



Prenos toplote

Načini prenosa toplote

(prevajanje, konvekcija, radiacija)

Toplotni menjalniki



James Prescott Joule (1818 - 1889)

Joule je demonstriral, da lahko vodo ogrejemo z opravljanjem mehanskega dela.

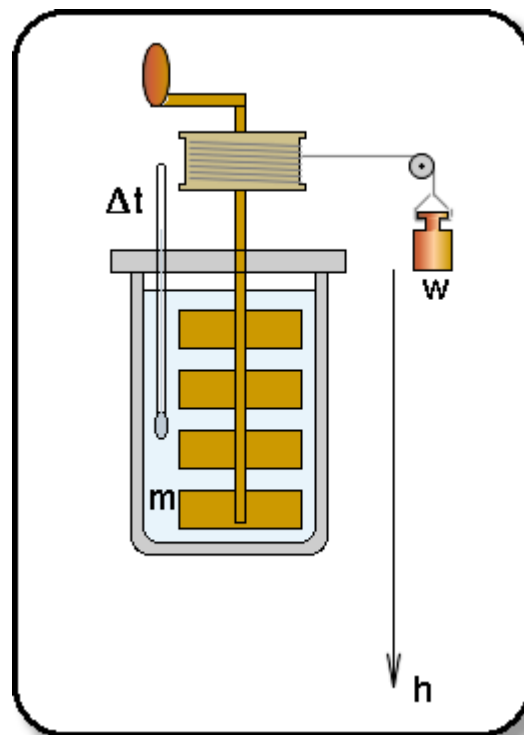
Temperatura 1 kg vode se dvigne za 1°C, če opravimo 4186 J dela.

(specifična toplotna kapaciteta)

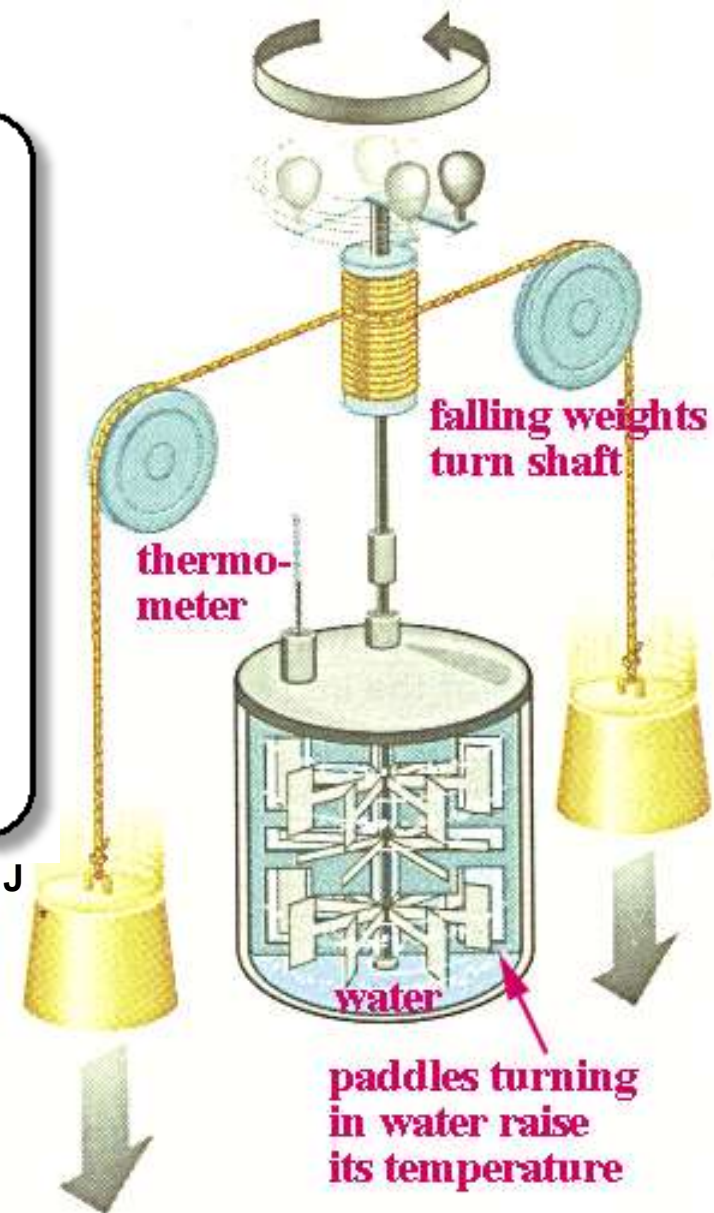
$$\text{Joule} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ kg m/s}^2 \cdot \text{m}$$

1 kalorija je toplotna energija, potrebna za ogretje 1 kg vode za 1°C

$$1 \text{ kalorija} = 4186 \text{ Joule}$$



Delo uteži na poti: $= w \cdot h = J$



The Calories in these items could:



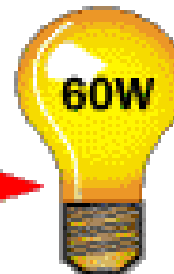
5 lbs of spaghetti



Brew a pot of coffee



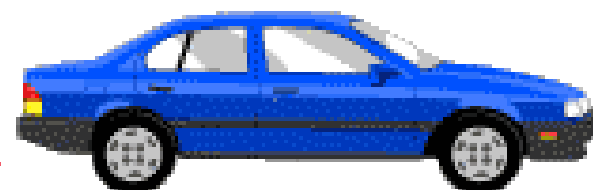
1 piece of cherry cheesecake



Light a bulb for 1.5 hours

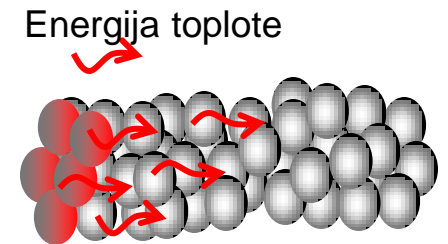
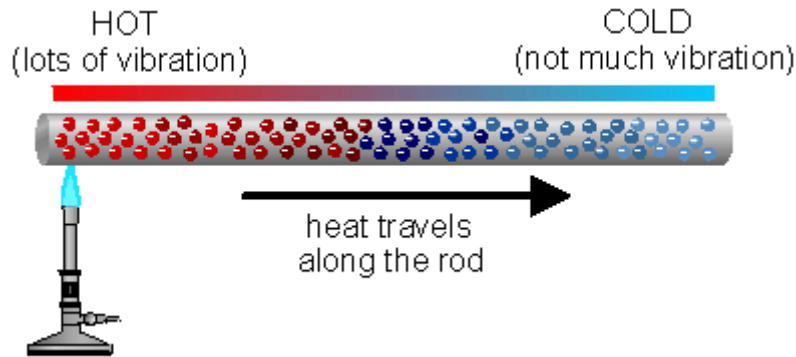


217 Big Macs



Drive a car 88 miles

Prenos toplote s prevajanjem - kondukcija

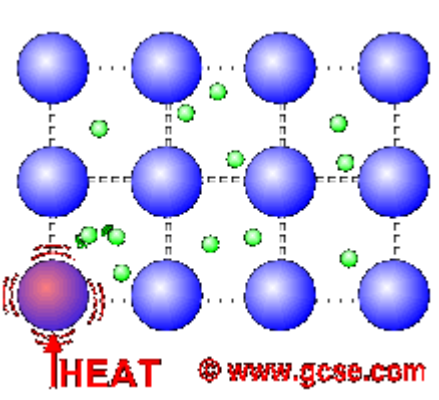


- Če obstaja **temperaturni gradient** v materialu se toplota pretaka neodvisno od tega ali se snov giblje
- **Trdne kovine** – prevajajo toploto zaradi gibanja ne-vezanih elektronov
- **Ostale trdne snovi in tekočine** – prevajanje toplote nastane zaradi prenosa kinetične energije posameznih molekul (ali atomov) vzdolž temperaturnega gradienta
- **Plini** – prevajanje toplote je posledica naključnega gibanja molekul, molekule se gibljejo iz toplega na hladno

Prenos toplote s prevajanjem

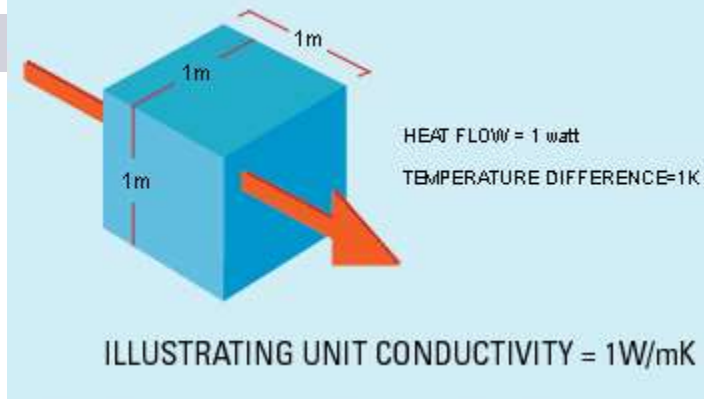
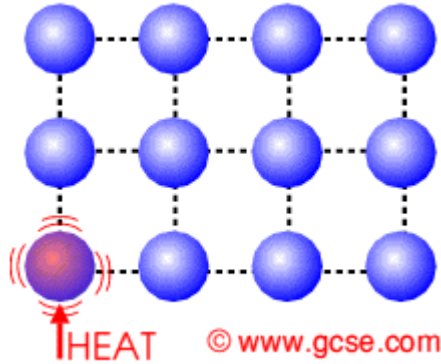
Prevodne snovi – kovine

Prosti elektroni prenašajo kinetično energijo po kovini

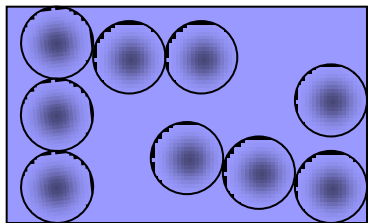


Ne-prevodne snovi

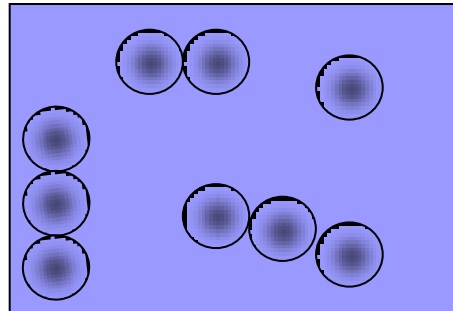
Nimajo prostih elektronov- kinetična energija se prenaša preko atomskih vibracij



Plini in tekočine (fluids)

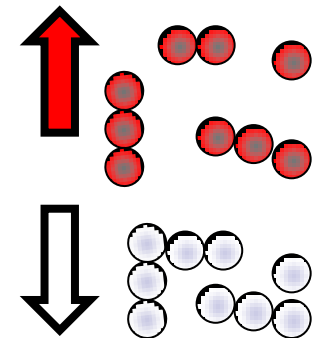


Ob dodajanju toplote se delci razprše – snov postane manj gosta

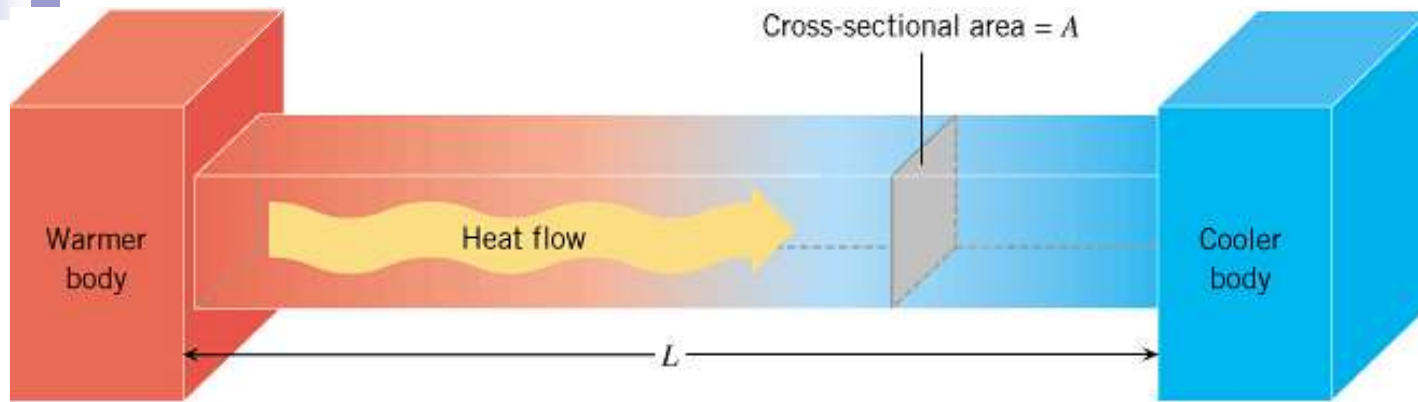


Hladnejše so tekočine in plini, bolj gosti so

snov	toplotna prevodnost λ : W / (m K)
baker	390
zlato	291
aluminij	240
železo	79
steklo	0.84
voda	0.60
les	0.10
zrak	0.023



Prenos toplote s prevajanjem



$$\frac{Q}{t} = q = \frac{\lambda \cdot A \cdot \Delta T}{L}$$

Q ... toplota (J)

Q/t (q) ... toplotni tok (J/s = W)

λ ... toplotna prevodnost (W/mK)

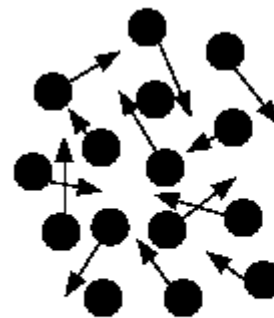
ΔT ... temperaturna razlika

A ... površina

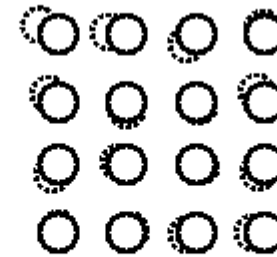
L dolžina m



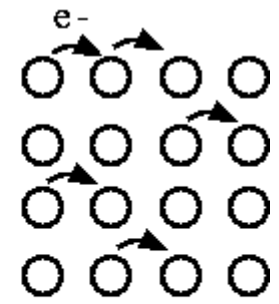
Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley



Fluids
(liquids and gases)



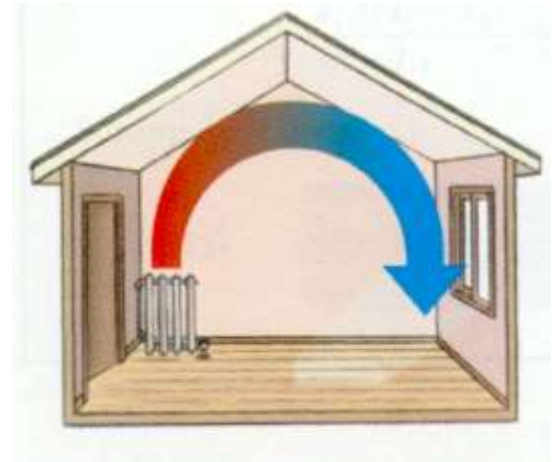
Solids



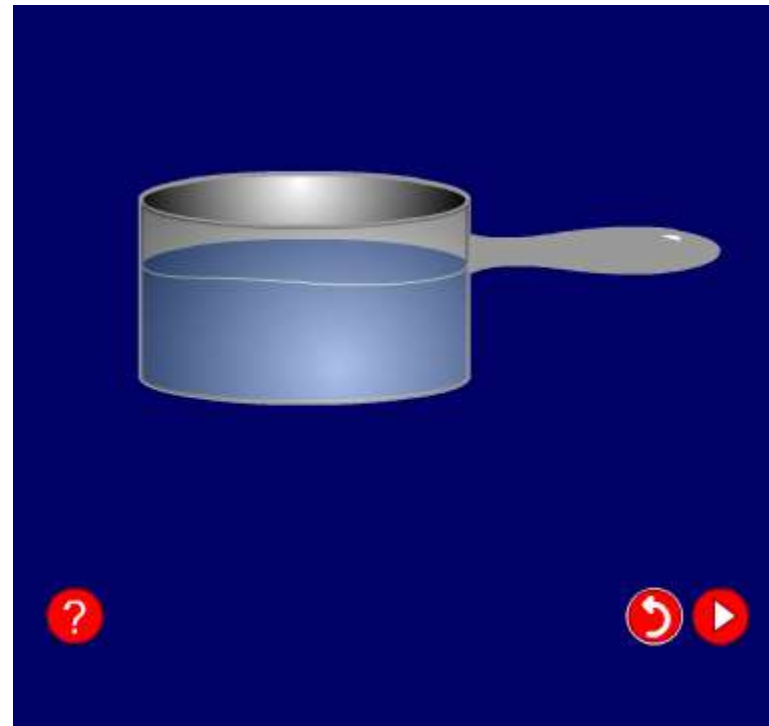
Solids



Konvekcija je proces pri katerem se toplota pretaka iz enega mesta na drugega z gibanjem fluida



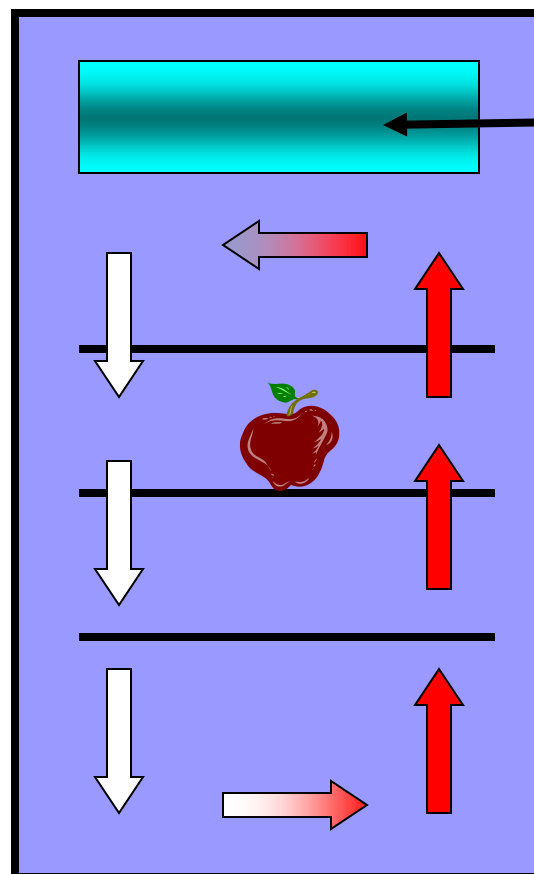
Tak način prenosa toplote se dogaja pri tekočinah in plinih.





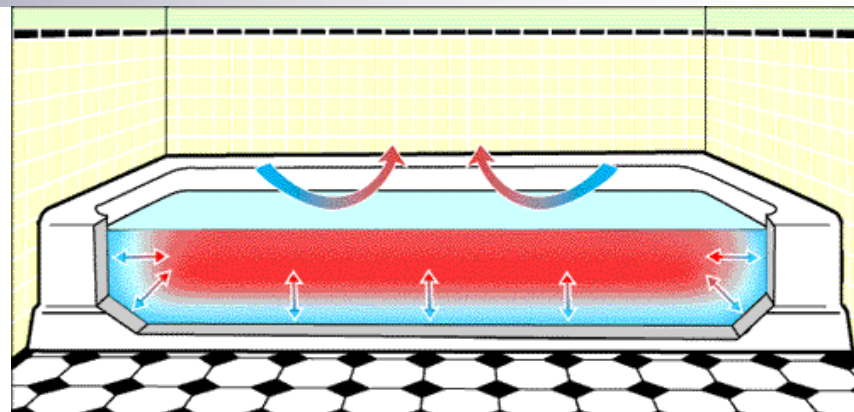
Zakaj je zamrzovalna cona na vrhu hladilnika?

Ob zamrzovalniku se zrak ohladi, postane gostejši (težji). Živila v hladilniku hladi na poti navzdol.



