8.3.1 Prevajanje toplote

Kovinska ponev, ki jo postavimo na vročo ploščo štedilnika, se kmalu močno segreje in z njo tudi kovinski ročaj. Tega ne moremo prijeti, ker se premočno segreje, lahko pa primemo lesen ročaj. Konec ročaja se segreje, ker toplota prehaja po ročaju od ponve (kjer je višja temperatura) do konca ročaja, kjer držimo. Izkušnja kaže, da se kovinski ročaj segreje hitreje kot lesen, kar pomeni, da se toplota bolje prevaja po kovini kot po lesu. Pravimo, da je kovina dober prevodnik toplote, les pa slab (ali da je dober toplotni izolator).

Stacionarna porazdelitev temperature

Zaradi toplotnih tokov, ki prehajajo v telesu z mesta z višjo temperaturo na mesto z nižjo temperaturo, se njegovi bolj segreti deli ohlajajo, manj segreti pa segrevajo. Torej se temperature telesa spreminjajo s časom; pravimo, da so *nestacionarne*. Šele ko se temperature na različnih delih telesa izenačijo, dosežemo toplotno ravnovesje, ki je *stacionarno* (od časa neodvisno). Temperaturne razlike v telesu so kljub prehajanju toplote stalne (segreti deli telesa se ne ohlajajo in hladnejši ne segrevajo) le, če jih vzdržujemo tako, da dovajamo toplejšim delom telesa od zunaj tolikšen toplotni tok, kolikšnega izgubljajo zaradi prevajanja toplote. Obenem moramo s hladnejših delov odvajati iz telesa toliko toplotnega toka, kolikor ga tja priteka. Tako dosežemo, da so različne temperature v različnih delih teles stalne. Pravimo, da vzdržujemo *stacionarno porazdelitev temperature.*

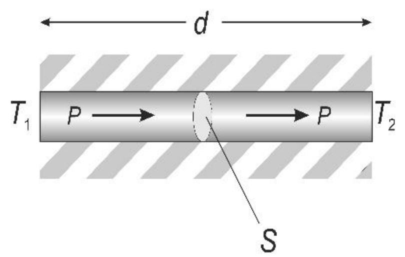
Za takšno porazdelitev je značilno, *da je toplotni tok enak skozi vsako površino telesa prečnega prereza.* Kolikšen toplotni tok P vstopa v telo na toplejšem delu, tolikšen teče skozi vsak prečni prerez telesa in tolikšen tudi izstopa iz telesa na hladnejšem delu. To velja le, če so temperature v snovi stalne (stacionarne), če se ne spreminjajo s časom.

Tolikšen toplotni tok P, kot ga oddaja radiator v stanovanju, da je temperatura v stanovanju stalna, tolikšen preide skozi zid (skozi vsako prečno plast zidu enak tok) in tolikšen zapusti zunanjo steno zidu, ki meji na okolico.

Zakon prevajanja toplote

Poglejmo, kako pridemo do enačbe za izračun toplotnega toka zaradi prevajanja toplote. Obravnavajmo telo, ki ima dve enaki, vzporedni osnovni ploskvi, npr. valj, kvader, plošča, koža, toplotna izolacija na hiši, stene kozarca. Tako telo pogosto imenujemo tudi *plast*.

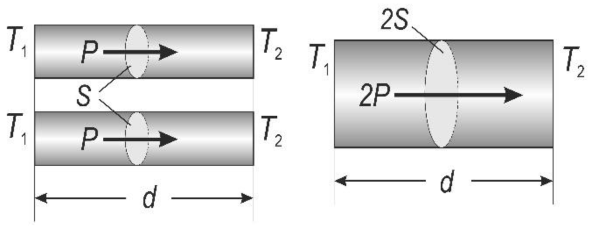
Kot primer plasti vzamimo palico iz dane snovi z dolžino d in prečnim prerezom S. Na eni strani palice vzdržujemo stalno temperaturo T_1 (če je npr. ta stran v stiku z vrelo vodo, je $T_1 =$ $= 100\ °C$), na drugi strani pa odvzemamo toplotni tok, tako da je tam stalna temperatura T_2 (na primer $T_2 = 0\ °C$, če je v toplotnem stiku s talečim se ledom), kot ponazarja slika 1. Palico ob strani toplotno izoliramo, tako da prehaja toplota le vzdolž nje, pravokotno na prečni prerez S.



