HANDOUT–4 ऊष्मा संचरण **(HEAT TRANSFER)**

1. परिचय (INTRODUCTION)

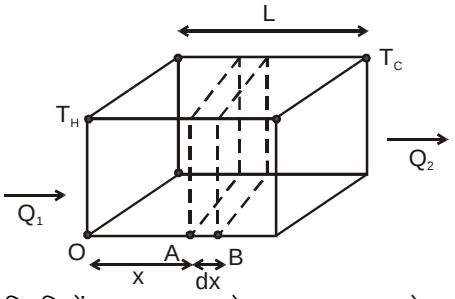
ऊष्मा ऐसी ऊर्जा है जो तापान्तर के कारण प्रवाहित होती है। उच्च ताप से निम्न ताप की वस्तु की ओर यह ऊष्मा संचरण तीन प्रकार से होता है।

(i) चालन (ii) संवहन (iii) विकिरण

2. चालन (CONDUCTION)

ऊष्मा ऊर्जा के संचरण की वह प्रक्रिया जिसमें ऊष्मा माध्यम के एक कण से दूसरे की ओर संचरित होती है, परन्तु माध्यम का प्रत्येक कण अपनी स्थिति पर रूका रहता है, चालन कहलाती है। उदाहरण स्वरूप यदि आप लोहे की एक छड़ को पकड़ कर उसके एक सिरे को कुछ समय के लिए आग पर रखें तो इसका हत्था गर्म हो जाता है। ऊष्मा, लोहे की छड़ के अनुदिश चालन द्वारा संचरित होती है। लोहे की छड़ के परमाणु व इलेक्ट्रॉनों का कम्पन आयाम गर्म सिरे पर वातावरण के उच्चताप के कारण अधिकतम मान प्राप्त कर लेता है। ये बढ़े हुए कम्पन आयाम, पड़ौसी परमाणुओं के मध्य परमाणु से परमाणु की टक्कर के दौरान छड़ के अनुदिश संचरित होते हैं। इस प्रकार बढ़ा हुआ ताप का क्षेत्र छड़ की लम्बाई के अनुदिश आपके हाथ तक फैलता है।

फलकीय क्षेत्रफल A व मोटाई L की एक पट्टिका पर विचार कीजिये जिसके फलकों का ताप T_H व T_C ($T_H > T_C$) है।



अब पट्टिका में अन्तराल dx पर स्थितियों A व B पर दो अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफलों पर विचार कीजिये। फलक A का ताप T व फलक B का ताप $T + \Delta T$ मानिये। प्रयोगों द्वारा प्रदर्शित होता है कि x दूरी पर t समय में पट्टिका के A क्षेत्रफल से गुजर रही ऊष्मा की मात्रा Q निम्न के द्वारा दी जाती है।

$$\boxed{\frac{Q}{t} = -KA\frac{dT}{dx}} \qquad .....(2.1)$$

यहां K एक नियतांक है जो पट्टिका के पदार्थ पर निर्भर है इसको पदार्थ की ऊष्मा चालकता कहते हैं एवं राशि $\left(\frac{dT}{dx}\right)$ को ताप प्रवणता कहते हैं। समीकरण (2.1) में (–) चिन्ह प्रदर्शित करता है कि ऊष्मा उच्चताप से निम्न ताप की ओर प्रवाहित होती है। ΔT –ve राशि है

3. स्थायी अवस्था (STEADY STATE)

यदि उपरोक्त प्लेट में किसी स्थिति x पर अनुप्रस्थ काट का तापमान समय के साथ नियत रहता है। (याद रखें यह स्थिति x के साथ परिवर्तित होती है) प्लेट स्थायी अवस्था में है। याद रखें स्थायी अवस्था, तापीय साम्यावस्था से अलग है, जिसके लिए किसी स्थिति x पर प्लेट में ताप समान रहना चाहिये। स्थायी अवस्था में किसी चालक के लिए किसी अनुप्रस्थ काट पर ऊष्मा का अवशोषण या उत्सर्जन नहीं होना चाहिए (क्योंकि प्रत्येक बिन्दु पर तापमान समय के साथ नियत रहता है)। बाँया व दाँया फलक नियत ताप क्रमशः T_H व T_C पर रखे जाते है, एवं अन्य सभी फलकों की दीवारें रूद्धोष्म हैं ताकि उनसे कोई ऊष्मा बाहर नहीं निकलती एवं दिये गये समायान्तराल में प्रत्येक अनुप्रस्थ काट से समान ऊष्मा की मात्रा प्रवाहित होती है। इस प्रकार $Q_1 = Q = Q_2$ हो तो, परिणामस्वरूप पूरी प्लेट में ताप प्रवणता समान है।

अतः, $\frac{dT}{dx} = \frac{\Delta T}{L} = \frac{T_f - T_i}{L} = \frac{T_C - T_H}{L}$ व $\frac{Q}{t} = -KA\ \frac{\Delta T}{L}$

$\Rightarrow \quad \frac{Q}{t} = KA\left(\frac{T_H - T_C}{L}\right)$ .... (3.1)

यहाँ Q, समयान्तराल t में किसी स्थिति पर प्लेट के अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल से प्रवाहित ऊष्मा की मात्रा है।

Solved Examples

Example 1 2 मीटर भुजा के एक ऐल्यूमिनियम के घन के एक फलक का ताप 100°C एवं दूसरे सिरे का 0°C रखा जाता है एवं सभी सतह रूद्धोष्म दीवारों से घिरी हुई है। घन के द्वारा 5 से. में प्रवाहित ऊष्मा की मात्रा ज्ञात कीजिये। (ऐल्यूमिनियम की ऊष्मा चालकता 209 W/m–°C है।

Solution : ऊष्मा 100ºC वाले सिरे से 0ºC वाले सिरे की ओर प्रवाहित होगी। ऊष्मा प्रवाह की दिशा के लम्बवत् अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल–

$A = 4m^2$

तो $\frac{Q}{t} = KA\frac{(T_H - T_C)}{L}$

$Q = \frac{(209W/m^oC)(4m^2)(100^oC - 0^oC)(5sec)}{2\ \ m} = 209$ KJ **Ans.**

4. चालन में ताप प्रतिरोध (THERMAL RESISTANCE TO CONDUCTION)