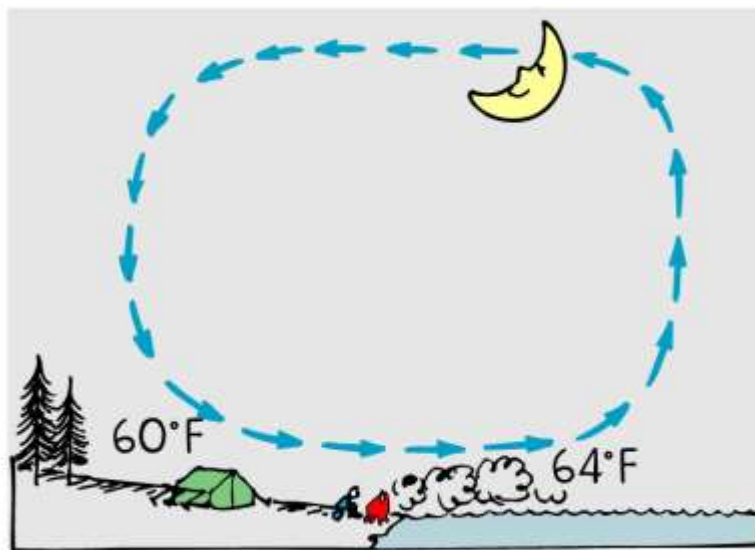
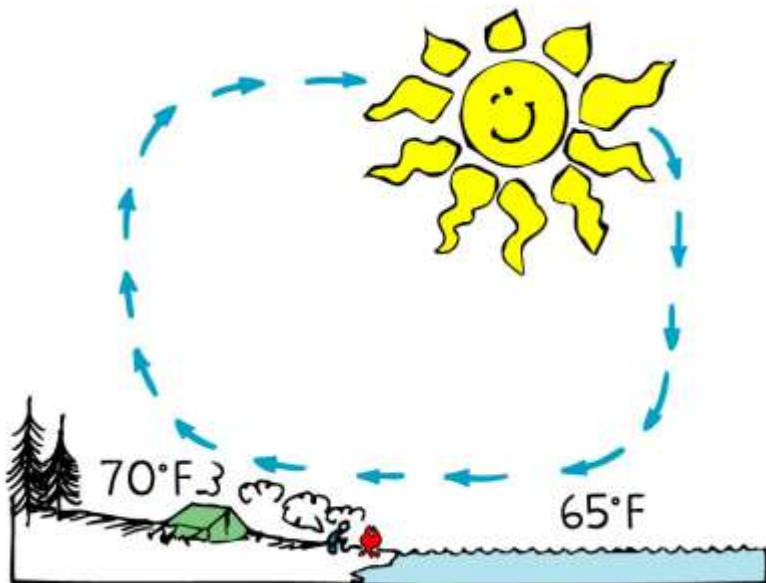
zamrzovalnik

Ker je toplejše na dnu, se topel zrak dviguje. Ustvari se konvekcijski tok.

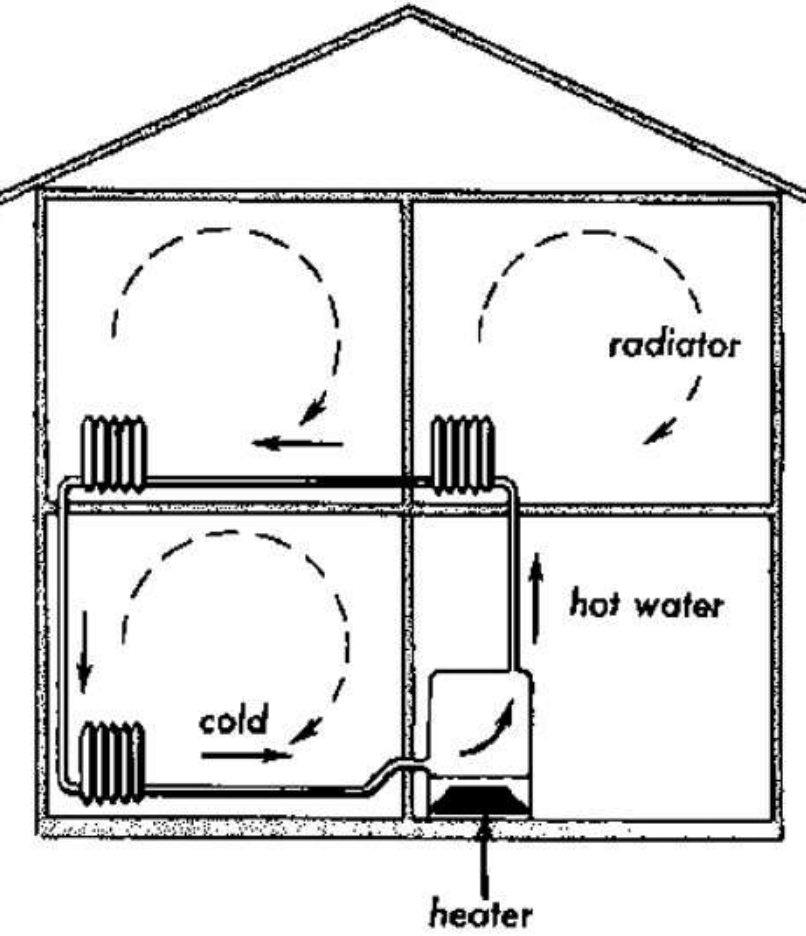
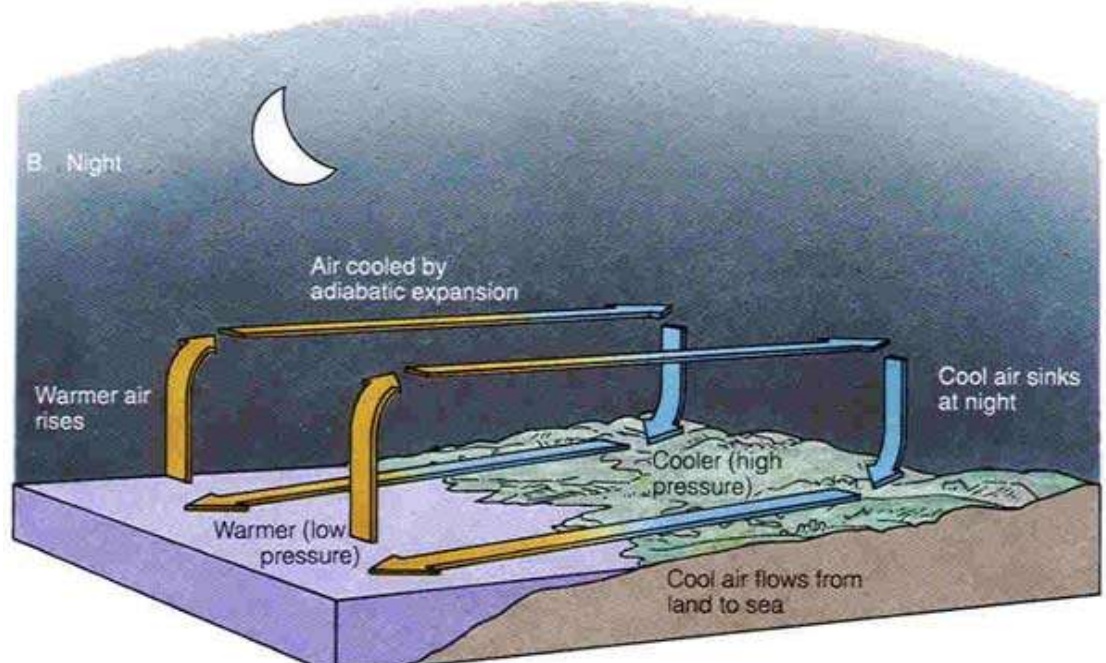
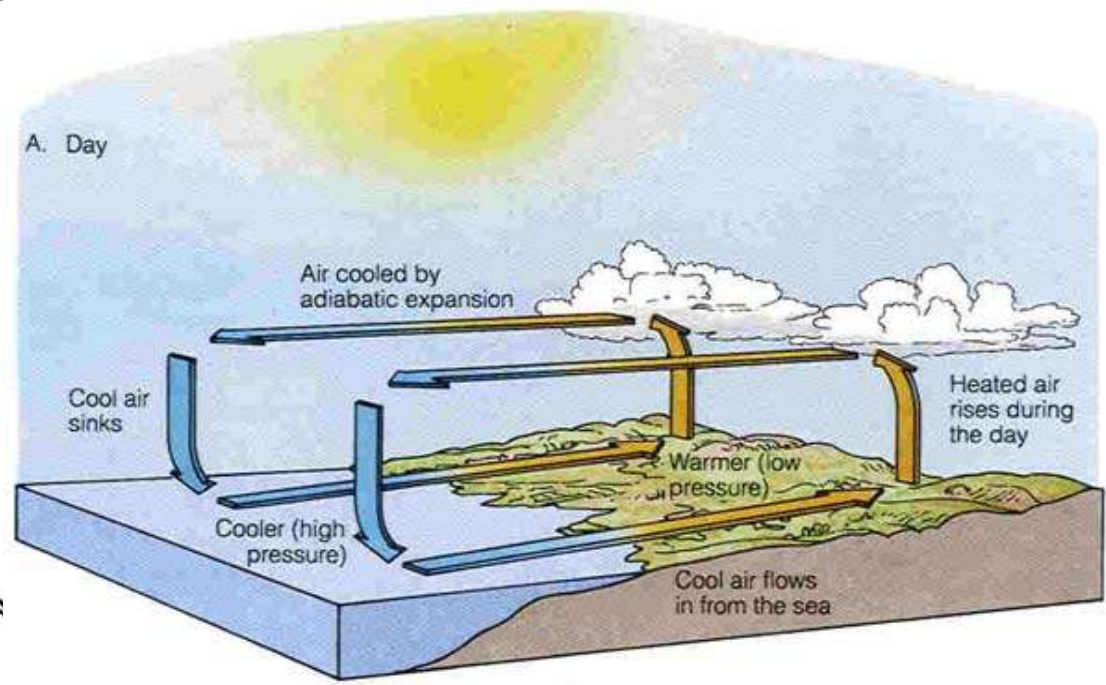


Ko se tekočina **ogreje** postane manj gosta (zato **lažja**) in se vzpenja **navzgor**, nadomesti jo hladnejša (**težja**) tekočina.

Enako se zgodi z ogretim zrakom. Topel zrak se dviguje, nadomesti ga hladnejši zrak.

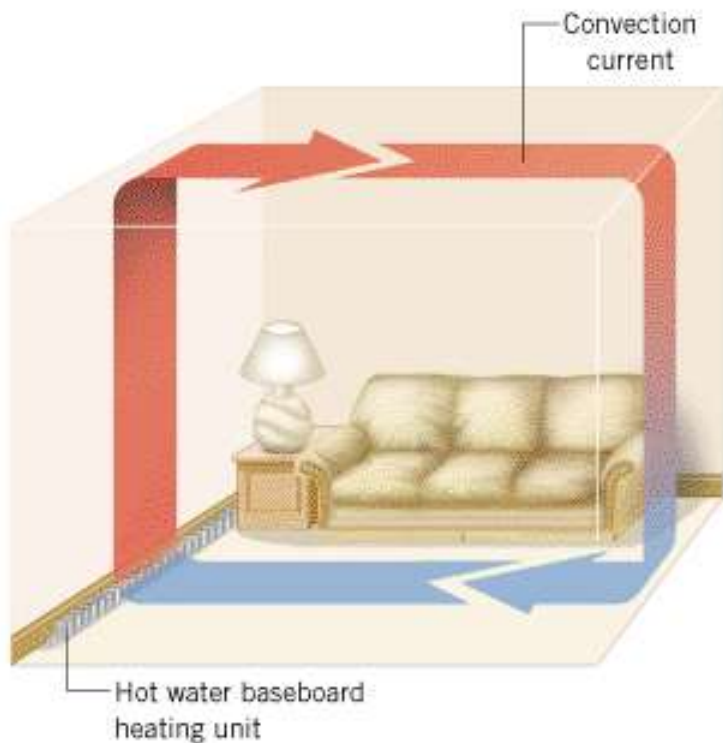


Prenos toplote s konvekcijo





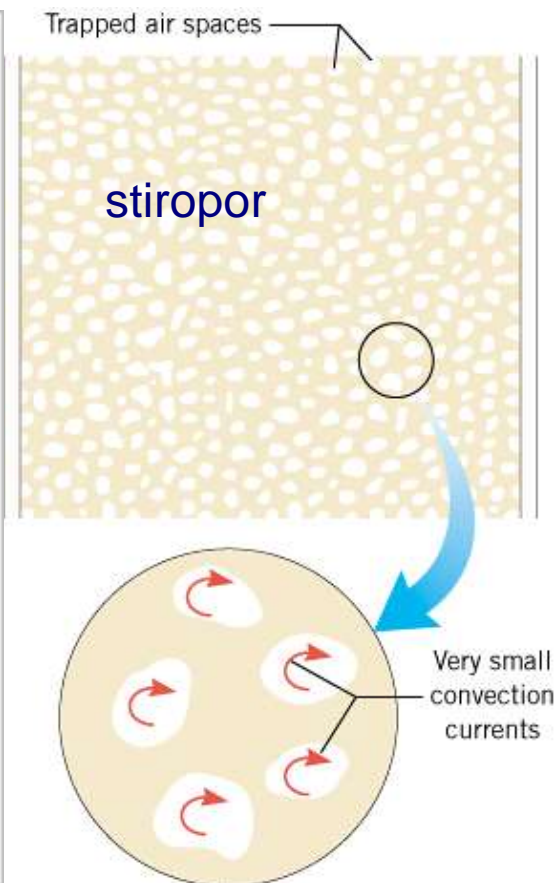
- Tok makroskopskih delcev tekočine ali plina zaradi termičnega gibanja in s seboj odnašajo določeno entalpijo (toplota)
- Obstaja le, ko delujejo na delec tekočine sile, ki se upirajo silam trenja, da obdrže delce tekočine ali plina, v gibanju(v toku).



(a)



(b)





Prenos toplote s konvekcijo

Naravna in prisilna konvekcija

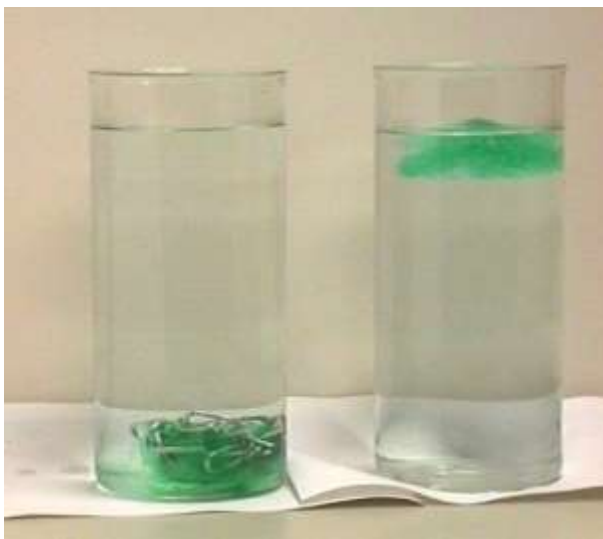
- **Naravna konvekcija** – tok tekočine ali plina je posledica sil vzgona, ki nastanejo zaradi razlike v gostoti fluida. Razlike v gostoti pa nastanejo zaradi razlik v temperaturi in posledično razliki v masi fluida.
- **Prisilna konvekcija** – tokovi fluida (plinov ali tekočin) se pojavijo ob vnosu mehanskega dela (črpalke, mešalniki). Črpalke v cevovodu ali mešala v mešalnikih ustvarijo tok tekočine, ki je neodvisen od razlike v gostoti tekočine.
- Prisilna konvekcija je odvisna od hidrodinamskih pogojev (laminarni, turbulentni tok)
 - Primer: tok tekočine preko ogrete cevi (toplotni menjalniki)

Eksperiment: konvekcija in prevajanje toplote

Dve čaši napolnimo s toplo vodo.

Prva čaša: dodamo obarvan led v katerega je ujeta veriga

Druga čaša: dodamo enak volumen obarvanega ledu



po 10 minutah

po 40 minutah

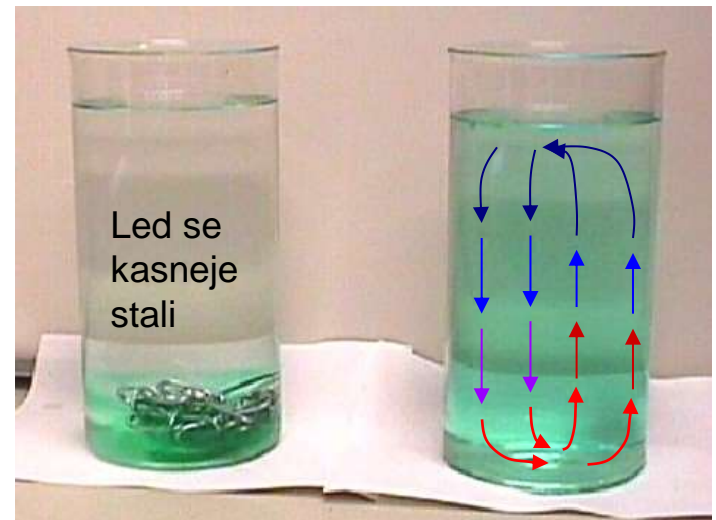
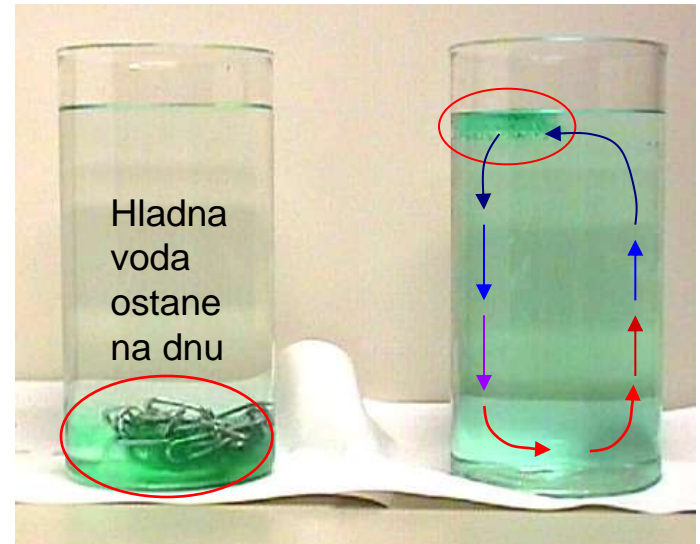
Led je lažji od vode – plava pri vrhu

Zaključek:

V tekočinah in plinih je konvekcija bolj učinkovit način prenosa toplote kot kondukcija (prevajanje). Razlika v učinkovitosti se kaže v očitni razliki v času potrebnem, da se led stali. Čeprav gre obeh primerih tudi za prevajanje toplote, se toplota učinkoviteje prenaša s konvekcijo.

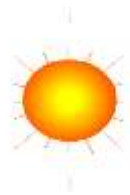
Led: lažji od vode

Topla voda: lažja od hladne vode (gostota)



Tretji način prenosa toplote je radiacija

Kako toplotna energija sonca doseže Zemljo?



Radiacija

?

Med Zemljo in soncem ni delcev, torej energija ne more potovati z prevajanjem ali z konvekcijo.

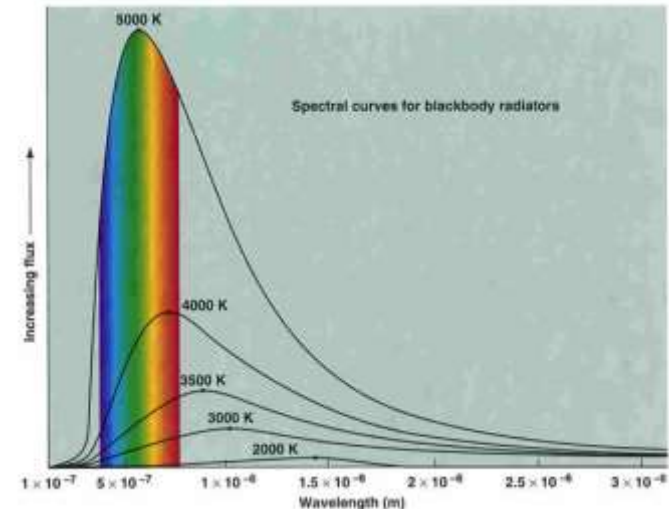


Radiacija je proces pri katerem se energija prenaša z elektromagnetnim valovanjem.

