निम्नलिखित सन्निकट नियम के अनुसार परिवर्तित होता है

$$R = R_o\,[1 + \alpha\,(T - T_o)]$$

यदि तापमापी का जल के त्रिक बिंदु 273.16 K पर प्रतिरोध 101.6 Ω तथा लैड के सामान्य संगलन बिंदु (600.5 K) पर प्रतिरोध 165.5 Ω है तो वह ताप ज्ञात कीजिए जिस पर तापमापी का प्रतिरोध 123.4 Ω है।

11.4 निम्नलिखित के उत्तर दीजिए:

(a) आधुनिक तापमिति में जल का त्रिक बिंदु एक मानक नियत बिंदु है, क्यों? हिम के गलनांक तथा जल के क्वथनांक को मानक नियत बिंदु मानने में (जैसा कि मूल सेल्सियस मापक्रम में किया गया था।) क्या दोष है?

(b) जैसा कि ऊपर वर्णन किया जा चुका है कि मूल सेल्सियस मापक्रम में दो नियत बिंदु थे जिनको क्रमशः 0 °C तथा 100 °C संख्याएँ निर्धारित की गई थीं। परम ताप मापक्रम पर दो में से एक नियत बिंदु जल का त्रिक बिंदु लिया गया है जिसे केल्विन परम ताप मापक्रम पर संख्या 273.16 K निर्धारित की गई है। इस मापक्रम (केल्विन परम ताप) पर अन्य नियत बिंदु क्या है?

(c) परम ताप (केल्विन मापक्रम) T तथा सेल्सियस मापक्रम पर ताप t_c में संबंध इस प्रकार है:

$$t_c = T - 273.15$$

इस संबंध में हमने 273.15 लिखा है 273.16 क्यों नहीं लिखा?

(d) उस परम ताप मापक्रम पर, जिसके एकांक अंतराल का आमाप फारेनहाइट के एकांक अंतराल की आमाप के बराबर है, जल के त्रिक बिंदु का ताप क्या होगा?

11.5 दो आदर्श गैस तापमापियों A तथा B में क्रमशः ऑक्सीजन तथा हाइड्रोजन प्रयोग की गई है। इनके प्रेक्षण निम्नलिखित है :

ताप	**दाब तापमापी A में**	**दाब तापमापी B में**
जल का त्रिक बिंदु	1.250×10^5 Pa	0.200×10^5 Pa
सल्फर का सामान्य गलनांक	1.797×10^5 Pa	0.287×10^5 Pa

(a) तापमापियों A तथा B के द्वारा लिए गए पाठ्यांकों के अनुसार सल्फर के सामान्य गलनांक के परमताप क्या हैं?

(b) आपके विचार से तापमापियों A तथा B के उत्तरों में थोड़ा अंतर होने का क्या कारण है? (दोनों तापमापियों में कोई दोष नहीं है)। दो पाठ्यांकों के बीच की विसंगति को कम करने के लिए इस प्रयोग में और क्या प्रावधान आवश्यक हैं?

11.6 किसी 1m लंबे स्टील के फीते का यथार्थ अंशांकन 27.0 °C पर किया गया है। किसी तप्त दिन जब ताप 45°C था तब इस फीते से किसी स्टील की छड़ की लंबाई 63.0 cm मापी गई। उस दिन स्टील की छड़ की वास्तविक लंबाई क्या थी? जिस दिन ताप 27.0 °C होगा उस दिन इसी छड़ की लंबाई क्या होगी? स्टील का रेखीय प्रसार गुणांक = 1.20×10^{-5} K^{-1} ।

11.7 किसी बड़े स्टील के पहिए को उसी पदार्थ की किसी धुरी पर ठीक बैठाना है। 27°C पर धुरी का बाहरी व्यास 8.70 cm तथा पहिए के केंद्रीय छिद्र का व्यास 8.69 cm है। सूखी बर्फ द्वारा धुरी को ठंडा किया गया है। धुरी के किस ताप पर पहिया धुरी पर चढ़ेगा? यह मानिए कि आवश्यक ताप परिसर में स्टील का रैखिक प्रसार गुणांक नियत रहता है: $\alpha_{\text{स्टील}} = 1.20 \times 10^{-5} K^{-1}$।