यदि आप अपने घर को ठंडे मौसम से अवरोधित करने के इच्छुक हैं या अपने टिफिन बॉक्स में खाना गर्म रखने के, तो आप की रूचि अच्छे चालकों की बजाय खराब ऊष्मा चालकों में अधिक हैं। इस कारण से ताप प्रतिरोध R का परिचय करवाया गया है।

अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल A, मोटाई L व ऊष्मा चालकता K की एक प्लेट के लिए

$R = \frac{L}{KA}$ ..... (4.1)

स्थायी अवस्था में प्लेट द्वारा प्रवाहित ऊष्मा की मात्रा R के पदों में (t समय में)

$\frac{Q}{t} = \frac{(T_H - T_C)}{R}$

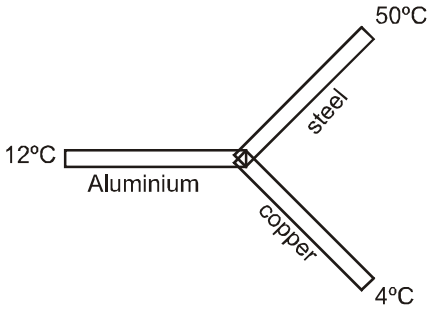
यदि हम $\frac{Q}{t}$ को तापीय धारा i_T का नाम दें

तो, $i_T = \frac{T_H - T_C}{R}$ .....(4.2)

यह गणितीय रूप में ओम के नियम के तुल्य है। तापमान, विद्युत विभव की भूमिका अदा कर रहा है। अतः ओम के नियम से व्युत्पन्न परिणाम ऊष्मीय चालन के लिए भी सत्य है। स्थायी अवस्था में एक प्लेट के लिए हम देख चुके है कि तापीय धारा i_T प्रत्येक अनुप्रस्थ काट पर समान रहती है। यह विद्युतिकी में किरचोफ के धारा के नियम के समरूप है जो अब ऊष्मीय चालन में आसानी से उपयोग किया जा सकता है।

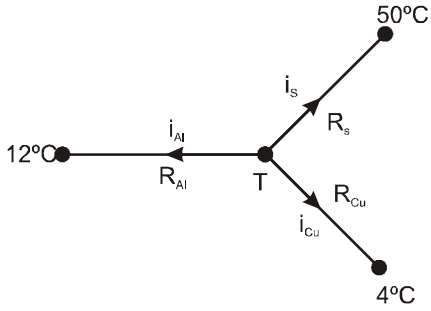
Solved Examples

Example.2 तीन एक समान छड़ों की लम्बाई प्रत्येक 1 मी., प्रत्येक का अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल 1 सेमी^{2} है एवं ये ऐल्यूमिनियम तांबे व इस्पात की बनी हैं, जिनके मुक्त सिरों के ताप क्रमशः 12ºC, 4ºC व 50ºC है, पर रखे जाते है। उनकी उभयनिष्ठ संधि का ताप ज्ञात कीजिये [K_{Cu} = 400 W/m-K, K_{Al} = 200 W/m-K, K_{steel} = 50 W/m-K]



Solution : $R_{Al} = \frac{L}{KA} = \frac{1}{10^{-4} \times 200} = \frac{10^4}{200}$

इसी प्रकार $R_{steel} = \frac{10^4}{50}$ तथा $R_{Cu} = \frac{10^4}{400}$



माना कि उभयनिष्ठ संधि का ताप = T

तो किरचोफ के धारा के नियम से,

$i_{Al} + i_{steel} + i_{Cu} = 0$

$\Rightarrow \frac{T-12}{R_{Al}} + \frac{T-50}{R_{steel}} + \frac{T-4}{R_{Cu}} = 0$

$\Rightarrow$ (T – 12) 200 + (T – 50) 50 + (T – 4) 400

$\Rightarrow$ 4(T – 12) + (T – 50) + 8 (T – 4) = 0

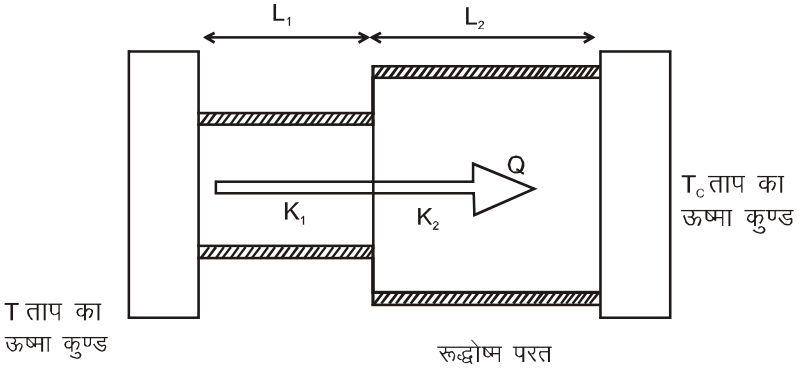
$\Rightarrow$ 13T = 48 + 50 + 32 = 130

$\Rightarrow$ T = 10ºC **Ans.**

5. समान्तर व श्रेणीक्रम में प्लेटें (SLABS IN PARALLEL AND SERIES)

5.1 श्रेणी क्रम में प्लेटें (स्थायी अवस्था में)

दो पदार्थों जिनकी मोटाई L_1 व L_2 अलग–अलग अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल A_1 व A_2 तथा भिन्न ऊष्मा चालकता K_1 व K_2 हैं से बनी एक संयुक्त प्लेट पर लीजिये। बाह्य सतहों के ताप T_H व T_C रखे जाते है, एवं सभी पार्श्व सतहों पर रूद्धोष्म परत चढ़ा दी जाती है।



माना जब स्थायी अवस्था प्राप्त कर ली जाती है तो संधि का ताप T होगा, प्रत्येक प्लेट से प्रवाहित तापीय धारा समान होगी। तो प्रथम प्लेट से तापीय धारा –

$$i = \frac{Q}{t} = \frac{T_H - T}{R_1} \text{ या } T_H - T = iR_1 \quad \text{..... (5.1)}$$

एवं द्वितीय प्लेट से

$$i = \frac{Q}{t} = \frac{T - T_C}{R_2} \text{ या } T - T_C = iR_2 \quad \text{.....(5.2)}$$