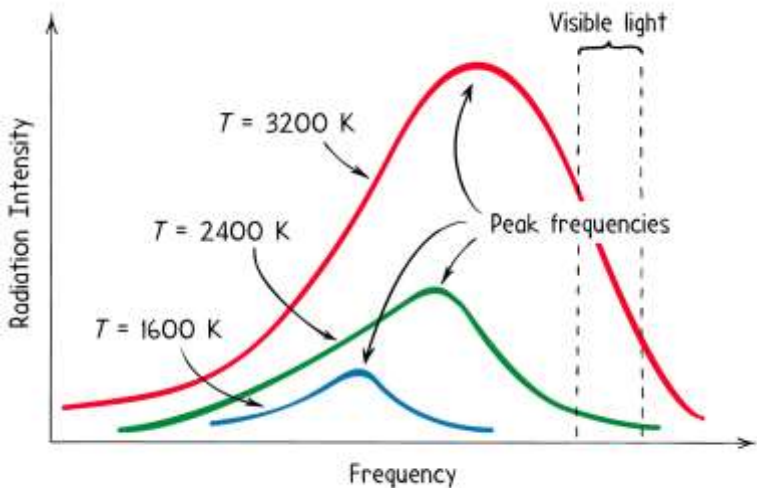
Prenos toplote z radiacijo se odvija tudi v vakuumu, ker elektromagnetno valovanje, ki je nosilec energije radiacije potuje tudi v praznem prostoru.

Radiacija potuje s hitrostjo svetlobe

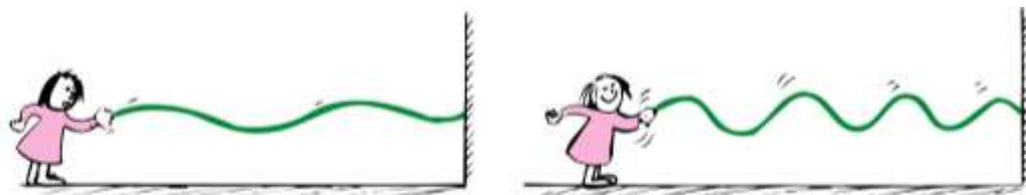
Pri prenosu toplote z radiacijo ni delcev kot nosilcev energije.



average frequency \propto absolute temperature



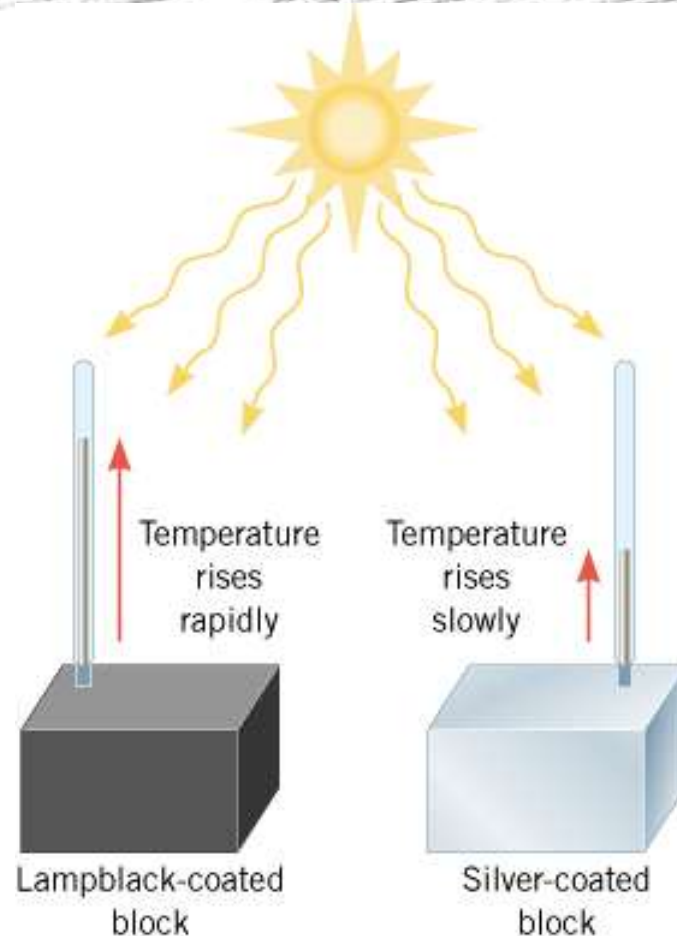
- energija se prenaša z elektromagnetnim valovanjem
- svetloba potuje z različnimi valovnimi dolžinami
- valovne dolžine so povezane s frekvenco valovanja.



Topel oz. vroč objekt emisira (oddaja) infrardečo radiacijo kot toplotno valovanje, ki se lahko absorbira (prejema) na drugem objektu, le ta se pri tem ogreje.

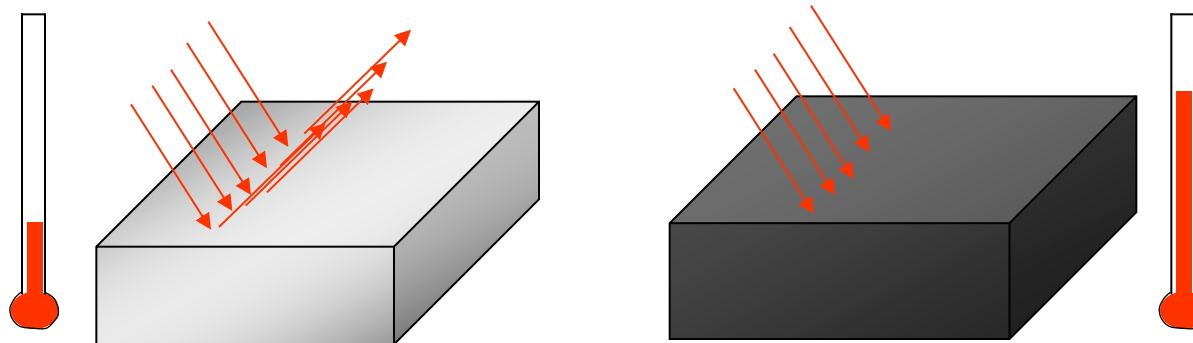
Pomembno je, da ima barva površine objekta odločilno vlogo pri hitrosti prenosa toplote z radiacijo.

Črno telo odlično absorbira energijo radiacije in jo tudi odlično emisira, pri vseh valovnih dolžinah



Snov (material), ki dobro absorbira svetlobno valovanje (črna) je tudi dober emitter (emisija= energije v okolico).

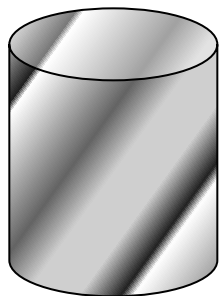
Nasprotno snov, ki slabo absorbira svetlobno valovanje (srebrna) jo tudi slabo emisira v okolico (slab emitter).



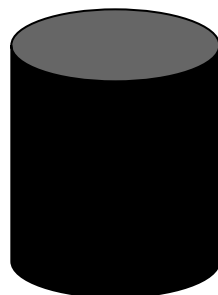
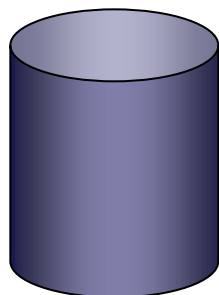
Katera od kovinskih kock se bo hitreje ogrela?

Če živite v mediteranski deželi, s kakšno barvo bi pobarvali svojo hišo? (svetlo ali temno)

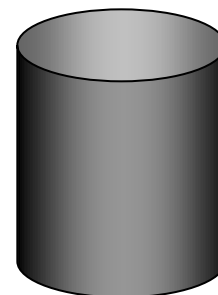




Kovina brez sijaja



Svetleča črna snov



Svetleča kovina

matirana črna snov

Emisijski poskus

Štiri sode napolnimo s toplo vodo. Kateri od sodov bo po 10 minutah vseboval najtoplejšo vsebino?

Sod iz svetleče kovine bo po 10 minutah najtoplejši, ker njegova svetleča kovinska površina odbija toploto radiacije nazaj v notranjost sode in se je manj izgubi v okolico. Sod iz mat. črne snovi bo najhladnejši ker najbolje emitira toploto radiacije.

Absorpcijski poskus

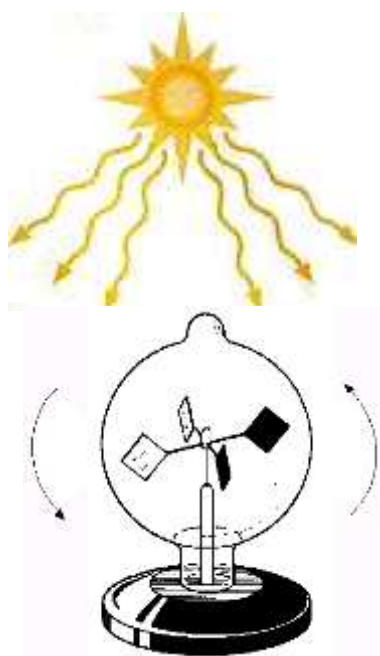
Štiri sode postavimo enako oddaljeno od vira toplote. V katerem od njih bo voda po 10 minutah najtoplejša?

V sodu iz mat črne snovi bo po 10 minutah voda najtoplejša, ker njegova površina najbolje absorbira toploto radiacije. V sodu iz svetleče kovine bo voda po 10 minutah najhladnejša, ker najslabše absorbira toploto radiacije.

Katera juha se bo hitreje ohladila?

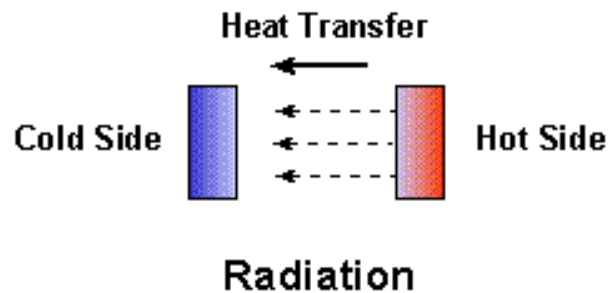
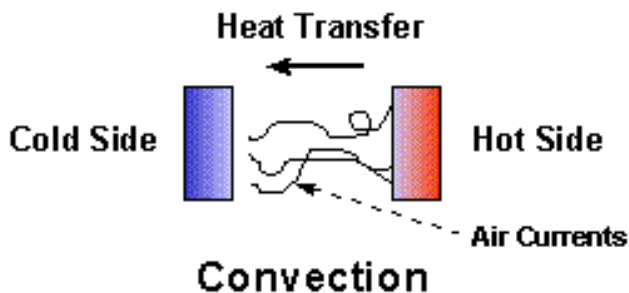
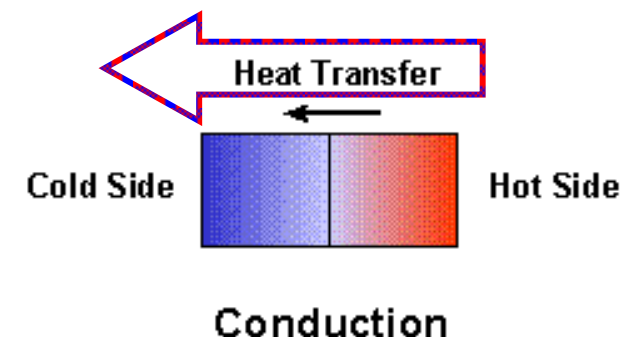


Primer: Ukvarjamo se z dostavo že pripravljenih živil. Ali bomo živila dostavljali v temno obarvani embalaži, ali v embalaži iz aluminijaste folije?



Načini prenosa toplote

2 zakon termodinamike: toplota potuje iz toplega na hladno



Prevajanje: učinkovit način pri trdnih snoveh. Odvija se na mikroskopski ravni delcev, molekul, atomov. Snovi morajo biti v direktnem kontaktu. Hitrost prenosa toplote je odvisna od lastnosti snovi, od difuzije (kako hitro se preko mikroskopskih elementov lahko giblje energija).

Konvektivni prenos toplote je posledica makroskopskega gibanja delcev tekočine ali plina. Je učinkovit način prenosa toplote v plinih in tekočinah. Naravna konvekcija: posledica razlik v gostoti fluida zaradi spremembe temperature. Prisilna konvekcija: še učinkovitejša gibanje tekočine ali plina povzroča mehanski vnos (črpalke, mešala)

Radiacija: prenos toplote z elektromagnetnim valovanjem. Pri prenosu toplote ni delcev. Toplota potuje s hitrostjo svetlobe različnih valovnih dolžin. Učinkovit način prenosa toplote iz snovi z zelo visoko temperaturo (sonce, ogenj). Hitrost prenosa toplote je odvisna od barve površine. (absorpcija, emisija)

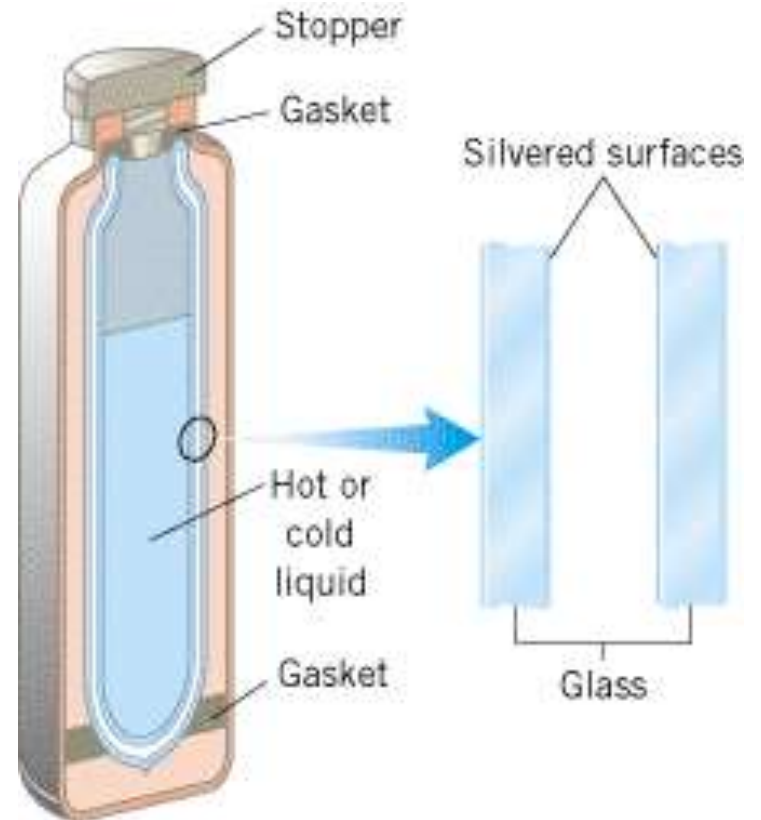
Termos steklenica

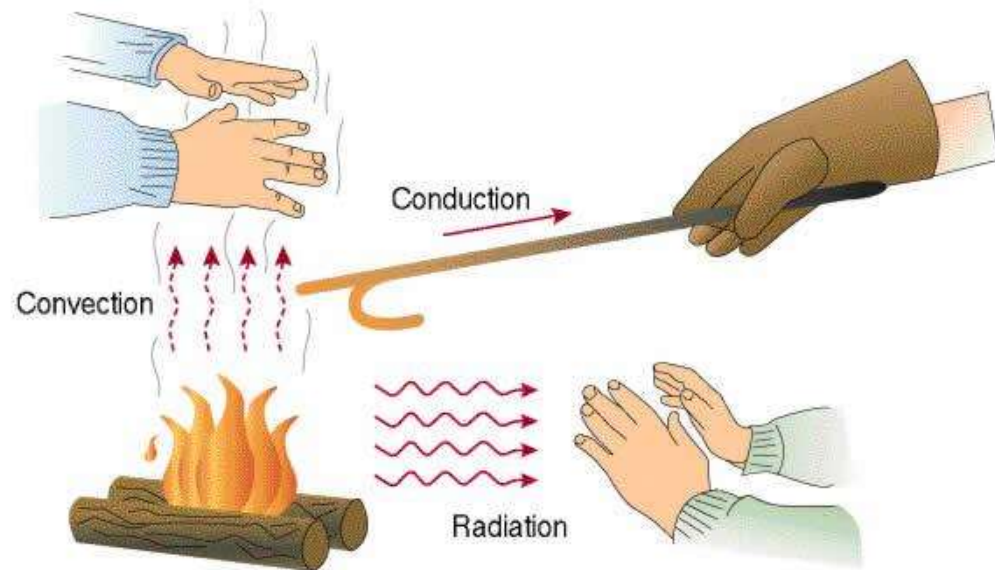
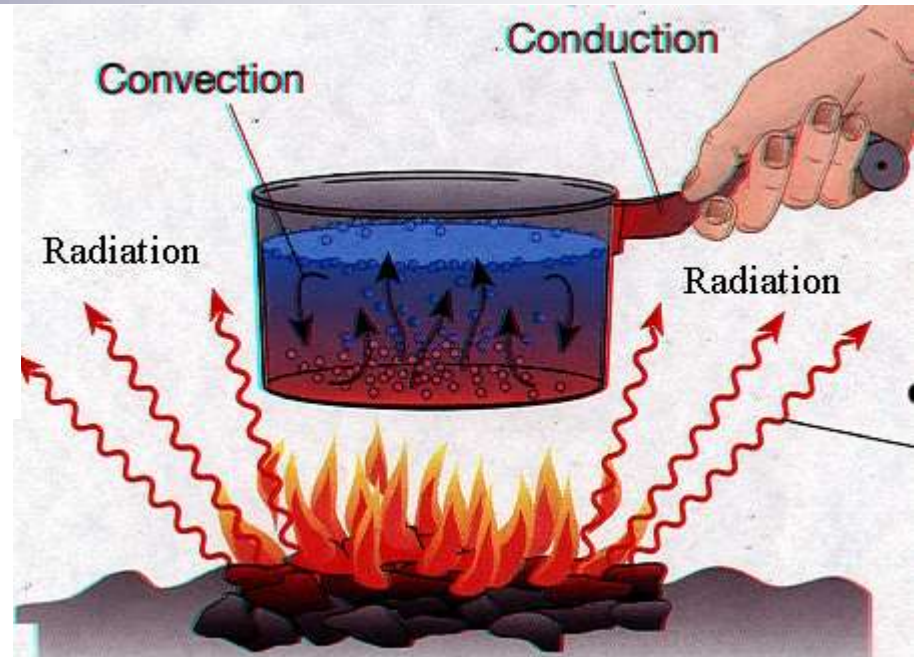
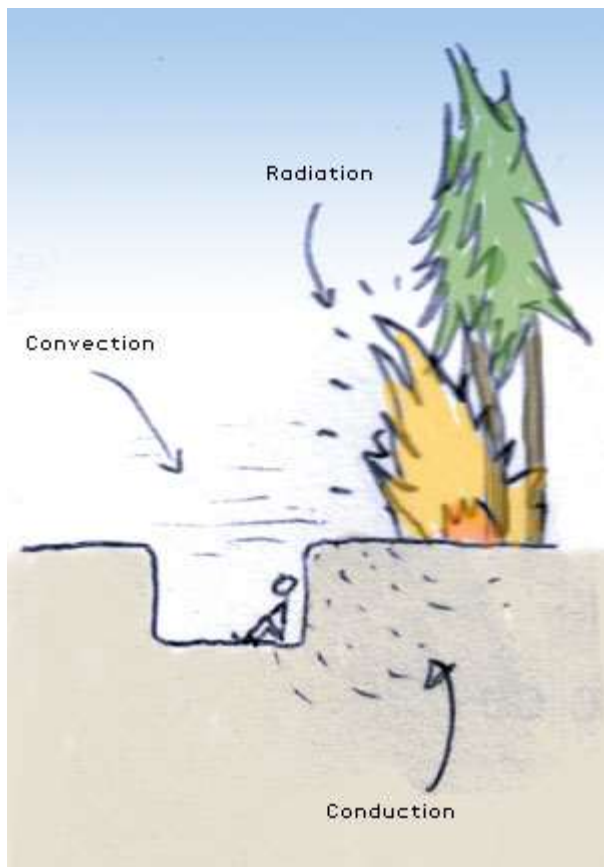
Termos steklenica minimizira izmenjavo toplote z okolico zaradi prevajanja, konvekcije in radiacije.

Zamašek- zmanjša izmenjavo toplote zaradi prevajanja.

Dvojna steklena posoda, katere vmesni prostor ima izsesan zrak zmanjša izmenjavo toplote zaradi konvekcije in prevajanja.