11.8 ताँबे की चादर में एक छिद्र किया गया है। 27.0 °C पर छिद्र का व्यास 4.24 cm है। इस धातु की चादर को 227 °C तक तप्त करने पर छिद्र के व्यास में क्या परिवर्तन होगा? ताँबे का रेखीय प्रसार गुणांक = 1.70×10^{-5} K^{-1}।

11.9 27°C पर 1.8 cm लंबे किसी ताँबे के तार को दो दृढ़ टेकों के बीच अल्प तनाव रखकर थोड़ा कसा गया है। यदि तार को –39 °C ताप तक शीतित करें तो तार में कितना तनाव उत्पन्न हो जाएगा? तार का व्यास 2.0 mm है। पीतल का रेखीय प्रसार गुणांक = 2.0×10^{-5} K^{-1}, पीतल का यंग प्रत्यास्थता गुणांक = 0.91×10^{11} Pa।

11.10 50 cm लंबी तथा 3.0 mm व्यास की किसी पीतल की छड़ को उसी लंबाई तथा व्यास की किसी स्टील की छड़ से जोड़ा गया है। यदि ये मूल लंबाइयाँ 40°C पर हैं, तो 250 °C पर संयुक्त छड़ की लंबाई में क्या परिवर्तन होगा? क्या संधि पर कोई तापीय प्रतिबल उत्पन्न होगा? छड़ के सिरों को प्रसार के लिए मुक्त रखा गया है। (ताँबे तथा स्टील के रेखीय प्रसार गुणांक क्रमशः = 2.0×10^{-5} K^{-1}, स्टील = 1.2×10^{-5} K^{-1} हैं।)

11.11 ग्लिसरीन का आयतन प्रसार गुणांक 49×10^{-5} K^{-1} है। ताप में 30 °C की वृद्धि होने पर इसके घनत्व में क्या आंशिक परिवर्तन होगा?

11.12 8.0 kg द्रव्यमान के किसी ऐलुमिनियम के छोटे ब्लॉक में छिद्र करने के लिए किसी 10 kW की बरमी का उपयोग किया गया है। 2.5 मिनट में ब्लॉक के ताप में कितनी वृद्धि हो जाएगी। यह मानिए कि 50% शक्ति

तो स्वयं बरमी को गर्म करने में खर्च हो जाती है अथवा परिवेश में लुप्त हो जाती है। ऐलुमिनियम की विशिष्ट ऊष्मा धारिता = $0.91 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ है।

11.13 2.5 kg द्रव्यमान के ताँबे के गुटके को किसी भट्ठी में 500 °C तक तप्त करने के पश्चात् किसी बड़े हिम-ब्लॉक पर रख दिया जाता है। गलित हो सकने वाली हिम की अधिकतम मात्रा क्या है? ताँबे की विशिष्ट ऊष्मा धारिता = $0.39 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$; बर्फ की संगलन ऊष्मा = 335 J g^{-1} ।

11.14 किसी धातु की विशिष्ट ऊष्मा धारिता के प्रयोग में 0.20 kg के धातु के गुटके को 150 °C पर तप्त करके, किसी ताँबे के ऊष्मामापी (जल तुल्यांक = 0.025 kg), जिसमें 27 °C का 150 cm^3 जल भरा है, में गिराया जाता है। अंतिम ताप 40 °C है। धातु की विशिष्ट ऊष्मा धारिता परिकलित कीजिए। यदि परिवेश में क्षय ऊष्मा उपेक्षणीय न मानकर परिकलन किया जाता है, तब क्या आपका उत्तर धातु की विशिष्ट ऊष्मा धारिता के वास्तविक मान से अधिक मान दर्शाएगा अथवा कम?