समी. 5.1 व 5.2 को जोड़ने पर

$$T_H - T_L = (R_1 + R_2)\, i \text{ या } i = \frac{T_H - T_C}{R_1 + R_2}$$

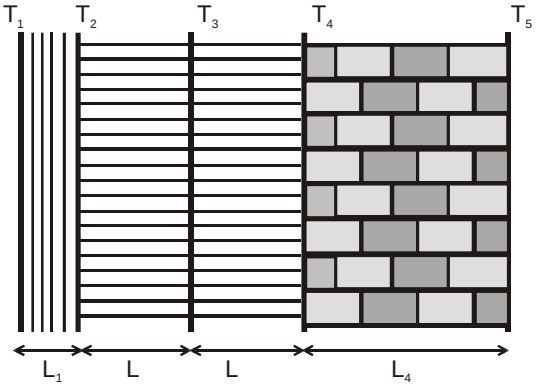
इस प्रकार दोनों प्लेटें ताप प्रतिरोध $R_1 + R_2$ की एकल प्लेट के तुल्य हैं।

यदि श्रेणीक्रम में दो से अधिक प्लेटें जोड़ी जाती हैं, एवं स्थायी अवस्था प्राप्त करने दी जाती है तो ताप प्रतिरोध व्यक्त किया जा सकता है –

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \text{.....} \quad \text{.....(5.3)}$$

Solved Examples

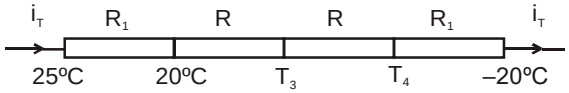
Example. 3 चित्र में एक पहाड़ी स्थल पर बने मकान की बाह्य दीवार का अनुप्रस्थ काट दिखाया गया जो मकान को बाहर के गलन ताप से अवरूद्ध रखती है दीवार की L_1 मोटाई में चीड़ की लकड़ी है एवं मोटाई ($L_2 = 5L_1$) में ईटें है। इनके बीच समान ऊष्मा चालकता के अज्ञात पदार्थ की दो परतें है। चीड़ की लकड़ी की ऊष्मा चालकता K_1 है व ईंट की $K_2 = 5K_1$ है। दीवार से चालन स्थायी अवस्था में पहुंचने के बाद तीन सतहों का तापमान ज्ञात है, $T_1 = 25^oC$, $T_2 = 20^oC$ एवं $T_5 = -20^oC$। आन्तरिक सतहों का ताप T_4 व T_3 ज्ञात कीजिये।



Solution : माना आन्तरिक सतह का क्षेत्रफल A है, तो लकड़ी का ताप प्रतिरोध $R_1 = \frac{L_1}{K_1 A}$ एवं ईंट की दीवार का

$$R_2 = \frac{L_2}{K_2 A} = \frac{5L_1}{5K_1 A} = R_1$$

माना बीच की प्रत्येक परत का ताप प्रतिरोध = R है तो उपरोक्त दीवार का परिपथ की तरह विश्लेषण करने पर



प्रत्येक दीवार से तापीय धारा समान है।

अतः $\frac{25-20}{R_1} = \frac{20-T_3}{R} = \frac{T_3-T_4}{R} = \frac{T_4+20}{R_1} \Rightarrow 25 - 20 = T_4 + 20 \Rightarrow T_4 = -15^oC$ **Ans.**

also, $20 - T_3 = T_3 - T_4 \quad \Rightarrow \quad T_3 = \frac{20+T_4}{2} = 2.5^oC$ **Ans.**

Example. 4 उदाहरण 3 में, $K_1 = 0.125$ W/m–ºC, $K_2 = 5K_1 = 0.625$ W/m–ºC एवं अज्ञात पदार्थ की ऊष्मा चालकता $K = 0.25$ W/mºC है। $L_1 = 4$cm, $L_2 = 5L_1 = 20$cm है। यदि मकान में केवल एक कमरा है जिसकी दीवारों का क्षेत्रफल 100 m^2 है, तो कमरे में उपयोग किये जा रहे विद्युत हीटर की शक्ति ज्ञात कीजिये।

Solution : **I[st] method** $R_1 = R_2 = \dfrac{(4\times10^{-2}m)}{(0.125w/m-^oC)(100m^2)} = 32 \times 10^{-4}$ ºC/w

$\because \quad \dfrac{25-20}{R_1} = \dfrac{20-T_3}{R}$

$\Rightarrow \quad L = \dfrac{17.5}{5} \times \dfrac{K}{K_1} L_1 = 28$ cm

$R = \dfrac{L}{KA} = 112 \times 10^{-4}$ ºC/W

पूरी दीवार का तुल्य ताप प्रतिरोध $= R_1 + R_2 + 2R = 288 \times 10^{-4}$ ºC/W

$\therefore$ कुल ऊष्मीय धारा, अर्थात मकान से प्रति सेकण्ड बाहर निकल रही ऊष्मा की मात्रा $= \dfrac{T_H - T_C}{R}$

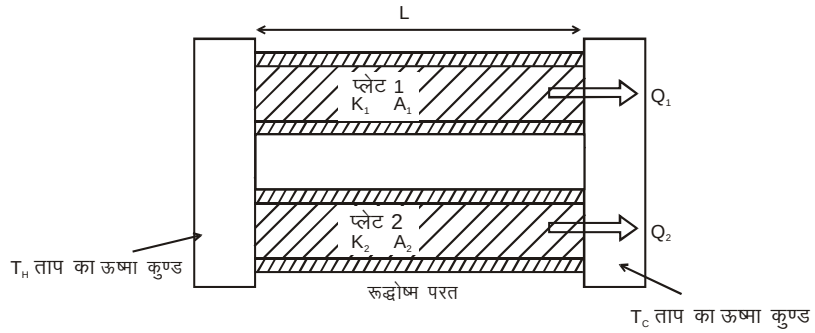
$= \dfrac{25^oC-(-20^oC)}{288\times10^{-4}{}^oC/w} = \dfrac{45\times10^4}{288}$ watt $= 1.56$ Kwatt

अतः निर्गत ऊष्मा की पूर्ति करने के लिए हीटर द्वारा 1.56 kW दी जानी चाहिये। **Ans.**

