

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA  
KEMIJO IN KEMIJSKO TEHNOLOGIJO

# PRAKTIKUM

Marija Bešter Rogač  
Primož Gspan  
Aleš Jug  
Iztok Košir  
Miha Dominik Puc  
Matija Tomšič

Ljubljana, 2014

**PRAKTIKUM**

<i>Avtorji</i>	Marija Bešter Rogač, Primož Gspan, Aleš Jug, Iztok Košir, Miha Dominik Puc, Matija Tomšič
<i>Strokovni pregled</i>	dr. Jože Šrekl, dr. Mitja Kožuh
<i>Jezikovni pregled</i>	Mojca Bajc, prof.
<i>Oblikovanje in slike</i>	Miha Dominik Puc, Iztok Košir, Vinko Volk
<i>Tisk</i>	Tiskarna Pleško d.o.o.
<i>Urednik</i>	prof. dr. Darko Dolenc

© (2007) Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo

Za založbo prof. dr. Matjaž Krajnc

Ljubljana, 2014

Druga dopolnjena izdaja, drugi natis

Naklada 150 izvodov

Cena 7,00 €

Vse pravice pridržane. Brez predhodnega pisnega dovoljenja UL-FKKT so prepovedani reproduciranje, distribuiranje, dajanje v najem, dajanje na voljo javnosti (internet) in druge oblike javne priobčitve, predelava ali vsaka druga uporaba tega avtorskega dela ali njegovih delov v kakršnem koli obsegu ali postopku, vključno s fotokopiranjem, tiskanjem ali shranitvijo v elektronski obliki. Odstranitev tega podatka je kazniva.

CIP - Kataložni zapis o publikaciji  
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

544(075.8)(076.5)

PRAKTIKUM / Marija Bešter Rogač ... [et al.] ; [slikovna oprema Miha Dominik Puc, Iztok Košir, Vinko Volk]. - 2. dopolnjena izd., 2. natis. - Ljubljana : Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, 2014

ISBN 978-961-6286-76-3

1. Bešter-Rogač, Marija  
272296192

# Kazalo

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
1.1	Namen praktikuma . . . . .	2
1.2	Merski instrumenti . . . . .	2
1.3	Napake pri merjenju in merska negotovost . . . . .	3
1.4	Grafični prikaz rezultatov in meritev . . . . .	14
1.5	Metoda najmanjših kvadratov . . . . .	14
1.6	Obveznosti študenta pri praktikumu . . . . .	16
1.7	Zgled za poročilo . . . . .	18
<b>2</b>	<b>Vaje</b>	<b>23</b>
2.1	Merjenje temperature . . . . .	24
2.2	Merjenje tlaka . . . . .	34
2.3	Umerjanje merilnikov pretoka . . . . .	39
2.4	Merjenje pretokov . . . . .	45
2.5	Prevajanje toplote . . . . .	54
2.6	Toplotne razmere . . . . .	60
2.7	Hrup . . . . .	72
2.8	Vibracije . . . . .	84
2.9	Merjenje koncentracije prahu v zraku . . . . .	91
2.10	Piroliza in temperatura plamena . . . . .	100
2.11	Ocena razmer v delovnem okolju . . . . .	106
	<b>Dodatki</b>	<b>109</b>
A	Delovanje naprav . . . . .	110
B	Razni diagrami in nomogrami . . . . .	112
C	Definicija temperaturne skale ITS-90 . . . . .	119
D	Snovne lastnosti . . . . .	120
E	Fizikalne enote in konstante . . . . .	121
F	Periodni sistem elementov . . . . .	123
G	Tabela standardov . . . . .	124
	<b>Literatura</b>	<b>130</b>



# Poglavje 1

## Uvod

## 1.1 Namen praktikuma

Cilji meritev v praksi so lahko različni:

- opazovanje pojava,
- preverjanje predpostavk, hipotez in teorij,
- iskanje fizikalnih zakonitosti,
- objektivno ugotavljanje ali opis stanja ipd.

Namen tega praktikuma je predvsem spoznati razmere v delovnem okolju, si pridobiti izkušnje ter s praktičnimi spoznanji, poglobiti teoretične osnove, ki smo jih spoznali pri predavanjih. Meritve se zato nanašajo v glavnem na oceno razmer z vidika varstva pri delu.

Cilj praktikuma je, da si študent pridobi nekatere splošne izkušnje z meritvami in da z meritvami in lastnimi poskusi poglobi znanje, ki ga je pridobil na predavanjih. Študent naj se seznani tudi z metodami ocenjevanja delovnega okolja. Rezultat, ki ga dobimo z meritvijo, bolj ali manj točno odraža dejansko stanje: študent naj bi pri praktikumu dobil tudi občutek o oceni točnosti oz. zanesljivosti izmerjenega podatka.

## 1.2 Merski instrumenti

Za merjenje uporabljamo merila in merske instrumente. Imenujemo jih merilnike. Lastnost merilnika je določena s:

- preciznostjo,
- točnostjo,
- ločljivostjo,
- občutljivostjo,
- obsegom,
- selektivnostjo,
- histerezo.

**Preciznost**, včasih jo imenujemo tudi ponovljivost ali natančnost, pove, koliko se posamezni odčitki med seboj razlikujejo, če večkrat merimo merjeno količino pod enakimi pogoji.

**Točnost** pove, koliko se lahko izmerjena vrednost razlikuje od resnične vrednosti. Točnost je odvisna od točnosti umeritve instrumenta, od preciznosti, občutljivosti instrumenta na različne zunanje vplive, npr. lego, temperaturo, pogonsko napetost itd.

**Ločljivost** je najmanjša sprememba merjene količine, ki jo instrument zazna.

**Občutljivost** je najmanjša velikost merjene količine, ki jo z instrumentom lahko merimo oz. zaznavamo.

**Obseg** je podan z intervalom med najmanjšo in največjo vrednostjo količine, ki jo instrument lahko meri. Pri nekaterih instrumentih je celoten obseg razdeljen na območja. Vsako od njih ima svoj (manjši) obseg.

**Selektivnost** pove, koliko je instrument občutljiv na ostale podobne merske količine ali motnje, kot je tista, ki jo merimo, npr. koliko je merilnik, s katerim želimo meriti koncentracijo trikloretilena v zraku, občutljiv tudi na hlape drugih podobnih snovi, ki so v prostoru, npr. na tetrakloretilen, butilacetat, aceton ipd.

**Histereza** je pojav, ko merilnik kaže drugače, kadar merjeno količino (npr. tlak, pretok itd.) povečujemo, kot kadar jo zmanjšujemo.

Pred vsako meritvijo na terenu, v laboratoriju ali pri tem praktikumu moramo najprej točno vedeti, kaj želimo meriti in kaj pri meritvi lahko pokvari rezultat, odločiti se moramo za metodo in izbrati merilnike z ustreznimi lastnostmi.

Vsako količino merimo tako, da jo primerjamo z ustrezno enoto. Primerjanje opravimo z merilniki, ki so umerjeni v skladu z enotami merskega sistema. Pri nas uporabljamo mednarodni sistem SI. Vsako izmerjeno količino sestavljajo velikost, enota in oznaka točnosti (napaka). Rezultat je brez vrednosti, če ne navedemo poleg vrednosti tudi enote in ocene, v kolišni meri se nanj lahko zanesemo.

## 1.3 Napake pri merjenju in merska negotovost

Temeljno opravilo tega praktikuma je merjenje raznih količin. Pri tem nas ne zanima samo vrednost merjene količine, ampak želimo tudi ugotoviti, kolikšna je zanesljivost rezultata oz. s kolikšno napako je rezultat obremenjen, torej mersko negotovost rezultata.

Vsak rezultat meritve ima omejeno zanesljivost. Zato rezultat meritve bolj ali manj odstopa od prave vrednosti. Pravimo, da je rezultat meritve zanesljiv v mejah določene napake. V slovenski literaturi in rabi izrazoslovje ni enotno. Nekateri uporabljajo namesto izraza napaka tudi izraz pogrešek. Oba izraza sta dovoljena, vendar se v nadaljnjem besedilu odločimo za rabo izraza napaka. Da je rezultat meritve obremenjen z napako, se prepričamo, če meritev večkrat ponovimo - vsaka meritev da nekoliko drugačen rezultat.

Pred merjenjem se moramo odločiti, kolikšno negotovost dopuščamo. Od tega bo odvisna izbira merske priprave, tehnike in metoda merjenja.

Pri vsakem rezultatu meritve mora biti označena tudi verjetna točnost oz. verjetna napaka rezultata. S tem uporabnik rezultata ve, koliko se sme zanesti na dani rezultat.

Vzroki za napake so različni. Razlikujemo:

- naključne (slučajne) in
- sistematične napake.

