

**UNIVERZA V LJUBLJANI
PEDAGOŠKA FAKULTETA
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO**

DIPLOMSKO DELO

MATEJ GRADIŠAR

**UNIVERZA V LJUBLJANI
PEDAGOŠKA FAKULTETA
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO
Študijski program: Matematika in fizika**

**OHLAJANJE TELES S
SEVANJEM IN KONVEKCIJO
DIPLOMSKO DELO**

**Mentor: Golli dr. Bojan,
izredni profesor**

Kandidat: Matej Gradišar

Ljubljana, junij, 2012

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju Bojanu Golliju za strokovno pomoč, spremljanje in usmerjanje pri izdelavi diplomskega dela.

Hvala vsem domačim, ki so me spodbujali in potrpežljivo čakali na končni izdelek.

Kazalo vsebine

| | |
|---|-----------|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. TEORETIČNI DEL | 3 |
| 2.1. PREVAJANJE TOPLOTE (KONDUKCIJA) | 3 |
| 2.2. KONVEKCIJA (PRESTOP TOPLOTE) | 5 |
| 2.3. TOPLOTNO SEVANJE | 6 |
| 2.3.1. Planckov zakon | 6 |
| 2.3.2. Wienov zakon..... | 7 |
| 2.3.3. Stefanov zakon | 8 |
| 3. EKSPERIMENTALNI DEL | 11 |
| 4. OBDELAVA PODATKOV IN REZULTATI | 14 |
| 4.1. OHLAJANJE ZAPRTE PLOČEVINKE | 15 |
| 4.1.1. Merjenje celotnega toplotnega toka | 16 |
| 4.1.2. Sevanje črne pločevinke..... | 20 |
| 4.1.3. Toplotni tok konvekcije | 21 |
| 4.1.4. Sevanje neobarvane in spolirane pločevinke ter njuna izsevnost | 22 |
| 4.2. OHLAJANJE ODPRTE PLOČEVINKE..... | 27 |
| 4.3. VSILJENA KONVEKCIJA PRI ZAPRTIH PLOČEVINKAH | 31 |
| 5. UMESTITEV V UČNI NAČRT..... | 34 |
| 6. ZAKLJUČEK..... | 39 |
| 7. LITERATURA IN VIRI..... | 41 |

Povzetek

Prenos toplote poteka s tremi osnovnimi mehanizmi: kondukcijo, konvekcijo in sevanjem. V tem delu opišem vse tri navedene mehanizme, vendar se v nadaljevanju ukvarjam predvsem s konvekcijo in sevanjem. Podrobneje opišem tudi eksperimente, pri katerih sem meril čas in temperaturo pri ohlajanju pločevink, napolnjenih s toplo vodo. S temi eksperimenti sem izmeril, kolikšen delež toplotnega toka odnese konvekcija in kolikšen delež je izsevan. Nadalje sem raziskal, kako veter pospeši konvekcijo in kako barva telesa vpliva na sevanje. Preučil sem tudi, kako izhlapevanje vode iz odprte pločevinke pospeši ohlajanje. Pri izvajanju eksperimentov sem si pomagal z računalnikom in programom eProLab, pri interpretaciji rezultatov pa v večini s programom Gnuplot. Temo sem umestil v učni načrt za osnovno šolo, rezultate in dognanja pa skušal povezati z globalnim segrevanjem in podobnimi pojavi.

Ključne besede

Kondukcija, konvekcija, toplotno sevanje, ohlajanje, toplotni tok, izhlapevanje, vsiljena konvekcija.

Abstract

Heat transfers with three basic mechanisms: conduction, convection and thermal radiation.

This thesis presents all three mentioned mechanisms, but in the later analysis I focus only on conduction and thermal radiation. I describe the experiments in which I measured the time and the temperature in the cooling process of cans, filled with hot water.

With these experiments I determined the portion of heat flux carried by convection and the portion carried by thermal radiation. Furthermore I measured how wind speedens the convection and examined the influence of colour of the cans on their thermal radiation. I also showed how water evaporation from open cans affects the cooling process. The computer and the program eProLab were used during experiments and the program Gnuplot for analysing the data. I placed this topic into the curriculum of the elementary school and tried to relate my findings with the problem of global warming and similar phenomena.

Key words

Conduction, convection, thermal radiation, cooling, heat flux, evaporation, forced convection.

1. Uvod

Narava teži k ravnovesju. Termodinamika opisuje, kako si sistem teles med seboj izmenjuje energijo v obliki toplote, da se na koncu med njimi ustvari ravnovesno ali vsaj stacionarno stanje. V tem delu bo bralec podrobneje spoznal mehanizme prenosa toplote in kako močno sta zastopana sevanje ter konvekcija v procesu ohlajanja.

S prevajanjem toplote na stik ali kondukcijo imamo v vsakdanjem življenju veliko izkušenj. Ko pozimi v roke primemo sneženo kepo, čutimo, kako se roke ohlajajo in vidimo, da se kepa tali. Če staknemo poljubni telesi različnih temperatur, teče toplotni tok s telesa z višjo temperaturo na tistega z nižjo. Tak toplotni tok določimo tako, da povemo, koliko joulov toplote se prenese na hladnejše telo vsako sekundo. Gonilo zanj je temperaturna razlika med telesoma.

Nasprotno pa si večina ne predstavlja dobro konvekcije in sevanja. Poleg tega ju je precej težje določiti. Jadralski padalci vedo, kam morajo zajadrati, da ulovijo vzgonski veter. Ta nastane ravno zaradi konvekcije. Na podoben način se dviguje dim nad ognjem. Gonilo pri konvekciji je spet temperaturna razlika med segretim telesom in tekočino, ki ga obliva.

Pri sevanju je skupni toplotni tok odvisen od temperaturne razlike, vendar ne linearno. Vsakdo čuti toplotno sevanje razbeljene žerjavice, prižgane žarnice, zakurjene peči in podobno. Ko pa predmeti niso dovolj vroči, se njihovo sevanje in sevanje okolice nemalokrat spregleda.

Prav tako se optičnim lastnostim predmeta (prosojnost, odbojnost in absorpcija) pogosto pripišejo enake značilnosti za celoten elektromagnetni spekter. Do trajnih poškodb oči lahko pride, če gledamo Sončev mrk skozi neustrezen pripomoček. Material, ki komaj prepušča vidno svetlobo, lahko močno prepušča infrardečo, ki poškoduje mrežnico očesa.

Planet se lahko ohlaja je s sevanjem, zato je prav ta mehanizem ključen za razumevanje učinka tople grede. Atmosfera, brez katere bi imela Zemljina površina povprečno temperaturo $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, vsebuje veliko toplogrednih plinov. Med najpomembnejšimi so: vodna para, ogljikov dioksid, metan, ozon in ostali. Te plini dobro prepuščajo Sončevo svetlobo, absorbirajo pa precej infrardeče. Ker Zemlja najmočneje seva v infrardečem območju, se precej sevanja absorbira v atmosferi. Ta nato seva v infrardečem delu spektra v vse smeri, zato se precejšen delež Zemljinega sevanja vrne nazaj, kar povzroča dodatno segrevanje, zaradi katerega je na našem planetu znosna temperatura. Merjenja, ki potekajo od poznejših let devetnajstega

stoletja pa kažejo, da se povprečna temperatura na Zemlji povečuje. Ta trend rasti temperature se imenuje globalno segrevanje. Znanstveniki z močno industrializiranih držav z 90-odstotno verjetnostjo potrjujejo, da je globalno segrevanje posledica povečevanja toplogrednih plinov, ki smo jih sami ustvarili z izgorevanjem fosilnih goriv, krčenjem gozdov in podobnim. Od leta 1975 naprej se povprečna temperatura Zemlje vsako desetletje dvigne za 0,15 - 0,20 °C [10][11].

Ker sta konvekcija in sevanje slabše razumljena, jima v svoji nalogi posvečam posebno pozornost.

2. Teoretični del

Ohlajanje je naravni proces izmenjave energije. Razlika temperature med telesom in okolico je gonilo toplotnega toka, ki sam od sebe vedno teče s področja višje temperature na področje z nižjo temperaturo. Segretemu telesu se notranja energija zmanjšuje, ko oddaja toploto v hladno okolico, dokler se na koncu temperaturi segretega telesa in okolice ne izenačita. Takrat toplotni tok neha teči. Pri tem se telo ohladi in okolica segreje.

V naravi se segreta telesa ohlajajo preko treh mehanizmov, ki so lahko precej različno močno zastopani. Lahko pa dosežemo, da ukinemo vpliv kakega mehanizma ali ga vsaj zmanjšamo na zanemarljivo stopnjo.

2.1. Prevajanje toplote (kondukcija)

Prevajanje toplote je mehanizem prenosa toplote po mirujoči trdni snovi. Dva rezervoarja z različnima temperaturama naj povezuje toplotni prevodnik. Toplota se pretaka preko toplotnega prevodnika od toplejšega rezervoarja proti hladnejšemu toliko časa, da se temperaturi rezervoarjev ne izenačita. Toplotni tok P je toplota dQ , ki jo toplejše telo v času dt odda hladnejšemu telesu [1]. Velja:

$$P = \frac{dQ}{dt}.$$

Tak toplotni tok si lahko predstavljamo kot pretakanje tekočine. Mikroskopska razlaga prevajanja toplote je, da se povprečna kinetična energija gradnikov toplotnega prevodnika prenaša v smeri nižje temperature.

Naj omenim preprosta primera:

Imejmo dve posodi. V prvi je voda pri 90 °C, v drugi pa voda pri temperaturi 20 °C. Posodi naj povezuje kovinska palica. Tedaj toplejša voda preko palice predaja toploto hladnejši vodi, dokler se temperaturi v rezervoarjih ne izenačita.

Kovinsko palico na enem koncu segrevamo s plamenom, drugi konec pa se dotika ledu pri temperaturi ledišča. Toplotni tok ves čas teče po palici. To se kaže tako, da so različni deli palice na različnih temperaturah [2].

Za takšno prevajanje toplote velja t.i. Fourierov zakon prevajanja. Za prevajanje v eni dimenziji, na primer po tanki palici, se glasi

$$j = -\lambda \frac{dT}{dx},$$

v treh razsežnostih pa

$$j = -\lambda \text{grad}T.$$

Količina j se imenuje gostota toplotnega toka in velja $j = dP/dS$, pri čemer je dS majhen presek, ki je pravokoten na smer toplotnega toka.

Vsaka snov je toplotni prevodnik, vendar se koeficienti toplotne prevodnosti λ med različnimi snovmi lahko bistveno razlikujejo. Tabela prikazuje nekaj vrednosti za nekatere snovi pri sobni temperaturi in normalnem tlaku [3].

| snov | λ [W/mK] |
|----------------------------|------------------|
| zrak | 0,024 – 0,026 |
| polistilen (plastika) | 0,033 |
| plutovina | 0,04 – 0,07 |
| les | 0,09 – 0,21 |
| voda | 0,6 |
| steklo | 0,8 – 0,9 |
| beton | 0,8 – 1,28 |
| železova litina | 55 |
| aluminij | 205 – 237 |
| srebro | 406 – 426 |
| diamant, prečiščen, umetni | 2000 – 2500 |

Tabela 1: Koeficienti toplotne prevodnosti za pogoste snovi [3]

2.2. Konvekcija (prestop toplote)

Iz tabele 1 je razvidno, da je razlika med tekočinami in kovinami v toplotni prevodnosti lahko tudi pet velikostnih redov. Pričakovali bi, da se tekočine segrevajo in ohlajajo ustrezno daljši čas, saj naj bi bil toplotni tok v tekočino skoraj zanemarljiv v primerjavi s kovinami. Vseeno pa se lahko hitro segrejejo. Ker so njihovi gradniki gibljivi, se toplota prenaša tudi z mešanjem tekočine. To se dogaja preko konvekcijskih tokov, ki nastanejo zaradi temperaturnega raztezanja. Tanka plast tekočine neposredno ob segreti površini se segreje. S tem se ji poveča prostornina za $\Delta V = \beta V \Delta T$. Ker je segreta tekočina običajno redkejša od okoliške tekočine, se dviga. Konvekcijski tok je dobro viden, ko na štedilnik postavimo stekleno posodo, v kateri je voda z manjšimi netopnimi delci. V takem primeru se na sredini dna lonca voda dviga, nato pa se na vrhu ohlaja in polzi ob stenah posode spet na dno [4].

Ta pojav je znan kot naravna konvekcija, kjer se konvekcijski tok ustvarja sam od sebe. Ohlajanje pa lahko pospešimo z vsiljeno konvekcijo, pri čemer v sistem vključimo še črpalko ali ventilator, ki prek segretega telesa poganja tok hladne tekočine. S tem je temperaturna razlika med segretim telesom in okoliško tekočino vedno največja. Nekateri avtorji [5] navajajo, da je pri vsiljeni konvekciji koeficient toplotne prevodnosti premo sorazmeren hitrosti zraka do hitrosti 5 m/s .