II[nd] method

$i = \dfrac{T_1 - T_2}{R_1} = \dfrac{25-20}{32\times10^{-4}} = 1.56$ Kwatt

5.2 समान्तर क्रम में प्लेटें :



दो ऊष्मा कुण्डों (heat reservoirs) के मध्य रखी दो प्लेटों पर विचार कीजिये। उनकी ऊष्मीय चालकता K_1 व K_2 तथा अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल A_1 व A_2 है तो $R_1 = \dfrac{L}{K_1A_1}$, $R_2 = \dfrac{L}{K_2A_2}$

प्लेट 1 के द्वारा तापीय धारा $i_1 = \dfrac{T_H - T_C}{R_1}$ एवं प्लेट 2 से $i_2 = \dfrac{T_H - T_C}{R_2}$

गर्म से ठण्डे कुण्ड (reservoir) की ऊष्मीय धारा $i = i_1 + i_2 = (T_H - T_C)\left(\dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2}\right)$

$i = \dfrac{T_H - T_C}{R_{eq}}$, से तुलना करने पर हम पाते हैं

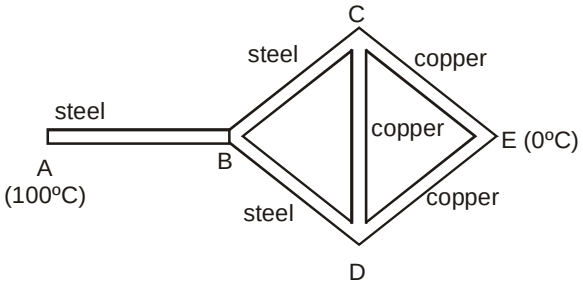
$\dfrac{1}{R_{eq}} = \dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2}$

यदि दो से अधिक छड़ें समान्तर क्रम में जोड़ी जाती है तो तुल्य प्रतिरोध निम्न से दिया जायेगा

$\dfrac{1}{R_{eq}} = + \dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2} + \dfrac{1}{R_3}$ ..... (5.4)

Solved Examples

Example. 5 ताँबें की तीन छड़े एवं इस्पात की तीन छड़ें प्रत्येक की लम्बाई ℓ = 10 सेमी. एवं अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल 1 सेमी^{2} चित्रानुसार जोड़े जाते है।



यदि सिरे A व E क्रमशः ताप 125ºC व 0ºC पर रखे जाते है, तो गर्म से ठंडी संधि की ओर प्रवाहित ऊष्मा की मात्रा ज्ञात कीजिये। (सारणी 3.1 का उपयोग कीजिये)

Solution : $R_{steel} = \dfrac{L}{KA} = \dfrac{10^{-1}m}{46(W/m–^oC)\times 10^{-4}m^2} = \dfrac{1000}{46}$ ºC/W.

इसी प्रकार $R_{Cu} = \dfrac{1000}{385}$ ºC/W

संधि C व D सभी प्रकार से एक जैसी हैं एवं दोनों संधि का ताप समान होगा। परिणाम स्वरूप छड़ CD तापीय साम्य में है एवं इससे कोई ऊष्मा प्रवाहित नहीं होगी। अतः आगे के विश्लेषण में यह छोड़ी जा सकती है। अब छड़ BC एवं CE श्रेणीक्रम में हैं व उनका तुल्य प्रतिरोध $R_1 = R_S + R_{Cu}$ है। इसी प्रकार छड़ BD व DE भी श्रेणी क्रम में हैं एवं उनका तुल्य प्रतिरोध भी $R_1 = R_S + R_{Cu}$ उतना ही होगा।

ये दोनों समान्तर क्रम में हैं जिनका तुल्य प्रतिरोध $\dfrac{R_1}{2} = \dfrac{R_S + R_{Cu}}{2}$

यह प्रतिरोध छड़ AB के साथ श्रेणीक्रम में है। अतः संयोजन का तुल्य प्रतिरोध होगा

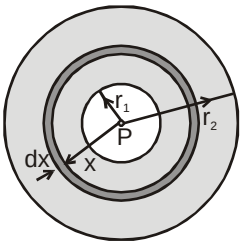
$$R = R_{steel} + \frac{R_1}{2} = \frac{3R_{steel} + R_{Cu}}{2} = 500\left(\frac{3}{46} + \frac{1}{385}\right)^oC/W$$

अब $i = \dfrac{T_H - T_C}{R} = \dfrac{100\ ^oC}{500\left(\dfrac{3}{46} + \dfrac{1}{385}\right)^oC/W} = \dfrac{46\times 385}{5(385\times 3 + 46)}$ Watt. = 2.95 Watt. **Ans.**

Example. 6 दो पतले संकेन्द्रीय कोश तांबे से बने हैं जिनकी त्रिज्या r_1 व r_2 ($r_2 > r_1$) है। उनके मध्य K ऊष्मा चालकता का पदार्थ भरा है। दोनों गोलो के केन्द्र पर P शक्ति के एक हीटर द्वारा आन्तरिक व बाह्य गोलों को क्रमशः T_H व T_C ताप पर रखा जाता है। P का मान ज्ञात कीजिये।

Solution : गोले के प्रत्येक अनुप्रस्थ काट से प्रति सेकण्ड प्रवाहित ऊष्मा = P = i.

x त्रिज्या व dx मोटाई के गोलीय कोश का ताप प्रतिरोध होगा



$$dR = \frac{dx}{K.4\pi x^2} \quad \Rightarrow \quad R = \int_{r_1}^{r_2} \frac{dx}{4\pi x^2.K} = \frac{1}{4\pi K}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

तापीय धारा $i = P = \dfrac{T_H - T_C}{R} = \dfrac{4\pi K(T_H - T_C)\ r_1\ r_2}{(r_2 - r_1)}$. **Ans.**

Example 7. नगण्य ऊष्मा धारिता के एक पात्र में 1 किग्रा. जल है। इसे एक इस्पात की छड़ लम्बाई 10 मी. व अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल 10 सेमी.^{2} के द्वारा एक बड़े भाप के कक्ष से जोड़ा जाता है जिसका ताप 100ºC रखा जाता है। यदि जल का प्रारम्भिक ताप 0ºC है तो वह समय ज्ञात कीजिये जिसके बाद यह 50ºC हो जाता है। (इस्पात की छड़ की ऊष्मा धारिता नगण्य मानिये एवं यह मानिये कि वातावरण को ऊष्मा क्षय नहीं होता) (सारणी 3.1 का उपयोग कीजिये एवं जल की विशिष्ट ऊष्मा = 4180 J/Kg°C लें)

