NOTAT

OM

VARMETRANSPORT

Del av pensum
i
TFY4115 Fysikk

Høst 2004

VARMETRANSPORT [20-4]

Termisk energi kan overføres fra ett sted til et annet på 3 ulike måter:

- Varmeledning
- Konveksjon
- Stråling

① Varmeledning: Termisk energi overføres fra atom til atom eller fra molekyl til molekyl uten noen transport eller forflytning av atomene eller molekylene selv. I gass direkte ved kollisjoner.

② Konveksjon: Varmetransport ved direkte massetransport.

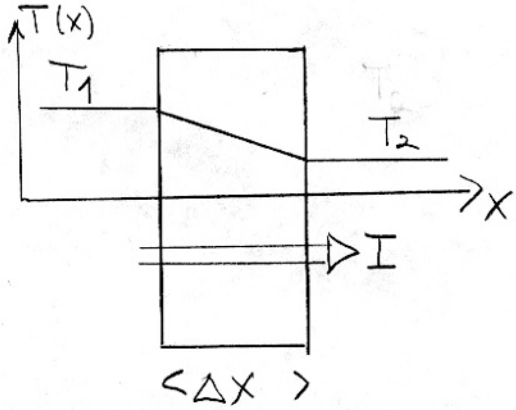
③ Stråling: Overføring ved hjelp av elektromagnetisk stråling. Alle stoff absorberer og emitterer elektromagnetisk stråling. Når et objekt er i termisk likevekt med omgivelsene, er det likevekt mellom absorbert og emittert stråling.
Dersom temperaturen på objektet derimot er høyere enn omgivelsene, vil utstrålingen være større enn innstrålingen.

Varmetransport er en vektoriell størrelse, som generelt avhenger både av tid og sted.

Varmetransporten er stasjonær dersom den ikke avhenger av tiden.

Varmeledning i en dimensjon

Vi definerer varmestrømmen I som den varmemengden som passerer flata pr. tidsenhet:



$$I = \frac{dQ}{dt}$$

Eksperimentelt finner en at varmestrømmen I er proporsjonal med arealet vinkelrett på varmestrømmen og med temperaturgradienten,

$$I(x) = -k A \frac{dT}{dx}$$

k = varmekonduktiviteten eller varmeledningsevnen, $[W/(m \cdot K)]$

(- tegnet gir positiv varmestrøm fra varmt til kaldt)

Når tilstanden er stasjonær er $I(x)$ = konstant, uavhengig av tid og sted, som gir:

$$T(x) = -\frac{I}{kA}x + C$$

Grensebetingelsene : $T(0) = T_1$ og $T(\Delta x) = T_2 \Rightarrow$

$$\boxed{I = kA\,\frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = kA\,\frac{\Delta T}{\Delta x}} \quad (20\text{-}7)$$

Alternativt $\boxed{\Delta T = RI}$ (20-9)

der $R = \frac{1}{k}\cdot\frac{\Delta x}{A}$ = varmeresistansen $\left(\frac{K}{W}\right)$

Analogi : $\Delta T \Leftrightarrow \Delta V$; R som resistans i elektriske kretser.

Seriekopling av varmeresistanser

$$T_i - T_{i+1} = R_i I \qquad i = 1, n$$

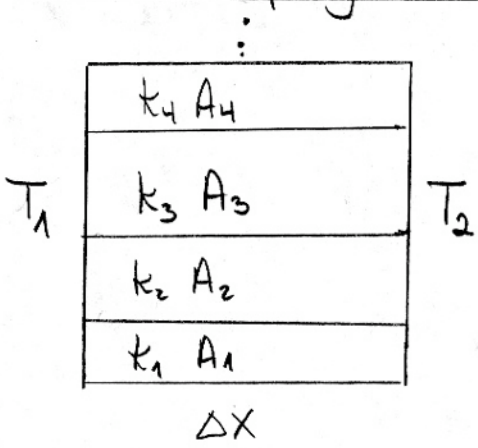
Summerer alle likningene:

$$T_1 - T_{n+1} = (R_1 + R_2 + \ldots\ldots + R_n) I$$

$$\boxed{R_{eq} = R_1 + R_2 + \ldots = \sum_{i=1}^{n} R_i} \quad (20\text{-}12)$$

$$\boxed{R_{eq} = \frac{1}{k_1}\cdot\frac{\Delta x_1}{A} + \frac{1}{k_2}\frac{\Delta x_2}{A} + \ldots = \frac{1}{A}\sum_{i=1}^{n}\frac{\Delta x_i}{k_i}}$$