Toplotni tok pri naravni konvekciji je, tako kot pri prevajanju, premo sorazmeren temperaturni razliki med segretim telesom in hladno tekočino. Z Λ_k je označen koeficient toplotne prevodnosti pri konvekciji, S je površina segretega telesa in T njegova temperatura. T' pa je temperatura hladilne tekočine. Velja [1] :

$$P_k = -\Lambda_k S (T - T'). \quad (1)$$

Rad bi izpostavil dva pomembna zгледа konvekcije.

Na enakem principu je zgrajena centralna kurjava na toplo vodo. Voda se v kletnih prostorih segreva, nato pa se po sistemu cevi dviga v višja nadstropja stavbe, v katerih so postavljeni

radiatorji. V njih poteka večina toplotne izmenjave s prostori. Ko se nekoliko ohlajena voda pretoči skozi najvišji radiator, se njena pot spet usmeri proti kleti, kjer se ponovno segreje.

Lokalni veter nastane zaradi konvekcije, ker se zrak neenakomerno segreva. Podnevi, ko sonce močno segreje asfalt v mestu, se tam zrak hitro dviga. Zrak nad okoliškimi gozdovi pa je precej manj segret. Ko se mestni zrak dviguje, ga sproti nadomešča okoliški zrak. Zato veter piha proti mestu.

2.3. Toplotno sevanje

Še zadnji mehanizem toplotne izmenjave je sevanje. To je elektromagnetno valovanje, ki v nasprotju s konvekcijo in prevodnostjo, za širjenje ne potrebuje nobenega medija. V vakuumu potuje s svetlobno hitrostjo $c_0 = 2,99 \cdot 10^8$ m/s. Vsako telo, ki ima temperaturo večjo od 0 K, seva. Če v hladno sobo prinesemo segret predmet, bo njegovo sevanje sprejela soba. Vendar tudi soba, čeprav je hladnejša od predmeta, seva nazaj. To je pomembna lastnost sevanja, da teče energijski tok tudi od hladnejših stvari do toplejših.

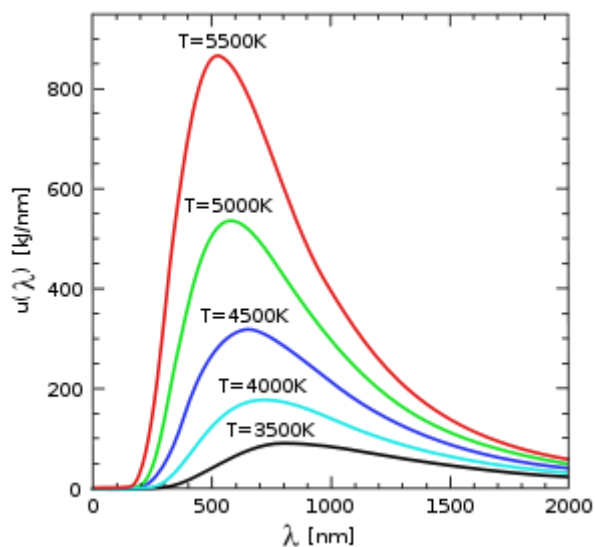
2.3.1. Planckov zakon

Velja, da črno telo izseva vse valovne dolžine, vendar so različno močno zastopane. Spekter sevanja nekega telesa je odvisen samo od njegove temperature, ne pa od materiala iz katerega je narejen.

Planckov zakon za gostoto energijskega toka pri sevanju črnega telesa podaja porazdelitev sevanja po valovnih dolžinah.

$$\frac{dj_\lambda}{d\lambda} = \frac{2\pi hc_0^2}{\lambda^5} \left(e^{\frac{hc_0}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1} \quad (2)$$

Tu sta h Planckova konstanta in k Boltzmannova konstanta. Funkcija $dj_\lambda/d\lambda$ ima vrh, ki hitro narašča s temperaturo. Slika 1 prikazuje porazdelitev za nekaj temperatur.



Slika 1: Spekter črnega telesa za različne temperature [6]

2.3.2. Wienov zakon

Iz slike 7 je razvidno, da se vrh funkcije $dj_\lambda/d\lambda$ pri višjih temperaturah premika proti krajšim valovnim dolžinam. Z λ_0 označimo valovno dolžino, pri kateri ima za dano absolutno temperaturo T funkcija (2) vrh. Za črno telo velja Wienov zakon

$$\lambda_0 T = k_w,$$

pri čemer je $k_w = 2.90 \cdot 10^{-3}$ mK Wienova konstanta [7].

S pomočjo tega zakona lahko sklepamo v katerem valovnem območju segreto telo najmočneje seva. Tabela 2 prikazuje nekaj primerov.

| T (°C) | telo/stanje | λ_0 (nm) | Valovni spekter |
|----------|------------------------------|------------------|-------------------------|
| -270,4 | kozmično prasevanje ozadja | $1 \cdot 10^6$ | mikrovalovi |
| 0 | led | 10600 | infrardeča |
| 25 | sobna temperatura | 9700 | infrardeča |
| 36,8 | človeška telesna temperatura | 9400 | infrardeča |
| 300 | žerjavica oglja | 5100 | infrardeča |
| 1000 | rumeni plamen | 2300 | infrardeča |
| 2500 | žarilna nitka v žarnici | 1000 | infrardeča |
| 5500 | površina Sonca | 500 | vidna svetloba - zelena |

Tabela 2: Spekter najmočnejšega sevanja snovi glede na njeno temperaturo [8]

Daleč najbolj zastopano sevanje okoli nas je infrardeči spekter, ki leži med vidno svetlobo in mikrovalovi. Sega nekje od 0,7 μm do 1000 μm . Človek ga s kožo zaznava kot občutek toplote.

2.3.3. Stefanov zakon

Slovenski fizik Jožef Stefan (1864 – 1928) je bil dejaven na vseh področjih fizike. V termodinamiki je opazoval prenos toplote s sevanjem. Po njem se imenuje zakon za sevanje črnega telesa, ki ga je odkril leta 1879 na osnovi meritev Johna Tyndalla. Eksperimentalno je odkril, da gostota vsega izsevanega toka narašča s četrto potenco absolutne temperature telesa.

Zakon za sevanje črnega telesa se glasi:

$$j^* = \sigma T^4.$$

Danes ga lahko izpeljemo iz Planckovega zakona kot integral [7]:

$$j^* = \int_0^{\infty} \left(\frac{dj^*}{d\lambda} \right) d\lambda = \sigma T^4,$$

tu je $dj^*/d\lambda$ porazdelitev energijskega toka za sevanje črnega telesa po valovnih dolžinah (2). Kot rečeno, ta zakon velja za idealizirano črno telo. To je takšno, ki absorbira vse valovanje, ki pada nanj in od vseh teles najmočnejše seva na celotnem valovnem območju. Stefanov zakon je kasneje v okviru termodinamike teoretično izpeljal njegov učenec Ludwig Boltzmann in ga dopolnil tako, da velja tudi za telesa, ki niso črna.

$$j = \varepsilon \sigma T^4$$

Količina ε je izsevnost, na katero vpliva obdelava površine in barva telesa v danem spektru. Gostota toplotnega toka j je definirana kot razmerje med toplotnim tokom P na enoto površine S . Izrazimo toplotni tok sevanja in enačba preide v obliko:

$$P_s = j_s S = \varepsilon S \sigma T^4. \quad (3)$$

Indeksa označujeta, da gre pri toku za sevanje.

Barva na tem mestu je pravzaprav pripisana temnosti telesa, saj vemo, da na primer v infrardečem spektru ne moremo govoriti o barvi. Idealna črna telesa imajo $\varepsilon = 1$, ostala telesa pa imajo izsevnost $0 < \varepsilon \leq 1$.

Telesa se glede na absorpcijo valovanja med seboj precej razlikujejo. Poglejmo preprost primer. Ko curek svetlobe pade na spolirano kovino, se skoraj v celoti odbije. Ko pa ta curek svetlobe pade na sajasto kovino, pa se ga odbije le majhen delež. Namesto odboja na površini pride do absorpcije valovanja, kar povzroči, da se sajasta kovina segreva in seva nazaj v prostor, ponavadi v nekem drugem delu spektra. Kovina je za svetlobo povsem neprosojna, v nasprotju pa steklo prepusti skoraj vso vpadno svetlobo, nekaj pa se je od površine odbije.

V splošnem velja naslednje. Ko na predmet pade valovanje z jakostjo j , se del valovanja aj odbije, αj absorbira in kj prepusti. Koeficient a se imenuje albedo ali odbojnost, α je

absorpcijski koeficient in k prepustnost. Vsi trije koeficienti imajo vrednost med 0 in 1. Velja še $a + \alpha + k = 1$. Za telo, ki ne prepušča vpadnega valovanja velja $k = 0$, za popolnoma prosojno telo pa velja $k = 1$. Pri zgornjem primeru pada svetloba na steklo, pri čemer steklo prepusti skoraj vso svetlobo. Ne velja pa enako, če na steklo svetimo z ultravijolično svetlobo, saj je steklo zanjo skoraj neprosojno. Vsi koeficienti a , α in k so odvisni od frekvence valovanja in temperature predmeta [5].

Realna telesa se na različne dele spektra sevanja obnašajo na svoj način. Na primer, predmet pobarvan na črno barvo bo skoraj idealno "črn" za poljuben del spektra. Isti predmet pobarvan z belo prekrivno barvo pa bo "bel" v vidni in skoraj "črn" v infrardeči svetlobi.

Vse stvari, za katere je albedo neodvisen od valovne dolžine, imenujemo siva telesa. V tem primeru je $\varepsilon = 1 - a$. Za sivo telo napišemo Stefanov zakon v taki obliki:

$$j = (1 - a)\sigma T^4.$$

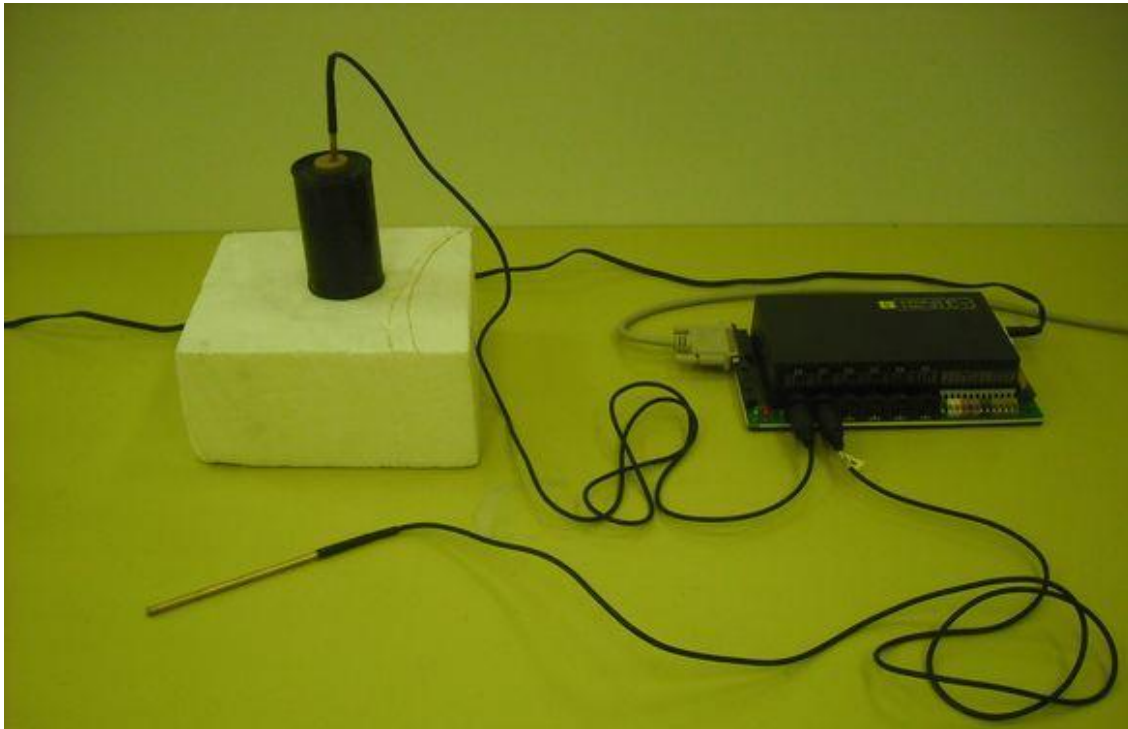
3. Eksperimentalni del

Z opravljenimi meritvami sem želel ugotoviti, kateri mehanizem oddajanja toplote prevladuje v vsakdanjih okoliščinah. Osredotočil sem se na konvekcijo in sevanje, ker sta ta dva mehanizma globalno najbolj zanimiva. Prevajanje toplote na stik je lahko predstavljivo, poleg tega ga je tudi najlažje zmanjšati na zanemarljivo raven.