Solution : माना t समय पर जल का ताप T है तो t समय पर ऊष्मीय धारा $i = \left(\frac{100-T}{R}\right)$

यह जल का ताप T से T + dT तक बढ़ाती है।

$$\Rightarrow \quad i = \frac{dH}{dt} = ms\frac{dT}{dt} \qquad \Rightarrow \qquad \frac{100-T}{R} = ms\frac{dT}{dt}$$

$$\Rightarrow \quad \int_0^{50}\frac{dT}{100-T} = \int_0^t \frac{dT}{Rms} \qquad \Rightarrow \qquad -\ell n\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{t}{Rms}$$

or $t = Rms\ \ell n2 \text{ sec} = \frac{L}{KA}\ ms\ \ell n2 \text{ sec}$

$$= \frac{(10m)\ (1\ kg)(4180\ J/kg\text{–}^oC)}{46(w/m\ ^oC)\times(10\times10^{-4}m^2)}\ell n2 = \frac{418}{46}(0.69)\times10^5 = 6.27\times10^5 \text{ sec} = 174.16 \text{ hours}$$ **Ans.**

क्या आप निम्न तथ्यों को देखकर इनको ऊष्मीय चालन के आधार पर समझा सकते है ?

(a) जाड़ों में लोहे की कुर्सियां लकड़ियों की कुर्सियों से ज्यादा ठण्डी प्रतीत होती है।
(b) पिघलने से रोकने के लिए बर्फ को बोरे से ढका जाता है
(c) ऊनी कपड़े गर्म होते है।
(d) फर वाले कोट में हम गर्मी महसूस करते है।
(e) दो पतले कम्बल, दुगुनी मोटाई के एक कम्बल से ज्यादा गर्मी देते हैं।
(f) जाड़ों में चिडियाँ अपने पंख फैला लेती है।
(g) नई रजाई, पुरानी रजाई से ज्यादा गर्म होती है।
(h) केटली में लकड़ी के हत्थे लगाये जाते है।
(i) एस्किमों दोहरी दीवार के बर्फ के घर बनाते है।
(j) अन्दर, बाहर से ऊष्मा संचरण को रोकने के लिए थर्मस फ्लास्क दो दीवारों का बनाया जाता है।

6. संवहन *(not in JEE Syllabus)

जब द्रव में एक स्थान से दूसरे स्थान तक उष्मा प्रवाह ऊष्मीय अणुओं की वास्तविक गति के कारण होता है तो इस प्रक्रम को संवहन कहते है। द्रव तथा गैसों में कुछ उष्मा, चालन के द्वारा भी प्रवाहित होती है परन्तु अधिकांश ऊष्मा संवहन के द्वारा प्रवाहित होती हैं। संवहन पृथ्वी के गुरूत्वीय प्रभाव के कारण उत्पन्न होता है। साधारणतया द्रव का उच्चताप वाला भाग विरल होता है। जबकि निम्न ताप वाला भाग सघन होता है। अतः संवहन के आधार पर गर्म द्रव ऊपर उठता है। जबकि ठण्डा द्रव नीचे बैठता है। गुरूत्व की अनुपस्थिति में संवहन सम्भव नहीं है।

जल का यह विपरीत (anamalous) व्यवहार (0-4ºC ताप के मध्य इसका घनत्व बढ़ता है) जिसके कारण रूचिकर घटनायें उत्पन्न होती है साथ ही संवहन की प्रक्रिया होती है। इनमें से एक रूचिकर घटना ध्रुवों पर जल के अन्दर जीवन है। दूसरा वर्षा चक्रक है।

क्या आप निम्न तथ्यों को देखकर इनको ऊष्मीय संवहन के आधार पर समझा सकते है ?

(a) समुद्र का पानी सतह पर बर्फ के रूप में जम जाता है, जबकि तल का पानी नहीं जमता।
(b) गहरे समुद्रों के तल पर पानी का तापमान 4ºC के लगभग रहता है। चाहे वातावरण गर्म हो या ठण्डा हो।
(c) मुक्त रूप से गिरती हुई लिफ्ट अथवा पृथ्वी के कृत्रिम उपग्रह में मोमबत्ती नहीं जला सकते है।
(d) आप अपने कमरे को मोमबत्ती के द्वारा प्रकाशित कर सकते है।

7. विकिरण

विकिरण प्रक्रम में एक स्थान से दूसरे स्थान तक ऊष्मा प्रवाह माध्यम को बिना गर्म करे ही प्रवाहित होती है। यहां पर प्रयुक्त विकिरण शब्द के लिए एक दूसरा शब्द विद्युत चुम्बकीय तरंगे है।

ये तरंगे वि. क्षेत्र तथा लम्बवत् चुम्बकीय क्षेत्रों के अध्यारोपण से बनती है तथा ऊर्जा प्रवाहित करती है।

विकिरण के गुणधर्म :

(a) साधारतया सभी वस्तुऐं विकिरण उत्सर्जित करती है क्योंकि इनका तापमान परम शून्य ताप से ज्यादा होता है और सभी वस्तुऐं अपने ऊपर दूसरी वस्तुओं के द्वारा आपतित कुछ विकिरणों को अवशोषित करते है।

(b) मैक्सवेल ने अपनी विद्युत चुम्बकीय सिद्धान्त के आधार पर समझाया कि सभी विकिरणें विद्युत चुम्बकीय तरंगें होती है और इनके स्त्रोत अणुओं व परमाणुओं के कम्पन्न करते हुए आवेशित कण होते है।

(c) उच्च तापमान पर वस्तु अधिक विकिरण उत्सर्जित करती है। तथा निम्न तापमान पर कम विकिरण उत्सर्जित करती है।

(d) अधिकतम विकिरण उत्सर्जन के संगत तरंगदैर्ध्य में विस्थापन तापमान बढ़ने के साथ अधिकतम तरंगदैर्ध्य से निम्न तरंग दैर्ध्य की ओर विस्थापित होती है। इस कारण वस्तु के रंग में परिवर्तन प्रतीत होता है। NTP पर वस्तु द्वारा उत्सर्जित विकिरणें अवरक्त तरंगे होती है।

(e) ऊष्मीय विकिरण प्रकाश की चाल से और सीधी रेखा में गति करती है।

(f) विकिरणें विद्युत चुम्बकीय तरंगें होती है तथा ये निर्वात में गति कर सकती है।

(g) प्रकाश की तरह उष्मीय विकिरण परावर्तन, अपवर्तन विवर्तन तथा ध्रुवण प्रदर्शित कर सकती है।

(h) बिन्दु स्त्रोत से उत्सर्जित विकिरण व्युत्क्रम वर्ग के नियम का पालन करती है। (तीव्रता $\alpha \frac{1}{r^2}$).