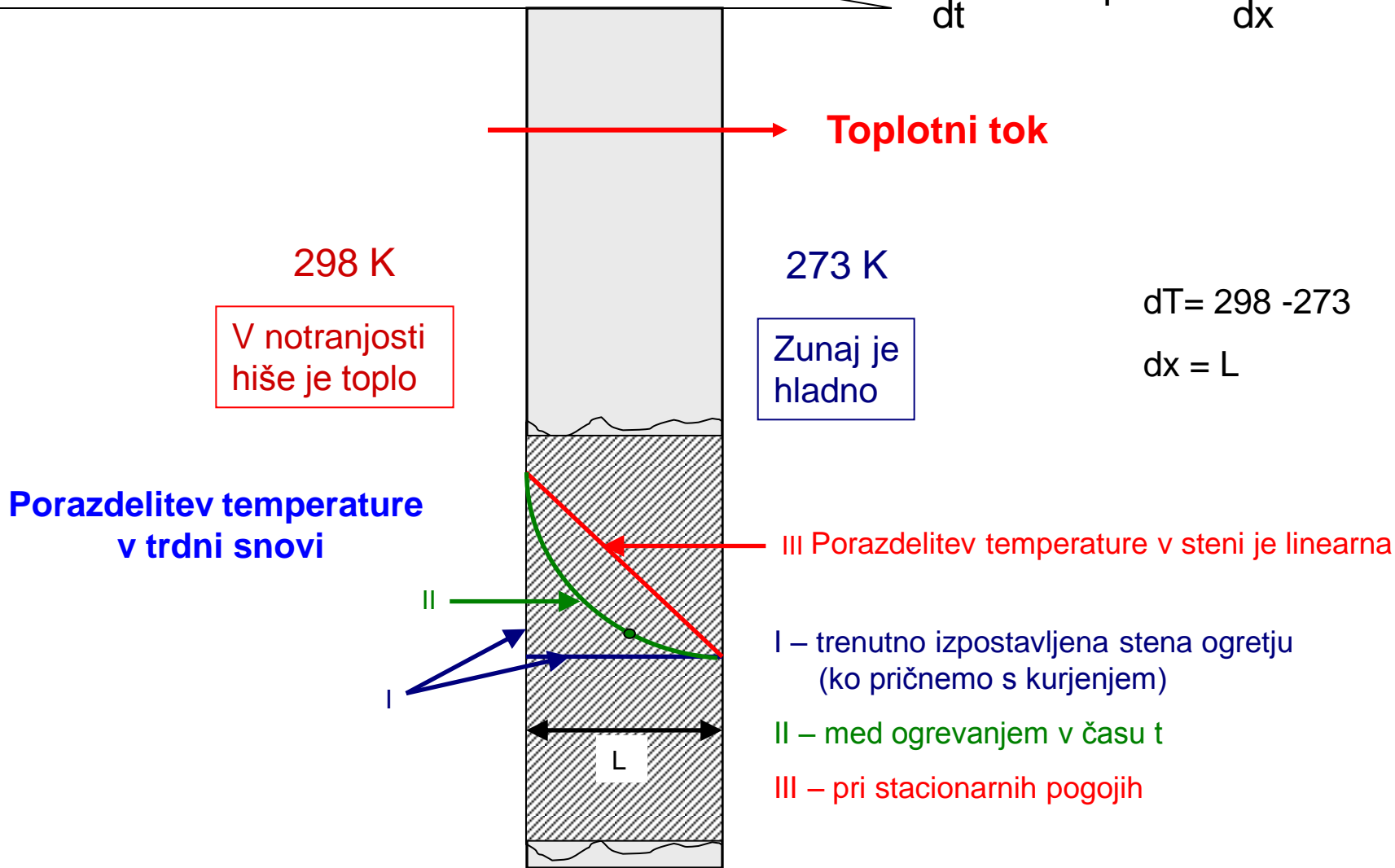
Posrebrena površina odbija večino energije radiacije, ki bi se drugače izmenjala z okolico, nazaj v steklenico.





Prenos toplote s prevajanjem v ravni steni:

$$\frac{dQ}{dt} = \dot{Q} = q = -\lambda A \frac{dT}{dx} = \text{const.}$$



STACIONARNO PREVAJANJE

(ni spremembe s časom)

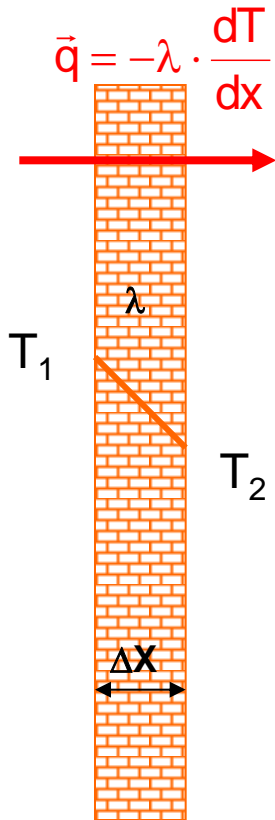
Fourier – jev zakon (eno-dimenzionalno):

prevajanje skozi steno, katere debelina je veliko manjša od ostalih dimenzij. Kadar so pogoji na obeh straneh stene neodvisni od y in z bo temperatura v steni samo funkcija x

$$\frac{q}{A} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}$$

$$\bar{q} = \frac{\text{energija toplote}}{\text{površina} \cdot \text{čas}}$$

Odgovarjajoči izraz za toplotni fluks (q)?



Toplotni upor (R – resistance)

Pri računanju toplotnih tokov je smiselno definirati toplotni upor (R),

$$q = \frac{A \cdot \Delta T}{R}$$

Primerjava gornje enačbe s Fourierjevim zakonom pokaže:

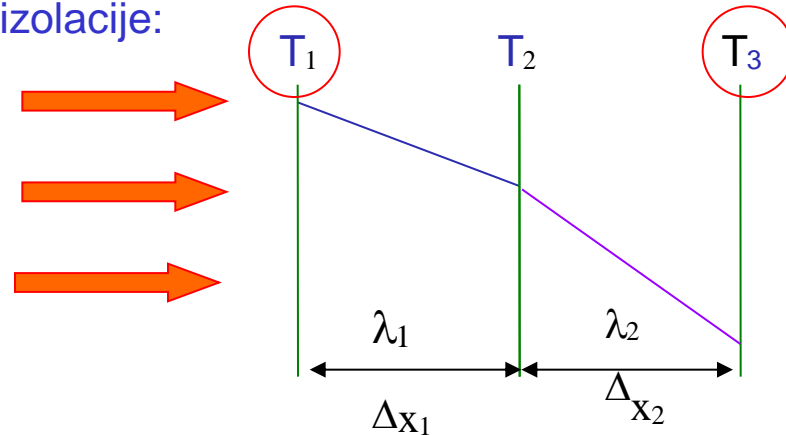
$$q = \frac{\lambda \cdot A}{\Delta x} \cdot (T_1 - T_2)$$

Toplotni upor R je definiran kot:

$$R = \frac{\Delta x}{\lambda}$$

Toplotni upor v sestavljeni steni

Primer : stena sestavljena iz opeke in izolacije:



$$q_1 = \frac{\lambda_1 \cdot A}{\Delta x_1} (T_1 - T_2)$$

$$q_2 = \frac{\lambda_2 \cdot A}{\Delta x_2} (T_2 - T_3)$$

$$q = q_1 = q_2$$

$$+ \left\{ \begin{array}{l} q \cdot \frac{\Delta x_1}{\lambda_1 \cdot A} = (T_1 - T_2) \\ q \cdot \frac{\Delta x_2}{\lambda_2 \cdot A} = (T_2 - T_3) \end{array} \right.$$

$$q \cdot \left(\frac{\Delta x_1}{\lambda_1 \cdot A} + \frac{\Delta x_2}{\lambda_2 \cdot A} \right) = (T_1 - T_3)$$

$$\frac{\lambda_1 \cdot A}{\Delta x_1} (T_1 - T_2) = \frac{\lambda_2 \cdot A}{\Delta x_2} (T_2 - T_3)$$

$$R = \frac{\Delta x}{\lambda}$$

$$(T_1 - T_3) = \frac{q}{A} \cdot (R_1 + R_2)$$

Temperaturna porazdelitev pri prenosu toplote med dvema tekočinama

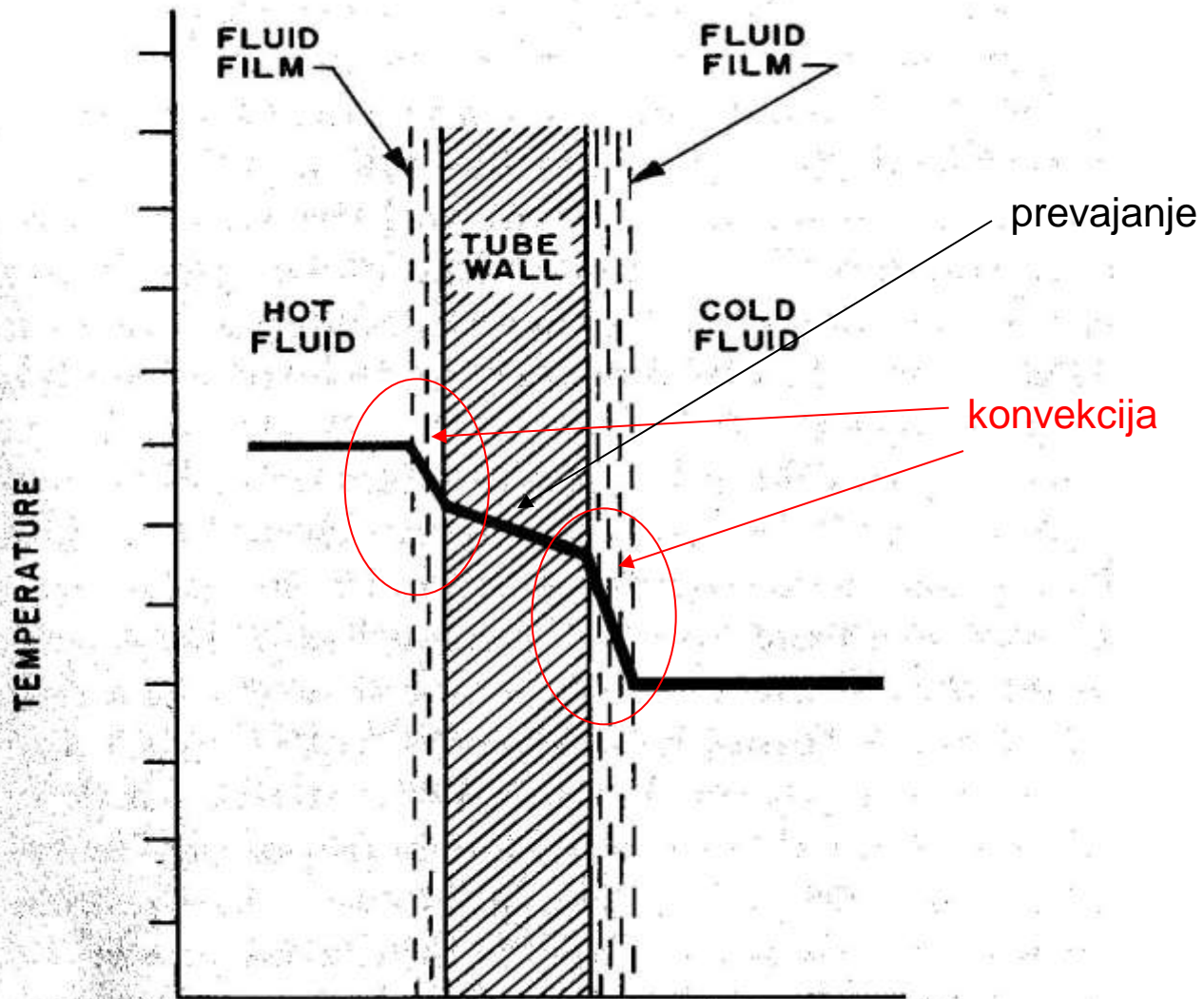
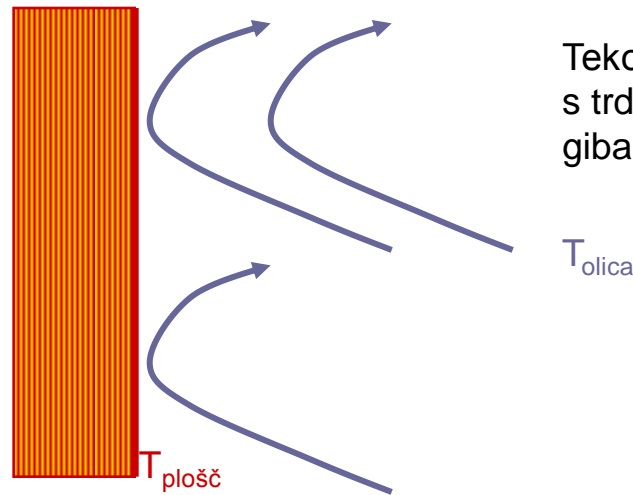


Figure 2-8. Effect of fluid film on heat transfer.

Konvekcija ob ravni plošči

Kadar so trdne snovi izpostavljene fluidom (plinom ali tekočinam) in obstaja temperaturna razlika med njimi, vedno pride do toplotnega toka zaradi konvekcije.

Konvektivni prenos toplote opiše Newtonov zakon hlajenja:

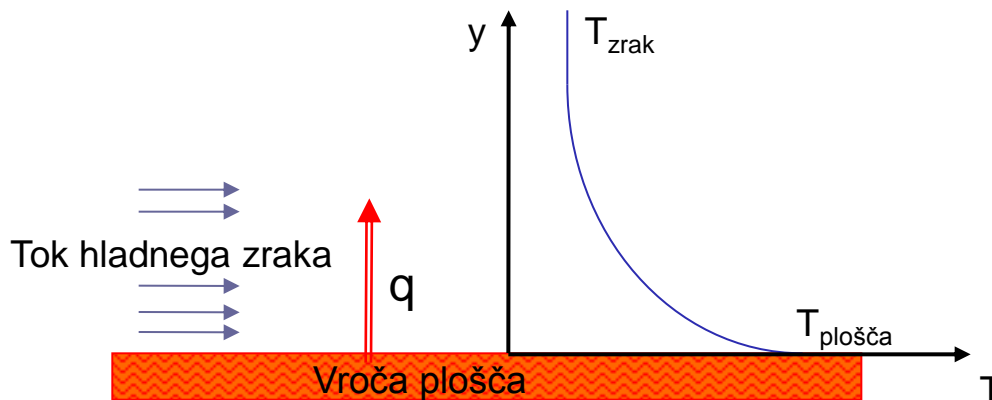


Tekočine in plini so ob stiku s trdno ploskvijo pogosto v gibanju

$$q = h \cdot A \cdot (T_1 - T_2)$$

h = koeficient toplotne prestopnosti W/m^2K
(function of everything)

$$\bar{q} = h \cdot (T_{plošč.} - T_{zrak})$$



Podobno kot pri prenosu toplote s prevajanjem, lahko vpeljemo konvektivni toplotni upor:

$$q = (T_1 - T_2) \cdot A / R \longrightarrow R = \frac{1}{h}$$

Večja je toplotna prestopnost (h) - manjši je toplotni upor R

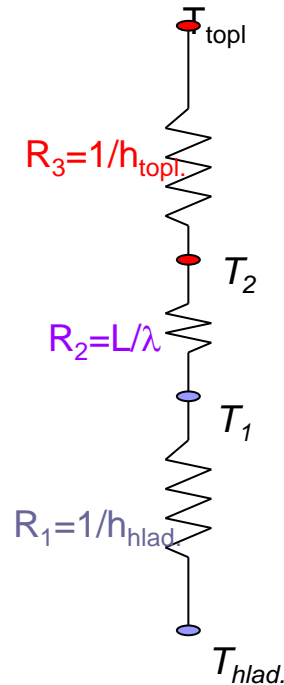
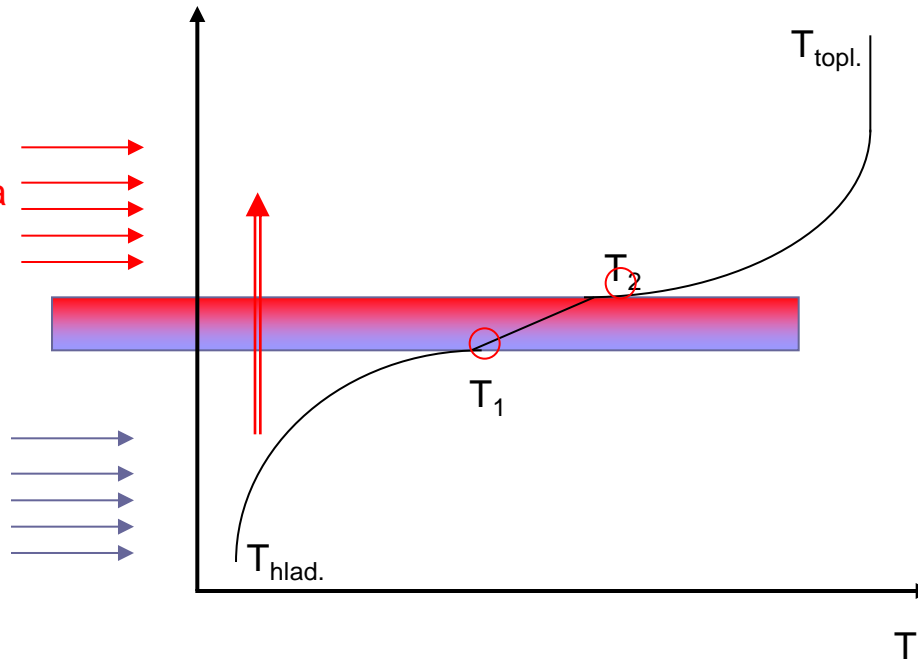
Prenos toplote ob ravni plošči pri konvekciji in prevajanju

$$q = \frac{\Delta T \cdot A}{R_{\text{tot}}}$$

$$q = \frac{(T_{\text{top}} - T_{\text{hlad}}) \cdot A}{\left(\frac{1}{h_{\text{top}}} + \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{h_{\text{hlad}}} \right)}$$

Tok hladnega zraka

Tok toplega zraka



$$q = \frac{(T_1 - T_{\text{hlad}}) \cdot A}{\left(\frac{1}{h_{\text{hlad}}} \right)}$$

(izračun T_1)

$$q = \frac{(T_2 - T_{\text{hlad}}) \cdot A}{\left(\frac{L}{\lambda} + \frac{1}{h_{\text{hlad}}} \right)}$$

(izračun T_2)

$$q = U \cdot A (T_{\text{topl.}} - T_{\text{hlad.}})$$

U ... toplotna prehodnost ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

$$U = \frac{1}{\sum R_i}$$

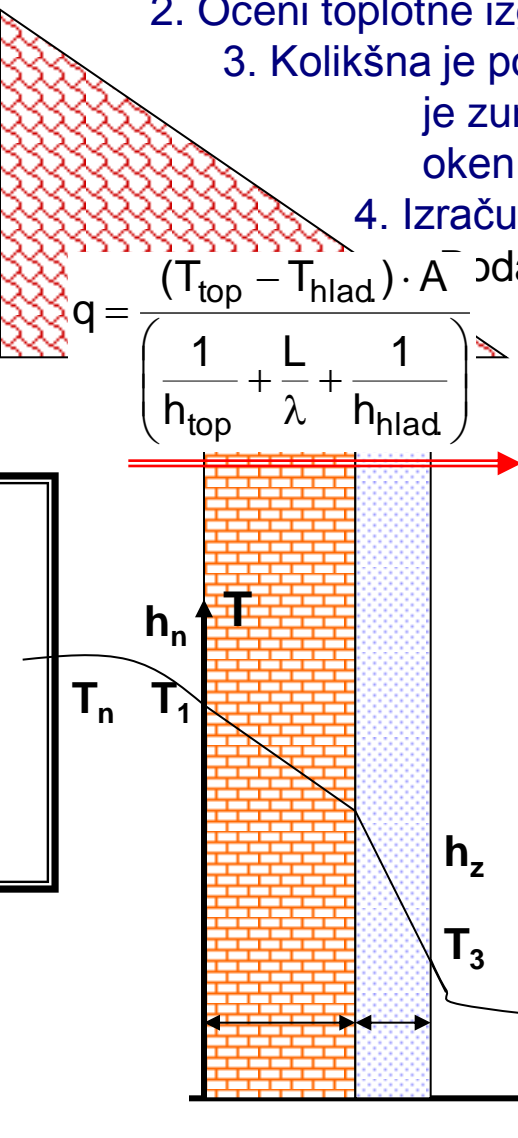
Skupna toplotna upornost je vsota toplotnih upornosti

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{\text{topl.}}} + \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{h_{\text{hlad}}}$$

Primer 1: Toplotne izgube s prevajanjem in konvekcijo:

Stena hiše je sestavljena iz debelega opečnega zidu 0.3 m in 0.1 m izolacije.