### 1.3.1 Naključne napake

Naključne napake nastajajo zaradi naključnih vzrokov pri meritvi. Če meritev večkrat ponovimo, se posamezni izmerki med seboj razlikujejo, čeprav smo se potrudili, da smo vse meritve na istem merjencu opravili na čimbolj enak način in v enakih okoliščinah. Zato sklepamo, da je vzrok za te razlike v okoliščinah, ki jih ne moremo nadzorovati. Lahko so vzrok osebni razlogi opazovalca, ki včasih površno opazuje. Kot, pod katerim gleda na skalo (paralaksa), ni vedno enak; merilec nima vedno enakih refleksov pri opazovanju ali pritisku na stoparico; ne zadene prave ocene vrednosti pri legi kazalca med dvema sosednjima črticama na skali instrumenta itd. Vzrok pa je lahko tudi narava pojava. Med meritvijo se lahko naključno spreminja merjena količina, npr. električna napetost, veter, temperatura, osvetljenost ali na rezultat vplivajo druge slučajne zunanje motnje.

Merjenje lahko ponovimo z bolj natančno merilno pripravo, bolj zbrano in poskrbimo, da so pri vseh meritvah iste in znane okoliščine. S tem dosežemo, da so razlike med posameznimi izmerki manjše, odpraviti pa jih ne moremo.

Zato je za merilca prava vrednost neke količine nedosegljiva, lahko se ji le bolj ali manj približa. Če imamo opravka le z naključnimi napakami, so rezultati meritev približno enako pogosto večji ali manjši od prave vrednosti. Zato se dogovorimo, da bomo vzeli kot "pravo" vrednost tisto, ki jo dobimo kot srednjo (povprečno) vrednost večih meritev.

Srednja vrednost bolj zanesljivo odraža pravo vrednost kot posamični izmerki. Prava vrednost se povprečni vrednosti približa tem bolj, čim večje je število meritev, ker se s tem zmanjšuje vpliv naključnih napak.

Pri predpostavljeni normalni (Gaussovi) porazdelitvi izmerkov, kot rezultat pogosto uporabljamo aritmetično srednjo vrednost izmerkov, ki jo iz posamičnih izmerkov  $x_i$  dobimo po enačbi:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1.1)$$

kjer je  $n$  število izmerkov. Število meritev  $n$  je omejeno in odvisno tudi od zahtevane točnosti meritve. Pri praktikumu bomo opravili le manjše število meritev. Pogosto se bomo zadovoljili s povprečno vrednostjo, ki jo bomo izračunali po enačbi 1.1, če je npr.  $n \leq 6$ .

Razlika med izmerkom  $x_i$  in povprečno vrednostjo  $\Delta x_i$  je odmik izmerka od povprečne vrednosti:

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}. \quad (1.2)$$



Odmiki so pozitivni in negativni. Njihovo povprečje je 0.

$$\sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0 \quad (1.3)$$

Čim večji so odmiki (po absolutni vrednosti), tem manjša je natančnost meritev. Kot napako navedemo običajno del največjega odmika.

Primerjava rezultatov meritev pokaže, da le nekateri rezultati močno odstopajo od povprečne vrednosti, medtem ko so izmerki, ki so blizu povprečni vrednosti, v večini. Meritev, pri kateri je odmik neprimerno večji od odmika drugih meritev, kaže na neko izredno motnjo pri tej meritvi. Upoštevanje takšne meritve včasih neupravičeno kviri povprečno vrednost merjene količine in je bolje, da tak izmerek izpustimo, če ocenimo, da je za to opravičljiv razlog. Po potrebi meritev zavržemo ali raje opravimo novo, če pa je drugih izmerkov dovolj, računamo s preostalimi meritvami.

Za napako meritve lahko izberemo tudi povprečno vrednost absolutnih vrednosti vseh napak. Tako dobimo absolutno povprečno napako, ki jo izračunamo po enačbi:

$$|\Delta x| = \frac{1}{n}(|\Delta x_1| + |\Delta x_2| + \dots + |\Delta x_n|) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta x_i|. \quad (1.4)$$

Pri večjem številu meritev je očitno, da postane po tej enačbi izračunana napaka nerazumno velika in zato absolutne povprečne napake navadno ne uporabljamo. Ta način uporabljamo samo, kadar je število meritev zelo majhno, npr. 2 do 5. Pri zelo majhnem številu meritev, npr. do 3, uporabimo za oznako napake razpon. Razpon je razlika med največjim in najmanjšim izmerkom v določeni seriji meritev. Napako ocenimo s polovico razpona, to je intervala, v katerem so vsi izmerki, torej  $\Delta x = 1/2(x_{max} - x_{min})$ . Kadar je število meritev veliko, npr.  $n \geq 6$ , lahko za izračun napake uporabimo statistična orodja in vzamemo kot napako  $\Delta x$  tisto vrednost okrog srednje vrednosti, da v interval  $\pm \Delta x$  pade približno 2/3 vseh meritev. Takšno vrednost  $\Delta x$  imenujemo efektivna napaka. Efektivno napako lahko zelo približno ocenimo tudi tako, da vzamemo 2/3 razpona.

Točneje efektivno napako izračunamo pri normalni porazdelitvi po enačbi:

$$\Delta x = \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (1.5)$$

kjer je  $s$  je standardni odklon (standardna deviacija) vzorca  $n$  izmerkov in ga izračunamo po enačbi:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (1.6)$$

Efektivna napaka je torej:

$$\Delta x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \approx \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (1.7)$$

Če predpostavljamo, da imamo pri merjenju opraviti le s slučajnimi napakami in imamo dovolj izmerkov, da lahko uporabimo statistična orodja (npr.  $n \geq 6$ ), zapišemo končni rezultat z efektivno napako takole:

$$x = \bar{x} \pm \frac{s}{\sqrt{n}}. \quad (1.8)$$

### 1.3.2 Sistematične napake

Enačba (1.8) kaže, da lahko slučajno napako zmanjšamo s tem, da povečamo število meritev. To pa še ne pomeni, da je dobljeni rezultat pravilen. Napaka lahko nastane tudi zaradi slabega umerjanja meril ali instrumentov, če je merilnik pokvarjen, če ne kaže pravilno, zaradi temperaturnih vplivov, za katere instrument ni predviden, zaradi napačne lege instrumenta med meritvijo, vpliva magnetnih in električnih polj, netočne stopnje ojačanja ojačevalnika, napačne nastavitve, napačnega načina merjenja, napačne metode merjenja, histereze merilnika itd. Takšno napako, ki je pri vsaki meritvi enaka, imenujemo sistematično napako. Tudi z velikim številom meritev sistematične napake ne moremo zmanjšati!

Z uporabo natančnejših merskih priprav, z dobrim vzdrževanjem, z občasnim primerjanjem z normalami (etaloni) ali z drugimi instrumenti, z izbiro pravilne tehnike in metode meritve se zmanjša sistematično napako. Kadar ni na voljo priprav, s katerimi bi kontrolirali celotno aparaturo, se navadno zanesemo na podatke, ki jih nudijo proizvajalci merilnih instrumentov o deklarirani točnosti naprave. Ti navajajo maksimalno možno sistematično napako, s katero moramo pri instrumentu računati. Točnost instrumentov označujejo tudi z razredi. Če spada npr. voltmeter v razred 1,5, to pomeni, da sistematična napaka pri merjenju s tem instrumentom ne presega 1,5 % pri odčitku na 2/3 merilnega območja.

### 1.3.3 Ocenjevanje napak oz. interval negotovosti

Rezultatu je vedno potrebno podati ocejnjeno napako oz. interval negotovosti. Če je število meritev zadosti veliko, določimo standardni odmik in nato efektivno napako. Večkrat pa se moramo zadovoljiti z oceno napake. Podatek za oceno je razred instrumenta oz. sistematična napaka, ki je pogosto večja od slučajne napake. Če nimamo podatka o razredu instrumenta, ali o natančnosti merilnih priprav, ocenimo, s kakšno natančnostjo je mogoče odčitati vrednost, ki jo kaže npr. kazalec na skali. Pri merjenju časa s stoparico moramo upoštevati, da nismo pravočasno pritisnili na gumb in smo s tem naredili napako približno 0,2 s. Dobre analize tehtnice imajo maksimalno sistematično napako od 0,05 do 0,3 mg. Za vsako merilno pripravo podobno ocenimo maksimalno sistematično napako, s katero lahko določeno količino izmerimo.

### 1.3.4 Navajanje rezultatov in napak

Zavedati se moramo, da je za uporabnika rezultat uporaben samo, če ve, koliko se nanj lahko zanese. Zato je ocena merilne negotovosti oz. možne ali verjetne napake rezultata bistveni sestavni del rezultata. Merilec se mora zavedati vseh možnih vplivov na

rezultat merjenja oz. možnih virov za to, da rezultat morda ne odraža točne vrednosti. Vse te možne moteče vplive ali napake združuje merska negotovost rezultata, ki jo mora merilec označiti pri navajanju rezultata.