Za merjenec sem uporabljal segreto vodo v pločevinki. Običajno je imela voda ob začetku merjenja temperaturo okoli 80 °C in se počasi ohlajala do temperature okolice, okoli 15 °C. Spremljal pa sem časovni potek temperature pri ohlajanju v štirih pločevinkah enakih dimenzij s prostornino 190 ml, razlikovale so se le po barvi. Uporabil sem črno, belo in dve neobarvani pločevinki valjaste oblike, kot je prikazano na slikah 2, 3 in 4. Ena neobarvana je imela precej površine prekrite z rjastimi zaplatami. To tudi v nadaljevanju imenujem neobarvana. Druga »neobarvana« pa je bila povsem brez rje, to v nadaljevanju imenujem spolirana, čeprav njena površina ni bila spolirana.

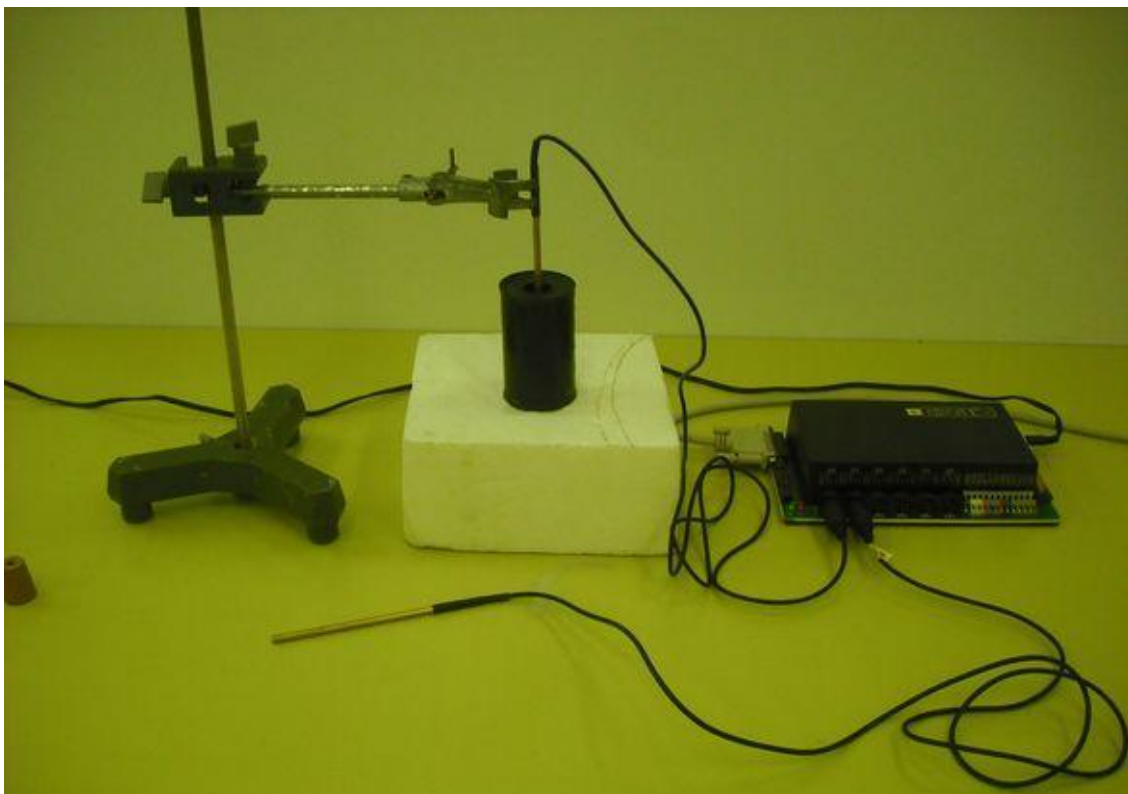
Postavil sem jih na stiropor, da sem čim bolj izničil prevajanje skozi podlago, in meril temperaturo z dvema sondama. Ena je merila temperaturo v sredini pločevinke, druga pa temperaturo okolice. Sondi sta bili preko vmesnika povezani z računalnikom. Program eProLab, ki je prikazan na sliki 5, mi je beležil temperaturo obeh sond vsakih pet sekund in sprti risal graf temperature v odvisnosti od časa $T(t)$. S spolirano pločevinko sem opravil dve meritvi, z ostalimi pa tri.

Preden pa sem se lotil meritev, sem še preveril, če sondi kažeta enaki temperaturi. Postavil sem ju skupaj in ugotovil, da ena sonda v povprečju kaže 0,1 °C nižjo temperaturo kot druga. To razliko sem kasneje upošteval pri obdelavi podatkov.



Slika 2: Merjenje temperature zaprte črne pločevinke

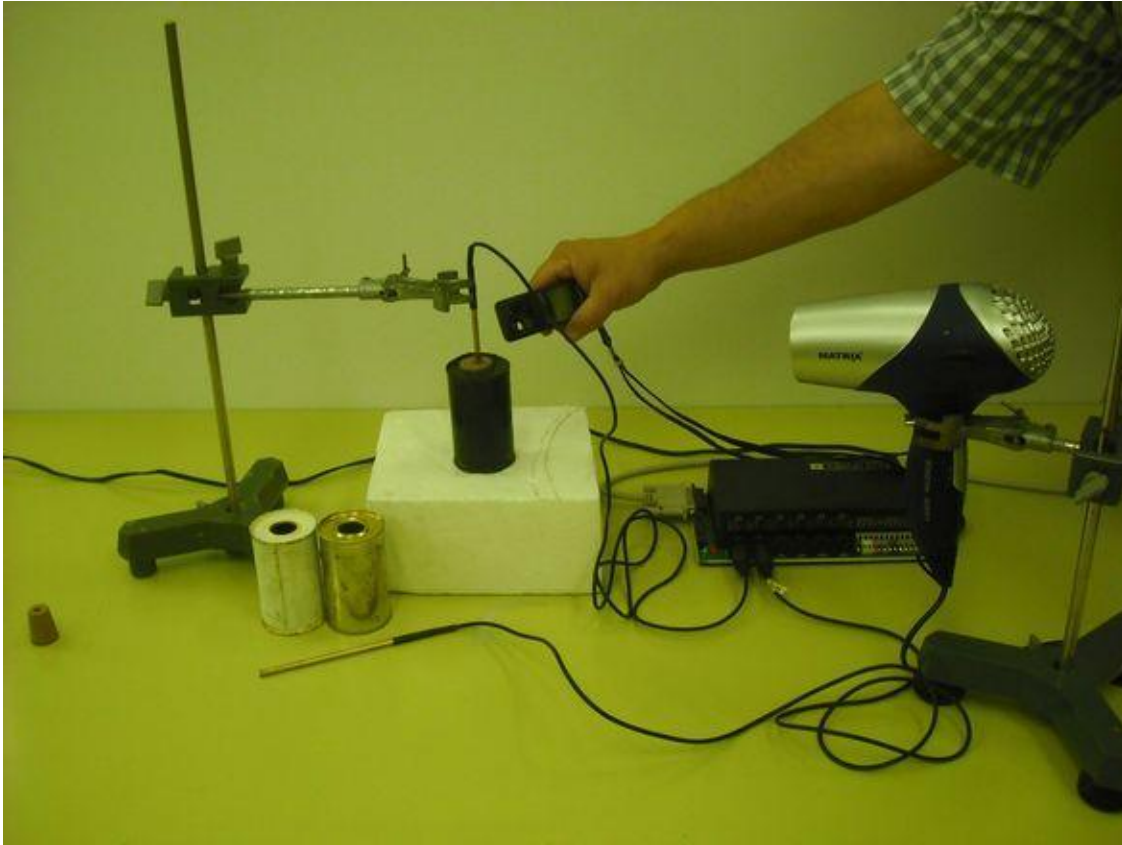
Enake meritve sem nato opravil še z odprtimi pločevinkami. S tem sem lahko ocenil, kako močno izhlapevanje pripomore k ohlajanju.



Slika 3: Merjenje temperature odprte črne pločevinke

Opazil sem, da prihaja do pomembnih razlik v času ohlajanja, zaradi različno močnega sevanja pločevink.

V zadnjih meritvah pa sem k zaprtim pločevinkam dodal še ventilator, kot model vsiljene konvekcije.



Slika 4: Merjenje temperature zaprte črne pločevinke pri vsiljeni konvekciji

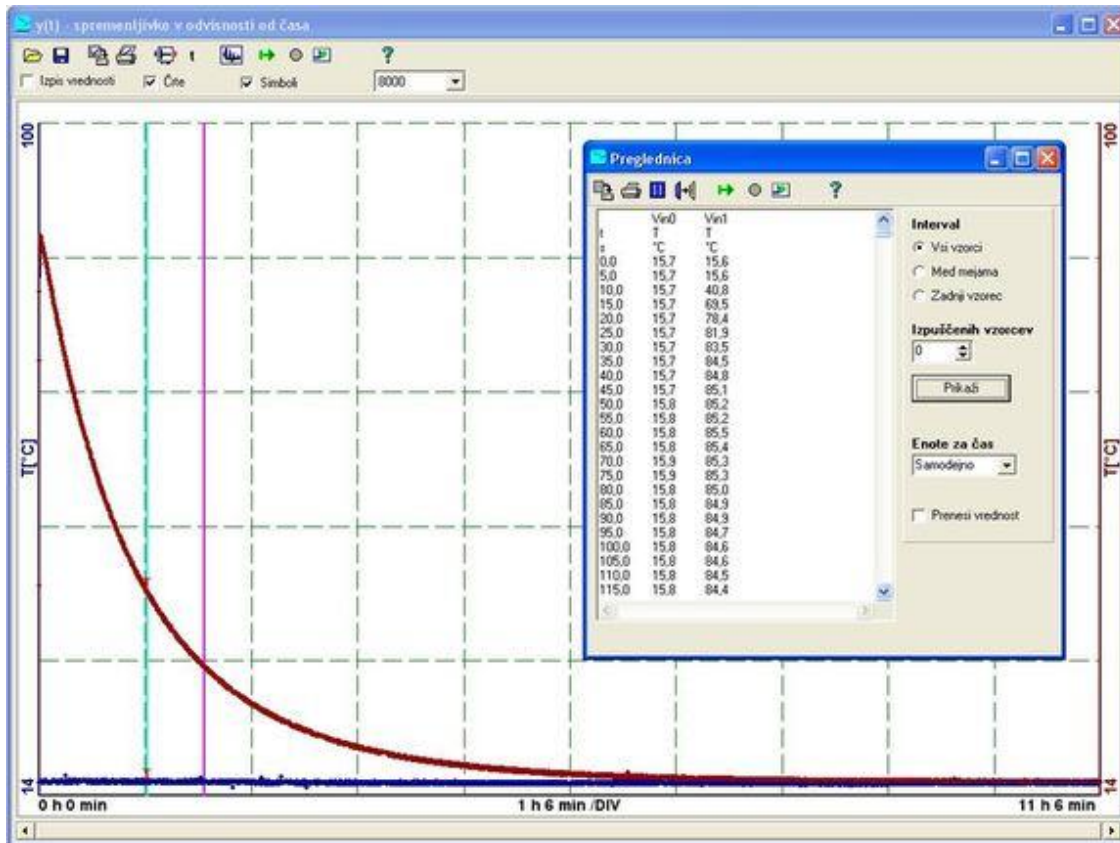
Pri računanju sevanja in konvekcije sem vzela za izsevnost ε črne pločevinke vrednost $\varepsilon = 0,94 \pm 0,4$ iz literature [5]. Prostornina je enaka $V = 190 \text{ ml} \pm 2 \text{ ml}$. Izmerjena je bila z merilnim valjem, v katerega sem nalil vodo iz polne pločevinke. Masa vode je izračunana iz enačbe $m = \rho V$ in je enaka $0,19 \text{ kg}$. Površino S pa sem izračunal tako, da sem izmeril višino in polmer osnovne ploskve. Če sem izmeril polmer in višino na en milimeter natančno, je površina pločevinke enaka:

$$S = \pi r^2 + 2\pi r v = 190,7 \text{ cm}^2 \pm 9,5 \text{ cm}^2.$$

Ena osnovna ploskev pločevinke leži na stiroporu, zato je nisem upošteval kot površino, skozi katero teče toplotni tok.

4. Obdelava podatkov in rezultati

Dobljeni podatki so v programu eProLab predstavljeni v obliki grafa in tabele. V tabeli se prikaže poljubni časovni interval, ki ga na grafu izberemo med modro in roza črto.



Slika 5: Prikaz meritve časovnega poteka temperature v programu eProLab

Za začetek vsake meritve sem si izbral čas, ko temperatura v pločevinki že pada. Konec meritve pa, ko se temperaturi pločevinke in okolice skoraj izenačita.

V tabeli je možnost izpuščanja vzorcev, kar omogoča hitro prilagajanje časovnega intervala med dvema zaporednima vzorcema. Treba ga je bilo podaljšati, da bi se izognil prevelikim napakam.

Tako dobljene podatke sem izvozil v Excel, nato pa izračunal še ostale potrebne količine. Izkazalo se je še, da je bolje prilagoditi časovni interval med meritvami tako, da so razlike v padcu temperature podobne. Na začetku, ko temperatura hitro pada, sem izbral več vzorcev, kasneje pa vse manj.