11.15 कुछ सामान्य गैसों के कक्ष ताप पर मोलर विशिष्ट ऊष्मा धारिताओं के प्रेक्षण नीचे दिए गए हैं:

गैस	**मोलर विशिष्ट ऊष्मा धारिता (C_v)** ($\text{cal mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
हाइड्रोजन	4.87
नाइट्रोजन	4.97
ऑक्सीजन	5.02
नाइट्रिक ऑक्साइड	4.99
कार्बन मोनोक्साइड	5.01
क्लोरीन	6.17

इन गैसों की मापी गई मोलर विशिष्ट ऊष्मा धारिताएँ एक परमाणुक गैसों की मोलर विशिष्ट ऊष्मा धारिताओं से सुस्पष्ट रूप से भिन्न हैं। प्रतीकात्मक रूप में किसी एक परमाणुक गैस की मोलर विशिष्ट ऊष्मा धारिता 2.92 cal/mol K होती है। इस अंतर का स्पष्टीकरण कीजिए। क्लोरीन के लिए कुछ अधिक मान (शेष की अपेक्षा) होने से आप क्या निष्कर्ष निकालते हैं?

11.16 CO_2 के *P-T* प्रावस्था आरेख पर आधारित निम्नलिखित प्रश्नों के उत्तर दीजिए :

(a) किस ताप व दाब पर CO_2 की ठोस, द्रव तथा वाष्प प्रावस्थाएँ साम्य में सहवर्ती हो सकती हैं?

(b) CO_2 के गलनांक तथा क्वथनांक पर दाब में कमी का क्या प्रभाव पड़ता है?

(c) CO_2 के लिए क्रांतिक ताप तथा दाब क्या हैं? इनका क्या महत्त्व है?

(d) (a) –70 °C ताप व 1 atm दाब, (b) –60 °C ताप व 10 atm दाब, (c) 15 °C ताप व 56 atm दाब पर CO_2 ठोस, द्रव अथवा गैस में से किस अवस्था में होती है?

11.17 CO_2 के $P-T$ प्रावस्था आरेख पर आधारित निम्नलिखित प्रश्नों के उत्तर दीजिए :

(a) 1 atm दाब तथा –60 °C ताप पर CO_2 का समतापी संपीडन किया जाता है? क्या यह द्रव प्रावस्था में जाएगी?

(b) क्या होता है जब 4 atm दाब पर CO_2 का दाब नियत रखकर कक्ष ताप पर शीतन किया जाता है?

(c) 10 atm दाब तथा –65 °C ताप पर किसी दिए गए द्रव्यमान की ठोस CO_2 को दाब नियत रखकर कक्ष ताप तक तप्त करते समय होने वाले गुणात्मक परिवर्तनों का वर्णन कीजिए।

(d) CO_2 को 70 °C तक तप्त तथा समतापी संपीडित किया जाता है। आप प्रेक्षण के लिए इसके किन गुणों में अंतर की अपेक्षा करते हैं?

11.18 $101 °F$ ताप ज्वर से पीड़ित किसी बच्चे को एन्टीपायरिन (ज्वर कम करने की दवा) दी गई जिसके कारण उसके शरीर से पसीने के वाष्पन की दर में वृद्धि हो गई। यदि 20 मिनट में ज्वर $98 °F$ तक गिर जाता है तो दवा द्वारा होने वाले अतिरिक्त वाष्पन की औसत दर क्या है? यह मानिए कि ऊष्मा ह्रास का एकमात्र उपाय वाष्पन ही है। बच्चे का द्रव्यमान 30 kg है। मानव शरीर की विशिष्ट ऊष्मा धारिता जल की विशिष्ट ऊष्मा धारिता के लगभग बराबर है तथा उस ताप पर जल के वाष्पन की गुप्त ऊष्मा 580 cal g^{-1} है।

11.19 थर्मोकोल का बना 'हिम बॉक्स' विशेषकर गर्मियों में कम मात्रा के पके भोजन के भंडारण का सस्ता तथा दक्ष साधन है। 30 cm भुजा के किसी हिम बॉक्स की मोटाई 5.0 cm है। यदि इस बॉक्स में 4.0 kg हिम रखा है तो 6 h के पश्चात् बचे हिम की मात्रा का आकलन कीजिए। बाहरी ताप $45 °C$ है तथा थर्मोकोल की ऊष्मा चालकता $0.01 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ है। (हिम की संगलन ऊष्मा = $335 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}$)