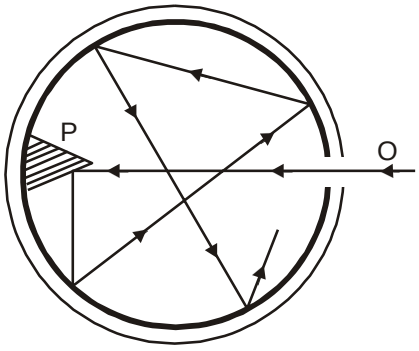
8. प्रीवोष्ट का ऊष्मा विनिमय का नियम

इस सिद्धान्त के अनुसार सभी वस्तुऍं सभी तापमानों पर उष्मीय विकिरण उत्सर्जित करती है। एकांक समय में उत्सर्जित उष्मीय विकिरण की मात्रा उत्सर्जक सतह की प्रकृति, सतह के क्षेत्रफल तथा सतह के तापमान पर निर्भर करती है। उच्च तापमान पर विकिरण की दर तीव्र होती है। जबकि वस्तु उसके चारों तरफ स्थित वस्तुओं द्वारा उत्सर्जित विकिरण की कुछ मात्रा अवशोषित भी करती है। यदि कोई वस्तु अवशोषण से ज्यादा उत्सर्जित करती है तो उसका तापमान गिरता है तथा तब कोई वस्तु अवशोषण से कम उत्सर्जित करती है तो उसका तापमान बढ़ता है और यदि वस्तु का ताप वातावरण के ताप के बराबर है तो यह उतनी ही दर से विकिरण उत्सर्जित करतीहै जितनी यह अवशोषित करती है।

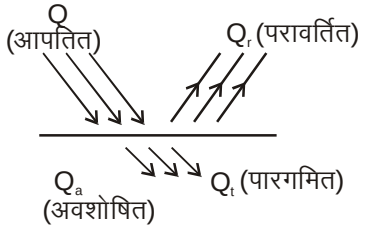
9. आदर्श कृष्णिका और काली वस्तु से विकिरण उत्सर्जन (फेरी की कृष्णिका)

एक आदर्श कृष्णिका अपने ऊपर आपतित सभी तरंग दैर्ध्यों की विकिरणों को अवशोषित कर लेती है। ना तो यह परावर्तित करती है और ना ही अपने ऊपर आपतित विकिरण को पारगमित करती है। अतः यह आपतित विकिरणों के किसी भी रंग के लिए काली प्रतीत होती है। वास्तव में कोई भी वास्तविक वस्तु आदर्श कृष्णिका की तरह व्यवहार नहीं करती है। परन्तु काजल तथा प्लेटिनम कालिख कृष्ण वस्तु की तरह व्यवहार करते है। ये आपतित विकिरणों का 99% तक अवशोषित कर लेते है। सबसे सरल व सर्वाधिक प्रयुक्त कृष्णिका फेरी द्वारा बनाई गई है।

यह एक अल्प खुले भाग वाली वस्तु होती है।जो कि अन्दर से काली पुती हुई होती है। खुला सिरा आदर्श काली वस्तु की तरह व्यवहार करता है। इसके अन्दर विकिरण जाने के पश्चात बाहर निकलने के पहले सम्पूर्ण विकिरण उत्तरोतर परार्वतन के कारण अवशोषित हो जाती है। खुले सिरे के सामने शंकू के कारण कोई भी विकिरण बाहर नहीं निकलती ।



10. विकिरणों का अवशोषण, परावर्तन और पारगमन



$$Q = Q_r + Q_t + Q_a$$

$$1 = \frac{Q_r}{Q} + \frac{Q_t}{Q} + \frac{Q_a}{Q}$$

$$1 = r + t + a$$

जहाँ r = परावर्तन क्षमता, a = अवशोषण क्षमता

और t = पारगमन क्षमता

(i) r = 0, t = 0, a = 1, आदर्श कृष्ण वस्तु

(ii) r = 1, t = 0, a = 0, पूर्ण परावर्तक

(iii) r = 0, t = 1, a = 0, पूर्ण पारगमित

10.1 अवशोषण क्षमता

किसी भी वस्तु की अवशोषण क्षमता को अवशोषित ऊर्जा तथा आपतित ऊर्जा के अनुपात के रूप में परिभाषित करते है।

$$a = \frac{\text{अवशोषित ऊर्जा}}{\text{आपतित ऊर्जा}}$$

वस्तु के ऊपर आपतित सभी विकिरणें अवशोषित हो जाती हो तो कृष्ण वस्तु के लिए a = 1 होगा।

10.2 उत्सर्जन क्षमता

क्षेत्रफल के लम्बवत् एकांक समय में एकांक क्षेत्रफल से ये उत्सर्जित ऊर्जा, उत्सर्जन क्षमता कहलाती हैं।

$$E = \frac{Q}{\Delta A \ \Delta t}$$

(नोट– अवशोषण क्षमता, उत्सर्जन क्षमता विमाहीन राशि नहीं है)

10.3 स्पेक्ट्रमी उत्सर्जन क्षमता

तरंग दैर्ध्य λ पर, प्रति इकाई तरंग दैर्ध्य परास के लिए उत्सर्जन क्षमता, स्पेक्ट्रमी उत्सर्जन क्षमता कहलाती है। यदि E सम्पूर्ण उत्सर्जन क्षमता तथा E_λ स्पेक्ट्रमी उत्सर्जन क्षमता हो तो इनके बीच सम्बन्ध

$$E = \int_0^\infty E_\lambda \, d\lambda \ \text{ तथा } \ \frac{dE}{d\lambda} = E_\lambda$$