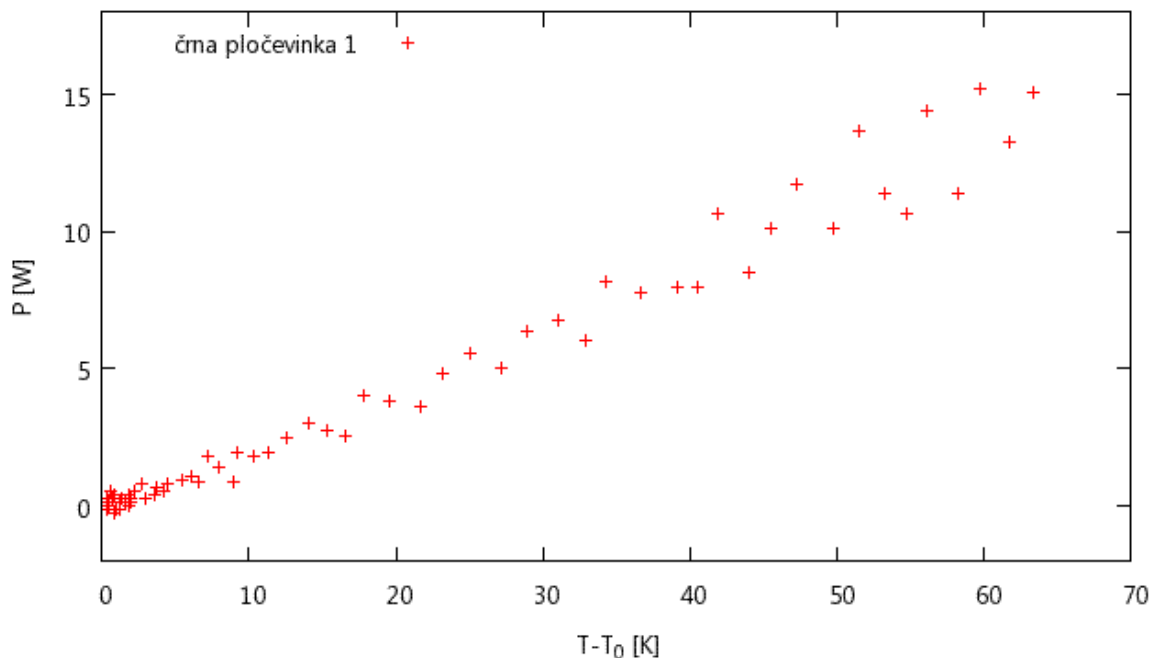
4.1. Ohlajanje zaprte pločevinke

Moč, s katero pločevinka oddaja toploto Q v kratkih časovnih intervalih Δt , sem izračunal po definiciji:

$$P = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{cm\Delta T}{\Delta t}.$$

S c sem označil specifično toploto vode, m pa je masa vode. Produkt cm za neko snov imenujemo toplotna kapaciteta. Če bi hotel biti zelo natančen, bi moral v formuli upoštevati tudi toplotno kapaciteto termometra in pločevinke, vendar sta obe veliko manjši od toplotne kapacitete vode, zato sem ju zanemaryl.

Če je časovni interval Δt dovolj majhen, lahko opazujemo trenutno moč P pločevinke pri temperaturi T . Ker je temperatura merjena v Kelvinovi lestvici, je sobna temperatura daleč od izhodišča. Za opisovanje odvisnosti je praktičen graf moči v odvisnosti od temperaturne razlike med pločevinko in okolico, kot kaže slika 6.



Slika 6: Graf odvisnosti izgubne moči od temperaturne razlike med okolico in črno pločevinko

Temperatura, pri kateri so meritve zgoščene, je temperatura okolice. Na tem mestu pločevinka ne izgublja več notranje energije.

Toplotni tok konvekcije naj bi bil premo sorazmeren temperaturni razliki med segretim telesom in tekočino, ki ga obliva [5]. Na tem mestu pa bom dopustil še odvisnost od kvadratnega člena:

$$P_k(T) = \Lambda_k S(T - T_0) + M_k S(T - T_0)^2.$$

Išče se torej odvisnost toplotne moči od temperature v obliki polinoma po potencah $(T - T_0)^n$, $n \in \mathbb{N}$

Za izsevan toplotni tok segretega telesa (3) velja:

$$P_s(T) = \varepsilon S \sigma (T^4 - T_0^4).$$

Pri tem je $\varepsilon S \sigma T_0^4$ tok, ki ga predmet prejme iz okolice.

Zakon bi sedaj radi preoblikovali v vsoto členov $(T - T_0)^n$, zato funkcijo $P_s(T)$ razvijemo v Taylorjevo vrsto v okolici točke T_0 . Ta preide v obliko:

$$P_s(T) = 4AT_0^3(T - T_0) + 6AT_0^2(T - T_0)^2 + 4AT_0(T - T_0)^3 + A(T - T_0)^4,$$

pri tem je $A = \varepsilon S \sigma = konst.$

4.1.1. Merjenje celotnega toplotnega toka

Ob predpostavki, da je toplotni tok zaradi kondukcije zanemarljiv [3], lahko sklepamo, da je skupni toplotni tok enak vsoti toplotnih tokov konvekcije in sevanja.

$$P = P_k + P_s$$

To pa je enako:

$$P = \Lambda_k S(T - T_0) + M_k S(T - T_0)^2 + 4AT_0^3(T - T_0) + 6AT_0^2(T - T_0)^2 + 4AT_0(T - T_0)^3 + A(T - T_0)^4.$$

Linearna in kvadratna člena lahko združimo.

$$P = (\Lambda_k S + 4AT_0^3)(T - T_0) + (M_k S + 6AT_0^2)(T - T_0)^2 + 4AT_0(T - T_0)^3 + A(T - T_0)^4$$

Na tem mestu se vidi, da se lahko celotna toplotna izguba izrazi kot vsota členov $(T - T_0)$ z naravnoštevilskim eksponentom. Zaradi preglednosti bom zapis skrajšal.

$$P = b(T - T_0) + c(T - T_0)^2 + d(T - T_0)^3 + e(T - T_0)^4,$$

pri tem se koeficienti b , c , d in e izražajo z:

$$b = \Lambda_k S + 4AT_0^3,$$

$$c = M_k S + 6AT_0^2,$$

$$d = 4AT_0,$$

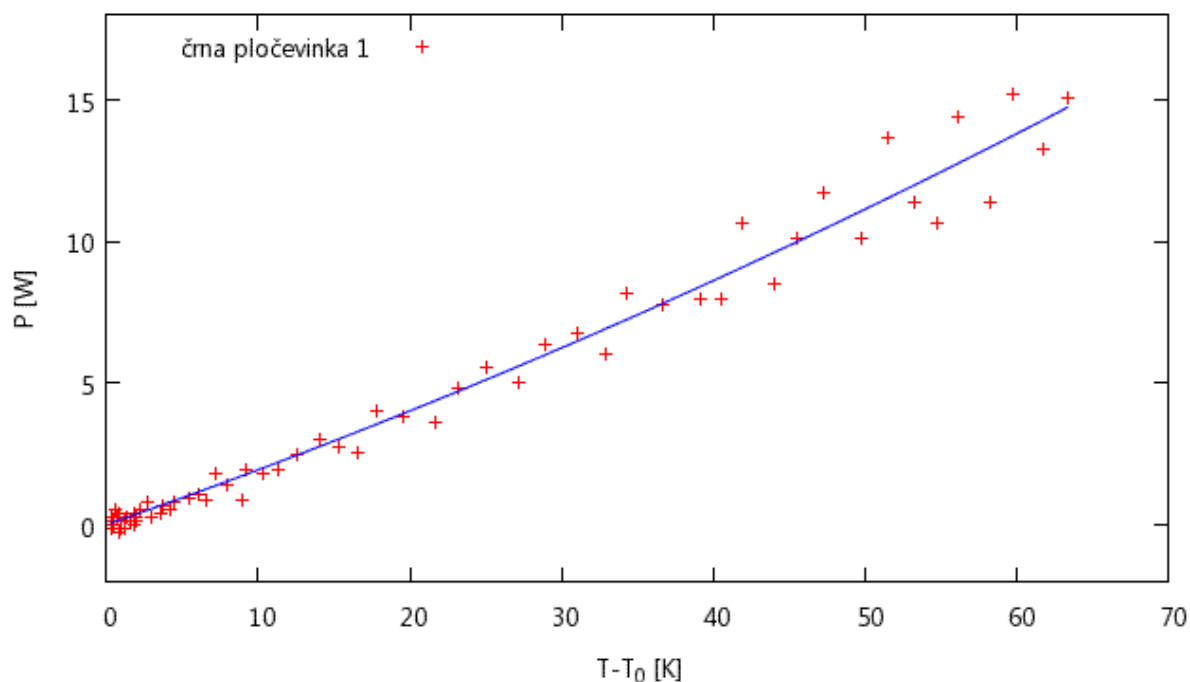
$$e = A.$$

Sedaj se lahko vrnem nazaj na zadnji graf, na katerem iščem krivuljo, ki se najlepše prilega meritvam in je oblike $f(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$, pri čemer je parameter $x = T - T_0$.

Program Gnuplot, s katerim sem risal grafe, je v nekaj poskusih sam določil parametre a , b , c , d in e ter njihove statistične napake. Izkazalo se je, da je pri parametrih d in e napaka večja od njune vrednosti, zato sta zanemarljiva. Parameter a pa sem moral nastaviti na vrednost $a = 0$, da sta bila ostala koeficienta bolj stabilna.

Krivulja, ki se najlepše prilega meritvam je torej drugega reda oblike:

$$f(x) = bx + cx^2.$$



Slika 7: Meritve za zaprto črno pločevinko in krivulja, ki se jim prilega

Tako sem dobil za vse tri meritve pri črni pločevinki koeficienta b in c . Z indeksom 1, 2, 3 sem označil kateri meritvi pripada koeficient. Vrednosti sem uredil v tabelo 3.

| Zaprta črna pločevinka | | | | |
|------------------------|-------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|
| | Koeficienti | Vrednost | Absolutna napaka | Relativna napaka [%] |
| Prva | b_1 | 0,182 W/K | 0,012 W/K | 6,4 |
| | c_1 | 0,00082 W/K ² | 0,00023 W/K ² | 29 |
| Druga | b_2 | 0,183 W/K | 0,012 W/K | 6,7 |
| | c_2 | 0,00083 W/K ² | 0,00024 W/K ² | 30 |
| Tretja | b_3 | 0,1907 W/K | 0,0094 W/K | 4,9 |
| | c_3 | 0,00064 W/K ² | 0,00018 W/K ² | 29 |

Tabela 3: Koeficienta b in c ter njuni napaki za vse tri meritve

Skupno absolutno napako koeficientov b označimo s σ_b . Dobi se jo iz posameznih absolutnih napak σ_{b_1} , σ_{b_2} in σ_{b_3} koeficientov b_1 , b_2 in b_3 [9].

$$1/(\sigma_b)^2 = 1/(\sigma_{b1})^2 + 1/(\sigma_{b2})^2 + 1/(\sigma_{b3})^2$$

Povprečno vrednost koeficienta b se sedaj izračuna po formuli:

$$\bar{b} = (\sigma_b)^2 \left(\frac{b_1}{(\sigma_{b1})^2} + \frac{b_2}{(\sigma_{b2})^2} + \frac{b_3}{(\sigma_{b3})^2} \right)$$

Koeficient \bar{c} določimo po enakem postopku.