Slika 1

Ker smo zagotovili, da so temperature v palici stacionarne (se ne spreminjajo s časom), prehaja skozi vsak prečni prerez S enako velik toplotni tok P. Recimo, da bi se toplotni tok v smeri prehajanja toplote spreminjal, da bi bil ob vstopu v kak del telesa večji, ob izstopu iz njega pa manjši. Torej bi ta del prejel večji toplotni tok, kot bi ga oddal. Notranja energija tega dela telesa bi zato s časom naraščala, temperatura bi zato naraščala in tako razmere ne bi bile stacionarne. Stacionarnost temperatur v toplotnem prevodniku zahteva, da so toplotni tokovi v njem enaki.

Najprej ugotovimo, da je toplotni tok P premo sorazmeren s prerezom S, skozi katerega prehaja. Če si namreč mislimo vzporedno ob palici enako palico (slika 2a), preide tudi skoznjo enak toplotni tok P kot skozi prvo palico. Palici ob straneh združimo, da dobimo palico s prečnim prerezom $2S$ (slika 2b). Očitno prehaja skozi sestavljeno palico toplotni tok $2P$.



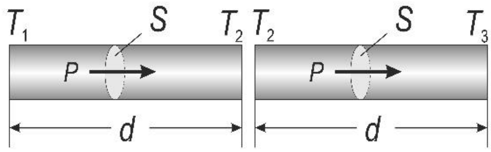
a) b)

Slika 2

Kolikorkrat se pri enakih razmerah spremeni prečni prerez S, tolikokrat se spremeni tudi toplotni tok P. Torej je pomemben kvocient toplotnega toka in prečnega prereza telesa, skozi katerega prehaja toplotni tok; spomnimo se (poglavje 8.1.1), da ga imenujemo *gostota toplotnega toka* $j = P/S$ z enoto W/m^2.

Gradient temperature

Drugo palico s slike 2a prestavimo v smer prve, tako da se palici ob prerezu S stikata. Nastane palica z dvojno dolžino $2d$ (slika 3). Vzemimo, da je med obema koncema druge palice enako velika temperaturna razlika kot na prvotni, d dolgi palici. Na prerezu, kjer sta palici v toplotnem stiku, je temperatura T_2, na koncu palice pa T_3, tako da je $\Delta T = T_2 - T_3 = T_1 - T_2$. Temperaturi na konceh palice se tako razlikujeta za $T_1 - T_3 = (T_1 - T_2) + (T_2 - T_3) = = 2(T_1 - T_2) = 2\Delta T$.



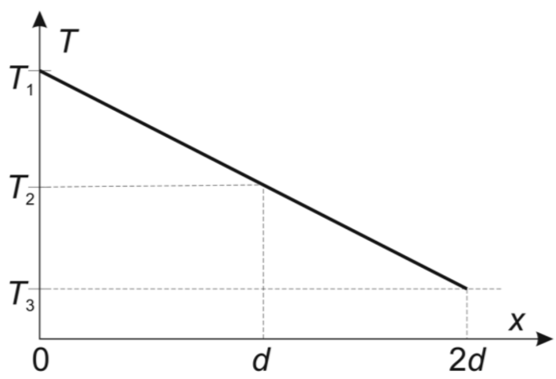
Slika 3

Torej je pri dvojni dolžini palice dvojna tudi temperaturna razlika na njenih konceh (za enak toplotni tok). Ob tem pa se toplotni tok skozi palico ne spremeni, saj prehaja skozi vsak del palice enako velik toplotni tok P. Torej je toplotni tok odvisen od kvocienta temperaturne razlike ΔT in dolžine d v smeri toplotnega toka. Ta kvocient imenujemo *temperaturni gradient* (grad T):

$$\mathbf{grad}\ \boldsymbol{T} = \frac{\boldsymbol{\Delta T}}{\boldsymbol{d}} \quad : \quad \textbf{temperaturni gradient}$$

Poenostavljeno rečeno pomeni v fiziki gradient spremembo fizikalne količine na enoto razdalje. Tako poznamo npr. tudi gradient tlaka (grad p) in gradient hitrosti (grad v)[1].

Temperaturni gradient pove, za koliko stopinj se spremeni temperatura na razdalji 1 m v smeri prehajanja toplote. Njegova enota je K/m. Gradient temperature 5 K/cm na primer pomeni, da se temperatura spremeni na razdalji 1 cm za 5 K, na razdalji 2 cm za 10 K, na razdalji 3 cm za 15 K ... Ker se pri stacionarnih temperaturnih razmerah toplotni tok v smeri prehoda ne spreminja, ostane torej tudi temperaturni gradient nespremenjen, na enakih razdaljah v smeri prehoda toplote je enaka temperaturna razlika. ***Temperatura se*** torej ***spreminja linearno s krajevno koordinato x*** (slika 4).