Parallellkopling av varmeresistanser



$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \ldots I_n$$

$$= \frac{\Delta T}{R_1} + \frac{\Delta T}{R_2} + \ldots\ldots + \frac{\Delta T}{R_n}$$

$$= \frac{\Delta T}{R_{eq}}$$

$$\boxed{\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots = \sum_{i=1}^{n}\frac{1}{R_i}} \quad (20\text{-}14)$$

$$\boxed{\frac{1}{R_{eq_T}} = k_1 \frac{A_1}{\Delta x} + k_2 \frac{A_2}{\Delta x} + \ldots = \frac{1}{\Delta x} \sum_{i=1}^{n} k_i A_i}$$

Varmekonduktiviteten er materialspesifikk og varierer mye fra materiale til materiale.

$$k_{kopper} = 400 \, W/m \cdot K \quad ; \quad k_{steinull} = 0{,}047 \, W/m \cdot K$$

$$k_{luft} = 0{,}026 \, W/m \cdot K$$

Isolasjonsmaterialer i bygningsindustrien, isopor, steinull og glassull, består for en stor del av luftlommer. Konveksjonen undertrykkes i disse lommene og varmetransporten skjer ved varmeledning i luftlommene og selve materialet.

Formlene for varmeledningen forutsetter endimensjonal varmeledning, hvilket blant annet betyr at størrelsen på flatene som utgjør den sammensatte plata eller veggen er stor sammenlikna med tykkelsen av veggen.

Beregning av f.eks. varmetapet fra et rom må inkludere vegger, vinduer, gulv og tak. Temperaturforskjellen er i hovedsak den samme for alle transportveier, lik differanse mellom inne- og utetemperaturen. Total varmeresistans beregnes som en parallellkopling av de ulike motstandene.

KONVEKSJON

Når en væske eller en gass strømmer langs en overflate, vil strømningshastigheten være null på selve overflaten. ⇒ Grensesjikt der strømningshastigheten øker fra null ved selve overflaten til en tilnærma konstant verdi langt fra overflata. Å beregne varmestrømmen fra en fast flate utover i en gass/væske er et komplekst problem.

Varmestrømmen avhenger av dynamisk viskositet for væska, termisk ledningsevne, spesifikk varmekapasitet c_p og hastigheten til gassen/væska.

Ved varmestrøm fra faste overflater til væsker eller gasser angis bare overflatetemperaturen T_s og gass- eller væsketemperaturen T_g og varmestrømmen I ut fra overflata ved en enkel empirisk formel, Newtons avkjølingslov:

$$\boxed{I = h \cdot A(T_s - T_g)}$$

A = overflatearealet
h = varmeovergangskoeffisienten. (som skjuler fysikken)

For naturlig konveksjon i luft er

$$2{,}5 \, \frac{W}{K \cdot m^2} \lesssim h \lesssim 10 \, \frac{W}{K \cdot m^2}$$

Sjiktet ved overflata virker som en varmeresistans

Total varmeresistans for lagdelt struktur blir da med konveksjonsbidrag på hver side

$$\boxed{R_{tot} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{1}{A}\sum_{i=1}^{n}\frac{\Delta x_i}{k_i} + \frac{1}{h_n A}}$$

Varmestrømmen gjennom lagstrukturen

$$\underline{I} = \frac{\Delta T}{R_{tot}}$$

Internasjonal standard for byggeindustrien definerer begrepet U-verdi for ei flate. Den tilsvarer total termisk ledningsevne pr. kvadratmeter for en konstruksjon slik at varmestrømmen pr. flateenhet er

$$j = \frac{I}{A} = -U\Delta T$$

U verdien har enhet $W/m^2 \cdot K$

STRÅLING

Når stråling treffer et objekt vil noe av strålingen bli reflektert, noe bli absorbert og resten bli transmittert. Brøkdelene av innfallende stråling som blir reflektert, absorbert og transmittert må summere seg til 1:

$$r + a + t = 1$$

der r = refleksjonsevnen, a = absorpsjonsevnen og t = transmisjonsevnen.