Dobljeni povprečni vrednosti in napake sem predstavil v tabeli 4.

| Koeficient | Vrednost | Absolutna napaka | Relativna napaka [%] |
|------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|
| \bar{b} | 0,1862 W/K | 0,0063 W/K | 3,4 |
| \bar{c} | 0,00074 W/K ² | 0,00012 W/K ² | 17 |

Tabela 4: Povprečje koeficientov b in c za celotno izgubno moč črne pločevinke

Dobljena koeficienta predstavljata celotni povprečni toplotni tok za črno pločevinko.

$$\bar{P}_{cel} = \bar{b}(T - T_0) + \bar{c}(T - T_0)$$

Naslednje tri tabele prikazujejo vrednosti koeficientov \bar{b} in \bar{c} še za belo, neobarvano in spolirano pločevinko. Vsi povprečni koeficienti in napake so bili izračunani po enakem postopku kot za črno pločevinko.

| Koeficient | Vrednost | Absolutna napaka | Relativna napaka [%] |
|------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|
| \bar{b} | 0,1873 W/K | 0,0050 W/K | 2,7 |
| \bar{c} | 0,000666 W/K ² | 0,000094 W/K ² | 14 |

Tabela 5: Povprečje koeficientov b in c za celotno izgubno moč bele pločevinke

| Koeficient | Vrednost | Absolutna napaka | Relativna napaka [%] |
|------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|
| \bar{b} | 0,1302 W/K | 0,0046 W/K | 3,6 |
| \bar{c} | 0,000333 W/K ² | 0,000087 W/K ² | 26 |

Tabela 6: Povprečje koeficientov b in c za celotno izgubno moč neobarvane pločevinke

| Koeficient | Vrednost | Absolutna napaka | Relativna napaka [%] |
|------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|
| \bar{b} | 0,1216 W/K | 0,0051 W/K | 4,2 |
| \bar{c} | 0,000318 W/K ² | 0,000088 W/K ² | 28 |

Tabela 7: Povprečje koeficientov b in c za celotno izgubno moč spolirane pločevinke

4.1.2 Sevanje črne pločevinke

Tako kot celotni toplotni tok, je tudi tok sevanja, ki sem ga dobil kot Taylorjev razvoj funkcije $P_s(T)$ v vrsto, drugega reda:

$$P_s(T) = 4AT_0^3(T - T_0) + 6AT_0^2(T - T_0)^2, \quad (4)$$

pri tem je $A = \varepsilon S \sigma = konst.$

Označimo koeficienta sevanja črne pločevinke z b_s in c_s .

$$b_s = 4AT_0^3,$$

$$c_s = 6AT_0^2.$$

Njuni povprečni vrednosti sem izračunal iz znanih količin: izsevnosti črne pločevinke ε , površine pločevinke S in temperature okolice T_0 . Povprečna koeficienta sta predstavljena v tabeli 8.

| Koeficient | Vrednost | Absolutna napaka | Relativna napaka [%] |
|-------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|
| \bar{b}_s | 0,1015 W/K | 0,0065 W/K | 6,4 |
| \bar{c}_s | 0,000527 W/K ² | 0,000034 W/K ² | 6,4 |

Tabela 8: Povprečne vrednosti koeficientov za tok sevanja črne pločevinke

Relativno napako koeficientov \bar{b}_s in \bar{c}_s sem seštel iz napake izsevnosti in površine po formuli:

$$r(b_s, c_s) = \sqrt{r^2(\varepsilon) + r^2(S)}.$$

4.1.3. Toplotni tok konvekcije

Toplotni tok konvekcije dobim tako, da od skupnega toplotnega toka odštejem sevanje. Koeficienta sevanja pa lahko iz Taylorjevega razvoja (4) določim samo za črno pločevinko, saj samo zanjo poznam izsevnost, za katero sem vzel vrednost $\varepsilon = 0,94 \pm 0,04$ iz literature [5]. Konvekcijo sem tako določil le iz črne pločevinke.

Absolutno napako koeficientov pri konvekciji pa sem določil po formuli:

$$a(\bar{b}_k) = \sqrt{a^2(\bar{b}) + a^2(\bar{b}_s)}.$$

Povprečna koeficienta izračunam posebej.

$$\bar{b}_k = \bar{b} - \bar{b}_s = (0,0846 \pm 0,0091) \text{ W/K}$$

in

$$\bar{c}_k = \bar{c} - \bar{c}_s = (0,00021 \pm 0,00013) \text{ W/K}^2$$

Ker je konvekcija odvisna le od oblike in velikosti pločevinke, ne pa od barve, bom predpostavil, da izračunani toplotni tok konvekcije velja za vse pločevinke. Velikostni red napake pri koeficientu \bar{c}_k je enak kot pri njegovi vrednosti, zato ga v nadaljevanju ne bom več upošteval.

$$\bar{P}_k = \bar{b}_k(T - T_0)$$

Iz zgornjega izraza lahko določim koeficient toplotne prevodnosti za naravno konvekcijo.

$$\Lambda_k = \frac{\bar{b}_k}{S}$$

Relativno napako sem izračunal po spodnji formuli:

$$r(\Lambda_k) = \sqrt{r^2(\bar{b}_k) + r^2(S)},$$

in dobil vrednost:

$$\Lambda_k = 4,28 (\pm 0,12) \text{ W/m}^2.$$

Za črno pločevinko lahko trdim, da najmočneje seva, saj je njena izsevnost ε blizu 1. Bela pločevinka se od črne v okviru napake ne razlikuje. Kako močno sevata neobarvana in spolirana pločevinka, pa moram še izračunati.

4.1.4 Sevanje neobarvane in spolirane pločevinke ter njuna izsevnost

Tok sevanja teh dveh pločevink dobim tako, da od njunega celotnega toka odštejem konvekcijo, nato pa iz Taylorjevega razvoja (4) za sevanje izračunam izsevnost. Absolutno napako sem določil po formulah:

$$a(\bar{b}_s) = \sqrt{a^2(\bar{b}) + a^2(\bar{b}_k)}$$

in

$$a(\bar{c}_s) = a(\bar{c}).$$

Najprej si pogledjmo, kako seva neobarvana pločevinka. Njena koeficienta sta:

$$\bar{b}_s = \bar{b} - \bar{b}_k = (0,046 \pm 0,010) \text{ W/K}$$

$$\bar{c}_s = \bar{c} = (0,00033 \pm 0,00009) \text{ W/K}^2$$

Pri spolirani pa:

$$\bar{b}_s = \bar{b} - \bar{b}_k = (0,037 \pm 0,010) \text{ W/K}$$

$$\bar{c}_s = \bar{c} = (0,00032 \pm 0,00009) \text{ W/K}^2$$

Izsevnost ε neobarvane in spolirane pločevinke sem izračunal tako, da sem linearni člen v Taylorjevem razvoju primerjal z vrednostjo koeficienta \bar{b}_s . Izsevnost, izračunana iz kvadratnega člena, ima preveliko napako.

Relativna napaka izsevnosti je izračunana po formuli:

$$r(\varepsilon) = \sqrt{r^2(\bar{b}_s) + r^2(S)}.$$

Za neobarvano je vrednost \bar{b}_s :

$$\bar{b}_s = 4AT_0^3 = 4\varepsilon S\sigma T_0^3 = 0,046 \text{ W/K}.$$

Izsevnost ε pa je:

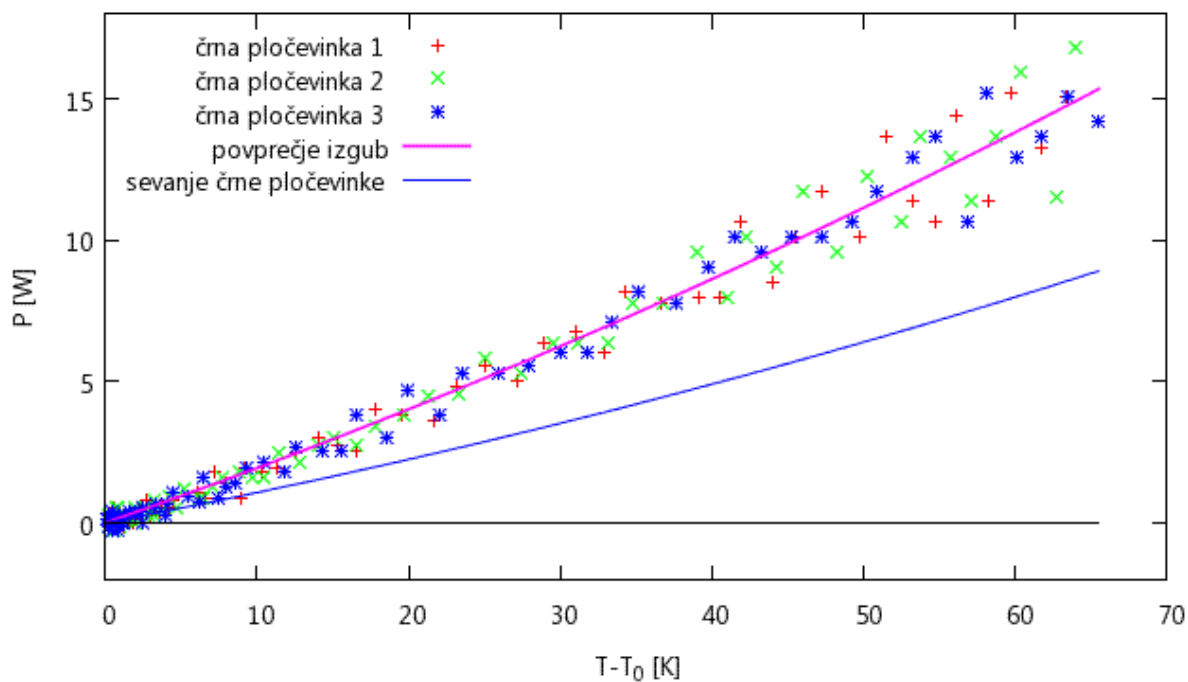
$$\varepsilon = \frac{\bar{b}_s}{4S\sigma T_0^3} = 0,420 \pm 0,093.$$

Pri spolirani pa z enakim postopkom dobim:

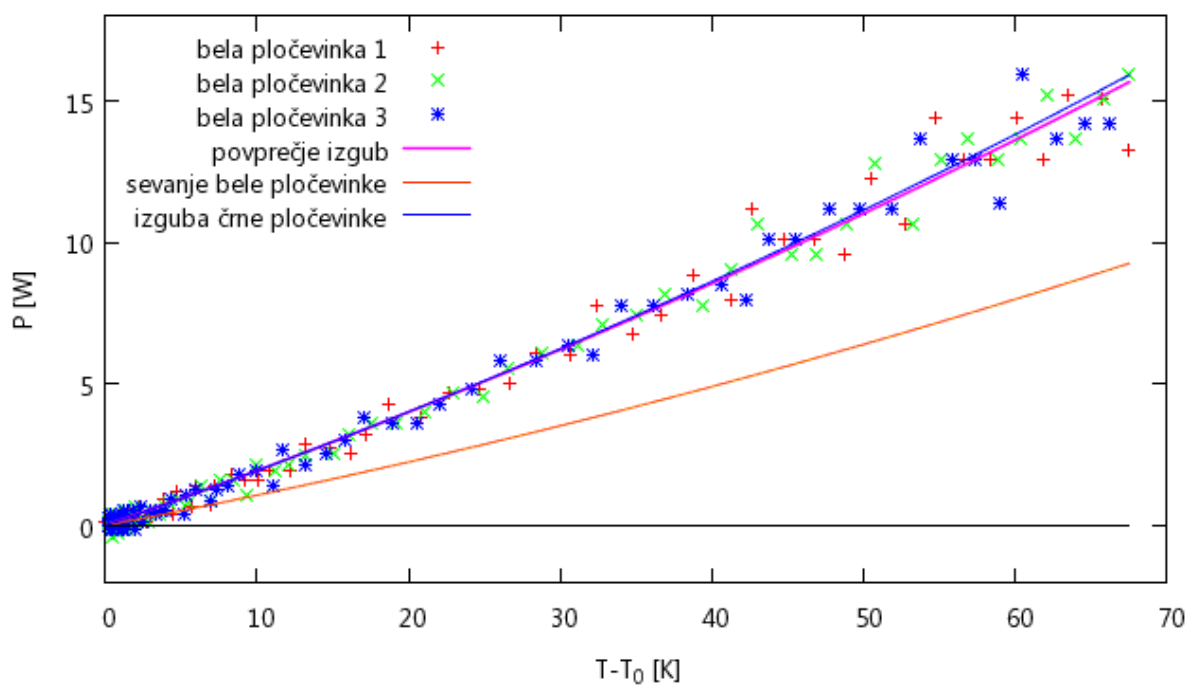
$$\varepsilon = 0,354 \pm 0,097.$$

Očitno je sevanje teh dveh pločevink bistveno manjše kot od črne in bele. Posledica je, da se segreti voda zaradi tega počasneje ohladi na temperaturo okolice.

Na spodnjih slikah so prikazane izgube vseh različnih pločevink v primerjavi s črno.