#### 1.3.4.1 Absolutna napaka

Rezultat podamo s povprečno vrednostjo izmerjene količine, verjetno napako in z enoto. Napaka mora biti torej razvidna iz rezultata, da vemo, koliko se lahko zanesemo na rezultat (s kolikšno napako moramo računati).

Rezultat  $x$  torej lahko napišemo v obliki:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x. \quad (1.9)$$

$\bar{x}$  in  $\Delta x$  vsebujeta tudi enoto.  $\bar{x}$  pa povprečna vrednost,  $\Delta x$  je absolutna napaka, ki označuje negotovost rezultata.

Pri navajanju rezultata:

- verjetno napako vedno zaokrožimo na eno mesto in
- srednjo vrednost rezultata zapišemo vedno le do tistega decimalnega mesta, kot smo zapisali njegovo napako.

Absolutno napako lahko pri rezultatu navedemo z eksplicitno navedbo ali s številom decimalnih mest oz. števk.

#### Navajanje absolutne napake z eksplicitno navedbo napake:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x, \quad (1.10)$$

$$\text{npr. } x = 2,386 \text{ m} \pm 0,001 \text{ m}. \quad (1.11)$$

To pomeni, da je rezultat natančen na 1 mm, dolžina  $x$  je po tej oceni nekje med 2,385 m in 2,387 m, nikakor pa ni verjetno, da je prava dolžina večja ali manjša od tega intervala.

**Navajanje napak s številom decimalnih mest** Rezultat zapišemo le s toliko decimalnimi mesti (števkami), za katera smo prepričani, da so dovolj zanesljiva. Ne smemo pisati negotovih števk, le zadnja števka sme biti nenatančna.

Ko npr. zapišemo, da je  $x = 2,386$  m, mislimo, da leži dolžina po naši oceni med 2,385 m in 2,387 m, torej je določena na 1 mm natančno. Če zapišemo  $x = 2,39$  m, pomeni, da je vrednost zanesljiva na 1 cm; če rečemo  $x = 3,6$  g, pomeni, da je masa določena na 0,1 g natančno; zapis  $x = 81$  dB pa pomeni, da je rezultat točen na  $\pm 1$  dB in torej ni niti 82 dB ali več, niti 80 dB ali manj.

Paziti moramo na dvoumno pisavo. Pri zapisu  $x = 300$  m ni jasno, ali pomenijo 3 decimalna mesta informacijo o točnosti ali podajajo le velikostni red. Da se izognemo dvoumnosti, raje pišemo  $3 \cdot 10^2$  m,  $3,0 \cdot 10^2$  m ali  $3,00 \cdot 10^2$  m, tako da je v zapisu točnost nedvoumno označena. Prvi zapis pomeni točnost na  $\pm 50$  m, zadnji na  $\pm 0,5$  m.

Pri izračunu rezultata iz več osnovnih podatkov število zanesljivih decimalnih mest rezultata (s čimer mislimo tudi zadnje negotovo decimalno mesto) ne more presegati števila zanesljivih decimalnih mest v najmanj točno določenem podatku (faktorju). Zato kot rezultat npr. zapišemo:

$$2,4 \cdot 2,71828 = 6,5 \quad (1.12)$$

ali

$$9,9 \cdot 1,04 = 10,3. \quad (1.13)$$

Pri drugem produktu ima prvi podatek sicer le dve zanesljivi števki, a je zelo blizu številu s tremi zanesljivimi števki, zato smo tudi produkt izrazili s tremi števki.

Pri seštevanju in odštevanju je pomembno, kje glede na decimalno vejico stoji (v členih vsote ali razlike) prva negotova številka. Tako je rezultat naslednjega seštevanja:

$$\begin{aligned} & 132,8 \text{ m} \\ & + 3,14 \text{ m} \\ & + 0,289 \text{ m} \\ & = 136,229 \text{ m} = 136,2 \text{ m}. \end{aligned}$$

Negotove številke smo pisali s krepkim tiskom. Ker smemo vključiti v rezultat le eno negotovo številko, smo zapisali vsoto kot 136,2 m, kjer je zadnja številka (0,2 m) že negotova, zato tudi preostali dve (0,029) nimata nobenega pomena več.

#### 1.3.4.2 Relativna napaka

Z absolutno napako ne moremo vedno pregledno primerjati točnosti rezultatov meritev različnih količin. Majhna absolutna napaka  $\pm 0,01$  m pri merjenju 2 m dolge klopi pomeni manj točno meritev kot npr. absolutna napaka  $\pm 1$  m pri merjenju 2000 m dolge ceste. Pri merjenju dolžine ceste smo se namreč zmotili na vsako dolžinsko enoto (na 1 m) v povprečju le za  $\pm 0,0005$  m, torej  $\pm 0,5$  mm, pri merjenju klopi pa na  $\pm 0,005$  m, torej  $\pm 5$  mm. Čeprav je bila absolutna napaka pri merjenju dolžine klopi 100-krat manjša od absolutne napake pri merjenju dolžine ceste, je bila meritev klopi opravljena 10-krat manj točno od meritve ceste.

Bolj pregledno od absolutne je zato navajanje relativne napake. Označimo jo z  $\delta x$ . Relativno napako definiramo z:

$$\delta x = \frac{\Delta x}{\bar{x}}. \quad (1.14)$$

Formalno zapišemo rezultat v obliki

$$x = \bar{x}(1 \pm \delta x). \quad (1.15)$$

Z relativno napako navedemo rezultat, npr. za primer dolžine, kot  $l = 865(1 \pm 0,005)$  m in je s tem na prvi pogled jasno, da je rezultat točen na 0,5%, ker je 0,005 0,5% od 1.

Nesmiselno je npr. navajati rezultat  $10,865(1 \pm 0,05)$  g, ker je točnost 5 % in je torej absolutna napaka  $\pm 0,5$  g ter sta zato števki na mestih  $\dots,65$  brez pomena. Smiselno naveden rezultat bi se pri tem zgledu glasil  $10,9(1 \pm 0,05)$  g, (števko 8 smo zaokrožili na 9, ker je zaradi števila  $\dots,65$  bližje 9 kot 8). Zpomnimo si, da tudi relativno napako vedno zaokrožimo na prvo negotovo mesto, npr.  $\pm 0,3$ !

### 1.3.5 Računanje z napakami

Pogosto se zgodi, da nam same izmerjene vrednosti določenih količin ne povedo veliko, zato običajno skušamo iz njih izračunati nek bolj splošen karakterističen parameter ali pa na osnovi izmerjenih vrednosti določenih količin želimo izračunati neko tretjo količino. Pri merjenju seveda skrbno ocenimo napake izmerjenim vrednostim, pojavi pa se vprašanje, kolikšna je potem napaka izračunanih vrednosti. Pri računanju se napaka namreč stopnjuje. Kot bomo videli v nadaljevanju, lahko za preproste matematične operacije, kot so seštevanje, odštevanje, množenje in deljenje, zapišemo dve preprosti pravili za stopnjevanje napak:

1. Pri seštevanju in odštevanju se seštevajo absolutne napake posameznih členov.
2. Pri množenju in deljenju se seštevajo relativne napake posameznih členov.

V splošnem si pri računanju stopnjevanja napake pomagamo s totalnimi diferenciali funkcij. Če pa funkcije, po katerih računamo, vsebujejo le zgoraj navedene osnovne matematične operacije, pa si lahko preprosto pomagamo tudi s kombinirano uporabo pravil (1) in (2). Pri tem moramo znotraj osnovne funkcije najti posamezne podenote, za katere lahko ti pravili uporabimo direktno, nato pa z ustreznim pretvarjanjem absolutnih napak v relativne in obratno izračunamo tudi končno napako vrednosti osnovne funkcije. Preverimo sedaj gornji dve pravili o računanju z napakami na enostavnih primerih.

#### 1.3.5.1 Vsota

Naj bo količina  $z$  vsota dveh količin  $x$  in  $y$ ,

$$z = x + y, \quad (1.16)$$

ki ju merimo na  $\pm \Delta x$  oz.  $\pm \Delta y$  natančno. Zanima nas, kako se izraža (absolutna) napaka  $\Delta z$ , s katero je obremenjena količina  $z$ , z absolutnima napakama  $\Delta x$  in  $\Delta y$ .

$$\bar{z} \pm \Delta z = (\bar{x} \pm \Delta x) + (\bar{y} \pm \Delta y) = (\bar{x} + \bar{y}) \pm (\Delta x + \Delta y) \quad (1.17)$$

$$\Delta z = \Delta x + \Delta y \quad (1.18)$$

Primer:

$$x = 4,23 \text{ m} \pm 0,04 \text{ m} = 4,23(1 \pm 0,01) \text{ m}, \quad (1.19)$$

$$y = 3,54 \text{ m} \pm 0,04 \text{ m} = 3,54(1 \pm 0,01) \text{ m}, \quad (1.20)$$

$$z = 7,77 \text{ m} \pm 0,08 \text{ m} = 7,77(1 \pm 0,01) \text{ m}. \quad (1.21)$$

Vidimo, da je v tem primeru relativna napaka rezultata približno enaka, kot je napaka vsakega od obeh sumandov. Premislite zakaj!  
Razmislite, kaj bi se zgodilo v primeru, če bi bil  $y = x$ , torej  $z = 2x$ . Ali lahko intuitivno uganete kako bi se stopnjevala napaka za funkcijo:  $z = 3x$  ali  $z = \frac{1}{2}x$ ?