Disse tre faktorene er materialspesifikke og avhenger også av strålingens bølgelengde og egenskapene til overflaten av materialet.

Eksempel: Glass er gjennomsiktig for synlig lys, men praktisk talt fullstendig ugjennomsiktig for stråling med bølgelengde større enn 5 µm.

Stefan - Boltzmanns lov

Alle legemer emitterer og absorberer stråling. Når et legeme er i termisk likevekt med omgivelsene vil det absorbere og emittere like mye varme.

Energien som emitteres som stråling fra et legeme er gitt ved Stefan - Boltzmanns lov:

$$\boxed{P_r = e\sigma A T^4} \qquad [\text{Enhet } W]$$

der P_r er utstrålt effekt, A er arealet
σ = Stefan-Boltzmanns konstant = $5{,}67 03 \cdot 10^{-8}\, W/(m^2 \cdot K^4)$.
T = temperaturen til legemet i K.
e = emissiviteten til legemet.

Emissiviteten avhenger av materialet og overflateegenskapene. $0 \leq e \leq 1$.

Absorpsjonen av stråling for et legeme med omgivelser ved temperatur T_0 er gitt ved:

$$P_a = e\sigma A T_0^4$$

Netto utstrålt effekt fra legemet (varmestrøm)

$$\boxed{P_{net} = e\sigma A\left(T^4 - T_0^4\right) = I_{rad}}$$

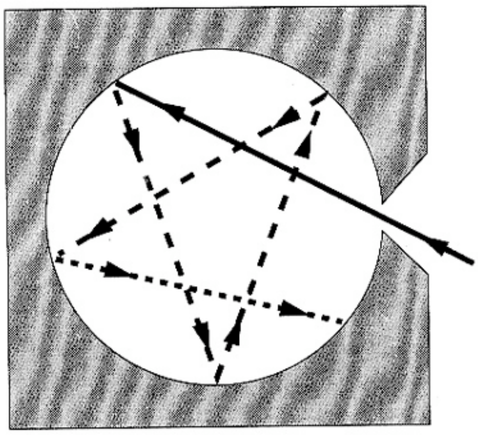
Energistrøm ut.

Ved termisk likevekt $T = T_0$ og $P_{net} = 0$ og $P_a = P_r$.

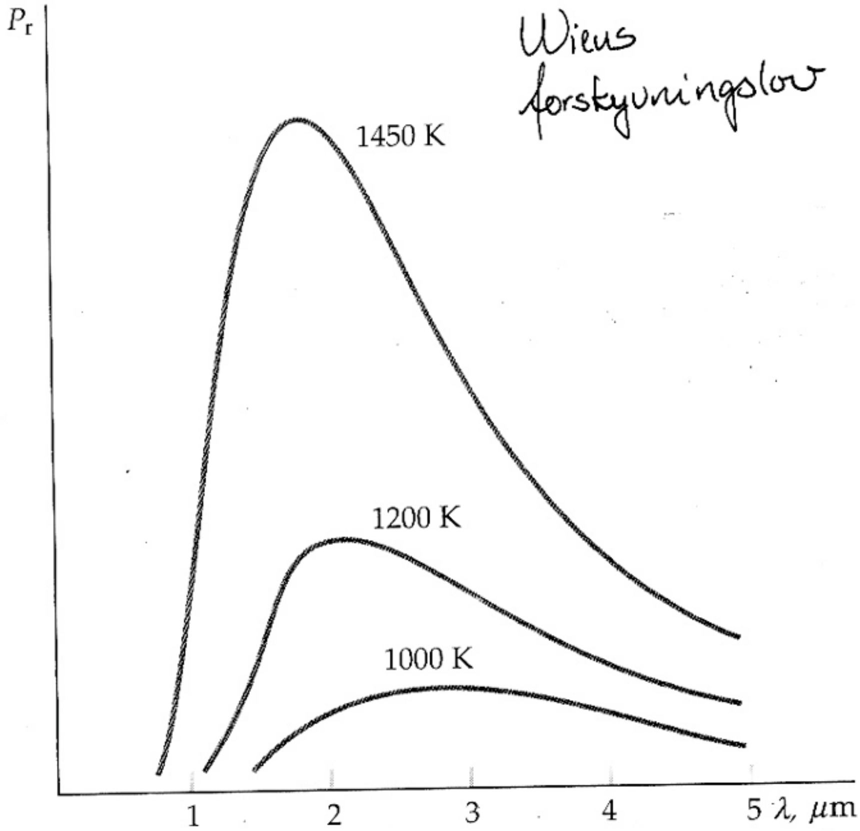
<u>Svart stråling</u> (Blackbody radiation)
En sentral idealisering i forbindelse med stråling er begrepet absolutt svart legeme, der $r = t = 0$ og $a = 1$ og dermed også $e = 1$ ved termisk likevekt.