- Ocenite toplotno prehodnost med zunanjim in notranjim zrakom, ki kroži v prostoru
- Oceni toplotne izgube na m² hiše če je zunanja temperatura -20°C in notranja 20°C.
- Kolikšna je potrebna moč peči za centralno kurjavo, ki mora vzdrževati 20°C v hiši, če je zunanja temp. -20. Vse zidne površine hiše merijo 300 m², izgube preko oken pa znašajo 20% izgub preko zidov.
- Izračunaj porazdelitev temperature v sestavljeni steni.



$$q = \frac{(T_{\text{top}} - T_{\text{hlad}}) \cdot A}{\left(\frac{1}{h_{\text{top}}} + \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{h_{\text{hlad}}} \right)}$$

Podatki: λ_1 (opeke) = 0.6 W/m²K, λ_2 (izolacije) = 0.2 W/m²K, $h_z = h_n = 20$ W/m²K

1. Toplotna prehodnost: $\frac{1}{U} = \frac{1}{h_n} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{1}{h_z}$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{20} + \frac{0.3}{0.6} + \frac{0.1}{0.2} + \frac{1}{20} = 1.1 \quad U = 1/1.1 = 0.909 \text{ W/m}^2\text{K}$$

2. Toplotne izgube:

top fluks = $q/A = U \cdot (T_z - T_n) = 0.909 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot (20 - (-20)) = 36.36 \text{ W/m}^2$

3. Moč peči:

$$q = U \cdot A \cdot (T_{\text{top}} - T_{\text{hlad}})$$

$$q = 0.909 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 300 \text{ m}^2 \cdot (20 - (-20))\text{K} = 10908 \text{ W}$$

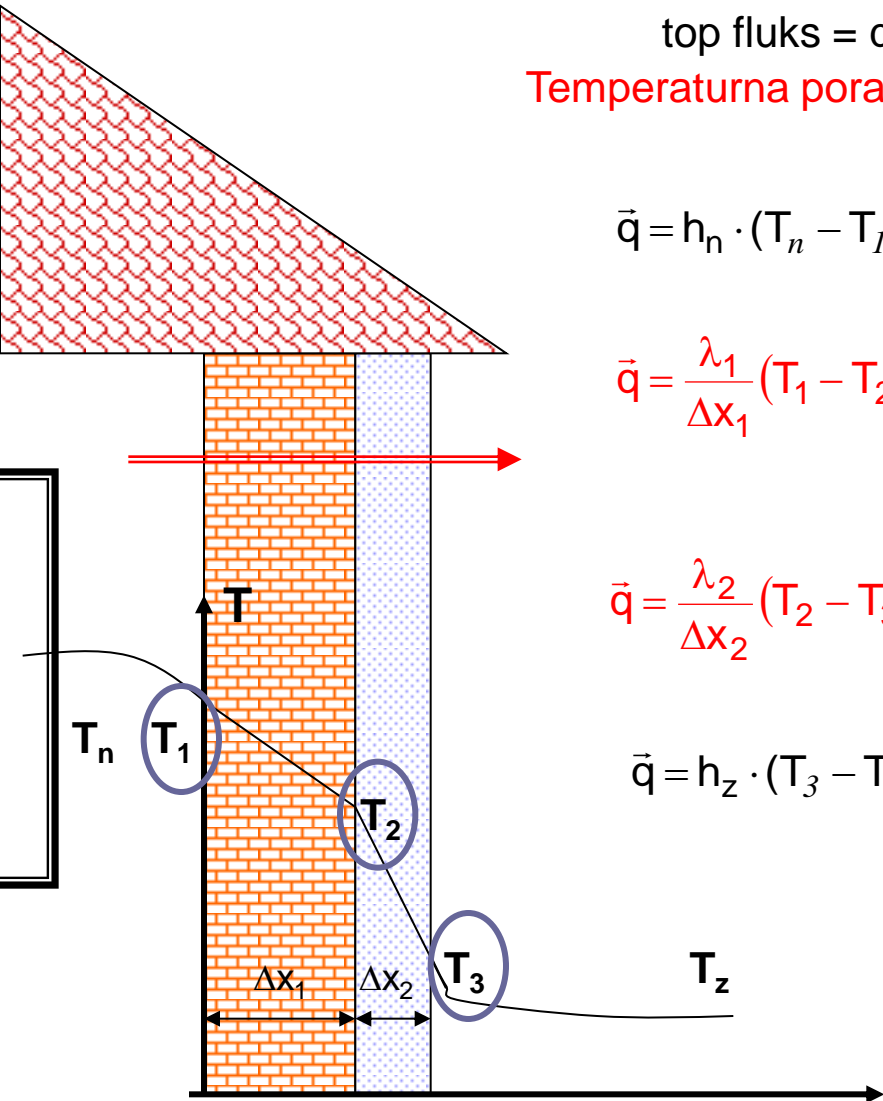
20% več izgub zaradi oken: $10908 \text{ W} \cdot 1.2 = 13089.6 \text{ W}$

Primer 1: Toplotne izgube s prevajanjem in konvekcijo:

$$\lambda_1 \text{ (opeke)} = 0.6 \text{ W/m}^2\text{K}, \lambda_2 \text{ (izolacije)} = 0.2 \text{ W/m}^2\text{K} \quad h_z = h_n = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\text{top fluks} = q/A = 36.36 \text{ W/m}^2$$

Temperaturna porazdelitev v steni:



$$\bar{q} = h_n \cdot (T_n - T_1)$$

$$T_1 = T_n - \frac{\bar{q}}{h_n} = 20 - \frac{36.36}{20} = 18.18^\circ \text{C}$$

$$\bar{q} = \frac{\lambda_1}{\Delta x_1} (T_1 - T_2)$$

$$T_2 = T_1 - \frac{\bar{q} \cdot \Delta x_1}{\lambda_{\text{OPEK}}} = 18.18 - \frac{36.36 \cdot 0.3}{0.6} = 0^\circ \text{C}$$

$$\bar{q} = \frac{\lambda_2}{\Delta x_2} (T_2 - T_3)$$

$$T_3 = T_2 - \frac{\bar{q} \cdot \Delta x_2}{\lambda_{\text{IZOL}}} = 0 - \frac{36.36 \cdot 0.1}{0.2} = -18.18^\circ \text{C}$$

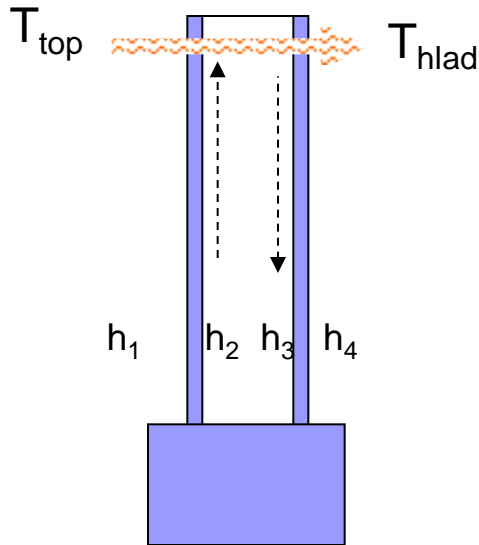
$$\bar{q} = h_z \cdot (T_3 - T_z)$$

$$T_3 = \frac{\bar{q}}{h_z} + T_z = \frac{36.36}{20} + (-20) = -18.18^\circ \text{C}$$

Primer 2: Približne izgube na dvojnem oknu

Oceni toplotne izgube preko standardnega okna z dvojno zasteklitvijo ob 2.5 mm debelih steklih.

Podatki iz tabel: $\lambda(\text{zrak}): 0.03 \text{ W/mK}$; $\lambda(\text{steklo}): 0.9 \text{ W/mK}$; $h_1=h_4 = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$; $h_2=h_3= 10 \text{ W/m}^2\text{K}$



$$q = \frac{(T_{\text{top}} - T_{\text{hlad.}}) \cdot A}{\left(\frac{1}{h_1} + \frac{L_1}{\lambda_s} + \frac{1}{h_2} + \frac{L_2}{\lambda_z} + \frac{1}{h_3} + \frac{L_3}{\lambda_s} + \frac{1}{h_4} \right)}$$

Toplotni prestopnosti med stekloma sta manjši – manjša cirkulacija zraka zaradi konvekcije. Ker zrak ne miruje med stekloma, je konvekcija prevladujoč način prenosa toplote; $\lambda(\text{zrak}): 0.03 \text{ W/mK}$ bi upoštevali če bi zrak miroval.

Toplotne izgube izrazimo s toplotno prehodnostjo

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_1} + \frac{L_1}{\lambda_s} + \frac{1}{h_2} + \frac{L_2}{\lambda_z} + \frac{1}{h_3} + \frac{L_3}{\lambda_s} + \frac{1}{h_4} \right)}$$

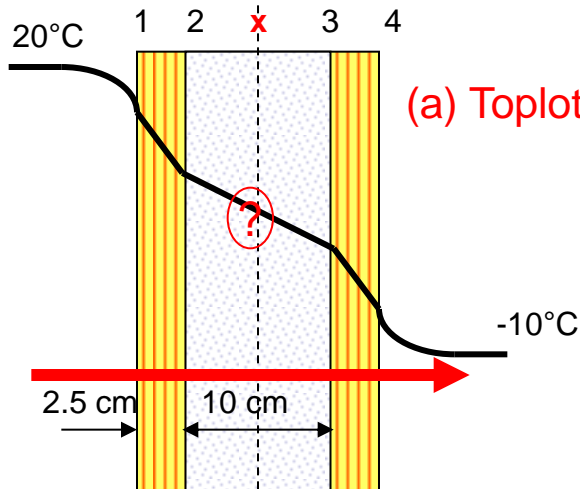
$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{20} + \frac{2.5 \cdot 10^{-3}}{0.9} + \frac{1}{10} + \frac{L_2}{\lambda_z} + \frac{1}{10} + \frac{2.5 \cdot 10^{-3}}{0.9} + \frac{1}{20} \right)} = 3.3 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Če bi zrak miroval, bi bile toplotne izgube mnogo manjše: $\frac{1}{U} \approx \frac{\Delta x}{\lambda_s} = \frac{0.05}{0.03}$ in $U = 0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$

Primer 3: debelina izolacije

Stena montažnega skladišča je sestavljena iz dveh 2.5 cm debelih slojev opaža, vmes je 10 cm stiropora. Izračunaj toplotni fluks, če je T_n 20°C in T_z -10 °C. Določi temperaturo v sredini izolacije in debelino izolacije, da se toplotni fluks zmanjša na polovico.

Podatki iz tabel: $\lambda_{(\text{stiropor})}$: 0.05 W/mK; $\lambda_{(\text{les})}$: 0.2 W/mK; $h_n=5$ W/m²K; $h_z=20$ W/m²K



(a) Toplotni fluks in temperatura v sredini izolacije:

$$\bar{q} = \frac{(T_{\text{top}} - T_{\text{hlad}})}{\left(\frac{1}{h_n} + 2 \cdot \frac{L_l}{\lambda_l} + \frac{L_s}{\lambda_s} + \frac{1}{h_z} \right)}$$

$$\bar{q} = \frac{(20 + 10)}{\left(\frac{1}{5} + 2 \cdot \frac{0.025}{0.2} + \frac{0.1}{0.05} + \frac{1}{20} \right)} = \frac{30}{2.5} = 12 \text{ W/m}^2$$

$$\bar{q} = h_n \cdot (T_n - T_1)$$

$$\bar{q} = \frac{\lambda_l}{L_l} (T_1 - T_2)$$

$$\bar{q} = \frac{\lambda_s}{L_s} (T_2 - T_3)$$

$$\bar{q} = \frac{\lambda_l}{\Delta L_l} (T_3 - T_4)$$

$$\bar{q} = h_z \cdot (T_4 - T_z)$$

$$\bar{q} = \frac{(T_{\text{top}} - T_x)}{\left(\frac{1}{h_n} + \frac{L_l}{\lambda_l} + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_s}{\lambda_s} \right)}$$

$$T_x = T_n - \bar{q} \cdot \left(\frac{1}{h_n} + \frac{L_l}{\lambda_l} + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_s}{\lambda_s} \right)$$

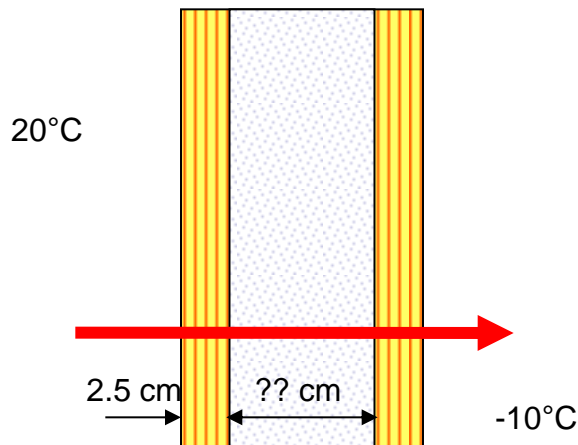
$$T_x = 20 - 12 \cdot \left(\frac{1}{5} + \frac{0.025}{0.2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{0.1}{0.05} \right) = 20 - 15.9 = 4.1^\circ\text{C}$$

Primer 3: debelina izolacije

(b) Potrebna debelina izolacije, da se fluks zmanjša na polovico:

Podatki iz tabel: λ (stiropor): 0.05 W/mK; λ (les): 0.2 W/mK; $h_n=5$ W/m²K; $h_z=20$ W/m²K

$$\bar{q}' = \frac{1}{2} \cdot \bar{q} = 6 \text{ W/m}^2$$



$$\bar{q}' = 6 = \frac{(T_{\text{top}} - T_{\text{hlad}})}{\left(\frac{1}{h_n} + 2 \cdot \frac{L_l}{\lambda_l} + \frac{(L_s)_x}{\lambda_s} + \frac{1}{h_z} \right)}$$

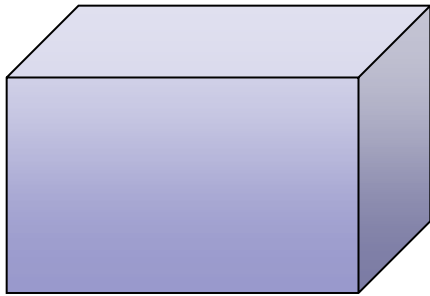
$$\frac{(L_s)_x}{\lambda_s} = \frac{(T_{\text{top}} - T_{\text{hlad}})}{\bar{q}'} - \left(\frac{1}{h_n} + 2 \cdot \frac{L_l}{\lambda_l} + \frac{1}{h_z} \right) = 4.5 \text{ Km}^2 / \text{W}$$

$$(L_s)_x = 4.5 \text{ Km}^2 / \text{W} \cdot 0.05 \text{ W/mK} = 0.225 \text{ m}$$

Primer 4: potrebna moč elektromotorja

Hladilna skrinja dimenzij: $0.7 \times 0.8 \times 1.5 \text{ m}^3$ je izolirana s 5 cm debelim slojem izolacije. Izračunaj potrebno moč elektromotorja, če je temperatura okolice 20°C , temperatura v skrinji -20°C in motor obratuje s 60% zmogljivostjo.

Podatki iz tabel: $\lambda(\text{izolacije}): 0.05 \text{ W/mK}$; $h_n = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$; $h_z = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$



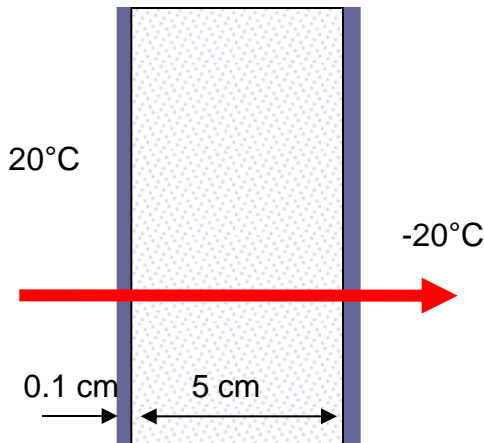
$$q = \frac{(T_{\text{top}} - T_{\text{hlad}}) \cdot A}{\left(\frac{1}{h_n} + 2 \cdot \frac{L_{\text{žel}}}{\lambda_{\text{žel}}} + \frac{L_{\text{iz}}}{\lambda_{\text{iz}}} + \frac{1}{h_z} \right)}$$

$$q = \frac{(20 + 20) \cdot 5.62}{\left(\frac{1}{20} + 2 \cdot \frac{L_{\text{žel}}}{\lambda_{\text{žel}}} + \frac{0.05}{0.05} + \frac{1}{10} \right)} = \frac{224.8}{1.15} = 195.5 \text{ W}$$

Potrebna moč:

$$q/0.6 = 326 \text{ W}$$

$$A = 2 \times 1.5 \times 0.7 + 2 \times 0.7 \times 0.8 + 2 \times 1.5 \times 0.8 = 5.62 \text{ m}^2$$

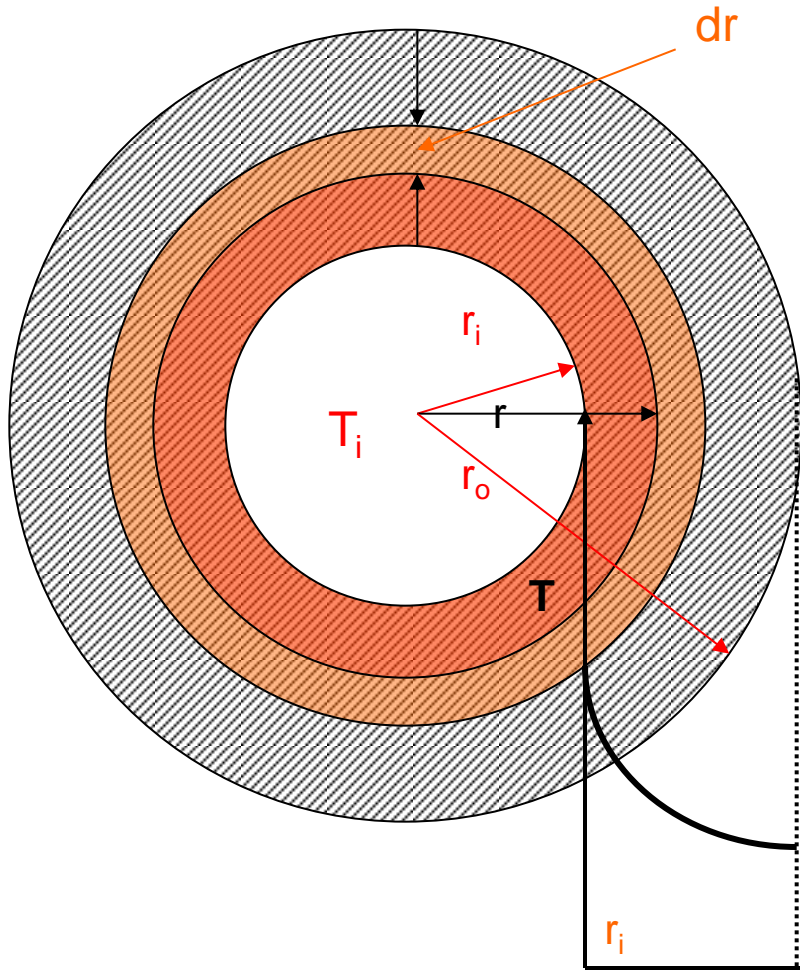


$$q' = \frac{(T_{\text{top}} - T_{\text{hlad}}) \cdot A}{\left(\frac{L_{\text{iz}}}{\lambda_{\text{iz}}} \right)} = \frac{40 \cdot 5.62}{1} = 224.8 \text{ W}$$

$$q'/0.6 = 375 \text{ W}$$

Prenos toplote s prevajanjem v cevi v radialni smeri

čprav je toplotni tok neodvisen od radia, pa je toplotni fluks funkcija r . Največji je skozi notranjo, najmanjši pa skozi zunanjo površino cevi.