### 1.3.5.2 Razlika

Količina  $z$  naj bo razlika merjenih količin  $x$  in  $y$ :

$$z = x - y. \quad (1.22)$$

Spet nas zanima, kako se izraža absolutna napaka  $\Delta z$  z  $\Delta x$  in  $\Delta y$ .

$$\bar{z} \pm \Delta z = (\bar{x} \pm \Delta x) - (\bar{y} \pm \Delta y) = (\bar{x} - \bar{y}) \pm (\Delta x + \Delta y) \quad (1.23)$$

$$\Delta z = \Delta x + \Delta y \quad (1.24)$$

Ker ne vemo, kakšen je predznak napake pri količinah  $x$  in  $y$ , moramo tudi pri razliki vzeti najslabšo možnost: da sta napaki  $\Delta x$  in  $\Delta y$  nasprotnega predznaka in je tedaj skupna napaka njuna vsota  $\pm(\Delta x + \Delta y)$ . Primer:

$$x = 4,234 \text{ m} \pm 0,005 \text{ m} = 4,234(1 \pm 0,001) \text{ m}, \quad (1.25)$$

$$y = 4,124 \text{ m} \pm 0,005 \text{ m} = 4,124(1 \pm 0,001) \text{ m}, \quad (1.26)$$

$$z = (4,234 - 4,124) \text{ m} \pm (0,005 + 0,005) \text{ m} = \quad (1.27)$$

$$= 0,11 \text{ m} \pm 0,01 \text{ m} = 0,11(1 \pm 0,1) \text{ m}. \quad (1.28)$$

Absolutna napaka se je v tem primeru povečala od  $\pm 0,5$  cm na  $\pm 1$  cm, tj. 2-krat, relativna napaka pa od 0,1% na 10%, tj. kar 100-krat. Zakaj?

Pri vsoti in razliki se vedno seštevajo absolutne napake.

### 1.3.5.3 Produkt

Zopet izmerimo količini  $x$  in  $y$  ter iščemo  $z$ , ki je

$$z = xy. \quad (1.29)$$

Zanima nas, kako točno lahko določimo  $z$ :

$$\begin{aligned} \bar{z} \pm \Delta z &= (\bar{x} \pm \Delta x) \cdot (\bar{y} \pm \Delta y) \\ &= \bar{x} \left(1 \pm \frac{\Delta x}{\bar{x}}\right) \cdot \bar{y} \left(1 \pm \frac{\Delta y}{\bar{y}}\right) \\ &= \bar{x} \cdot \bar{y} (1 \pm \delta x)(1 \pm \delta y) \\ &= \bar{x} \cdot \bar{y} [1 \pm (\delta x + \delta y) + \delta x \delta y]. \end{aligned} \quad (1.30)$$

Torej je

$$\bar{z}(1 \pm \delta z) = \bar{x} \cdot \bar{y} [1 \pm (\delta x + \delta y)] \quad (1.31)$$

in

$$\delta z = \delta x + \delta y. \quad (1.32)$$

Pri majhnih vrednostih  $\delta x$  in  $\delta y$  je produkt  $\delta x \delta y \ll \delta x$  in  $\delta y$ . Zato lahko  $\delta x \delta y$  v primerjavi z  $\delta x$  in  $\delta y$  pri zaokrožitvi napake očitno zanemarimo.

Premislite kaj bi se zgodilo v primeru, če bi bil  $y = x$ , torej  $z = x^2$ . Ali lahko intuitivno uganete kako bi se stopnjevala napaka za funkcijo:  $z = x^3$  ali  $z = \sqrt{x} = x^{\frac{1}{2}}$ ? Primer:

$$x = 4,234 \text{ m} \pm 0,005 \text{ m} = 4,234(1 \pm 0,001) \text{ m}, \quad (1.33)$$

$$y = 4,124 \text{ m} \pm 0,005 \text{ m} = 4,124(1 \pm 0,001) \text{ m}, \quad (1.34)$$

$$z = xy = 4,234(1 \pm 0,001) \text{ m} \cdot 4,124(1 \pm 0,001) \text{ m} \quad (1.35)$$

$$= 17,46(1 \pm 0,002) \text{ m}^2 = 17,46 \text{ m}^2 \pm 0,03 \text{ m}^2. \quad (1.36)$$

V tem primeru je  $\delta x = \delta y = 0,001 = 10^{-3}$  in  $\delta x \delta y = 10^{-6}$ , tako da je res  $\delta x \delta y \ll \delta x, \delta y$ . Obe izhodiščni vrednosti in njun produkt smo zapisali s štirimi števki (na 4 decimalna mesta točno).

#### 1.3.5.4 Kvocient

Kvocient je poseben primer produkta  $xy^{-1}$ :

$$z = x/y = xy^{-1}, \quad (1.37)$$

$$\bar{z} \pm \Delta z = \frac{\bar{x} \pm \Delta x}{\bar{y} \pm \Delta y} = \frac{\bar{x}(1 \pm \frac{\Delta x}{\bar{x}})}{\bar{y}(1 \pm \frac{\Delta y}{\bar{y}})} = \frac{\bar{x}}{\bar{y}}(1 \pm \delta x)[1 \mp \delta y \pm (\delta y)^2 + \dots], \quad (1.38)$$

$$\bar{z}(1 \pm \delta z) = (\bar{x} \cdot \bar{y})[1 \pm (\delta x + \delta y)] \quad (1.39)$$

$$\delta z = \delta x + \delta y. \quad (1.40)$$

Najprej smo za  $(1 \pm \delta y)^{-1}$  uporabili binomski razvoj, nato pa v produktu  $(1 \pm \delta x)[1 \mp (\delta y \pm \dots)]$  zaradi zaokrožitve zadržali le linearni člen. Spet smo upoštevali najslabšo možnost: da sta relativni napaki  $\delta x$  in  $\delta y$  takega predznaka, da se seštevata.

Primer:

$$x = 5,28 \text{ m} \pm 0,01 \text{ m} = 5,28 \text{ m}(1 \pm 0,002) \text{ m}, \quad (1.41)$$

$$y = 2,53 \text{ m} \pm 0,01 \text{ m} = 2,53 \text{ m}(1 \pm 0,004) \text{ m}, \quad (1.42)$$

$$z = x/y = (5,28)/(2,53)[1 \pm (0,002 + 0,004)] = \quad (1.43)$$

$$= 2,09(1 \pm 0,006) = 2,09 \pm 0,01. \quad (1.44)$$

Pri množenju in deljenju se vedno seštevajo relativne napake.

### 1.3.5.5 Splošni primer

Poglejmo splošni primer, kjer je neka količina  $F$  funkcija izmerjenih količin  $u$ ,  $v$  in  $w$ ,

$$F = F(u, v, w). \quad (1.45)$$

Totalni diferencial je

$$dF = \left( \frac{\delta F}{\delta u} \right)_{v,w} du + \left( \frac{\delta F}{\delta v} \right)_{u,w} dv + \left( \frac{\delta F}{\delta w} \right)_{u,v} dw. \quad (1.46)$$

Ker so napake majhne, računamo z njimi tako kot z diferenciali. Kadar nas zanima samo maksimalna napaka količine  $F$ , vzamemo pri vseh členih v prejšnji enačbi kar pozitivne predznake. Tako za napako  $\Delta F$  dobimo

$$\Delta F = \left| \frac{\delta F}{\delta u} \right|_{v,w} \Delta u + \left| \frac{\delta F}{\delta v} \right|_{u,w} \Delta v + \left| \frac{\delta F}{\delta w} \right|_{u,v} \Delta w. \quad (1.47)$$

Če so posamezni členi različno predznačeni, se lahko napake kompenzirajo. Pri ocenjevanju maksimalne napake tega ne upoštevamo.