Slika 4

Poskusi pokažejo, da je gostota toplotnega toka premo sorazmerna s temperaturnim gradientom:

$$j \propto \mathrm{grad}\, T \qquad \rightarrow \qquad j = \frac{P}{S} = \mathrm{konst.}\frac{\Delta T}{d}$$

[1] Druga oznaka za gradient je matematični simbol ∇ (nabla), npr. grad $T = \nabla T$.

Sorazmernostna konstanta je **toplotna prevodnost**; označimo jo z grško črko λ (lambda). Toplotna prevodnost je ***snovna lastnost***. Enačbo za prevajanje toplote skozi toplotni prevodnik zapišemo v obliki:

$$\boxed{P = \lambda S \frac{\Delta T}{d}} \quad : \qquad \textbf{zakon prevajanja toplote}^{2}$$

Toplotni tok P je tem večji, čim večja je toplotna prevodnost snovi λ, čim večja je površina prereza S, skozi katerega prehaja toplota, ter čim manjša je razdalja d, na kateri se temperatura spremeni za ΔT.

Merska enota toplotne prevodnosti je W/mK, kar lahko hitro ugotovimo iz zgornje enačbe:

$$\lambda = \frac{Pd}{S\Delta T}; \qquad [\lambda] = \frac{\mathrm{W \cdot m}}{\mathrm{m^2 \cdot K}} = \mathrm{W/mK}$$

Kovine so dobri *toplotni prevodniki* (imajo toplotno prevodnost več 100 W/mK), navadne snovi nekaj W/mK (rdeča opeka npr. 0,60 W/mK), slabi toplotni prevodniki (dobri *toplotni izolatorji*) pa nekaj stotink W/mK (na primer mineralna volna 0,045 W/mK). Toplotna prevodnost nekaterih snovi je v preglednici 1.

snov	λ [W/mK]	snov	λ [W/mK]
srebro	420	porcelan	1,4
baker	390	malta	0,87
zlato	310	okensko steklo	0,80
aluminij	230	opeka (polna)	0,80
cink	113	opeka (votla)	0,60
medenina	90	voda (20 °C)	0,58
železo	50	bakelit	0,23
jeklo	45	hrastovina	0,20
svinec	35	olje, usnje	0,15
živo srebro	28	smrekovina	0,13
granit	2,5	filc	0,06
led	2,2	volna	0,045
beton	2,0	stiropor	0,040
apnenec	1,75	zrak (20 °C)	0,025

Preglednica 1: Toplotne prevodnosti nekaterih snovi

○ ***Naloga 49:*** Zid z debelino d = 40 cm je iz rdeče opeke s toplotno prevodnostjo λ = = 0,60 W/mK. Na notranji steni zidu je stalna temperatura T_1 = 20 °C, na njegovi zunanji strani pa stalna temperatura T_2 = –10 °C. Kolikšen je toplotni tok (P) skozi zid, ki je širok a = 4,0 m in visok b = 2,5 m? Koliko kilovatnih ur toplote (Q) preide skozi zid v eni uri (t)?

● Temperaturna razlika med notranjo in zunanjo steno zidu je $\Delta T = T_1 - T_2$ = 20 °C – – (–10 °C) = 30 °C = 30 K (spomnimo, da lahko pri temperaturni razliki enoto za temperaturo °C vedno nadomestimo z enoto K).

$$S = ab = 4{,}0\ \mathrm{m} \cdot 2{,}5\ \mathrm{m} = \underline{10\ \mathrm{m}^2}$$

$$P = \lambda S \frac{\Delta T}{d} = 0{,}60 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}} \cdot 10\ \mathrm{m}^2 \cdot \frac{30\ \mathrm{K}}{0{,}40\ \mathrm{m}} = \underline{\underline{450\ \mathrm{W}}}$$

$$Q = Pt = 450\ \mathrm{W} \cdot 3600\ \mathrm{s} = 1{,}62 \cdot 10^6\ \mathrm{Ws} = \underline{\underline{1{,}6\ \mathrm{MJ}}}$$

Pogosto prehaja toplotni tok P skozi več vzporedno povezanih toplotnih prevodnikov. Toplota iz notranjosti hiše na primer prehaja skozi različne stene ter skozi strop in tla. Toplotni tok skozi steno pa prehaja deloma skozi okno in deloma skozi masivni del stene. Celoten toplotni tok P se razdeli na toplotne tokove P_1, P_2, P_3 …, ki prehajajo skozi vzporedno povezane toplotne prevodnike:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \ldots$$

Izračunamo posamezne toplotne tokove in jih seštejemo. Tako na primer prehajajo toplotni tokovi iz hiše v okolico. Del celotnega toka (na primer P) teče skozi eno steno, del (P_1) skozi drugo, del (P_2) skozi tla ...

[2] Tudi Fourierov zakon.