$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dr} 2\pi \cdot r \cdot L$$

$$q = \frac{\lambda \cdot (2\pi \cdot L) \cdot (T_n - T_z)}{\ln(r_z / r_n)}$$

$$q = \frac{\lambda \cdot (2\pi \cdot L \cdot r_z) \cdot (T_n - T_z)}{r_z \cdot \ln(r_z / r_n)}$$

Toplotni tok skozi zunanjo površino cevi ($2\pi L r_z$)

$$q = \frac{\Delta T \cdot A}{R} \xrightarrow{\text{sledi}} R = \frac{r_z \cdot \ln(r_z / r_n)}{\lambda}$$

Ravna stena

$$R = \frac{\Delta x}{\lambda}$$

Prenos toplote v cevi s prevajanjem :

$$q = \frac{\Delta T \cdot A}{R} \xrightarrow{\text{sledi}} R = \frac{r_z \cdot \ln(r_z / r_n)}{\lambda}$$

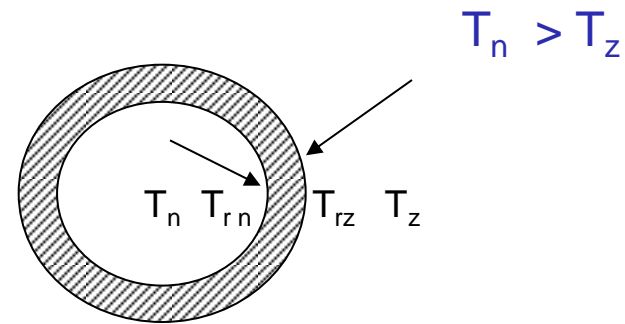
Prenos toplote v cevii s konvekcijo :

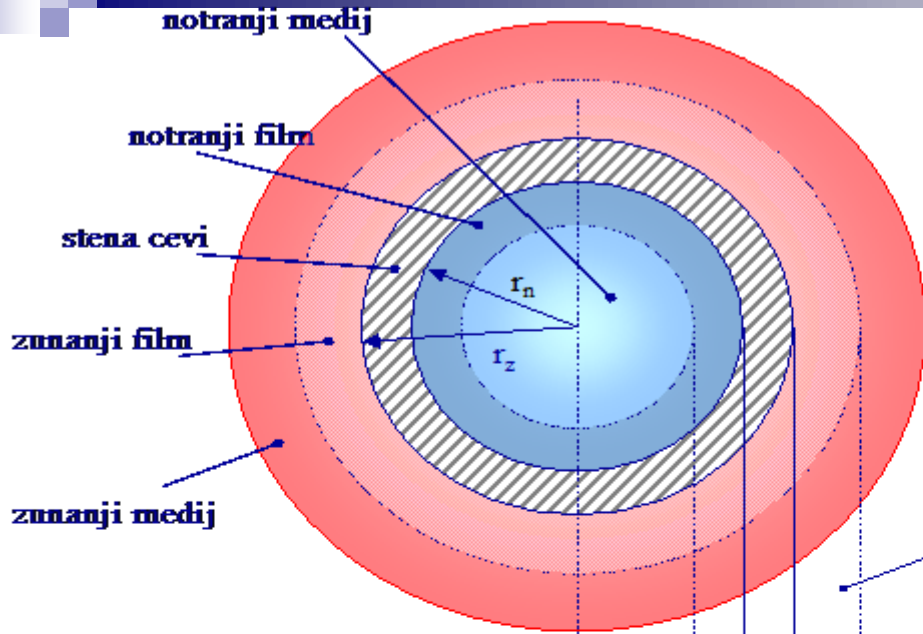
$$q = h \cdot A \cdot (T_1 - T_2)$$

$$q = (T_1 - T_2) \cdot A / R \longrightarrow R = \frac{1}{h}$$

$$q = h_z \cdot 2\pi L r_z \cdot (T_{rz} - T_z)$$

$$q = h_n \cdot 2\pi L r_n \cdot (T_n - T_m)$$





Prečni prerez cevi toplotnega menjalnika

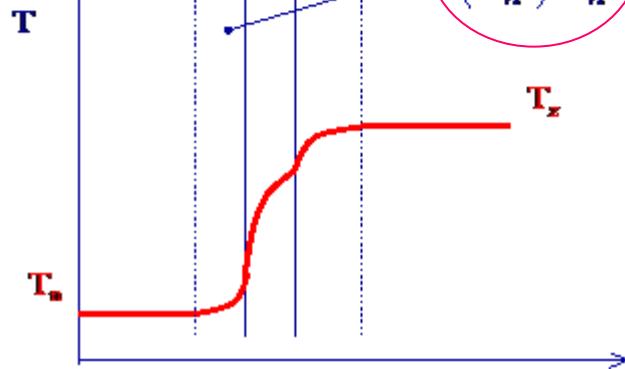
Kombiniran prenos toplote

$\frac{1}{\langle h_z \rangle}$ → Toplotni upori: na zunanji strani

$\frac{r_z \ln\left(\frac{r_z}{r_n}\right)}{\lambda_s}$ → v cevi

$\frac{1}{\langle h_n \rangle \frac{r_z}{r_n}}$ → na notranji strani

Temperaturni profil skozi steno cevi



Toplotni tok: $q = U_z \cdot A_z \cdot (T_z - T_n)$

$q = (T_z - T_n) \cdot A_z / R_{\text{cel}}$

$A_z = 2\pi L r_z$
 $T_n < T_z$

kjer je U_z (W/m²K) **toplotna prehodnost**, izračunana na zunanjo površino cevi A_z in $(T_z - T_n)$ temperaturna razlika med medijema.

Toplotna prehodnost U_z je podana z izrazom:

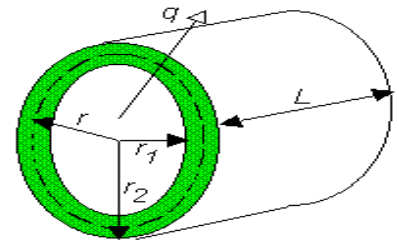
torej je njena recipročna vrednost seštevek toplotnih uporov

$$\frac{1}{U_z} = \frac{1}{h_n} \cdot \left(\frac{r_z}{r_n} \right) + \frac{r_z \cdot \ln(r_z / r_n)}{\lambda_s} + \frac{1}{h_z}$$

na notranji strani cevi

v cevi

na zunanji strani



Primer 5: Izgube toplote ob horizontalni izolirani cevi

Cev notranjega premera $D_1 = 0.04$ m in zunanjega $D_2 = 0.05$ m je izolirana d 5 cm debelim slojem poliuretanske pene; Izračunaj toplotne izgube na dolžinskem metru cevi, če je temperatura tekočine (vode) v cevi 100°C in je temperatura zraka 20°C . Koliko znaša temperatura na površini izolacije? Oцени toplotne izgube na ne-izolirani cevi.

$$\begin{aligned}r_0 &= 0.02 \text{ m} \\r_1 &= 0.025 \text{ m} \\r_2 &= 0.075 \text{ m}\end{aligned}$$

Toplotno prestopnost s cevi na zrak lahko približno ocenimo z enačbo: $h = 1.65 \cdot \Delta T^{0.25}$, pri čemer je ΔT razlika temperatur med površino cevi ali površino izolacije in zrakom. Približni oceni toplotnih prestopnostista: $h_z = 2.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ za izolirano in $h_z = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$ za neizolirano cev.

Toplotna prestopnost iz vode na jekleno cev $h_v = 1000 \text{ W/m}^2\text{K}$

Podatki iz tabel: λ (jekla) = 60 W/mK ; λ (izol.) = 0.05 W/mK

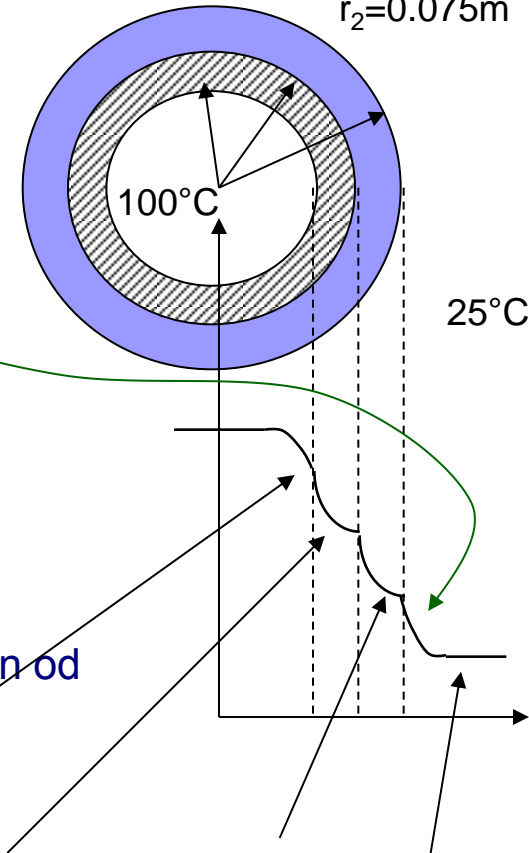
(a) Najprej ocenimo toplotne izgube:

pri ceveh računamo toplotni tok in ne toplotni fluks, ker je le ta odvisen od radia cevi:

$$q = U_z \cdot A_z \cdot (T_z - T_n)$$

Toplotno prehodnost računamo na zunanjo površino:

$$\frac{1}{U_z} = \frac{1}{h_n} \cdot \left(\frac{r_2}{r_0} \right) + \frac{r_2 \cdot \ln(r_1 / r_0)}{\lambda_{\text{jek.}}} + \frac{r_2 \cdot \ln(r_2 / r_1)}{\lambda_{\text{izol.}}} + \frac{1}{h_z}$$



Primer 5: Izgube toplote ob horizontalni izolirani cevi

(a) Najprej ocenimo toplotne izgube:

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot L \cdot (T_n - T_z)}{\frac{1}{h_n} \cdot \left(\frac{r_2}{r_0}\right) + \frac{r_2 \cdot \ln(r_1/r_0)}{\lambda_{\text{jek.}}} + \frac{r_2 \cdot \ln(r_2/r_1)}{\lambda_{\text{izol.}}} + \frac{1}{h_z}}$$

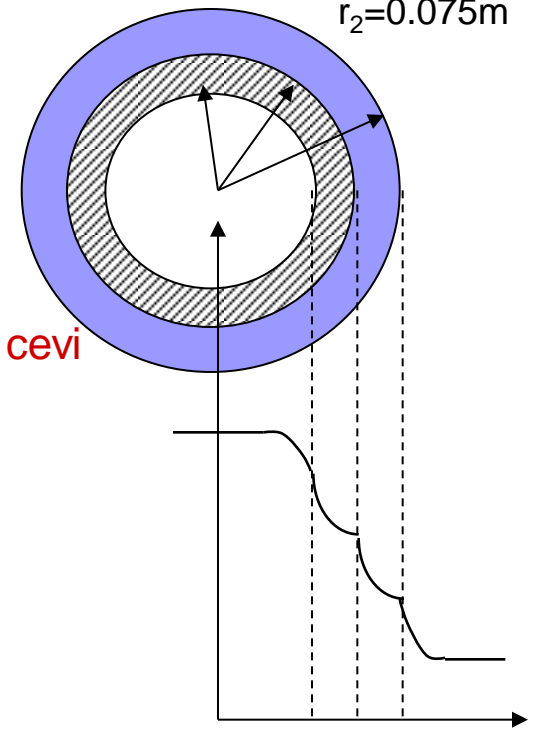
$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0.075 \cdot 1 \cdot (100 - 20)}{\frac{1}{1000} \cdot \left(\frac{0.075}{0.020}\right) + \frac{0.075 \cdot \ln(0.025/0.02)}{60} + \frac{0.075 \cdot \ln(0.075/0.025)}{0.05} + \frac{1}{2.5}} = 18.37 \text{ W/m}^2\text{K za 1m cevi}$$

(b) Ocenimo toplotne izgube za neizolirano cev:

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot L \cdot (T_n - T_z)}{\frac{1}{h_n} \cdot \left(\frac{r_1}{r_0}\right) + \frac{r_1 \cdot \ln(r_1/r_0)}{\lambda_{\text{jek.}}} + \frac{1}{h_z}}$$

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0.025 \cdot 1 \cdot (100 - 20)}{\frac{1}{1000} \cdot \left(\frac{0.025}{0.020}\right) + \frac{0.025 \cdot \ln(0.025/0.02)}{60} + \frac{1}{5}} = 62.4 \text{ W/m}^2\text{K za 1m cevi}$$

$$\begin{aligned} r_0 &= 0.02 \text{ m} \\ r_1 &= 0.025 \text{ m} \\ r_2 &= 0.075 \text{ m} \end{aligned}$$



Primer 5: Izgube toplote ob horizontalni izolirani cevi

(c) Temperatura na površini izolacije: $q = h_z \cdot A_z \cdot (T_2 - T_n)$?

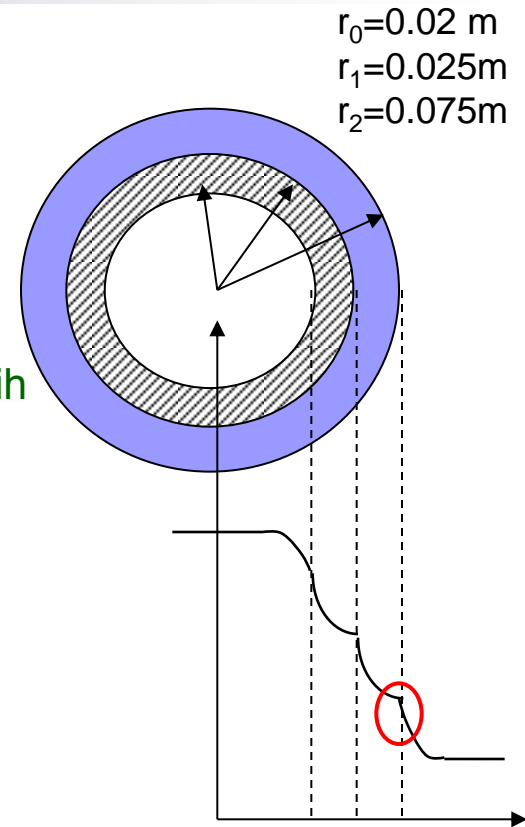
Toplotno prestopnost s cevi na zrak lahko približno ocenimo z enačbo: $h = 1.65 \cdot \Delta T^{0.25}$, pri čemer je ΔT razlika temperatur med površino cevi ali površino izolacije in zrakom. Približni oceni toplotnih prestopnostista: $h_z = 2.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ za izolirano in $h_z = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$ za neizolirano cev.

$$T_2 = T_z + \frac{q}{A_z \cdot h_z} \quad \text{Približna ocena, ker ne vemo temp. razlike}$$

$$T_2 = 20 + \frac{18.37}{2 \cdot \pi \cdot 0.075 \cdot 1.5} = 20 + 15.6 = 35.6^\circ\text{C}$$

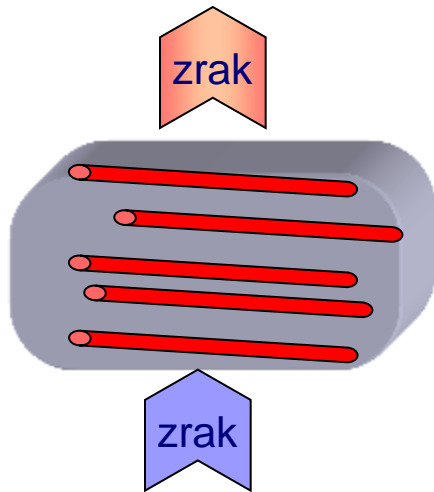
$$h_{iz.}' = 1.65 \cdot \Delta T^{0.25} = 1.65 \cdot 15.6^{0.25} = 3.28 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$T_2 = 20 + \frac{18.37}{2 \cdot \pi \cdot 0.075 \cdot 1 \cdot 3.28} = 20 + 11.9 = 31.9^\circ\text{C}$$



Primer 6: Ogrevanje zraka s toplotnim menjalnikom

V sušilnem obratu ogrevamo zrak z ventilatorjem tako, da ga pihamo preko šopa rebrastih cevi, ki imajo temperaturo 120°C . Koliko se pogreje zrak pri enem prehodu preko cevi (toplotnega menjalnika), če znaša njegova linearna hitrost (računana na celotni presek naprave) 10 m/s . Površina toplotnega menjalnika je $10\text{ m}^2/1\text{ m}^2$ preseka. Temperatura vstopnega zraka je 20°C , $c_p(20^{\circ}\text{C})=1000\text{ J/kgK}$, $\rho(\text{zraka})1.2\text{ kg/m}^3$ in ocenjena toplotna prestopnost iz cevi v zrak pri danih pogojih obratovanja $60\text{ W/m}^2\text{K}$.



$$q = h_{\text{zr}} \cdot A \cdot (T_{\text{cevi}} - T_{\text{zr}}) = \Phi_m \cdot c_p \cdot (T_{\text{iz}} - T_{\text{vs}})_{\text{zrak}}$$

Povprečna temperatura zraka med vstopom in iztokom v toplotni menjalnik,

Je ne poznamo, izračun je približen, ko vstavimo 20°C

iščemo

$$\frac{T_{\text{cevi}} - T_{\text{zr}}}{T_x - T_{\text{zr}}} = \frac{\Phi_m \cdot c_p}{h_{\text{zr}} \cdot A} = \frac{12 \cdot 1000}{60 \cdot 10} = 20$$

$$T_x = (120 - 20) / 20 + 20 = 25^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Masni pretok } \Phi_m = v \times S \times \rho = 10 \times 1 \times 1.2 = 12\text{ kg/s}$$

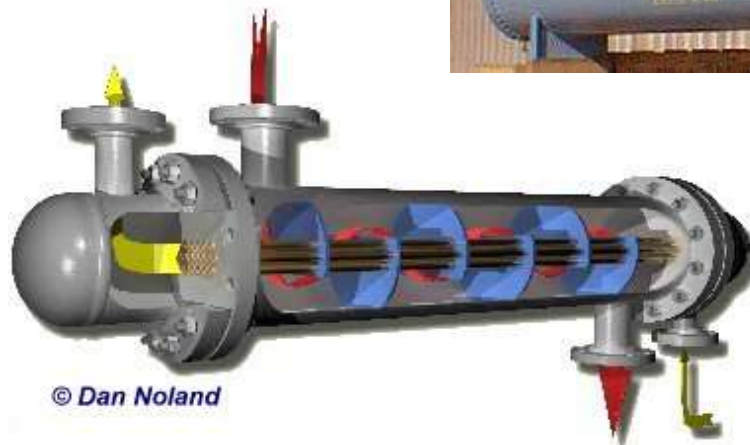
$$\text{Površina toplotnega menjalnika je } 10\text{ m}^2/1\text{ m}^2 \Rightarrow A = 10\text{ m}^2 \text{ in } S = 1\text{ m}^2$$

Toplotna prestopnost je odvisna od snovi (fluida), hidrodinamskih pogojev in temperaturne razlike, ki pogojujejo tudi fazne prehide plin- tekočina. Direktno je ne moremo eksperimentalno določiti, ocenjene vrednosti so odvisne od dane situacije. V tabeli so zbrani podatki območij vrednosti za različne medije.

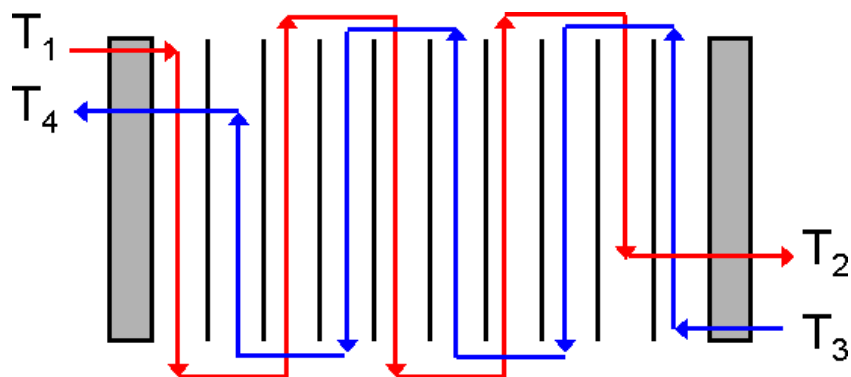
Range of Values of h		
Type of Process	W/m ² -°C	Btu/ft ² -h-°F
Steam (dropwise condensation)	30,000-100,000	5000-20,000
Steam (film-type condensation)	6000-20,000	1000-3000
Boiling water	1700-50,000	300-9000
Condensing organic vapors	1000-2000	200-400
Water (heating or cooling)	300-20,000	50-3000
Oils (heating or cooling)	50-1500	10-300
Steam (superheating)	30-100	5-20
Air (heating or cooling)	1-50	0.2-10

Toplotni menjalniki

Zelo pomemben procesni element. So naprave, ki omogočajo prenos toplote med različnimi tekočinami in plini. Prenos toplote poteka s konvekcijo in prevajanjem.