Večkrat ima funkcija  $F$  naslednjo obliko:

$$F = \frac{u^k \cdot v^m}{w^n}. \quad (1.48)$$

V takih primerih je pripravno računati z relativnimi napakami. Enačbo logaritmiramo

$$\ln F = k \ln u + m \ln v - n \ln w \quad (1.49)$$

in odvajamo

$$d \ln F = k d \ln u + m d \ln v - n d \ln w. \quad (1.50)$$

Ker je  $d \ln F = dF/F$ , dobimo

$$\frac{dF}{F} = k \frac{du}{u} + m \frac{dv}{v} - n \frac{dw}{w}. \quad (1.51)$$

Diferenciale zamenjamo z napakami in izračunamo maksimalno relativno napako (pri vseh členih vzamemo pozitivne predznake):

$$\frac{\Delta F}{F} = k \frac{\Delta u}{u} + m \frac{\Delta v}{v} + n \frac{\Delta w}{w} \quad (1.52)$$

oziroma

$$\delta F = k \delta u + m \delta v + n \delta w. \quad (1.53)$$

Potenčni eksponenti  $k$ ,  $m$  in  $n$  imajo torej na relativno napako velik vpliv, ker se napaka z njimi množi.

Oglejmo si dva preprosta zgleda.



- Izračunajmo maso kocke, ki smo ji izmerili dolžino roba  $a = (2,37 \pm 0,02)$  cm. S posebnim eksperimentom smo določili njeno gostoto,  $\rho = (2,691 \pm 0,005)$  g/cm<sup>3</sup>. Masa kocke je:

$$m = a^3 \cdot \rho = 35,8227 \text{ g} \quad (1.54)$$

in v skladu z enačbo (1.52) je relativna napaka:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta m}{m} &= 3 \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta \rho}{\rho} = 3 \frac{0,02}{2,37} + \frac{0,005}{2,691} \\ &= 0,025316 + 0,001859 \approx 0,03 = 3 \% \end{aligned} \quad (1.55)$$

zapisano z relativno napako  $\delta m$  ali zapisano z absolutno napako:

$\Delta m$  je torej  $35,8227 \text{ g} \cdot 0,03 = 1,074 \text{ g}$ .

Rezultat je

$$m = (35 \pm 1) \text{ g} \quad (1.56)$$

ali zapisano z relativno napako

$$m = 35(1 \pm 0,03) \text{ g} \quad (1.57)$$

K relativni napaki  $\Delta m/m$  prispeva člen  $3\Delta a/a$  približno 13-krat več kot člen  $\Delta \rho/\rho$ . Očitno nima pomena pretiravati z natančnostjo pri merjenju ene količine, če druge ne moremo določiti bolj natančno.

- Izračunajmo gostoto toplotnega toka skozi montažni zid. Debelina zidu je  $d = 14\text{cm} \pm 0,5\text{cm}$ , njegova toplotna prevodnost pa  $\lambda = 0,95\text{W}/(\text{mK}) \pm 0,03\text{W}/(\text{mK})$ . Notranja temperatura je  $T_n = 22,2^\circ\text{C} \pm 0,1^\circ\text{C}$ , zunanja pa  $T_z = 14,3^\circ\text{C} \pm 0,2^\circ\text{C}$ . Gostota toplotnega toka je:

$$\begin{aligned} j &= \lambda \frac{T_2 - T_1}{d} \\ &= (0,95 \text{ W/mK} \pm 0,03) \frac{\text{W}}{\text{mK}} \frac{(22,2 \pm 0,1 - 14,3 \pm 0,2)^\circ\text{C}}{(14 \pm 0,5) \text{ cm}} \\ &= (0,95 \text{ W/mK} \pm 0,03) \frac{\text{W}}{\text{mK}} \frac{(7,9 \pm 0,3) \text{ K}}{(14 \pm 0,5) 10^{-2} \text{ m}} \\ &= 0,95(1 \pm 0,03) \frac{7,9(1 \pm 0,04)}{14(1 \pm 0,03) 10^{-2}} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \\ &= 53(1 \pm 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = (53 \pm 5) \frac{\text{W}}{\text{m}^2}. \end{aligned} \quad (1.58)$$

## 1.4 Grafični prikaz rezultatov in meritev

Včasih želimo grafično ponazoriti funkcijske zveze med dvema ali več parametri, ki smo jih merili, npr. med izbirano (neodvisno) količino  $x$  in pripadajočo izmerjeno (odvisno) količino  $y$ .

Če je funkcijska odvisnost med količinama  $x$  in  $y$  linearna, bodo v diagramu vrednosti odvisne spremenljivke  $y_i$  (pripadajoče vrednostim  $x_i$ ) razmetane nad in pod premico, ki bi povezovala točke idealnih parov izmerkov, če bi bila meritev brez napak. Primer kaže slika 1.1a.

Spomnimo se, da tudi vrednosti neodvisne spremenljivke  $x_i$  niso brez napak, čeprav so svojevoljno izbrane. Tudi te vrednosti spreminjamo in nastavljamo s pomočjo priprav in instrumentov ali merilnega pribora s končno točnostjo.

Podobno velja, če zveza med  $x$  in  $y$  ni linearna, kar vidimo na sliki 1.1b. V primerih na slikah 1.1a in 1.1b na diagramu zaznamujemo točke, ki pripadajo množici izbranih in izmerjenih vrednosti. Premico ali krivuljo, ki ponazarja funkcijsko odvisnost  $y = f(x)$ , pa bomo narisali med točkami na več načinov, npr. po občutku tako, da bodo odstopanja na obeh straneh krivulje približno enakomerno porazdeljena.

Obstajajo metode za točnejše ugotavljanje poteka krivulje, kot je npr. metoda najmanjših kvadratov, glej poglavje 1.2.6. Mi se bomo pri praktikumu zadovoljili z izbiro najboljše krivulje po občutku.

Kadar so vrednosti spremenljivk obremenjene z napakami in vemo, kolikšne so, možne napake označimo grafično na diagramu na način, kot vidimo na sliki 1.1c. Napake lahko označimo tudi v ustrezno povečanem merilu. Izmerek odvisne spremenljivke  $y_i$  smo nanesti kot ordinato na pripadajočem mestu abscisne vrednosti  $x_i$ . Od vrednosti izmerka navzgor in navzdol smo nanesti napako  $\pm\Delta y_i$ , kot daljico s središčem pri  $y_i$ . Na podoben način ponazorimo v diagramu z vodoravno črtico tudi napake neodvisne spremenljivke  $\pm\Delta x_i$ .

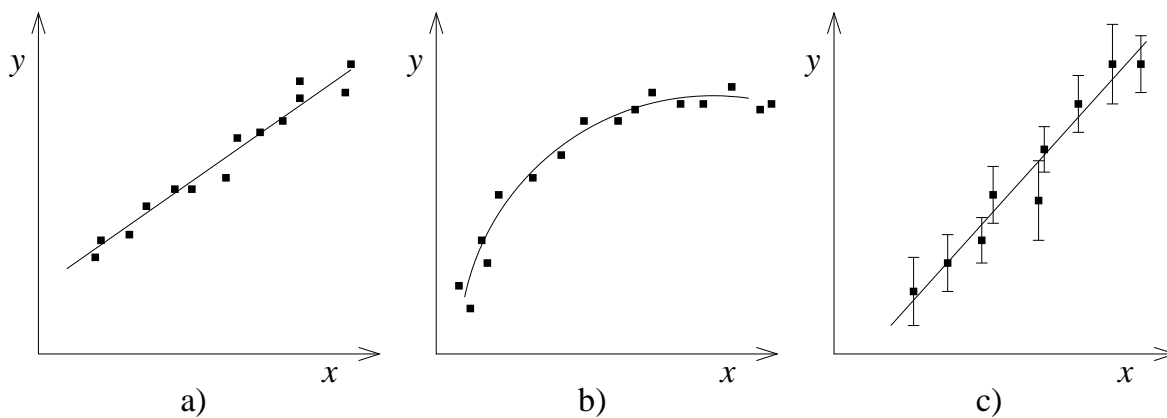
Če je meritev dovolj precizna in če velja predpostavljena funkcijska zveza, mora krivulja, ki ponazarja funkcijo  $y = f(x)$ , potekati večinoma znotraj daljic, ki označujejo napake vseh izmerjenih podatkov (točk na diagramu). Dopustno je, da je približno 1/3 vseh točk z daljicami vred zunaj predpostavljene krivulje. Ni pa nujno, da imajo vse točke na diagramu enako napako. Npr. rezultati, ki smo jih odčitavali na zadnji tretjini skale instrumenta, so točnejši kot rezultati, ki smo jih odčitavali v prvi tretjini.

Pri grafičnem prikazu meritev moramo pri odvisni in neodvisni spremenljivki vedno poleg skale na abscisni in ordinatni osi navesti tudi enoto (glejte primer laboratorijskega dnevnika).

## 1.5 Metoda najmanjših kvadratov

Recimo, da imamo več izmerjenih točk  $T_i(x_i, y_i)$ . Prilagodili bi jim radi neko krivuljo, podano s funkcijo  $y = f(x)$ . To lahko storimo po metodi najmanjših kvadratov,

- če poznamo tip krivulje (npr. premica, parabola, eksponentna, Gaussova, sinusoida itd.), na kateri bi morale ležati naše izmerjene točke in
- če so odstopanja izmerjenih točk od te krivulje (napake pri merjenju) naključna.