10.4 उत्सर्जकता

$$e = \frac{\text{T तापमान पर वस्तु की उत्सर्जन क्षमता}}{\text{T तापमान पर कृष्ण वस्तु की उत्सर्जन क्षमता}} = \frac{E}{E_0}$$

11. किरचौफ का नियम

सभी वस्तुओं के लिए समान तापमान पर दी गई सभी तरंगदैर्ध्य के लिए उत्सर्जन क्षमता व अवशोषण क्षमता का अनुपात, समान तरंगदैर्ध्य व समान तापमान पर कृष्णिका के लिए उत्सर्जन क्षमता के बराबर होता है।

$$\frac{E \ (\text{वस्तु})}{a \ (\text{वस्तु})} = E \ (\text{कृष्ण वस्तु})$$

अतः हमेशा अच्छे उत्सर्जक, अच्छे अवशोषक भी होते है।

12. ऊष्मीय विकिरण की प्रकृति (वीन का विस्थापन नियम)

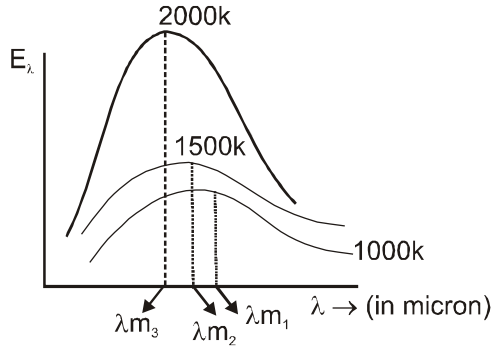
कृष्ण वस्तु के उर्जा वितरण वक्र से निम्न निष्कर्ष निकलते हैं।

(a) वस्तु के उच्च तापमान पर वक्र के नीचे का क्षेत्रफल अत्यधिक होता है। अतः उच्च तापमान पर वस्तु अत्यधिक मात्रा में ऊर्जा उत्सर्जित करती है।

(b) भिन्न भिन्न तापमानों पर वस्तु द्वारा उत्सर्जित उर्जा असमान होती है। लम्बी व छोटी तरंगदैर्ध्य के लिए उत्सर्जित उर्जा बहुत कम होती है।

(c) दिये गये तापमान पर, एक निश्चित तरंगदैर्ध्य (λ_m) पर उत्सर्जित उर्जा (E_λ) अधिकतम होती हैं।

(d) जब कृष्ण वस्तु का तापमान बढ़ाया जाता है।
वक्र का उच्चिष्ठ मान कम तरंगदैर्ध्य की तरफ विस्थापित होता हैं।



ऊपर समझायें गये कृष्णिका के ऊर्जा वितरण से यह सिद्ध होता है कि कृष्णिका का तापमान बढ़ाने पर आपतित अधिकतम तीव्रता के संगत तरंगदैर्ध्य का मान घटता है।

अर्थात $\lambda_m \propto \frac{1}{T}$ या $\lambda_m T = b$

(वीन विस्थापन स्थिरांक) $b = 0.282$ cm-K

Solved Examples

Example. 8 सूर्य विकिरण कि अधिकतम् तीव्रता 470 nm परास तरंग दैर्ध्य के संगत मिलती है। सूर्य की सतह को पूर्ण अवशोषक ($a = 1$) मान सकते है। सूर्य की सतह का ताप ज्ञात करो

Solution : चूंकि $a = 1$है,सूर्य को काली वस्तु की तरह उत्सर्जित करते हुए मान सकते है।
काली वस्तु के लिए वीन के नियम से $\lambda_m . T = b$

$$\Rightarrow T = \frac{b}{\lambda_m} = \frac{0.282 \ (cm-K)}{(470\times10^{-7} cm)} \simeq 6000 \text{ K.}$$ **Ans.**

13. स्टीफन बोल्टजमेन का नियम

इस नियम के अनुसार किसी पृष्ठ के प्रति एकांक क्षेत्रफल से ऊष्मा विकिरण की मात्रा पृष्ठ के परम ताप की चतुर्थ घात के समानुपाती होता है। काली वस्तु के लिए एकांक समय व एकांक क्षेत्रफल से विकिरित ऊर्जा,

$$u = \sigma A T^4 \qquad .....(13.1)$$

यहाँ σ स्टीफन नियतांक $= 5.67 \times 10^{-8}$ W/m^2 k^4

चूंकि कोई वस्तु जो कृष्णिका नहीं है समीकरण (13.1) में दी गई विकिरण से कम अवशोषित व उत्सर्जित करती है।

ऐसी वस्तु के लिए, $u = e\sigma AT^4$ .....(13.2)

यहाँ e = उत्सर्जकता (अवशोषण क्षमता के बराबर होती है।) इसका मान 0 से 1 के बीच होता है।

यदि वातावरण का ताप T_0 हो , तो क्षेत्रफल A द्वारा एकांक समय में उत्सर्जित कुल ऊर्जा

$$\Delta u = u - u_0 = e\sigma A(T^4 - T_0^4) \qquad .....(13.3)$$

Solved Examples

Example. 9 एक वस्तु की उत्सर्जकता (e = 0.75) सतह क्षैत्रफल 300 cm^2 और 227° तापमान पर 27° तापमान के कमरे मे रखी जाती है। वस्तु द्वारा उत्सर्जित प्रारम्भिक कुल शक्ति का मान ज्ञात करो?