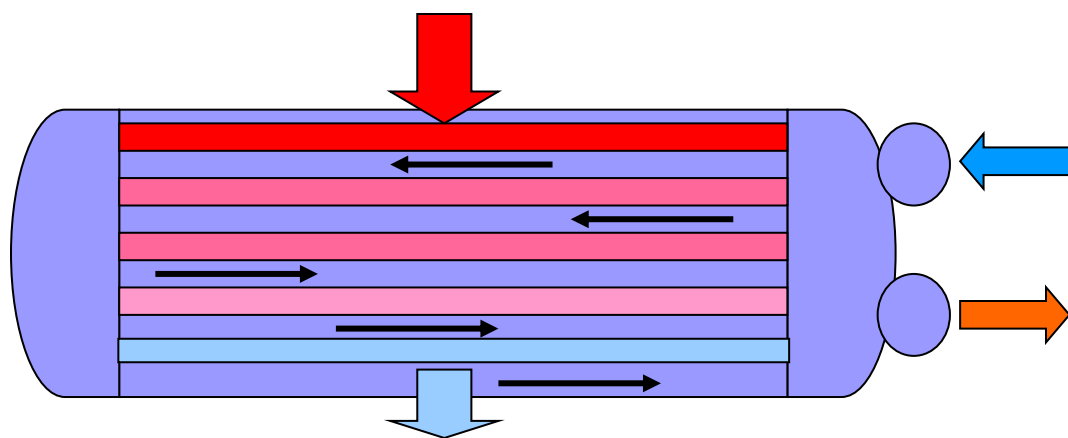


Po ceveh vodimo različno tople procesne tokove.
cevi so iz kovin ki so dobri prevodniki toplote
(cev ne predstavlja velikega toplotnega upora).
Zunanje cevi izoliramo zaradi preprečevanja toplotnih izgub



Prenos toplote je kombiniran, kar pomeni, da se toplota prenaša s konvekcijo in s prevajanjem in je značilen za toplotne menjalnike.

V stacionarnem stanju se v radialni smeri v cevnem sistemu vzpostavi temperaturni profil med tokom toplega in hladnega medija.

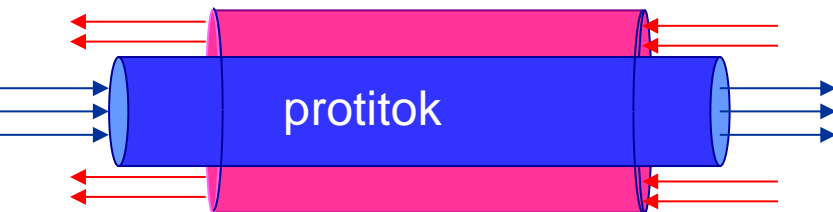


Med hladnim in toplim medijem skozi steno cevi prehaja toplotni tok q

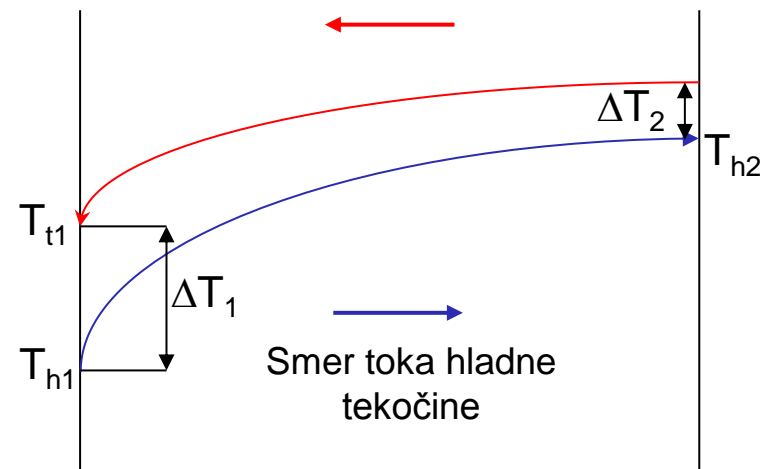
$$q = U \cdot A_T \cdot (T_{\text{topli}} - T_{\text{hladni}})$$

Dvocevni toplotni menjalnik

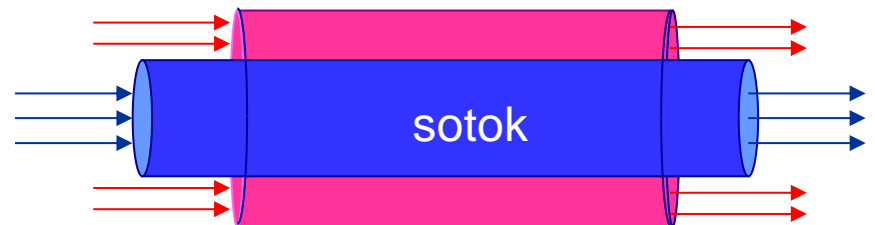
sistem dveh koncentričnih cevi, po katerih se pretakata medija z različnima temperaturama
 Stacionarni prenos toplote v dvocevnem toplotnem menjalniku



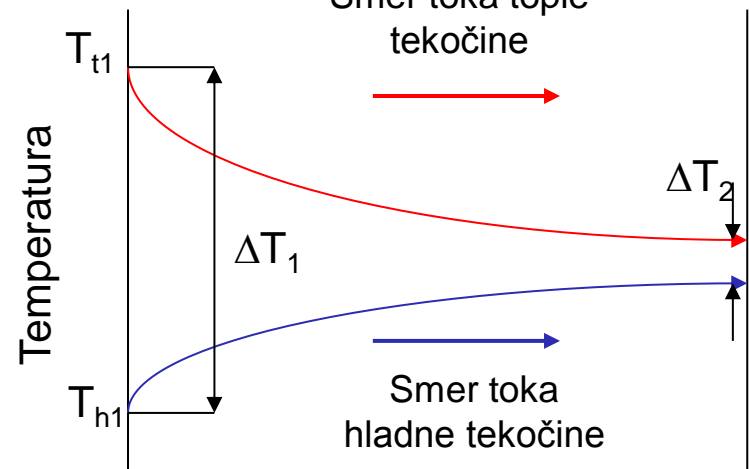
Smer toka tople tekočine



Oddaljenost od vstopa hladne tekočine



Smer toka tople tekočine



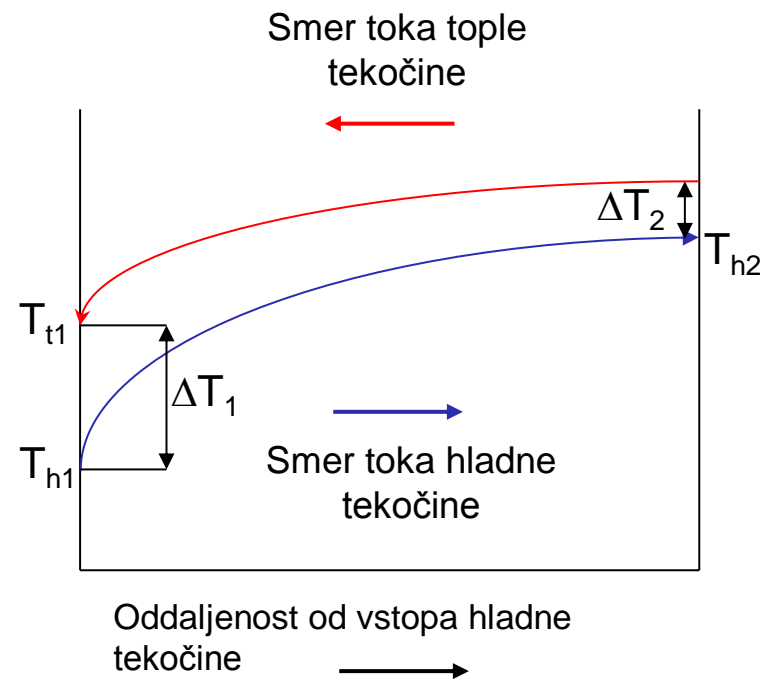
Oddaljenost od vstopa hladne tekočine

$$\Delta T_{\ln} = \frac{(T_t - T_h)_1 - (T_t - T_h)_2}{\ln \frac{(T_t - T_h)_1}{(T_t - T_h)_2}}$$

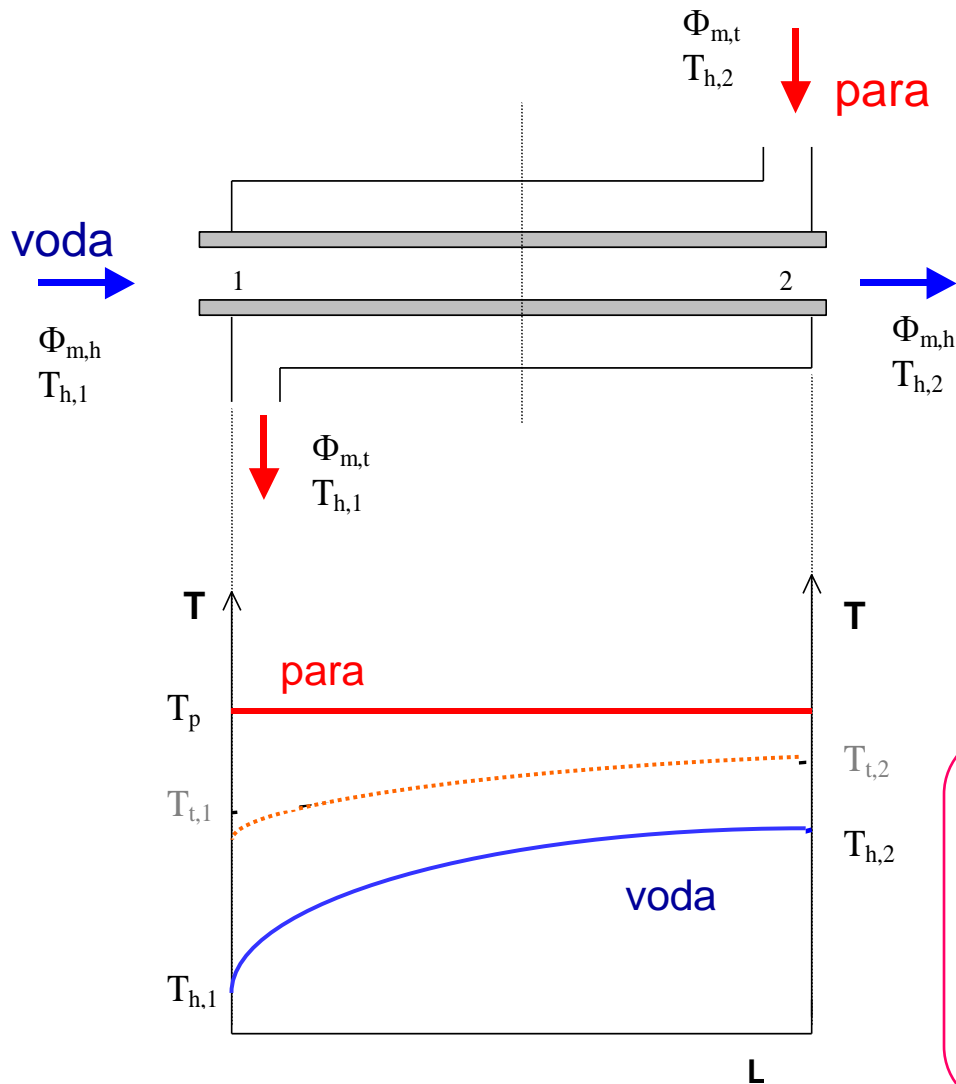
Izpeljava srednje temperaturne razlike med toplim in hladnim medijem v toplotnem menjalniku

$$q = U \cdot A_T \cdot (\Delta T_1 - \Delta T_2)$$

$$\int_{\Delta T_1}^{\Delta T_2} \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = \frac{U(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{q_T} \int_0^{A_T} dA$$



$$q = \Phi_{mh} \cdot c_{ph} \cdot (T_{h1} - T_{h2}) = \Phi_{mp} \cdot \Delta H_{kond}$$



Toplotni tok: $q = U_z \cdot A_z \cdot \Delta T_{ln}$

hidrodinamičnih pogojev na obeh straneh cevi

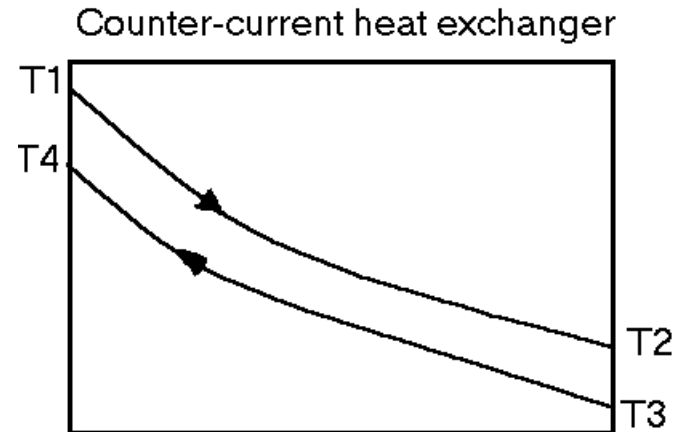
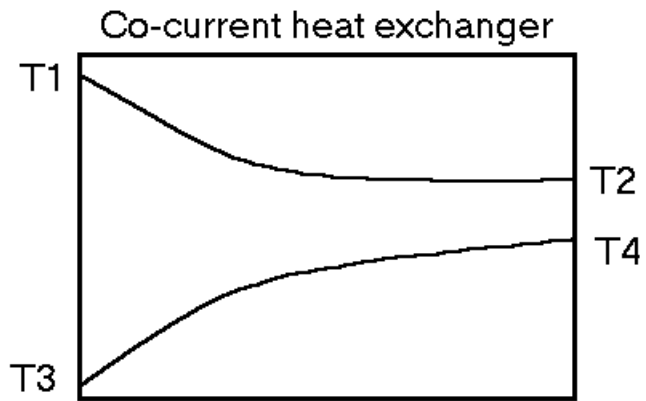
debeline stene r_z/r_n in njene toplotne prevodnosti λ_s

od snovnih lastnosti obeh strujajočih medijev

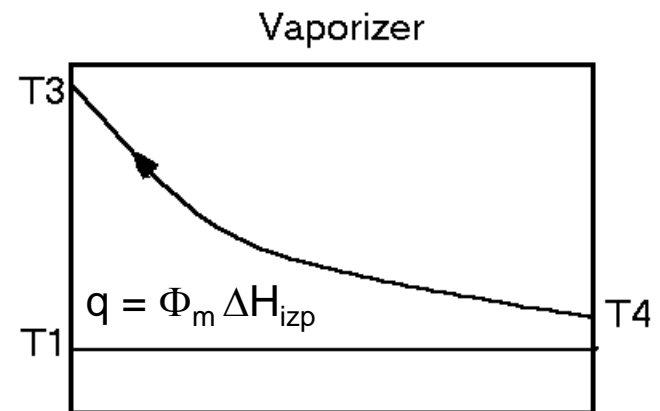
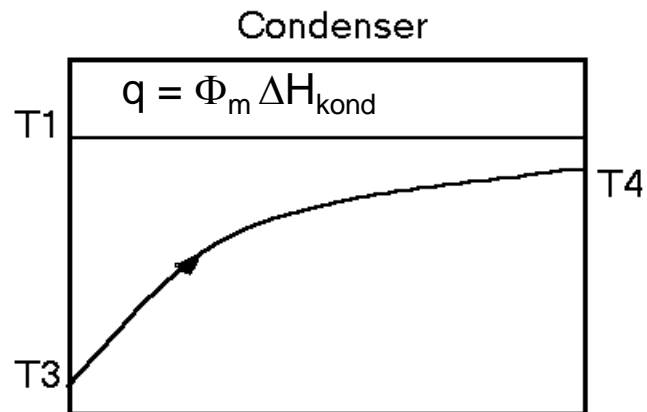
Karakteristična temperaturna razlika

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_t - T_h)_1 - (T_t - T_h)_2}{\ln \frac{(T_t - T_h)_1}{(T_t - T_h)_2}}$$

Opiši proces v dvocevnem toplotnem menjalniku glede na temperaturno razliko vzdolž cevi menjalnika

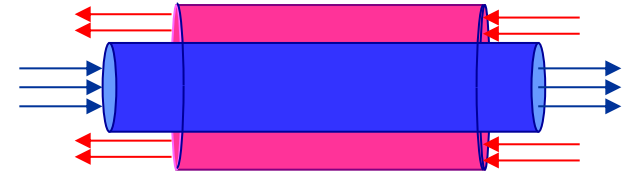


$$q = \Phi_{mh} c_{ph} (T_{h1} - T_{h2}) = \Phi_{mt} c_{pt} (T_{t1} - T_{t2})$$



Izračun toplotne prehodnosti U_z

na podlagi korelacijskih enačb



r_n in r_z ... notranji in zunanji premer cevi

$$\frac{1}{U_z} = \frac{1}{h_n} \left(\frac{r_z}{r_n} \right) + \frac{r_z \ln \left(\frac{r_z}{r_n} \right)}{\lambda_s} + \frac{1}{h_z}$$

↑
toplotna prestopnost na notranji strani cevi (voda)

↑
toplotna prevodnost cevi (baker)

↑
toplotna prestopnost na zunanji strani cevi (para)

h_n izračunamo po Dittus Boelterjevi enačbi: $Nu = 0.023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n$

λ_s dobimo v priročnikih, pogosto jo lahko zanemarimo zaradi dobre prevodnosti kovin

h_z izračunamo po korelaciji: $h_z = 0.72 \cdot \left[\frac{g \cdot \Delta H_{kon} \cdot \rho^2 \cdot \lambda^3}{D_z \cdot \eta \cdot (T_p - T_s)} \right]^{0.25}$

Toplotna prestopnost na notranji strani cevi - voda

Za primer turbulentnega strujanja po dolgih, ravnih, gladkih ceveh izračunamo toplotno prestopnost na podlagi brezdimenzijskih kriterijskih enačb :

Dittus-Boelterjeva enačba:

$$Nu = 0.023 Re^{0,8} Pr^n$$

0,4 segrevanje

0,3 ohlajanje

$$Nu = \frac{h_n \cdot D_n}{\lambda}$$

Nusseltovo št.

$$Re = \frac{v \cdot D_n \cdot \rho}{\eta}$$

Reynoldsovo št.

$$Pr = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda}$$

Prandtlovo št.

$$T_{ar} = (T_1 + T_2) / 2$$

Toplotni tok zaradi konvekcije

Sile vztrajnosti

Difuzivnost gibalne količine

Toplotni tok zaradi prevajanja

Sile viskoznosti

Difuzivnost toplote

Snovne lastnosti (ρ , η , λ , c_p) se nanašajo na tekočino v cevi pri **aritmetični srednji temperaturi**.

turbulentno strujanje tekočin po dolgih, ravnih, gladkih cevah

Dittus-Boelterjeva enačba: $Nu = 0.023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n$ → 0,4 segrevanje
→ 0,3 ohlajanje

Why are higher coefficients found when a liquid is being heated rather than cooled?

Related to viscosity. For low-viscosity fluids the ration of η/η_w is not very important. However, for viscous fluids (oils), η_w and η_{bulk} may differ by 10-fold.