Den beste approksimasjonen til en svart legeme stråler er et lite hull inn mot et hulrom som illustrert i figuren på neste side.

Emittert stråling øker med økende temperatur og utstrålt energi utvides til høyere frekvenser.



Et hull i en kavitet er en god tilnærmelse for en svart-legeme-stråler.



Utstrålt effekt som funksjon av bølgelengde for en svart-legeme-stråler.
λ_{max} avhenger av den absolutte temperaturen til legemet.

Den bølgelengden der vi har høyest utstrålt effekt, er gitt ved Wiens forskyvningslov (se fig foran)

$$\boxed{\lambda_{max} = \frac{2{,}898 \cdot 10^{-3} \cdot m \cdot K}{T}}$$

To interessante tilfeller:

Romtemperatur, 300 K $\Rightarrow \lambda_{max} = 10\mu m$

Solas overflate, 5800 K $\Rightarrow \lambda_{max} = 0{,}5\mu m$

Den første av disse bølgelengdene ligger et godt stykke ute i det infrarød området, mens den andre ligger midt i det synlige området. Disse to bølgelengdene er så forskjellige at vanlig vindusglass vil slippe gjennom det meste av sollyset, mens romtemperaturstrålingen ikke slipper ut. Det er dette som ligger til grunn for <u>drivhuseffekten.</u> Energien i solstrålingen slipper gjennom vinduene i drivhuset, absorberes og re-emitteres i det infrarøde området og slipper ikke ut av drivhuset igjen.

Eksempel

En svart flate ($\varepsilon = 1$) settes i sollyset slik at lyset faller vinkelrett inn mot flaten. Den totale solstrålingen er $W = 0.8$ kW/m². Vi vil finne likevektstemperaturen T_0 til platen dersom den eneste mekanismen for varmetap er stråling, og baksiden er isolert slik at vi bare har utstråling fra forsiden. Anta at omgivelsene (himmelen) har en temperatur $T_1 = 250$ K og $\varepsilon = 1$.

Ved likevekt må netto utstråling være lik innstråling fra solen, dvs. $j_s = W = 0.8$ kW/m². Det gir følgende ligning

$$W = \varepsilon\sigma(T_0^4 - T_1^4)$$

som gir

$$T_0 = \left(\frac{W}{\varepsilon\sigma} + T_1^4\right)^{1/4}$$

$$= \left(\frac{0.8 \times 10^3 \text{ W/m}^2}{1 \times 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)} + 250^4 \text{ K}^4\right)^{1/4} = 366 \text{ K} = 93\ ^\circ\text{C}$$

For solenergiformål anvendes av og til et belegg som gjør at emisjonsevnen og dermed absorpsjonevnen $a = 1$ i det spektralområdet der vi har solstråling, mens emisjonsevnen i området for termisk stråling er lav, typisk $\varepsilon = 0.1$. Vi antar igjen at den eneste mekanismen for varmetap er stråling, og at baksiden av platen er isolert slik at vi bare har utstråling fra forsiden. I dette tilfellet vil platen fortsatt absorbere $W = 0.8$ kW/m², men emisjonsevnen for utstråling er bare $\varepsilon = 0.1$. Det gir

$$T_0 = \left(\frac{W}{\varepsilon\sigma} + T_1^4\right)^{1/4}$$

$$= \left(\frac{0.8 \times 10^3 \text{ W/m}^2}{0.1 \times 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)} + 250^4 \text{ K}^4\right)^{1/4} = 617 \text{ K} = 344\ ^\circ C$$

Hensikten med et selektivt belegg er å redusere strålingstapene, noe som de to likevektstemperaturene klart illustrerer.