Solution : समीकरण 13.3 के प्रयोग से

$P = \rho\sigma A (T^4 - T_0^4)$

$= (0.75)\ (5.67 \times 10^{-8}\ W/m^2 - K^4)\ (300 \times 10^{-4}\ m^2) \times \{(500\ K)^4 - (300\ K)^4\} = 69.4$ Watt. **Ans.**

Example. 10 एक गर्म कृष्णिका 16 J m^{-2} s^{-1} की दर से ऊर्जा उत्सर्जित करती है तथा उसकी सबसे सघन विकिरण 20,000 Å है। जब वस्तु का तापमान और बढ़ाया जाता है तो इसकी सबसे सघन विकिरण 10,000 Å, हो जाती है तो उत्सर्जित ऊर्जा का मान Jm^{-2} s^{-1} में ज्ञात करो।

Solution : वीन के विस्थापन नियम से : $\lambda_m . T = b$

i.e. $T \propto \frac{1}{\lambda_m}$

जब, λ_m आधी होती है–

$\therefore$ तापमान दुगुना हो जाता है।

तथा $e = \sigma T^4$

$\Rightarrow \frac{e_1}{e_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^4 \Rightarrow e_2 = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4 . e_1 = (2)^4 .16 = 16.16 = 256\ J\ m^{-2}\ s^{-1}$ **Ans.**

14. न्यूटन का शीतलन का नियम :

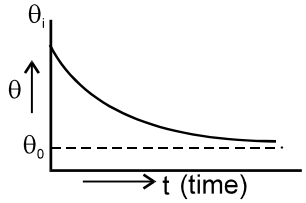
वस्तु व वातावरण के मध्य अल्प तापान्तर के लिए किसी वस्तु की ऊष्मा हास की दर, आस–पास की वस्तुओं से उसके तापान्तर तथा प्रयुक्त सतह क्षेत्रफल के समानुपाती होती है

अर्थात $\frac{d\theta}{dt} \propto (\theta - \theta_0)$, यहाँ θ व θ_0 क्रमशः वस्तु तथा वातावरण के तापमान है।

उपरोक्त सम्बन्ध से, $\frac{d\theta}{dt} = -k(\theta - \theta_0)$ .....(14.1)

यह व्यंजक न्यूटन का शीतलन के नियम को प्रदर्शित करता है। इसको स्टीफन के नियम द्वारा भी प्राप्त कर सकते है। इसके द्वारा

$k = \frac{4e\sigma\theta_0^3}{mc} A$ .....(14.2)



अतः $\frac{d\theta}{dt} = -k[\theta - \theta_0] \Rightarrow \int_{\theta_i}^{\theta_f} \frac{d\theta}{(\theta - \theta_0)} = \int_0^t -k\ dt$

यहां θ_i = वस्तु का प्रारम्भिक तापमान तथा θ_f = वस्तु का अन्तिम तापमान

$\Rightarrow \ell n \frac{(\theta_f - \theta_0)}{(\theta_i - \theta_0)} = -kt \Rightarrow (\theta_f - \theta_0) = (\theta_i - \theta_0)\ e^{-kt}$

$\Rightarrow \theta_f = \theta_0 + (\theta_i - \theta_0)\ e^{-kt}$ ..... (14.3)

14.1 न्यूटन के शीतलन के नियम की सीमाऐं

(a) वस्तु तथा वातावरण के मध्य तापान्तर अल्प होना चाहिए

(b) ऊष्मा हास केवल और केवल विकिरण द्वारा होना चाहिए।

(c) वस्तु के शीतलन के दौरान वातावरण का ताप नियत रहना चाहिए

14.2 न्यूटन के शीतलन के नियम के प्रयोग के लिए लगभग विधि

कुछ समय के लिए जब हमे न्यूटन के नियम के लिए लगभग विधि की आवश्यकता होती है। तो हम शीतलन की दर को नियत मान सकते है जो कि इस अन्तराल मे औसत तापमान के संगत शीतलन की दर के बराबर होती है

$$\left\langle \frac{d\theta}{dt} \right\rangle = -k(\langle\theta\rangle - \theta_0) \qquad .....(14.4)$$

यदि θ_i व θ_f वस्तु के प्रारम्भिक व अन्तिम तापमान हो तो $\langle\theta\rangle = \frac{\theta_i + \theta_f}{2}$.

समीकरण 14.4 लगभग मान देता है और समीकरण 14.1 का प्रयोग यथार्थ मान के लिए करते है।

Solved Examples

Example 11 40ºC ताप की वस्तु 20ºC नियत ताप के वातावरण मे रखी है। यह पाया जाता है कि इसका ताप 10 मिनट में 35ºCतक गिर जाता है। तो 30ºC ताप प्राप्त करने के लिए लिया गया अतिरिक्त समय ज्ञात करो

Solution : समीकरण 14.3 से $\Delta\theta_f = \Delta\theta_i\, e^{-kt}$

अन्तराल जिसमें ताप 40 से 35º C तक गिरता है के लिए $(35 - 20) = (40 - 20)\, e^{-k.\,10}$

$$\Rightarrow\ e^{-kt} = \frac{3}{4} \qquad \Rightarrow \qquad K = \frac{\ell n\frac{4}{3}}{10}$$

अगले अन्तराल के लिए

$$(30 - 20) = (35 - 20)e^{-kt} \Rightarrow \qquad e^{-10k} = \frac{2}{3}$$

$$\Rightarrow\ kt = \ell n\ \frac{3}{2} \qquad \Rightarrow \qquad \frac{\left(\ell n\frac{4}{3}\right)\ t}{10} = \ell n\ \frac{3}{2}$$

$$\Rightarrow\ t = 10\ \frac{\left(\ell n\frac{3}{2}\right)}{\left(\ell n\frac{4}{3}\right)} \text{ मिनिट} = 14.096 \text{ मिनिट} \qquad \textbf{Ans.}$$

अन्यविधि **:** (लगभग विधि से)

तापमान 40 से 35ºC तक गिरने के अन्तराल के लिए $\langle\theta\rangle = \frac{40 + 35}{2} = 37.5ºC$

समीकरण (14.4) से $\left\langle \frac{d\theta}{dt} \right\rangle = -k(\langle\theta\rangle - \theta_0)$

$$\Rightarrow\ \frac{(35ºC - 40ºC)}{10(\text{min})} = -K(37.5ºC - 20ºC) \qquad \Rightarrow \qquad K = \frac{1}{35}(\text{min}^{-1})$$

तापमान 35ºC से 30ºC तक गिरने के अन्तराल के लिए $\langle\theta\rangle = \frac{35 + 30}{2} = 32.5ºC$

समीकरण (14.4) से

$$\frac{(30ºC - 35ºC)}{t} = -(32.5ºC - 20ºC)\ K \Rightarrow \quad \text{आवश्यक समय } t = \frac{5}{12.5} \times 35\text{min} = 14 \text{ मिनिट} \quad \textbf{Ans.}$$