Sieder-Tate eq. allows for heating and cooling $\frac{h_i D}{\lambda} = 0.023 \left(\frac{\rho v D}{\eta} \right)^{0.8} \left(\frac{c_p \eta}{\lambda} \right)^{1/3} \left(\frac{\eta}{\eta_w} \right)^{0.14}$

Toplotna prestopnost na zunanji strani cevi – para / film kondenzata

na zunanji strani horizontalne cevi, ki jo grejemo z nasičeno vodno paro, ko le na steni kondenzira in dobimo film kondenzata izračunamo:

$$h_z = 0,72 \left[\frac{g \Delta H_{\text{kon}} \rho^2 \lambda^3}{D_z \eta (T_p - T_s)} \right]^{0.25}$$

Snovne lastnosti : **gostota** (ρ),

prevodnost filma kondenzata (λ),

viskoznost filma kondenzata (η)

kondenzacijska entalpija (ΔH_{kon})

$$\Delta H_{\text{kon}} = H_{\text{pare}} - H_{\text{kond}}$$

se nanašajo na film kondenzata, (pregreta voda)

V dvocevnem toplotnem menjalniku eksperimentalno toplotno prehodnost določimo:

Energetska bilanca (toplotna bilanca) v dvocevnem toplotnem menjalniku za hladnejši medij, ki ga ogrevamo:

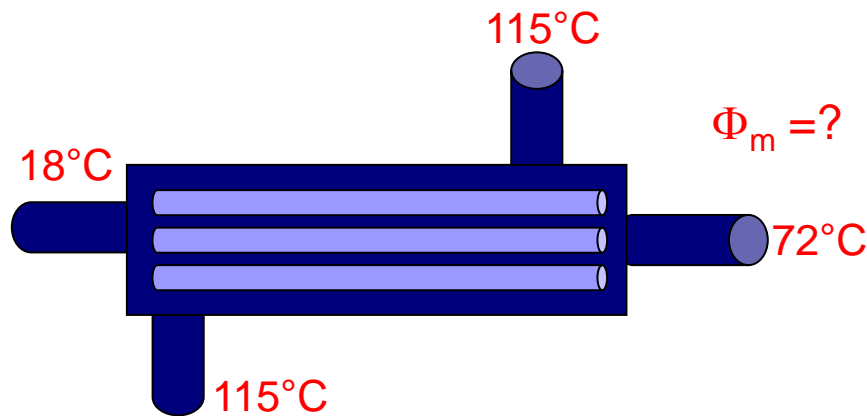
$$q = \Phi_m \cdot c_p \cdot (T_{h2} - T_{h1})$$

in je enaka konvektivno in konduktivno izmenjani toploti

$$q = U_z \cdot A_z \cdot \Delta T_{ln}$$

- Izmerimo temperature vode na vstopu in izstopu iz notranje cevi (T_{h1} in T_{h2})
- Izmerimo temperature pare na vstopu in izstopu, ter temperature zunanje stene cevi
- Ker poznamo masni pretok vode (Φ_m), specifično toploto vode (c_p) in površino zunanje stene ($A_z = \pi D_z L$)
- je edina neznanka obeh enačb toplotna prehodnost (U_z)

Primer 1: V cevnem toplotnem menjalniku segrevamo vodo, z nasičeno vodno paro pri temperaturi 105 °C. Toplotni menjalnik je sestavljen iz treh tankoplastnih bakrenih cevi dimenzij: $d_n = 8$ mm, $d_z = 10$ mm in dolžine $L = 1$ m. Kakšen naj bo pretok vode, ki vstopa v menjalnik s temperaturo 18 °C in jo želimo ogreti na temperaturo 72 °C? Pri danih obratovalnih pogojih sta ocenjeni vrednosti toplotnega prestopa: na strani pare $h_p = 20$ kW/m²K in na strani vode $h_h = 7$ kW/m²K, $c_p \text{ vode} = 4.179$ KJ/kg K.



$$A = 3 \cdot (\pi D_z \cdot L)$$

$$A = 3 \cdot 0.01 \cdot 1 = 0.094 \text{ m}^2$$

$$\frac{1}{U_z} = \frac{1}{h_n} \left(\frac{r_z}{r_n} \right) + \frac{r_z \ln \left(\frac{r_z}{r_n} \right)}{\lambda_s} + \frac{1}{h_z}$$

$$\frac{1}{U_z} = \frac{1}{h_h} \cdot \frac{r_z}{r_n} + \frac{1}{h_p}$$

$$\Delta T_{\ln} = \frac{(105 - 18) - (105 - 72)}{\ln \frac{(105 - 18)}{(105 - 72)}} = \frac{54}{0.969} = 55.7 \text{ K}$$

$$\frac{1}{U_z} = \frac{1}{7} \cdot \frac{10}{8} + \frac{1}{20} = 0.2286 \text{ m}^2\text{K/kW}$$

$$q = \Phi_m \cdot c_p \cdot (T_{h1} - T_{h2}) = U_z \cdot A \cdot \Delta T_{\ln}$$

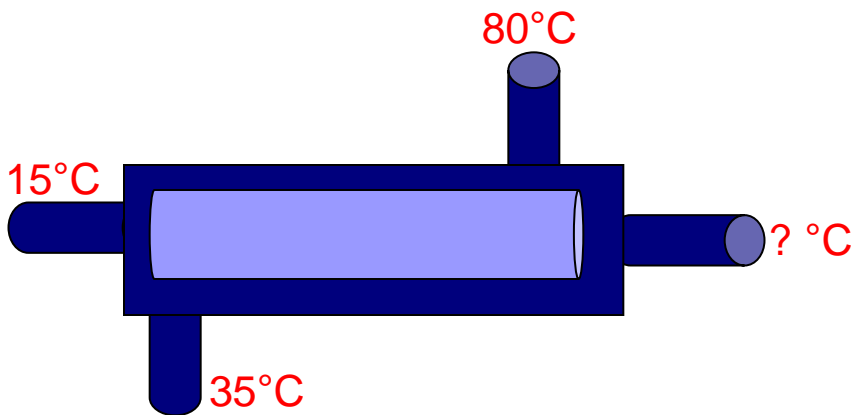
$$U_z = 4.375 \text{ kW/m}^2\text{K}$$

$$\Phi_{m \text{ voda}} = \frac{U_z \cdot A \cdot \Delta T_{\ln}}{c_p \cdot \Delta T}$$

$$\Phi_{m \text{ voda}} = \frac{4.375 \cdot 0.094 \cdot 55.7}{4.179 \cdot (72 - 18)} = 0.1 \text{ kg/s}$$

Primer 2: S toplotnim menjalnikom ohlajamo organsko topilo iz temperature 80°C na 35 °C. Pretok topila je 0.36 kg/s. Notranja tankoplastna bakrena cev toplotnega menjalnika je dolga 2.5 m in ima premer 0.02 m. V zunanji cevi se pretaka hladilna voda, ki vstopa v menjalnik pri 15° C, s pretokom 0.6 kg/s. Izračunajte toplotno prehodnost, če menjalnik obratuje protitočno.

(c_p vode = 4187 J/kgK c_p ; topila = 2100 J/kgK)



$$q = \Phi_m \cdot c_p \cdot (T_{h1} - T_{h2}) = U_z \cdot A \cdot \Delta T_{ln}$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{(28.54 - 80) - (15 - 35)}{\ln \frac{(28.54 - 80)}{(15 - 35)}} = 33.3 \text{ K}$$

$$U_z = \frac{(\Phi_m \cdot c_p \cdot \Delta T)_{top}}{A \cdot \Delta T_{ln}}$$

$$U_z = \frac{(0.36 \cdot 2100 \cdot 45)_{top}}{(\pi \cdot 0.02 \cdot 2.5) \cdot 33.3} = 6505.8 \text{ W/m}^2\text{K}$$

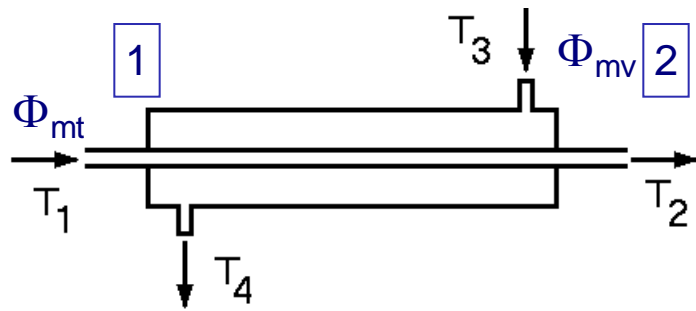
$$q = \Phi_m \cdot c_p \cdot (T_{h1} - T_{h2}) = \Phi_m \cdot c_p \cdot (T_{T1} - T_{T2})$$

$$\Delta T_{voda} = \frac{(\Phi_m \cdot c_p \cdot \Delta T)_{top}}{(\Phi_m \cdot c_p)_{voda}}$$

$$\Delta T_{voda} = \frac{(0.36 \cdot 2100 \cdot 45)_{top}}{(0.6 \cdot 4178)_{voda}} = 13.54 \text{ K} = 13.54 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{h2} = T_{h1} + 13.54 \text{ } ^\circ\text{C} = 28.54 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Primer 3. S toplotnim menjalnikom ohlajamo organsko topilo iz temperature 70 °C na 25 °C. Pretok topila je 1 m³/h. Za hlajenje uporabljamo hladilno vodo, ki vstopa v menjalnik pri 10 °C s pretokom 3 m³/h. Toplotni menjalnik je sestavljen iz tankoplastnih bakrenih cevi dolžine 2.5 m in premera 3 cm po katerih se pretaka hladilna voda. Koliko cevi je potrebnih pri protitočnem načinu obratovanja, če je povprečna toplotna prehodnost 707.7 W/m²K?



$$\begin{aligned} T_1 &= 70^\circ\text{C} \\ T_2 &= 25^\circ\text{C} \\ T_3 &= 10^\circ\text{C} \\ T_4 &=? \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_p \text{ topila} &= 2300 \text{ J/kgK} \\ \rho \text{ topila} &= 870 \text{ kg/m}^3 \\ c_p \text{ vode} &= 4187 \text{ J/kgK} \\ \rho \text{ vode} &= 998 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$q = \Phi_{mv} c_{pv} (T_{h1} - T_3) = \Phi_{mt} c_{pt} (T_1 - T_2)$$

$$\text{Topilo: } q = \Phi_{mt} \cdot c_{pt} \cdot (T_1 - T_2) = \rho_t \cdot \Phi_{vt} \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2) = 870 \cdot (1/3600) \cdot 2300 \cdot (70 - 25) = 25012 \text{ J/s}$$

$$\text{Voda: } (T_4 - T_3) = q / \Phi_{mv} \cdot c_{pv} = 25012 / ((3/3600) \cdot 4187) = 7.19 \text{ K}$$

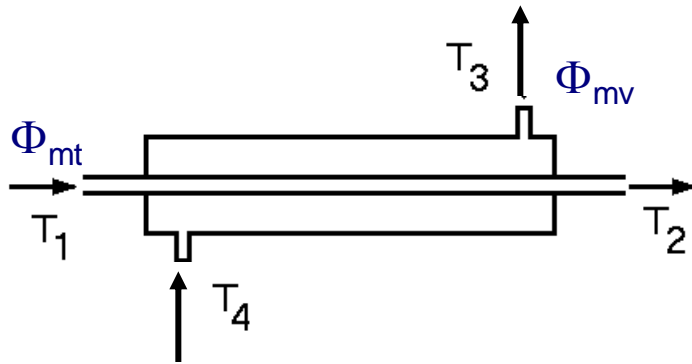
$$T_4 = 17.2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Voda - topilo: } q = U \cdot A_z \cdot \Delta T_{ln} \quad \Delta T_{ln} = \frac{(T_t - T_h)_1 - (T_t - T_h)_2}{\ln \frac{(T_t - T_h)_1}{(T_t - T_h)_2}} = \frac{(70 - 17.2)_1 - (25 - 10)_2}{\ln \frac{(70 - 17.2)_1}{(25 - 10)_2}} = 30 \text{ K}$$

$$A = q / U \cdot \Delta T_{ln} = 25012 / (707.7 \cdot 30) = 1.178 \text{ m}^2$$

$$A(\text{za eno cev}) = \pi \cdot D_z \cdot L = \pi \cdot 0.03 \cdot 2.5 = 0.236 \text{ m}^2 \quad \text{št. cevi} = A/A_1 = 1,178 / 0.236 = 5$$

Primer 3. število cevi pri sotočnem načinu obratovanja:



$$\begin{aligned} T_1 &= 70^\circ\text{C} \\ T_2 &= 25^\circ\text{C} \\ T_3 &= 17.2^\circ\text{C} \\ T_4 &= 10^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$q = \Phi_{mv} c_{pv} (T_{h1} - T_3) = \Phi_{mt} c_{pt} (T_1 - T_2) = 25012 \text{ J/s}$$

$$\Delta T_{\ln} = \frac{(T_t - T_h)_1 - (T_t - T_h)_2}{\ln \frac{(T_t - T_h)_1}{(T_t - T_h)_2}} = \frac{(70 - 10)_1 - (25 - 17.2)_2}{\ln \frac{(70 - 10)_1}{(25 - 17.2)_2}} = 25.58 \text{ K}$$

Voda - topilo: $q = U \cdot A_z \cdot \Delta T_{\ln}$

$$A = q / U \cdot \Delta T_{\ln} = 25012 / (707.7 \cdot 25.58) = 1.382 \text{ m}^2$$

$$A(\text{za eno cev}) = \pi \cdot D_z \cdot L = \pi \cdot 0.03 \cdot 2.5 = 0.236 \text{ m}^2 \quad \text{št. cevi} = A / A_1 = 1,382 / 0.236 = 5.85 = 6$$

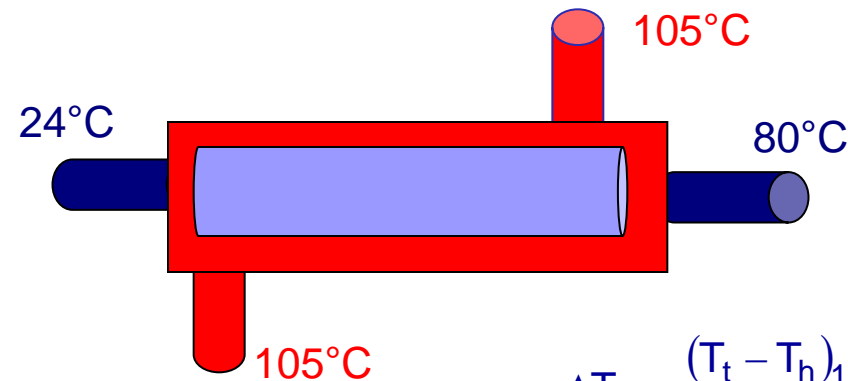
Primer 4: Uporaba Dittus Boelterjeve enačbe

V cevnem toplotnem menjalniku segrevamo vodo z nasičeno vodno paro pri temperaturi 105 °C. Voda vstopa v menjalnik pri temperaturi 24 °C, s pretokom 180 L/h. Kakšna naj bo dolžina cevnega toplotnega menjalnika, ki ima premer cevi: $d_n = 8$ mm in $d_z = 10$ mm, da bo izstopna temperatura vode 80 °C.

Snovne lastnosti vode pri srednji temperaturi v cevi so:

$$\rho: 987 \text{ kg/m}^3, \quad c_p: 4182 \text{ J/kg K}, \quad \eta: 0.528 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}, \quad \lambda: 0.645 \text{ W/mK}$$

Ocenjena vrednost koeficienta toplotnega prestopa na strani pare je 18 KW/m² K, prevodnost samih cevi pa lahko zanemarimo.



$$q = \Phi_m \cdot c_p \cdot (T_{h1} - T_{h2}) = U_z \cdot A \cdot \Delta T_{\ln}$$

$$\begin{aligned} \text{Voda: } q &= \Phi_m c_p (T_1 - T_2) = \rho_v \cdot \Phi_v \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2) \\ q &= 987 \cdot (0.18/3600) \cdot (4182) \cdot (80 - 24) = 11557.4 \text{ J/s} \end{aligned}$$

$$\Delta T_{\ln} = \frac{(T_t - T_h)_1 - (T_t - T_h)_2}{\ln \frac{(T_t - T_h)_1}{(T_t - T_h)_2}} = \frac{(105 - 24)_1 - (105 - 80)_2}{\ln \frac{(105 - 24)_1}{(105 - 80)_2}} = 47.6 \text{ K}$$

Primer 4: Uporaba Dittus Boelterjeve enačbe

$$q = \Phi_m \cdot c_p \cdot (T_{h1} - T_{h2}) = U_z \cdot A \cdot \Delta T_{ln}$$

$$\frac{1}{U_z} = \frac{1}{h_n \left(\frac{r_z}{r_n} \right)} + \frac{r_z \ln \left(\frac{r_z}{r_n} \right)}{\lambda_s} + \frac{1}{h_z}$$

$$\frac{1}{U_z} = \frac{1}{h_h} \cdot \frac{r_z}{r_n} + \frac{1}{h_p}$$

$$\frac{1}{U_z} = \frac{1}{6606.3} \cdot \frac{10}{8} + \frac{1}{18 \cdot 10^3}$$

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^n$$

$$U_z = 4085.5 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$Nu = \frac{h_n \cdot D_n}{\lambda} = 0.023 \cdot 14875.5^{0.8} \cdot 3.42^{0.4} = 81.9$$

$$h_n = \frac{\lambda \cdot Nu}{D_n} = \frac{0.645 \cdot 81.9}{0.008} = 6606.3 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$Re = \frac{v \cdot D_n \cdot \rho}{\eta} = \frac{1 \cdot 0.008 \cdot 987}{0.528 \cdot 10^{-3}} = 14875.5$$

$$v = \frac{\Phi}{A} = \frac{0.18 \cdot 4}{3600 \cdot \pi \cdot (0.008)^2} = 1 \text{ m/s}$$

$$Pr = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda} = \frac{4182 \cdot 0.528 \cdot 10^{-3}}{0.654} = 3.42$$

$$A_z = \frac{q}{U_z \cdot \Delta T_{ln}} = \frac{11557.4}{4085.5 \cdot 47.6} = 0.0593 \text{ m}^2$$

$$A_z = \pi \cdot D_z \cdot L$$

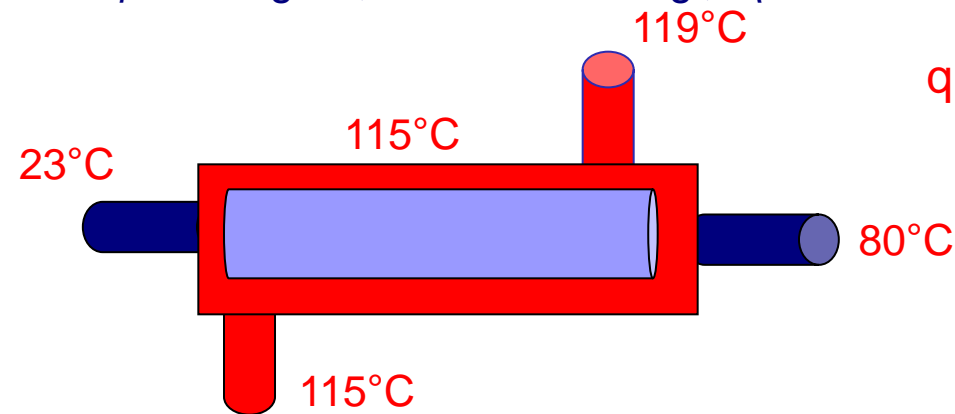
$$L = 0.0593 / (\pi \cdot 0.01) = 1.9 \text{ m}$$

Primer 5: toplotna prestopnost na filmu kondenzata

V dvocevnom toplotnem menjalniku dimenzij $d_n = 4 \text{ mm}$ $D_z = 6 \text{ mm}$ in $L = 1 \text{ m}$ želimo ogreti jabolčni sok iz 23°C na 80°C . Za ogrevanje uporabljamo vodno paro s temperaturo 119°C , ki kondenzira na cevi pri temperaturi 115°C . Ocenite s kakšnim pretokom soka skozi toplotni menjalnik lahko obratujemo, če je ocenjena toplotna prestopnost na strani jabolčnega soka $14.4 \text{ kW/m}^2\text{K}$ in specifična toplota 4.18 kJ/kgK ?

Snovne lastnosti kondenzata pare pri 115°C odčitamo iz tabele:

ρ : 943 kg/m^3 , ΔH : 2218 kJ/kg , η : $0.233 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, λ : 0.686 W/mK



$$\Delta T_{\text{In}} = \frac{(115 - 23)_1 - (115 - 80)_2}{\ln \frac{(115 - 23)_1}{(115 - 80)_2}} = 59 \text{ K}$$

$$A_z = \pi \cdot D_z \cdot L = \pi \cdot 0.006 \cdot 1 = 0.0188 \text{ m}^2$$

$$q = \Phi_m \cdot c_p \cdot (T_{h1} - T_{h2}) = U_z \cdot A \cdot \Delta T_{\text{In}}$$

$$\frac{1}{U_z} = \frac{1}{h_h} \cdot \frac{r_z}{r_n} + \frac{1}{h_p}$$

$$h_z = 0,72 \cdot \left[\frac{g \cdot \Delta H_{\text{kon}} \cdot \rho^2 \cdot \lambda^3}{D_z \cdot \eta \cdot (T_p - T_s)} \right]^{0.25}$$

$$h_z = 0,72 \cdot \left[\frac{9.81 \cdot 2218 \cdot 10^3 \cdot 943^2 \cdot 0.686^3}{0.006 \cdot 0.233 \cdot 10^{-3} \cdot (119 - 115)} \right]^{0.25}$$

$$h_z = 23\,870 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Primer 5: toplotna prestopnost na filmu kondenzata

$$\frac{1}{U_z} = \frac{1}{h_h} \cdot \frac{r_z}{r_n} + \frac{1}{h_p} = \frac{1}{14.4 \cdot 10^3} \cdot \frac{6}{4} + \frac{1}{23870}$$

$$U_z = 6846 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$q = \Phi_m \cdot c_p \cdot (T_{h1} - T_{h2}) = U_z \cdot A \cdot \Delta T_{ln} = 6846 \cdot 0.0188 \cdot 59 = 7593.6 \text{ W}$$

$$\Phi_m = q / c_p (T_{h1} - T_{h2}) = 7593.6 / (4180 \cdot (80 - 23)) = 0.03187 \text{ kg/s} = 115 \text{ kg/h}$$