11.20 किसी पीतल के बॉयलर की पेंदी का क्षेत्रफल 0.15 m^2 तथा मोटाई 1.0 cm है। किसी गैस स्टोव पर रखने पर इसमें 6.0 kg/min की दर से जल उबलता है। बॉयलर के संपर्क की ज्वाला के भाग का ताप आकलित कीजिए। पीतल की ऊष्मा चालकता = $109 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$; जल की वाष्पन ऊष्मा = $2256 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}$ है।

11.21 स्पष्ट कीजिए कि क्यों –

(a) अधिक परावर्तकता वाले पिण्ड अल्प उत्सर्जक होते हैं।

(b) कंपकंपी वाले दिन लकड़ी की ट्रे की अपेक्षा पीतल का गिलास कहीं अधिक शीतल प्रतीत होता है।

(c) कोई प्रकाशिक उत्तापमापी (उच्च तापों को मापने की युक्ति), जिसका अंशांकन किसी आदर्श कृष्णिका के विकिरणों के लिए किया गया है, खुले में रखे किसी लाल तप्त लोहे के टुकड़े का ताप काफी कम मापता है, परन्तु जब उसी लोहे के टुकड़े को भट्ठी में रखते हैं, तो वह ताप का सही मान मापता है।

(d) बिना वातावरण के पृथ्वी अशरणीय शीतल हो जाएगी।

(e) भाप के परिचालन पर आधारित तापन निकाय तप्त जल के परिचालन पर आधारित निकायों की अपेक्षा भवनों को उष्ण बनाने में अधिक दक्ष होते हैं।

11.22 किसी पिण्ड का ताप 5 मिनट में $80 °C$ से $50 °C$ हो जाता है। यदि परिवेश का ताप $20 °C$ है, तो उस समय का परिकलन कीजिए जिसमें उसका ताप $60 °C$ से $30 °C$ हो जाएगा।

अध्याय 12

ऊष्मागतिकी

12.1 भूमिका
12.2 तापीय साम्य
12.3 ऊष्मागतिकी का शून्य कोटि नियम
12.4 ऊष्मा, आंतरिक ऊर्जा तथा कार्य
12.5 ऊष्मागतिकी का प्रथम नियम
12.6 विशिष्ट ऊष्मा धारिता
12.7 ऊष्मागतिकीय अवस्था चर तथा अवस्था का समीकरण
12.8 ऊष्मागतिकीय प्रक्रम
12.9 ऊष्मा इंजन
12.10 प्रशीतक/ऊष्मा पंप
12.11 ऊष्मागतिकी का द्वितीय नियम
12.12 उत्क्रमणीय व अनुत्क्रमणीय प्रक्रम
12.13 कार्नो इंजन

सारांश
विचारणीय विषय
अभ्यास

12.1 भूमिका

पिछले अध्याय में हमने द्रव्यों के तापीय गुणों का अध्ययन किया। इस अध्याय में हम उन नियमों का अध्ययन करेंगे जो ऊष्मीय ऊर्जा को निर्धारित करते हैं। हम उन प्रक्रियाओं का अध्ययन करेंगे जिनमें कार्य ऊष्मा में परिवर्तित होता है, तथा विलोमतः ऊष्मा भी कार्य में परिवर्तित होती है । शीत ऋतु में जब हम हथेलियों को परस्पर रगड़ते हैं तो हमें गरमी की अनुभूति होती है क्योंकि इस प्रक्रिया में किया गया कार्य ऊष्मा उत्पन्न करता है । इसके विपरीत, भाप इंजन में वाष्प की ऊष्मा का उपयोग लाभप्रद कार्य को संपन्न करने में अर्थात् पिस्टन को गति देने में होता है जिसके परिणामस्वरूप रेलगाड़ी के पहिए घूमते हैं।