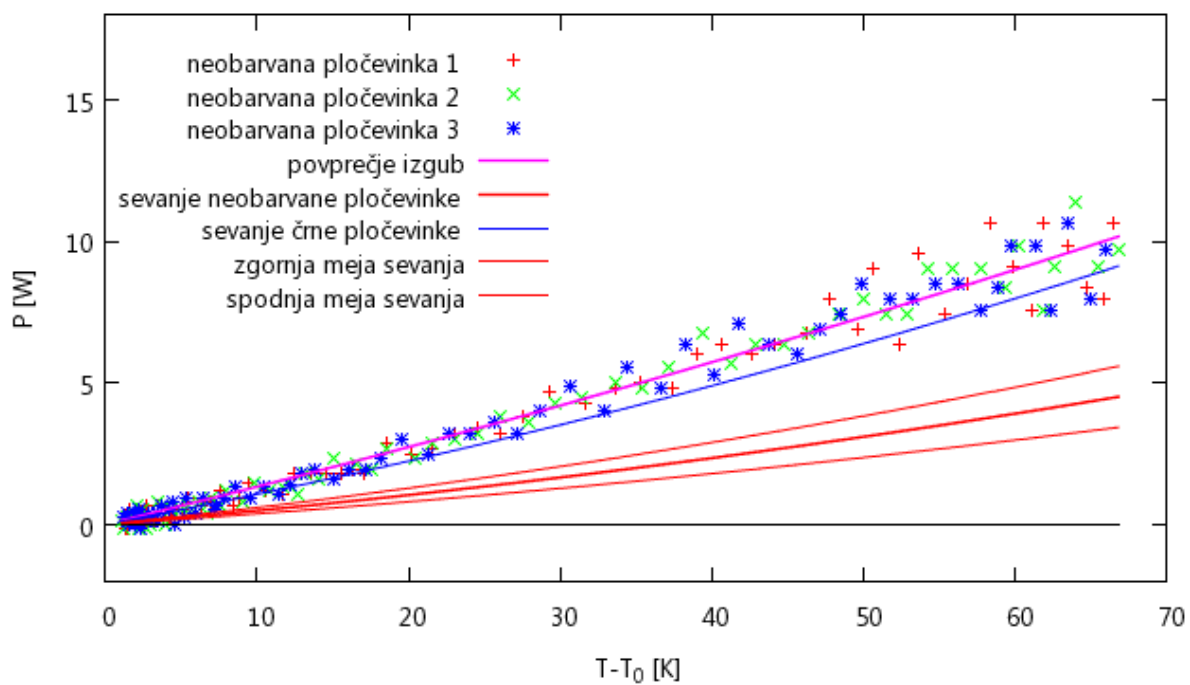


Slika 8: Toplotna izguba zaprte črne pločevinke

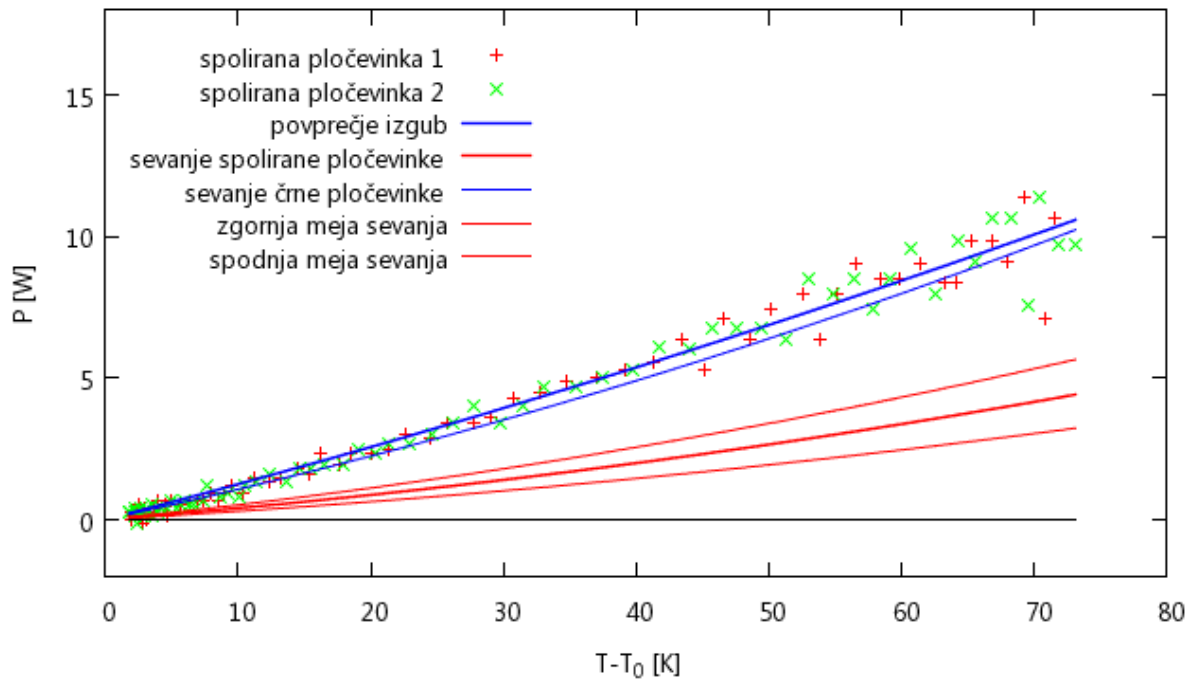


Slika 9: Toplotna izguba zaprte bele pločevinke

Iz slik 8 in 9 je razvidno, da črna in bela pločevinka v okviru napake oddajata enak toplotni tok. Obe v infrardečem delu spektra sevata kot črni telesi.



Slika 10: Toplotna izguba zaprte neobarvane pločevinke in njeno sevanje



Slika 11: Toplotna izguba zaprte spolirane pločevinke in njeno sevanje

Povprečje izgub pri spolirani pločevinki je zaradi majhne izsevnosti primerljivo samo s sevanjem črne pločevinke.

Že iz slike 8 je razvidno, da se črna pločevinka ohlaja bolj na račun sevanja, kot konvekcije. Za izračun pa določim napako po formuli:

$$r = \sqrt{r^2(\bar{b}_s) + r^2(\bar{b})}.$$

Delež sevanja črne (in bele) pločevinke je torej:

$$\frac{\bar{b}_s}{\bar{b}} = \frac{0,1015 \text{ W/K}}{0,1862 \text{ W/K}} = 55\% \pm 4\%.$$

Za neobarvano je delež sevanja:

$$\frac{\bar{b}_s}{\bar{b}} = \frac{0,046 \text{ W/K}}{0,1302 \text{ W/K}} = 35\% \pm 8\%.$$

Pri spolirani pa:

$$\frac{\bar{b}_s}{b} = \frac{0,037\text{W/K}}{0,1216\text{W/K}} = 30\% \pm 8\%.$$

4.2. Ohlajanje odprte pločevinke

Ohlajanje pločevinke sem opazoval tudi, ko so bile odprte. Za njih je potrebno prilagoditi krivuljo, saj moramo k konvekciji in sevanju dodati še en člen, ki upošteva izhlapevanje. Pričakovati je, da bo ta člen tem večji, čim večja je temperatura vode. Predpostavljamo, da je hitrost izhlapevanja sorazmerna z nasičenim parnim tlakom nad gladino vode. Mase vode, ki je v času merjenja izhlapela, v računih nisem upošteval, saj je veliko manjša v primerjavi z maso polne pločevinke.

Za parni tlak velja Clausius - Clapeyronova enačba za izhlapevanje vode, ki obravnava parni tlak nad segreto tekočino [1]:

$$p = p_0 e^{\kappa \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)}. \quad (5)$$

Krivulja, ki se je prilegala zaprtim pločevinkam je bila drugega reda. Nova krivulja za odprte pločevinke mora vsebovati prejšnjo, dodatni člen pa je eksponentni.

$$y(x) = bx + cx^2 + ze^{\kappa \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_0+x} \right)}$$

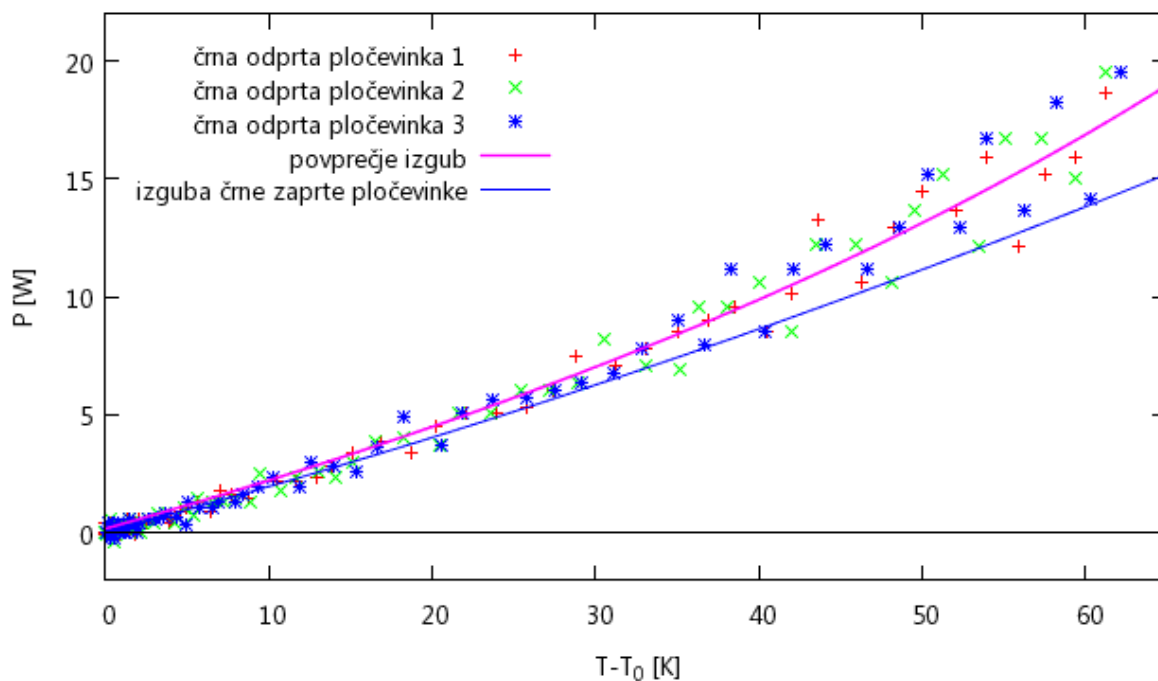
Parameter x je še vedno enak $(T-T_0)$, b in c pa sta enaka ustreznim koeficientom pri zaprtih pločevinkah. Nov parameter z je potrebno prilagoditi tako, da se bo krivulja čim lepše prilegala meritvam odprtih pločevink.

Podobno kot prej b in c , je tudi tokrat parameter z ter njegovo statistično napako program Gnuplot določil sam za vse odprte pločevinke.

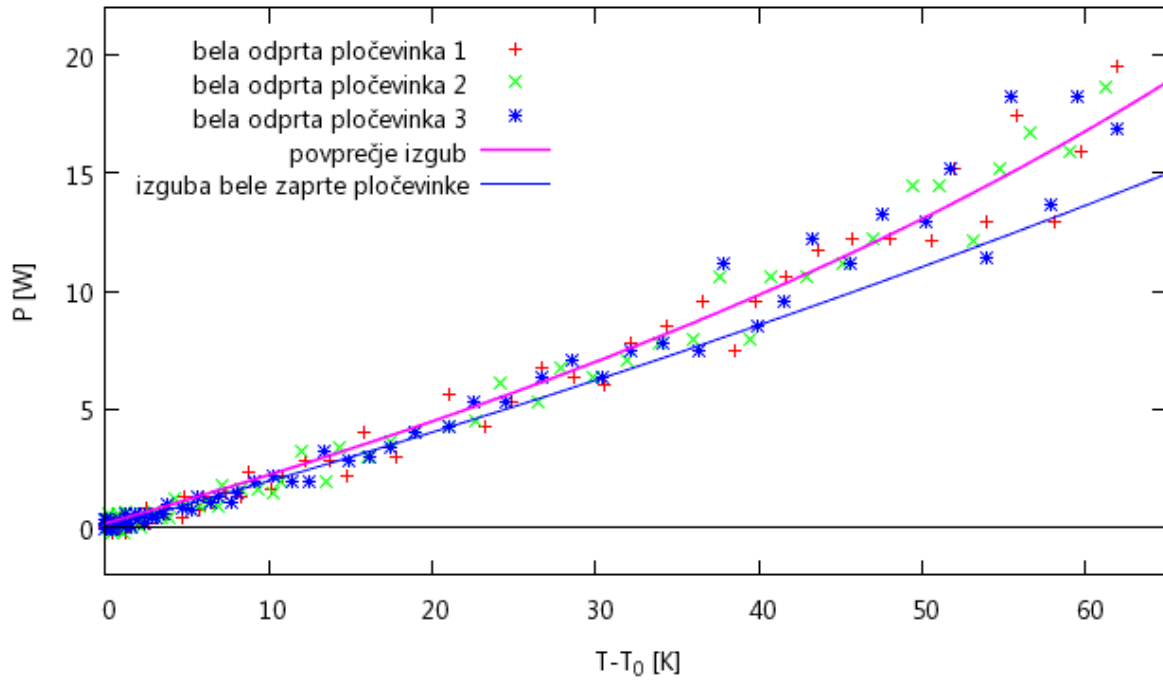
| Pločevinka | Povprečna vrednost z [W] | Absolutna napaka [W] |
|------------|----------------------------|----------------------|
| Črna | 0,1437 | 0,0074 |
| Bela | 0,1454 | 0,0074 |
| Neobarvana | 0,1570 | 0,0069 |
| Spolirana | 0,1321 | 0,0074 |

Tabela 9: Povprečje parametra z za odprte pločevinke

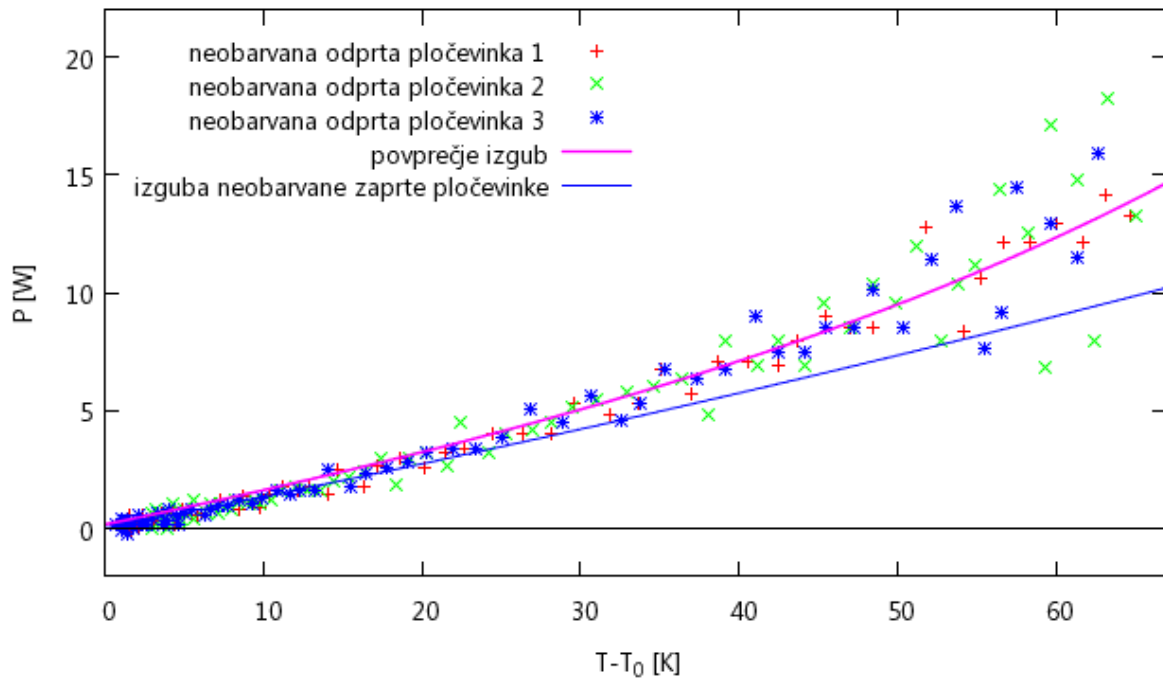
Spodnjih 5 slik prikazuje toplotne izgube za vse različne odprte pločevinke. Za primerjavo je na slikah krivulja, ki pripada povprečju izgub za ustrezno zaprto pločevinko.