Slika 1.1: Trije primeri grafičnega prikaza meritev; a) premica, b) krivulja in c) premica, z označenimi napakami izmerjenih točk.

Vzemimo najpreprostejši primer, ko točkam prilagajamo linearno funkcijo, katere splošna oblika je  $y = ax + b$ . Iz pogoja, da je vsota kvadratov odstopanj vseh točk minimalna, dobimo oba potrebna parametra  $a$  in  $b$  najverjetnejše linearne funkcije ( $a$  pove naklon premice in  $b$  odsek premice na ordinatni osi.) Iščemo torej minimum vsote kvadratov odstopanj od premice, ki jo prilagajamo rezultatom:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 = S(a, b). \quad (1.59)$$

Pri minimumu funkcije  $S(a, b)$  mora biti odvod po vsakem parametru te funkcije enak nič, torej:

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0 \quad \text{in} \quad \frac{\partial S}{\partial b} = 0. \quad (1.60)$$

Spomnimo se, da je odvod vsote enak vsoti odvodov in zapišemo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial a} &= \frac{\partial}{\partial a} \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial a} (y_i - ax_i - b)^2 \\ &= \sum_{i=1}^n 2(y_i - ax_i - b)(-x_i) = 0, \\ &\implies \sum_{i=1}^n x_i y_i - a \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - b \sum_{i=1}^n x_i = 0 \end{aligned} \quad (1.61)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial b} &= \sum_{i=1}^n 2(y_i - ax_i - b)(-1) = 0 \\ &\implies \sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i - nb = 0. \end{aligned} \quad (1.62)$$

Iz enačbe (1.62) izrazimo  $b$  ter ga vnesemo v enačbo (1.61) in izrazimo še  $a$ . Končni rezultat je:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i - n \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2 - n \sum_{i=1}^n (x_i)^2}, \quad (1.63)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (1.64)$$

Da izračunamo parametra  $a$  in  $b$  po zgornjih enačbah, rabimo vsote  $\sum_{i=1}^n x_i$ ,  $\sum_{i=1}^n y_i$ ,  $\sum_{i=1}^n (x_i)^2$ ,  $\sum_{i=1}^n x_i y_i$  in število izmerkov  $n$ . Če je izmerkov veliko, je računanje precej zamudno, zato se splača napisati računalniški program ali uporabiti že napisanega.

## 1.6 Obveznosti študenta pri praktikumu

- Pred prihodom na vaje ponovite ali poglobite snov, ki se nanaša na poskus. Seznanite se z različnimi nevarnostmi, s katerimi je lahko vaja povezana.
- V laboratoriju nosite haljo, varovalna očala in spredaj zaprte čevlje.
- Pred izvedbo vsakega poizkusa oz. meritve natančno preberite navodila.
- Prepričajte se, če je na mestu vsa potrebna oprema in če je brezhibna. Če ni, nujno opozorite asistenta.
- O vsaki nepravilnosti ali poškodbi opreme takoj obvestite asistenta.
- S priborom ravnajte pazljivo.
- Nalogo izvedite pazljivo.
- Rezultate sproti vpisujte v delovni zvezek.
- Po končani nalogi pustite urejene instrumente, navodila in pribor.
- Ko je naloga zaključena, obvestite asistenta, da vajo pregleda in podpiše meritve.
- Po opravljeni vaji naprave izključite in zapustite delovno mesto urejeno.

Pred uporabo priprav in instrumentov, ki jih še niste uporabljali in z njimi ne znate ravnati, se morate obvezno seznaniti z njihovim delovanjem. Zelo nepremišljeno bi bilo, da bi odkrivali lastnosti priprave s poskušanjem, saj jo lahko pri tem pokvarite in onemogočite delo sebi in drugim. Zato v takem primeru prosite za pomoč asistenta.

Pogosto je potrebno vnaprej oceniti, kolikšna je največja možna vrednost merjene količine, s katero je merilno pripravo še dovoljeno obremeniti. Zato se je potrebno navaditi grobo ocenjevati vrednosti pri meritvi pričakovane količine. Tako pogosto tudi sproti odkrivamo napake pri merjenju in pri računanju. V primeru napake je potrebno meritev ponoviti.

Pred poizkusom mora biti delovno mesto pregledno urejeno, priprave ustrezno razporejene, merilni instrumenti postavljeni tako, da bo delo varno in bo možno kar najbolj udobno odčitavati meritve. Vse podatke o poteku in rezultatih eksperimenta sproti zapisujemo v laboratorijski dnevnik. Poročilo o izvedeni vaji dopolnimo z zahtevanimi izračuni in diagrami.

Zapiski naj bodo takšni, da jih lahko pozneje, ko se podrobnosti ne spominjamo več, uporabimo za ponovitev eksperimenta.

Da se izognemo obširnemu naštevanju podatkov in opisov, ki sodijo v laboratorijski dnevnik, navajamo za zgled poročilo o vaji "Merjenje koncentracije prahu v zraku".

## 1.7 Zgled za poročilo

Datum: 15. 4. 1999

Nája št. 8

### MERJENJE KONCENTRACIJE PRAHU V ZRAKU

#### 1. naloga

Z odtirnim dozimetrom in gravimetričnim merilnikom na mikrocipi piezo - električni kristal določa koncentracijo prahu v komori.

#### 2. osnove

S pojmom prah v pogovornem jeziku imenujemo vsako zmes trdne snovi v zraku oz. kakem drugem plinu. Tak sistem je praviloma nestabilen in se obrata drugače kot npr. zmes klapov ali par v zraku, kar je pomembno za metode merjenja in za vpliv prahu na dihalni sistem.

Prah po velikosti delcev ločimo na inhalabilno in alveolarno frakcijo. Prva je tista del prahu, ki ga pri dihanju vdihujemo skozi nos ali usta, druga pa je tista del prahu, ki zajde v pljuča do alveol.

Škodljivost je odvisna od vrste prahu, velikosti in oblike delcev in od njegove koncentracije. Vpliv na človeka je odvisen še od časa izpostavljenosti in globine dihanja (napora).

Mera za škodljivost določene snovi je maksimalna dovoljena koncentracija (MDK).

MDK je po definiciji tista koncentracija, ki odraslemu, zdravemu človeku ob fizično lahkem delu ne povzroči zdravstvene okvare tekom cele delovne dobe pri vsakodnevni izpostavljenosti.

Glede na škodljivost pralovne delimo na:

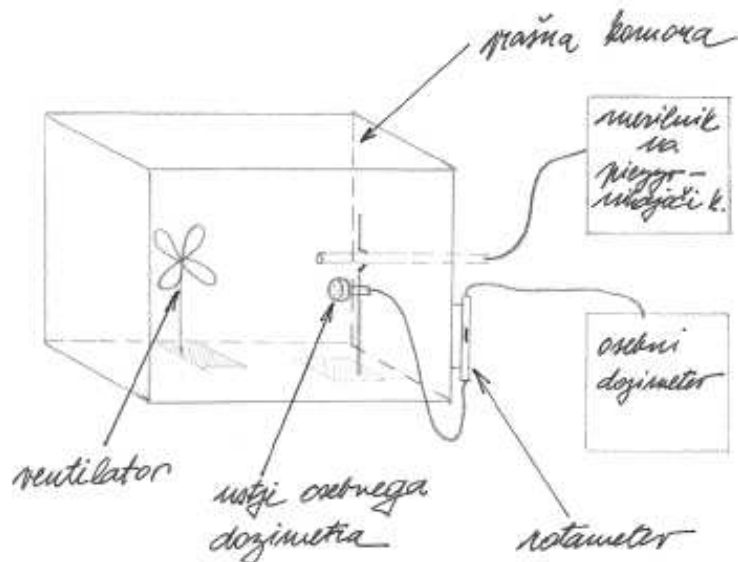
- inertne,
- fitrogene,
- toksične,
- dražilne,
- alergene in
- kancerogene.

Od načina delovanja je odvisna izbira merilnega instrumenta: ali merimo inhalabilno ali alveolarno frakcijo.

### 3. oprema in pripomočki

- prašna komora,
- osebni dozimeter "CASELLO" z glavo za zbiranje inhalabilnega prahu,
- gravimetrični merilnik na nihajoči pilzo - kristal "TSI", model 8510,
- analitska tehtnica "METTLER".