भौतिकी में ऊष्मा, ताप, कार्य आदि की अवधारणाओं को अधिक सावधानीपूर्वक परिभाषित करने की आवश्यकता पड़ती है । ऐतिहासिक रूप से ऊष्मा की सटीक अवधारणा तक पहुँचने के लिए पर्याप्त समय लगा । आधुनिक अवधारणा के पूर्व ऊष्मा को ऐसे सूक्ष्म अदृश्य तरल के रूप में समझा गया जो किसी पदार्थ के रंध्रों में भरा रहता है । गरम व ठंडे पिंडों के पारस्परिक संपर्क में आने पर यह तरल (जिसे कैलॉरिक कहते थे) ठंडे पिंड से अपेक्षाकृत गरम पिंड में बहने लगता है ! यह बिलकुल वैसा ही है जैसा उस समय होता है जब भिन्न-भिन्न ऊँचाइयों तक पानी से भरी दो टंकियों को एक क्षैतिज नल से जोड़ दिया जाता है । जल का बहाव उस समय तक निरंतर बना रहता है जब तक दोनों टंकियों में जल के तल समान न हो जाएँ। इसी के समान ऊष्मा की 'कैलॉरिक' धारणा में ऊष्मा उस समय तक प्रवाहित होती रहती है जब तक कि 'कैलॉरिक तल' (अर्थात् ताप) समान नहीं हो जाते ।

इसी बीच, ऊष्मा को ऊर्जा के रूप में कल्पित करने की आधुनिक अवधारणा के कारण इसके (ऊष्मा के) तरल स्वरूप को नकार दिया गया । इस संबंध में 1798 में बेंजामिन थॉमसन (जिन्हें काउन्ट रम्फोर्ड भी कहते हैं) ने एक महत्वपूर्ण प्रयोग भी किया । इन्होंने पाया कि पीतल की तोप में छेद करते समय इतनी अधिक ऊष्मा उत्पन्न होती है कि उससे पानी उबल सकता है । इससे अधिक महत्वपूर्ण तथ्य यह प्राप्त हुआ कि प्रयोग में उत्पन्न ऊष्मा का परिमाण उस कार्य पर निर्भर करता था जो घोड़े ड्रिल को घुमाने में करते थे न कि ड्रिल के पैनेपन पर । कैलॉरिक स्वरूप के अनुसार अधिक पैनी ड्रिल को रंध्रों से अधिक ऊष्मा तरल बाहर निकालना चाहिए, किंतु प्रयोग में यह सही नहीं पाया गया । प्रेक्षणों की सबसे अधिक स्वाभाविक व्याख्या यह थी कि ऊष्मा ऊर्जा का ही एक रूप है तथा प्रयोग से भी यह प्रमाणित हो गया कि ऊर्जा एक रूप से दूसरे रूप में अर्थात् कार्य से ऊष्मा में रूपांतारित हो जाती है ।

ऊष्मागतिकी भौतिकी की वह शाखा है जो ऊष्मा तथा ताप की अवधारणा एवं ऊष्मा के अन्य प्रकार की ऊर्जाओं में अंतरा-रूपान्तरण का विवेचन करती है । ऊष्मागतिकी एक स्थूल विज्ञान है, क्योंकि यह किसी निकाय की स्थूल प्रकृति पर विचार करती है न कि द्रव्य की आण्विक संरचना पर । वास्तव में, इससे संबंधित अवधारणाओं तथा नियमों का प्रतिपादन 19वीं शताब्दी में उस समय हुआ था जब द्रव्य के आण्विक स्वरूप को दृढ़तापूर्वक प्रमाणित नहीं किया गया था । ऊष्मागतिकी के वर्णन में निकाय के अपेक्षाकृत कुछ ही स्थूल चर समाहित होते हैं जो सामान्य अनुभव पर आधारित हैं तथा जिन्हें प्रत्यक्ष रूप में मापा जा सकता है । उदाहरणार्थ, किसी गैस के सूक्ष्म वर्णन में उसकी रचना करने वाले अगणित अणुओं के निर्देशांकों एवं वेगों का निर्धारण आवश्यक होता है । हालांकि गैसों के अणुगति सिद्धांत का विवरण बहुत विस्तृत नहीं है फिर भी इसमें अणुओं के वेगों का विवरण समाहित है । इसके विपरीत किसी गैस के ऊष्मागतिकीय विवरण में आण्विक वर्णन पूर्ण रूप से नकार दिया जाता है । ऊष्मागतिकी में किसी गैस की अवस्था दाब, आयतन, ताप, द्रव्यमान तथा संगठन जैसे ऐसे स्थूल चरों द्वारा निर्धारित होती है जिन्हें हम अपनी इंद्रियों से अनुभव करते हैं और माप सकते हैं*।