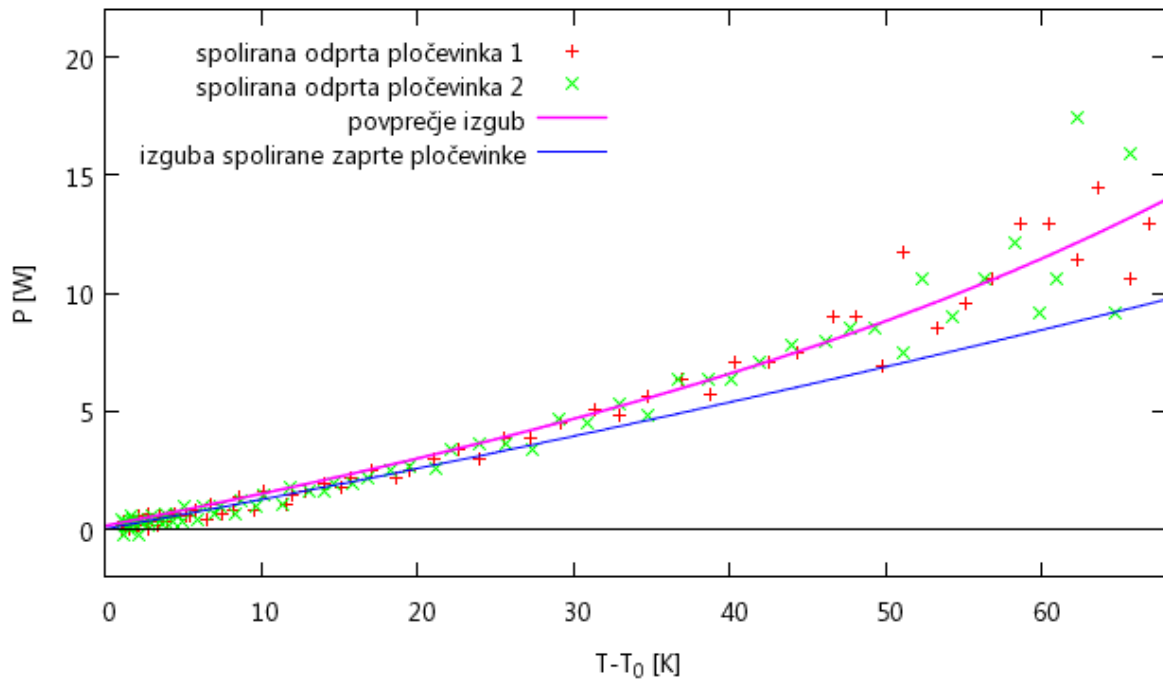
Slika 12: Toplotna izguba črne odprte pločevinke



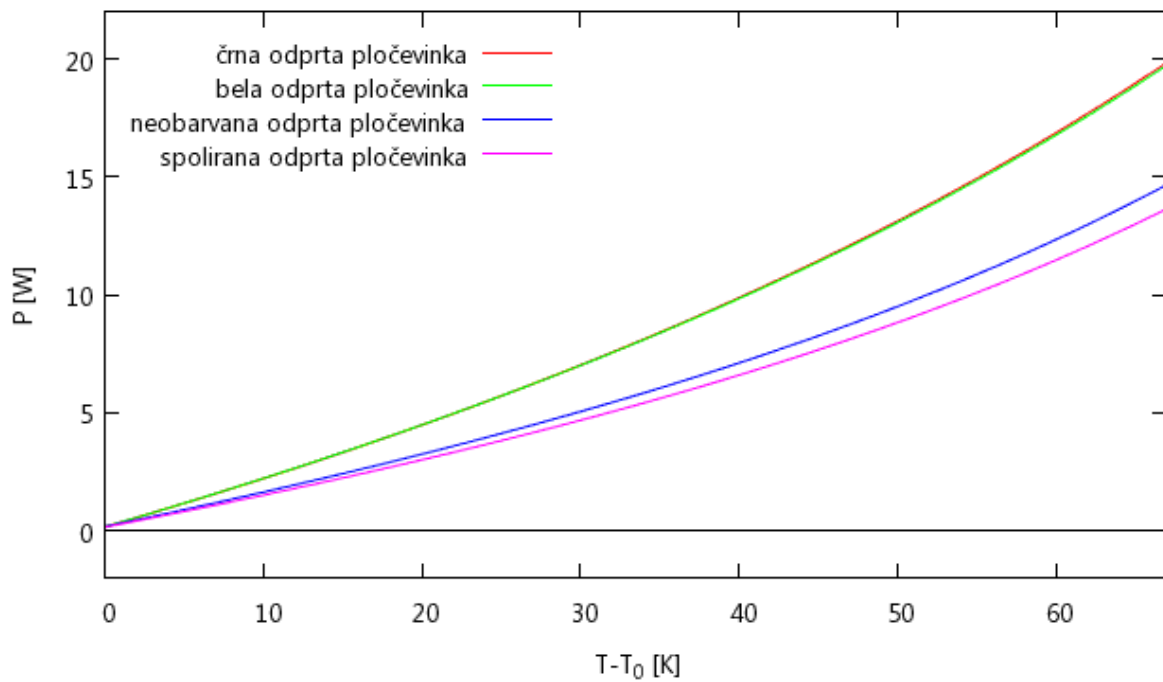
Slika 13: Toplotna izguba bele odprte pločevinke



Slika 14: Toplotna izguba neobarvane odprte pločevinke



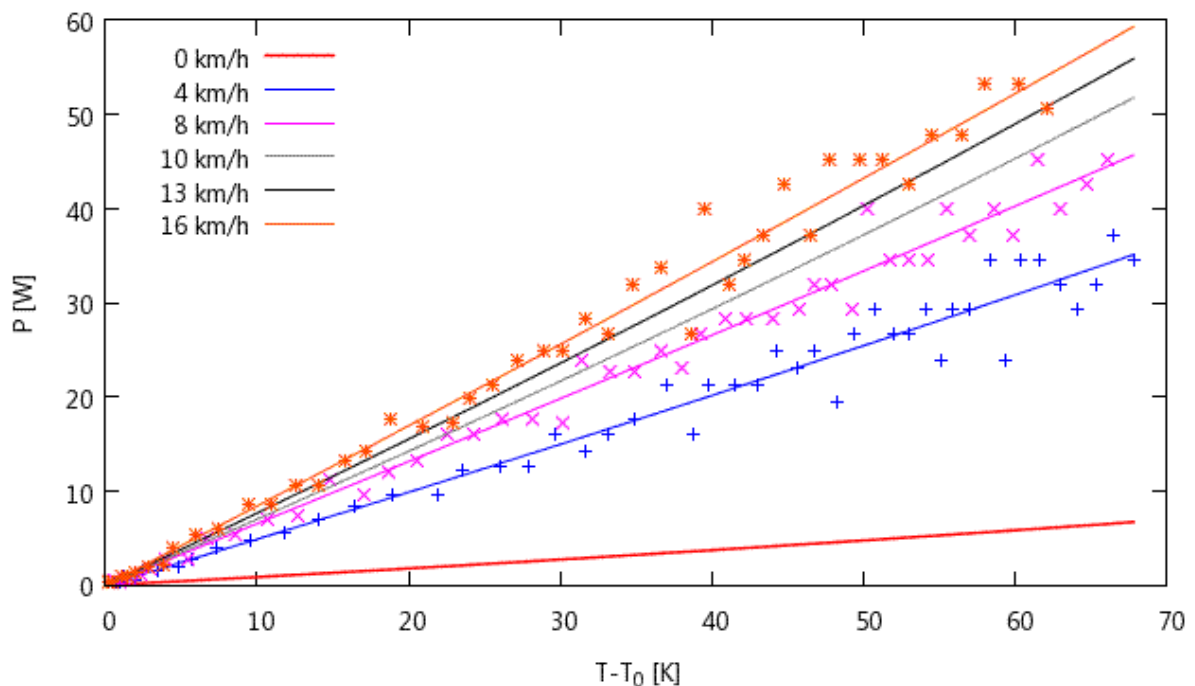
Slika 15: Toplotna izguba spolirane odprte pločevinke



Slika 16: Primerjava izgub odprtih pločevink

4.3. Vsiljena konvekcija pri zaprtih pločevinkah

Nadalje sem v sistem ohlajanja vključil še ventilator in opazoval potek temperature pri vsiljeni konvekciji. Te meritve sem opravil samo na zaprti črni pločevinki. Tu je treba pripomniti, da je časovni potek temperature zelo odvisen od notranjih konveksijskih tokov vode, saj med ohlajanjem tekočine nisem mešal.



Slika 17: Vsiljena konvekcija pri zaprti črni pločevinki za različne hitrosti vetra (izmerjene vrednosti sem prikazal le pri treh vrednostih hitrosti, sicer bi bila slika preveč natrpana)

Pri prilagajanju krivulje meritvam sem dopustil tudi kvadratni člen, vendar so v večini napake kvadratnega člena večje kot njegova vrednost.

$$f(x) = bx + cx^2$$

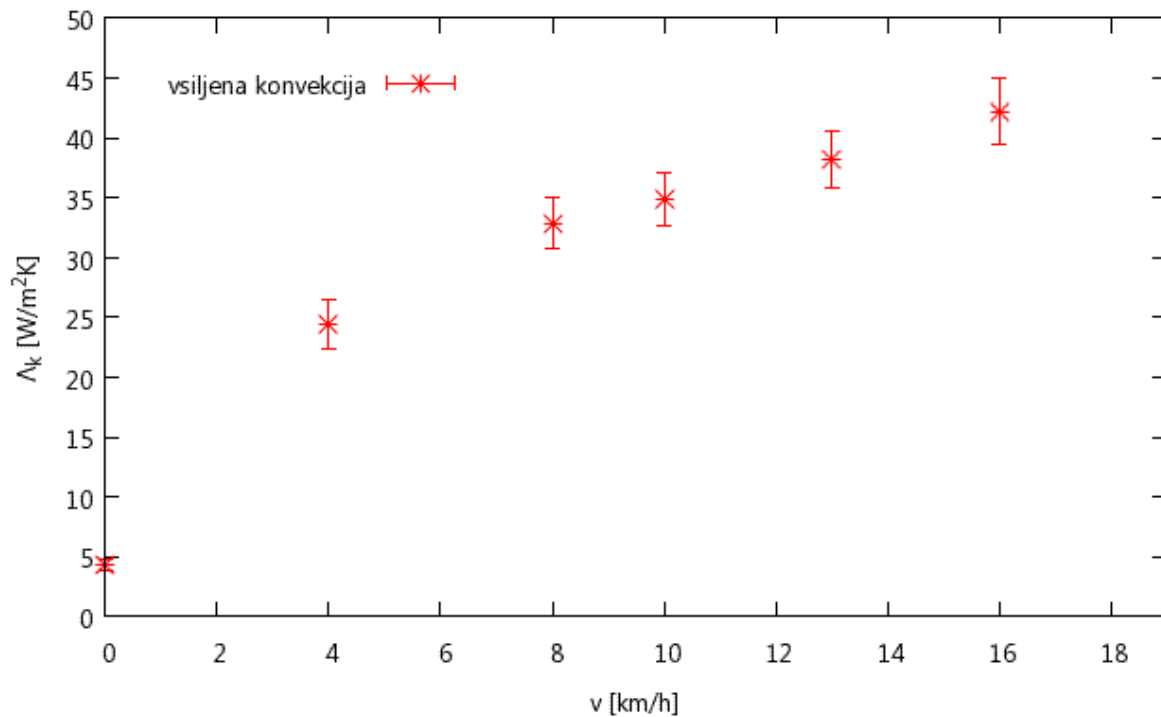
| Zaprte črne pločevinke z vsiljeno konvekcijo | | | |
|--|-------------|-------------------------|----------------------|
| Hitrost vetra | Koeficienti | Vrednost | Relativna napaka [%] |
| 4 km/h | <i>b</i> | 0,484 W/K | 7,0 |
| | <i>c</i> | 0,0005 W/K ² | 123 |
| 8 km/h | <i>b</i> | 0,650 W/K | 4,4 |
| | <i>c</i> | 0,0004 W/K ² | 156 |
| 10 km/h | <i>b</i> | 0,690 W/K | 4,3 |
| | <i>c</i> | 0,0011 W/K ² | 54 |
| 13 km/h | <i>b</i> | 0,755 W/K | 4,1 |
| | <i>c</i> | 0,0010 W/K ² | 60 |
| 16 km/h | <i>b</i> | 0,835 W/K | 4,6 |
| | <i>c</i> | 0,0006 W/K ² | 137 |

Tabela 10: Toplotni tok vsiljene konvekcije pri zaprti črni pločevinke

Iz koeficienta *b* se enostavno izračuna koeficient toplotne prevodnosti za vsiljeno konvekcijo Λ_k tako, da se ga deli s površino pločevinke *S*. Λ_k naj bi bil premo sorazmeren s hitrostjo vetra za hitrosti manjše od 5 m/s [5].

$$\Lambda_k = \frac{b}{S}$$

Vrednost λ_k za hitrost vetra $v = 0$ km/h je enaka kot pri naravni konvekciji.