Shema



4. meritve

a) masa filtra pred ugorčevanjem: 0,06985 g  
 masa filtra po ugorčevanju: 0,07093 g  
 čas ugorčevanja: 125 min  
 pretok: 1,7 dm<sup>3</sup>/min

b)

t/min	c/mg·m <sup>-3</sup>
0	1,25
10	1,05
20	1,85
30	1,22
40	1,56
50	1,05
60	1,51
70	1,44
80	1,79
90	1,21

5. račun

$$a) c = \frac{0,00108 \text{ g}}{1,7 \cdot 0,001 \text{ m}^3/\text{min} \cdot 125 \text{ min}} = 0,00508 \text{ g/m}^3 \approx 5,1 \text{ mg/m}^3$$

6. ocena napake

Po svoji presoji ocenimo, kakšno maksimalno absolutno napako smo napravili pri posameznih meritvah, npr. pri:

$$a) m = 0,00108 \pm 0,0001 \text{ mg}$$

$$t = 125 \pm 0,1 \text{ min}$$

$$\dot{V} = 1,70 \pm 0,02 \text{ dm}^3/\text{min}$$

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta \dot{V}}{\dot{V}} + \frac{\Delta t}{t} = \frac{0,0001}{0,00108} + \frac{0,1}{125} + \frac{0,02}{1,7} =$$

$$= 0,09259 + 0,0008 + 0,01176 = 0,1051 \approx 0,1$$

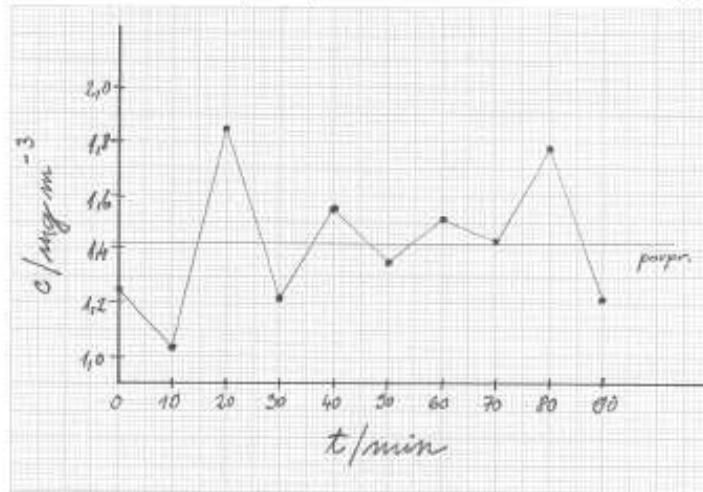


b) Napako najboljše ocenimo, če izvedemo več meritev in nato izračunamo povprečno vrednost in standardno deviacijo. Ker smo želeli zaskledovati le časovno edinstvo koncentracije, tega misno napačili.

### 7. rezultat

a)  $c = 5,1 (1 \pm 0,1) \text{ mg/m}^3$

b) spreminjanje koncentracije prahu u komori s časom



Povprečna koncentracija alveolarne frakcije prahu je  $\approx 1,42 \text{ mg/m}^3$ .

### 8. odgovori na vprašanja

1.) Zakaj se vrednost, določena z osebnim dozimetrom, razlikuje od ocenjene povprečne koncentracije, določene z merilnikom na piezo-električni kristal?

Z osebnim dozimetrom merimo koncentracijo inhalabilnega prahu, z merilnikom na piezo-kristal pa koncentracijo alveolarne frakcije. Zato je prva vrednost večja od druge.

2.) Ali je bila presežena vrednost MDK? Kolikšna je presežnost?

Za prah kartlinskega in živalskega izvora je MDK alveolarne frakcije  $3 \text{ mg/m}^3$  in inhalabilne  $10 \text{ mg/m}^3$ . V našem primeru nobena ni bila presežena.

Presežnost je za alveolarno in za inhalabilno okrog 0,5. Ker je  $I < 1$ , je okolje v smislu predpisov varno.

3.) Katera frakcija je v našem primeru odločilna za oceno škodljivosti?

Možna ni fibrogena, vendar obremenjuje dihala in lahko povzroča alergene reakcije. Zato je za oceno škodljivosti odločilna inhalabilna frakcija.

4.) Kakšne so prednosti in pomanjkljivosti merilnika na nihajoči piezo-električni kristal?

Z merilnikom na nihajoči piezo-električni kristal lahko odčitamo rezultat in lahko izmerimo dinamiko spreminjanja koncentracije. Ker meri trenutne vrednosti, ni primeren za oceno povprečne izpostavljenosti delavca pri delu.

5.) V kakšnem primeru bi se odločil za uporabo enega ali drugega merilnika?

Oxboxni dozimeter uporabimo, če je v delovnem okolju prisoten prah, ki škodljivo deluje že v zgornjih dihalnih poteh. Merilnik alveolarne frakcije uporabimo, če merimo koncentracijo prahu, ki povzroča škodljive posledice globoko v pljučih.

## Poglavje 2

### Vaje

## 2.1 Merjenje temperature

### 2.1.1 Naloga

1. Umeri
  - živosrebrni termometer s platinskim uporovnim termometrom
  - ali bakrov uporovni termometer z živosrebrnim termometrom
  - ali termistor z živosrebrnim termometrom.
2. Umeri termočlen nikelj-krom/nikelj s termočlenom železo/konstantan.
3. S pomočjo pirometra pomeri temperaturo volframove nitke v žarnici in nariši umeritveni diagram pirometra za ta primer.

### 2.1.2 Osnove

Temperatura je povezana tudi z občutkom, kako topla se zdi snov, če se je dotaknemo. Vendar je človekov občutek toplote zelo odvisen tudi od drugih dejavnikov in zato ni primeren za definicijo temperature. Človeška čutila niso zanesljiva in tudi ne pokrijejo vsega temperaturnega območja (le kdo bi si želel biti po poklicu termometer za merjenje temperature v plavžu ali pa temperature zraka ob letalskem krilu?).

Temperaturo merimo z instrumenti, ki jim pravimo termometri. Delujejo na podlagi tega, da se razne lastnosti snovi s temperaturo spreminjajo (npr. temperaturno raztezanje, spreminjanje električne prevodnosti, termonapetosti ali spektra sevane svetlobe itd.).

#### 2.1.2.1 Temperaturna skala

Temperaturno skalo so najprej določili na naslednji način: vzeli so živosrebrni termometer, ga pri tlaku  $1,01 \cdot 10^5$  Pa potopili v mešanico vode in ledu ter s črtico označili višino živosrebrnega stolpca. Potem so ga pri enakem tlaku potopili v vrelo vodo in spet označili višino stolpca. Interval med tališčem in vreliščem vode so razdelili na sto enakih delov. Stoti del so poimenovali stopinja. Tako je skalo definiral švedski astronom Anders Celsius (1742) in po njem se skala in stopinja tudi imenujeta.

Kasneje je William Thomson, lord Kelvin uvedel absolutno skalo z dvema točkama:

- najnižjo možno temperaturo - absolutno ničlo  $T = 0$  K in
- trojno točko vode, ko imamo vodo v trdnem, kapljevinskem in plinastem agregatnem stanju hkrati. Ta točka ima temperaturo  $T = 273,16$  K. Kelvinova stopinja je enako velika kot Celzijeva in velja  $0\text{ °C} = 273,15$  K in  $100\text{ °C} = 373,15$  K.

Teoretično sta ti dve točki za definicijo skale dovolj, praktično pa ne. Z dogovorom ITS-90 (International Temperature Scale of 1990) je bilo določenih sedemnajst temperaturnih točk v območju med 3 K in 1400 K (glej dodatek C). Določeni so

bili standardni načini za merjenje temperature med temi točkami. To počnemo z več različnimi vrstami standardnih termometrov, ki so dovolj natančni in pokrijejo celotno skalo. Z njimi potem umerimo druge termometre, ki so prikladnejši za vsakdanjo rabo. Spoznali bomo le nekaj vrst termometrov.

### 2.1.2.2 Uporovni termometer

Uporovni termometri delujejo tako, da se električna upornost kovin s temperaturo povečuje. Odvisnost upornosti od temperature je skoraj linearna. Čutilo uporabnega termometra je kovinska žica, ki je navita na nosilec iz stekla ali keramike in zaščitena z zaščitno cevjo ali zataljena v steklo. Čutilo je povezano z žicami za priključitev na merilnik upornosti.

**Platinski uporovni termometer** je po ITS-90 standardni uporovni element za merjenje temperature med  $-260\text{ °C}$  in  $962\text{ °C}$ . Platino so izbrali, ker je odporna proti kemijskim vplivom, vleči se da v drobno žico, ima visoko tališče, je skoraj nehlapna do temperature  $1000\text{ °C}$  in jo lahko pridobivamo v zelo čisti obliki. Odvisnost upora platine od temperature je zelo dobro definirana.