यांत्रिकी एवं ऊष्मागतिकी के बीच भेद आपके मस्तिष्क में भलीभांति आ जाना चाहिए । यांत्रिकी में हमारी रुचि बलों तथा बल आघूर्णों के प्रभाव में गति कर रहे कणों एवं पिण्डों में होती है । ऊष्मागतिकी में संपूर्ण निकाय की गति पर विचार नहीं किया जाता । इसकी रुचि पिण्ड की आंतिरक स्थूल अवस्था में होती है । जब बंदूक से गोली दागते हैं तब जो परिवर्तन होता है वह गोली की यांत्रिक अवस्था (विशेषकर गतिज ऊर्जा) में परिवर्तन होता है, उसके ताप में नहीं । जब गोली लकड़ी में धँसकर रुक जाती है तो गोली की गतिज ऊर्जा ऊष्मा में रूपांतरित हो जाती है जिससे गोली तथा उसके चारों ओर की लकड़ी की सतहों का ताप परिवर्तित हो जाता है । ताप गोली की आंतरिक गति (जो अव्यवस्थित है) की ऊर्जा से संबंधित होता है न कि गोली की संपूर्ण गति से ।

12.2 तापीय साम्य

यांत्रिकी में साम्यावस्था से तात्पर्य है कि निकाय पर नेट बाह्य बल व बल आघूर्ण शून्य हैं । ऊष्मागतिकी में साम्यावस्था का अर्थ भिन्न संदर्भ में दृष्टिगोचर होता है : निकाय की अवस्था को हम उस समय साम्यावस्था में कहते हैं जब निकाय को अभिलक्षणित करने वाले स्थूल चर समय के साथ परिवर्तित नहीं होते । उदाहरणार्थ, किसी पर्यावरण से पूर्णत: ऊष्मारोधी बंद दृढ़ पात्र में भरी कोई गैस ऊष्मागतिक रूप से तब साम्यावस्था में होगी जब उसके दाब, आयतन, ताप, द्रव्यमान के परिमाण तथा संगठन समय के साथ परिवर्तित न हों ।

कोई निकाय साम्यावस्था में है कि नहीं व्यापक रूप में यह चारों ओर के परिवेश तथा उस दीवार की प्रकृति पर निर्भर करता है जो निकाय को परिवेश से पृथक् करती है । कल्पना कीजिए कि दो गैसें A व B दो भिन्न-भिन्न पात्रों में भरी हैं । प्रयोग द्वारा हमें पता है कि किसी गैस के दिए हुए द्रव्यमान के दाब व ताप को उसके दो स्वतंत्र चरों के रूप में चुना जा सकता है । मान लीजिए कि गैसों के दाब व आयतन क्रमश: (P_A, V_A) तथा (P_B, V_B) हैं । कल्पना कीजिए कि पहले दोनों निकाय पास-पास हैं परंतु उन्हें किसी रुद्धोष्म दीवार (एक **ऊष्मारोधी दीवार**) द्वारा एक दूसरे से पृथक् रखा गया है । इस दीवार के कारण ऊर्जा (ऊष्मा) एक पात्र से दूसरे पात्र में नहीं जा पाती है । निकायों को भी शेष परिवेश से इसी प्रकार की रुद्धोष्म दीवार से पृथक् रखते हैं । इस व्यवस्था का आरेखीय चित्रण [12.1(a)] में दिया गया है । यहाँ यह पाया गया है कि (P_A, V_A) के किसी भी संभावित युग्म का मान (P_B, V_B) के किसी भी संभव युग्म के मान के साथ साम्यावस्था में होगा । पुन: कल्पना कीजिए कि **रुद्धोष्म दीवार** को एक **ऊष्मा-पार्थ-दीवार** से प्रतिस्थापित कर दिया गया है - यह दीवार (ऊष्मा) ऊर्जा को एक निकाय से दूसरे निकाय में जाने देती है । ऐसा करने में यह देखा गया है कि निकायों A व B के स्थूल चर स्वत: उस समय तक परिवर्तित होते हैं जब तक कि दोनों निकाय साम्यावस्था की स्थिति प्राप्त नहीं कर लेते । इसके पश्चात् उनकी अवस्था में कोई परिवर्तन नहीं होता है । इस स्थिति को चित्र [12.1(b)] में दर्शाया गया है । मान लीजिए कि दोनों गैसों के दाब व आयतन संबंधी चर परिवर्तित होकर क्रमश: (P'_A, V'_A) तथा (P'_B, V'_B) हो जाते हैं ताकि A व B की नयी अवस्थाएँ पुन: एक-दूसरे की साम्यावस्था में हो जाती हैं** । एक निकाय से दूसरे निकाय में अब और ऊर्जा का प्रवाह नहीं होता । ऐसी स्थिति में हम कहते हैं कि निकाय A, निकाय B के साथ तापीय साम्य में है ।