Slika 18: Odvisnost koeficienta toplotne prevodnosti za vsiljeno konvekcijo od hitrosti vetra

Iz grafa ne bi mogel sklepati, da je koeficient toplotne prevodnosti za vsiljeno konvekcijo premo sorazmeren s hitrostjo vetra do hitrosti 5 m/s. Vidi pa se, da se toplotni tok vsiljene konvekcije, in s tem λ_k , približuje končni vrednosti. Ta vrednost toplotnega toka je določena s hitrostjo prenosa toplote znotraj posode.

5. Umestitev v učni načrt

Učenci osnovne šole se že v šestem in sedmem razredu pri pouku naravoslovja srečajo s pojmom energije. Prav tako spoznajo pojem toplotni tok, razlikujejo med toplotnimi prevodniki ter izolatorji in podobno.

V osmem razredu se pri pouku fizike njihovo znanje nadgrajuje in podkrepi z računanjem. Predvidene vsebine, ki so neposredno povezane z mojo diplomsko nalogo so:

- merjenje toplote;
- moč in toplotni tok.

Učni načrt vsebuje spodnje cilje predvidenih vsebin.

Učenec:

- Opiše termometer kot napravo za merjenje temperature.
- Pove, da toplota prehaja s telesa z višjo temperaturo na telo z nižjo temperaturo.
- Našteje primere, ko telo prejema ali oddaja toploto.
- Ve, da se notranja energija telesu poveča, če toploto prejme, in da se mu zmanjša, če toploto odda.
- Opredelel specifično toploto in enoto zanjo: $J/kg\ K$.
- Izrazi spremembo notranje energije s prejetjo ali z oddano toploto.
- Ve, od česa je odvisna množina toplote, ki je potrebna za spremembo notranje energije opazovanega telesa.
- Izračuna prejetjo ali oddano toploto po zapisu $Q = mc\Delta T$.
- Zna zapisati enačbi za moč in toplotni tok.

Učenci imajo ob koncu osmega razreda devetletke usvojeno potrebno znanje in pojme za razumevanje ohlajanja. Tako bi lahko sami opravili poskuse, ki sem jih jaz opravil za eksperimentalni del diplomske naloge. Ob tem bi ponovili in poglobili vse znanje predvidenih vsebin.

Sami bi lahko prišli do pravih zaključkov s kvalitativno primerjavo dveh različnih pločevink. Primerjali bi časovne intervale in padce temperature pri različnih pločevinkah. S

tem bi sami ugotovili, kaj vpliva na hitrost ohlajanja. Interpretacija rezultatov merjenja pa ne bi bila smiselna brez poznavanja sevanja. Na tem mestu bi jim pomagal z razlago, preprostimi zgledi in izkušnjami učencev.

Pri izvajanju poskusov bi bila pomembna varnost učencev, zato bi v pločevinke točili vodo pri največ 60 °C. Pri mojih eksperimentih se temperaturna padca pri odprti in zaprti beli pločevinki v 45. minutah razlikujeta okoli 1,5 °C. Da bi učenci prišli do opaznejših razlik, bi bilo potrebno dimenzije pločevink ustrezno prilagoditi. Tudi odprtina bi morala biti precej večja.

Naloga

Pripomočki:

- ❖ Črna, bela in neobarvana pločevinka,
- ❖ termometri,
- ❖ štoparica,
- ❖ podstavki iz stiropora,
- ❖ stojala,
- ❖ zamaški.

Navodilo

Črno, belo in neobarvano pločevinko postavi na stiropor. V njih natoči vodo s temperaturo 60 °C. S stojalom pritrdi termometer tako, da bo meril temperaturo v sredini vsake pločevinke. Nato sproži štoparico.

V tabelo si zapiši čas na štoparici, ko v pločevinki prvič izmeriš temperaturo. Nato pa še vsakokrat, ko vodi v pločevinki pade temperatura za 3 °C.

To naredi za vse odprte pločevinke.

Z enakim postopkom ponovi merjenje še za zamašene pločevinke. Termometer vstavi v zamašek,

Tabele

Zaprta črna pločevinka

| $t(s)$ | $T(^{\circ}C)$ |
|--------|----------------|
| | |

Zaprta bela pločevinka

| $t(s)$ | $T(^{\circ}C)$ |
|--------|----------------|
| | |

Zaprta kovinska pločevinka

| $t(s)$ | $T(^{\circ}C)$ |
|--------|----------------|
| | |

Odporna črna pločevinka

| $t(s)$ | $T(^{\circ}C)$ |
|--------|----------------|
| | |

Odporna bela pločevinka

| $t(s)$ | $T(^{\circ}C)$ |
|--------|----------------|
| | |

Odporna kovinska pločevinka

| $t(s)$ | $T(^{\circ}C)$ |
|--------|----------------|
| | |

Na milimetrski papir nariši graf temperature v odvisnosti od časa $T(t)$ za vsako meritev. Skozi točke na grafu potegni črto tako, da se bo najlepše prilegala meritvam.

Odgovori na spodnja vprašanja.

Vprašanja

- 1. Primerjaj grafa črne in bele zaprte pločevinke. Ali so časi med padcem temperature enaki?*
- 2. Kaj pa časi pri zaprti črni in kovinski pločevinki?*
- 3. Med seboj primerjaj odprto črno in zaprto črno pločevinko. Katera se ohlaja hitreje? Zakaj je tako?*
- 4. Primerjaj še odprto kovinsko in zaprto črno pločevinko. Katera se v krajšem času ohladi za 12 °C?*

6. Zaključek

Na osnovi preprostih eksperimentov, zgolj z merjenjem časovnega poteka temperature, sem prišel do pomembnih zaključkov.

Pri razlaganju sevalnih lastnosti predmeta je zelo pomembno, da poleg »barve« jasno povemo v katerem delu spektra telesu pripada taka »barva«. Pogosto avtor učbenika preprosto pove, da črna telesa najbolje absorbirajo sevanje. Podobno navede, da črna telesa najmočnejše sevajo. Pri tem pa ne omeni nobenega dela spektra, v katerem je navedeno telo črno [5].

V odsotnosti Sončeve svetlobe se telesa, ki so pobarvana s črno ali belo prekrivno barvo ohlajajo povsem enako. To velja, ker je konvekcija neodvisna od barve, za infrardeče sevanje pa je prekrivna barva črna.

Nasprotno pa velja za segrevanje z vidno svetlobo. Na svetlobo postavimo dve telesi. Eno je pobarvano z belo, drugo pa s črno barvo. Črno telo absorbira večino vidne svetlobe, belo pa jo večino odbije. Vendar pa obe telesi v infrardečem spektru sevata enako, zato se črno telo segreva hitreje in na koncu doseže višjo temperaturo kot belo telo.

Pri ohlajanju črnega telesa cilindrične oblike velja, da sta toplotni izgubi zaradi sevanja in konvekcije skoraj enaki. Do precej večjega prispevka konvekcije bi prišlo pri telesih rebrastih oblik.

Bolj natančen rezultat nam da primerjava koeficienta, ki stoji pred linearno odvisnim členom sevanja od temperaturne razlike, in koeficienta, ki stoji pred linearno odvisnim členom celotnega toplotnega toka od temperaturne razlike. Črna in bela pločevinka s sevanjem oddata $55\% \pm 4\%$ celotnega oddanega toka. Neobarvana pločevinka izseva $35\% \pm 8\%$ celotnega oddanega toka, še manjši delež pa sevanje odnese spolirani pločevinki. Ta izseva le $30\% \pm 8\%$ celotnega toka.

Pri računanju naravne konvekcije se je izkazalo, kot navaja literatura [1], da res ni smiselno upoštevati odvisnosti toplotnega toka od kvadrata temperaturne razlike. Z drugimi besedami, koeficient, ki je odvisen od kvadrata razlike temperature pri naravni konvekciji, je zanemarljiv.

Pri svojih merjenjih nisem ugotovil, da je koeficient toplotne prevodnosti Λ_k pri vsiljeni konvekciji premo sorazmeren s hitrostjo vetra za hitrosti do 5 m/s. Za vsiljeno konvekcijo pri zaprtih pločevinkah velja, da se moč ohlajanja približuje mejni vrednosti. Ta vrednost je

določena z naravno konvekcijo kapljevine znotraj pločevinke. Če bi vodo v pločevinki mešal, pa bi morda prišel do drugačnih ugotovitev.

Infrardeče sevanje neobarvane pločevinke je približno 2,2-krat manjše, spolirane pa 2,7-krat manjše kot sevanje črne pločevinke. Konvekcija pa se od črne ne razlikuje, zato je čas ohlajanja pri telesih s kovinsko površino daljši od počrnjenih ali belih. Podobno velja, da se kovinska telesa počasneje ogrevajo v toplejši okolici (na primer v pečici) kot počrnjena, saj odbijajo več infrardečega sevanja.

Pri odprti pločevinki poleg sevanja in konvekcije k ohlajanju pripomore še izhlapevanje, ki je tem močnejše, čim večji je nasičeni parni tlak nad gladino. Za parni tlak nad gladino vode velja eksponentna odvisnost od temperature, ki jo dobro opiše Clausius-Clapeyronova enačba (5).

Celotna tematika je primerna za osnovno šolo. Učenci lahko sami merijo čas in temperaturo pri ohlajanju pločevink, napolnjenih s toplo vodo. Sami ugotovijo, katere pločevinke se ohlajajo hitreje in kaj na to vpliva. Pri interpretaciji rezultatov pa jim pomaga učitelj, saj učni načrt osnovne šole ne zajema mehanizmov ohlajanja. S tem utrdijo in dogradijo prej usvojeno znanje, ki ni zajemalo konvekcije in sevanja.

7. Literatura in viri

- [1] Strnad, J. *Fizika, 1. del: Mehanika, toplota*. 8. natis. Ljubljana: DMFA, 1995. ISBN 961-212-047-1.
- [2] Brauer, H. *Atlas klasične in moderne fizike*. (prevod in priredba priročnika Hansa Breuerja, dtv-Atlas zur Physik, Deutscher Taschenbuch verlag, München 1987, 1988; Prevedel in priredil Janez Strnad), Ljubljana: DZS, 1993. ISBN 86-341-1105-9
- [3] http://sl.wikipedia.org/wiki/Toplotna_prevodnost (pridobljeno: 22.5.2012)
- [4] Kladnik, R. *Fizika za tehniške usmeritve: Prvi zvezek*. 8. izdaja. Ljubljana: DZS, 1992.
- [5] Besson, U. Paradoxes of thermal radiation. *European Journal of Physics*, 2009, št. 30, str. 995-1007.
- [6] Strnad, J. *Fizika: Drugi del*. 4. natis. Ljubljana: DMFA, 1992.
- [7] http://sl.wikipedia.org/wiki/Planckov_zakon (pridobljeno: 22.5.2012)
- [8] http://sl.wikipedia.org/wiki/Wienov_zakon (pridobljeno: 22.5.2012)
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/Weighted_mean (pridobljeno: 22.5.2012)
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/Global_warming (pridobljeno: 22.5.2012)
- [11] <http://hypertextbook.com/facts/2005/JudyTang.shtml> (pridobljeno: 22.5.2012)