दो निकायों के मध्य की साम्यावस्था की स्थिति को क्या अभिलक्षित करती है ? आप अपने अनुभव से उत्तर का अनुमान लगा सकते हैं । तापीय साम्य में, दो निकायों के ताप समान होते हैं । हम जानेंगे कि ऊष्मागतिकी में ताप की अवधारणा तक कैसे पहुँचते हैं ? ऊष्मागतिकी का शून्य कोटि का नियम इसकी ओर संकेत करता है ।

* ऊष्मागतिकी में अन्य ऐसे चर भी निहित होते हैं जो हमारी इंद्रियों को इतने सुस्पष्ट नहीं होते (उदाहरणार्थ, एंट्रॉपी, एंथाल्पी (संपूर्ण ऊष्मा), आदि जिनके विषय में आप उच्च कक्षाओं में पढ़ेंगे), किंतु ये सभी स्थूल चर हैं ।

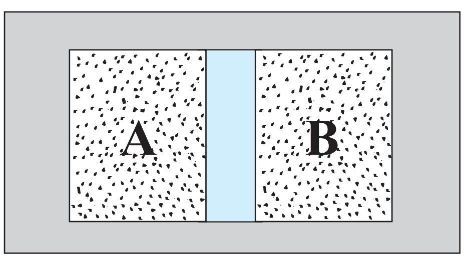
** यह आवश्यक नहीं है कि दोनों चर बदलें । ऐसा प्रतिबंधों पर निर्भर करता है । उदाहरण के लिए, यदि गैस स्थिर आयतन वाले पात्र में भरी हो तो तापीय साम्य के लिए केवल गैसों के दाब को परिवर्तित होना चाहिए ।

12.3 ऊष्मागतिकी का शून्य कोटि नियम

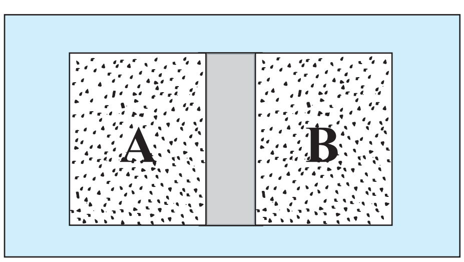
कल्पना कीजिए कि दो निकाय A व B एक रुद्धोष्म दीवार से पृथक् हैं । इनमें से प्रत्येक एक तीसरे निकाय C से एक सुचालक दीवार द्वारा संपर्क में हैं [चित्र 12.2(a)] । निकायों की अवस्थाएँ (अर्थात् उनके स्थूल चर) तब तक परिवर्तित होंगी जब तक A व B दोनों निकाय C के साथ तापीय साम्य में नहीं आ जाते हैं । जब ऐसा हो जाए तो कल्पना कीजिए कि A व B के मध्य की रुद्धोष्म दीवार एक सुचालक दीवार से प्रतिस्थापित कर दी जाती है तथा C को A व B से किसी रुद्धोष्म दीवार से पृथक् कर दिया जाता है [चित्र 12.2(b)] । ऐसा देखा जाता है कि A व B की अवस्थाएँ अब और नहीं बदलतीं अर्थात् वे **दोनों अब तापीय साम्य में होती हैं** । यह प्रेक्षण ऊष्मागतिकी के शून्य कोटि नियम का आधार बना । यह नियम बतलाता है कि ***यदि दो निकाय किसी तीसरे निकाय के साथ पृथक्-पृथक् रूप से तापीय साम्य में हैं तो वे परस्पर भी तापीय साम्य में होते हैं ।*** यहाँ यह बात ध्यान में रखनी चाहिए कि ऊष्मागतिकी के प्रथम व द्वितीय नियम की अभिव्यक्ति तथा उनके क्रमांकन के बहुत समय बाद 1931 में आर.एच. फाउलर ने शून्य कोटि नियम का प्रतिपादन किया था।

शून्य कोटि नियम से यह संकेत मिलता है कि जब दो निकाय A व B परस्पर तापीय साम्य में होते हैं, तो ऐसी कोई भौतिक राशि है जो दोनों निकायों के लिए समान मान रखती है । यह ऊष्मागतिक चर, जिसका मान तापीय साम्य वाले निकायों के लिए समान होता है, ताप (T) कहलाता है । अतः यदि A व B साम्यावस्था में तीसरे निकाय C से पृथक् हैं तो $T_A = T_C$ तथा $T_B = T_C$ । इसका तात्पर्य यह है कि $T_A = T_B$ अर्थात् निकाय A व B स्वयं भी तापीय साम्य में हैं ।

शून्य कोटि नियम के माध्यम से हमने विधिवत ताप की अवधारणा विकसित की है । हमारे सामने पुनः एक प्रश्न उत्पन्न होता है : भिन्न-भिन्न पिंडों के ताप के लिए हम अंकिक मानों का निर्धारण कैसे करें? दूसरे शब्दों में, हम ताप मापक्रम कैसे बनाएँ? तापमिति इस मौलिक प्रश्न से संबंध रखती है जिसके विषय में हम अगले अनुभाग में अध्ययन करेंगे ।

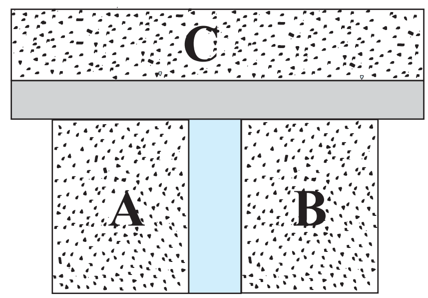


(a)

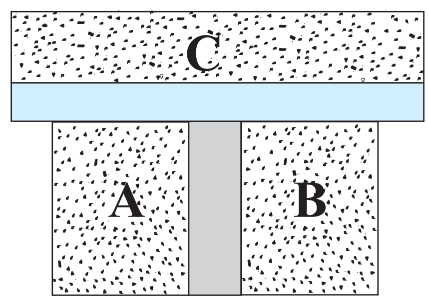


(b)

चित्र 12.1 (a) (दो गैसों के) निकाय A व B एक रुद्धोष्म दीवार से पृथक् हैं : इस दीवार से ऊष्मा आर-पार नहीं जा पाती । (b) यही निकाय A व B एक ऊष्मा-पार्थ दीवार से पृथक् दर्शाए गए हैं । यह एक चालक दीवार होती है जिससे ऊष्मा एक निकाय से दूसरे में चली जाती है । इस उदाहरण में तापीय साम्य यथोचित समय में प्राप्त हो जाता है ।



(a)



(b)

चित्र 12.2 (a) निकाय A व B जो एक रुद्धोष्म दीवार से पृथक् हैं जबकि इनमें से प्रत्येक एक तीसरे निकाय C से एक सुचालक दीवार द्वारा संपर्क में है । (b) A व B के मध्य की रुद्धोष्म दीवार को किसी सुचालक दीवार से प्रतिस्थापित किया गया है जबकि C को A व B से रुद्धोष्म दीवार से पृथक् दर्शाया गया है ।

12.4 ऊष्मा, आंतरिक ऊर्जा तथा कार्य

ऊष्मागतिकी के शून्य कोटि नियम से ताप की अवधारणा की उत्पत्ति हुई जो हमारे सामान्य ज्ञान के अनुकूल है । ताप किसी पिण्ड की उष्णता का द्योतक है । जब दो पिण्ड ऊष्मीय संपर्क