Za platinski uporovni termometer je v večini definicijskih točk določeno razmerje upornosti proti upornosti pri temperaturi trojne točke vode (glej dodatek C):

$$W = \frac{R(T)}{R(273,16\text{ K})}. \quad (2.1)$$

Med definicijskimi točkami določimo merjeno temperaturo z interpolacijo iz izmerjenega upora. Nad  $0\text{ °C}$  odvisnost upora platinskega termometra zadovoljivo podaja enačba:

$$\begin{aligned} R(T) &= R_0 (1 + aT + bT^2), \\ a &= 0,390784076 \cdot 10^{-2} \text{ °C}^{-1}, \\ b &= -0,57840840 \cdot 10^{-6} \text{ °C}^{-2}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Upor pri trojni točki vode je za standardne termometre ponavadi  $R_0 = 100\ \Omega$  ali  $R_0 = 1000\ \Omega$ . Temperaturo moramo v zgornjo enačbo vstavljati v  $\text{°C}$ .

Ker merimo upor in iz njega računamo temperaturo, je treba temperaturo izraziti z uporom. Rešimo kvadratno enačbo (2.2) in dobimo temperaturo v  $\text{°C}$  kot funkcijo upora:

$$T_{Pt} = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4b \left( \frac{R}{R_0} - 1 \right)}}{2b}. \quad (2.3)$$

Pri majhnih temperaturnih razlikah lahko vzamemo, da je upornost termometra linearno odvisna od temperature, ker je konstanta  $b$  desetisočkrat manjša od  $a$ . Če temperaturni interval ni prevelik, lahko torej poenostavljeno zapišemo:

$$R(T) = R_0 (1 + aT). \quad (2.4)$$

Enačbo (2.4) bomo uporabili pri **bakrovem uporovnem termometru**.

### 2.1.2.3 Termistor

Termistor (**ther**mally sensitive **resistor**) je polprevodniški električni uporovni element. Zanj je značilno, da se upor z višanjem temperature manjša, kar je ravno obratno kot pri uporovnem termometru. Sprememba upora pri določeni spremembi temperature je pri termistorju bistveno večja kot pri uporovnem termometru, ima pa termistor večji šum. Odvisnost termistorjevega upora od temperature *ni linearna*. Približno jo opiše enačba:

$$R(T) = Ae^{\frac{B}{T}}. \quad (2.5)$$

Konstanti  $A$  in  $B$  sta odvisni od snovi, iz katere je narejen termistor, in njegove oblike. Določimo ju lahko, če pri različnih temperaturah izmerimo upor ter narišemo graf odvisnosti  $\ln(R(T))$  od  $1/T$ , ki bi moral biti premica:

$$\ln R(T) = \ln \left( Ae^{\frac{B}{T}} \right), \quad (2.6)$$

$$\ln R(T) = \ln A + B \frac{1}{T}. \quad (2.7)$$

### 2.1.2.4 Kapljevinski termometer

Kapljevinski termometri so med najpogostejšimi. Imajo bučko, v kateri je tekočina, in kapilaro. Ko se termometru spremeni temperatura, se tekočini in bučki spremeni volumen. Ker se tekočini volumen spremeni bolj kot bučki, pri nekaj tekočine zleze v kapilaro oz. iz nje, če termometer ohlajamo. Če segrevamo in ohlajamo tudi kapilaro, se spreminjata tudi presek in dolžina kapilare. Večina termometrov je umerjenih tako, da je cel termometer, vključno s kapilaro, na isti temperaturi. Če ga uporabljamo tako, da je bučka toplejša od kapilare, kaže premalo in obratno.

### 2.1.2.5 Termočlen

Termočlen deluje na temelju kontaktne napetosti. To je električna napetost, ki se pojavi med dvema kovinama, če ju staknemo. Odvisna je od temperature spoja in je tem večja, čim večja je temperatura spoja. Zato termočlen ne potrebuje zunanje napetosti.



Slika 2.1: Termočlen.

Termočlen ima dve žici iz različnih kovin, ki sta na koncih zvarjeni. (slika 2.1). Če imata oba spoja enako temperaturo, sta kontaktni napetosti v njih nasprotno enaki in se odštejeta. Če pa en spoj segrejemo bolj od drugega, je pri spoju z višjo temperaturo kontaktna napetost večja in med obema spojema nastane električna napetost, ki je

enaka razliki obeh kontaktnih napetosti. Pravimo ji *termonapetost*. Če temperaturna razlika spojev ni previsoka, se zadovoljimo z linearnim približkom:

$$U = a(T_2 - T_1). \quad (2.8)$$

Koeficient  $a$  imenujemo koeficient termonapetosti.

Z merjenjem termonapetosti lahko torej termočlen uporabimo za merjenje temperaturne razlike. Ker ponavadi želimo meriti absolutno temperaturo in ne razlike, damo en spoj termočlena na znano konstantno temperaturo - najpogosteje v zmes ledu in vode ( $0^\circ\text{C}$ ).

Za termočlene uporabljamo različne dvojice kovin. Izbiramo take, ki imajo čim večji koeficient termonapetosti. Tako dobimo večje napetosti, ki jih lažje merimo. Vendar pa imajo nekatere kombinacije zelo majhno linearno območje. Za precizne meritve navadno uporabljamo standardizirano kombinacijo Pt-Pt/Rd (platina-platina/rodij). V tabeli 2.1 so zbrani koeficienti termonapetosti za nekaj parov kovin.

termoelement	$a/\frac{\mu\text{V}}{\text{K}}$ (pri $0^\circ\text{C}$ )
železo-konstantan	50
baker-konstantan	42
železo-nikelj	32
železo-platina	16

Tabela 2.1: Koeficient termonapetosti za nekatere termoelemente.

### 2.1.2.6 Pirometer

Za merjenje temperature močno segrelih teles, ki sevajo, uporabljamo posebne inštrumente, imenovane pirometri. Pirometri merijo gostoto sevanega svetlobnega toka  $j$  in s pomočjo Štefanovega zakona:

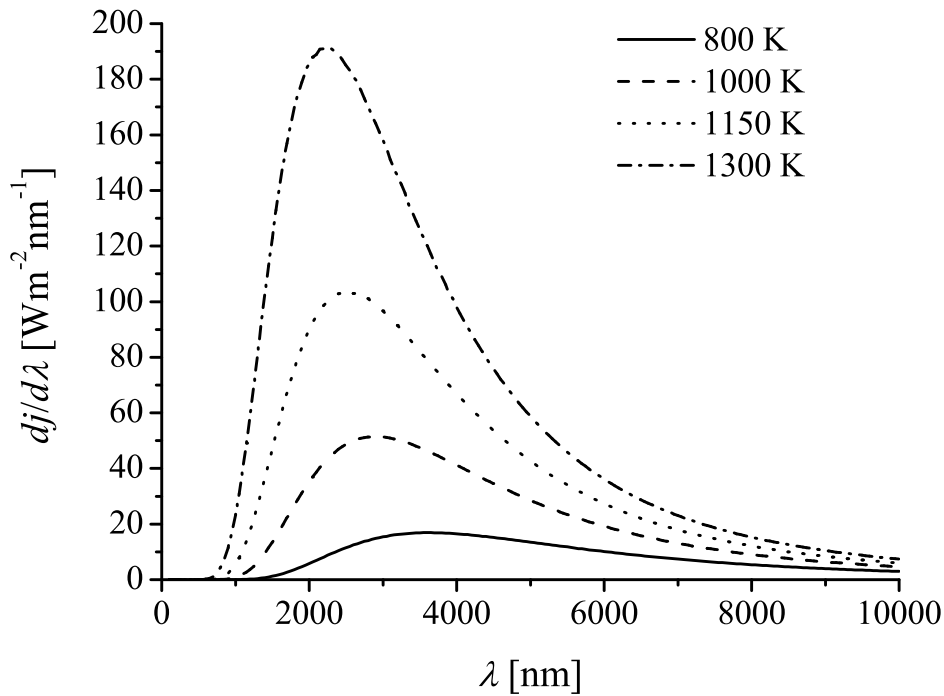
$$j = \sigma T^4, \quad (2.9)$$

določijo temperaturo sevajočega telesa  $T$ .  $\sigma$  je Štefanova konstanta, ki znaša  $\sigma=5,670\cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ . Štefanov zakon velja za tako imenovano črno telo; to je telo, ki absorbira vso svetlobo, ki pade nanj iz okolice. Segreto črno telo oddaja svetlobo vseh valovnih dolžin, pri čemer so z naraščajočo temperaturo v spektru vse bolj zastopane nižje valovne dolžine (slika 2.2).

Odvisnost gostote svetlobnega toka od valovnih dolžin podaja Planckov sevalni zakon:

$$\left(\frac{dj}{d\lambda}\right)_T = \frac{8\pi hc^2}{\lambda^5} \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1\right)^{-1}, \quad (2.10)$$

kjer je  $h$  Planckova konstanta ( $h=6,6\cdot 10^{-34} \text{ Js}$ ),  $c$  svetlobna hitrost ( $c=2,998\cdot 10^8 \text{ m/s}$ ) in  $k$  Boltzmannova konstanta ( $k=1,38\cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ).



Slika 2.2: Porazdelitev gostote sevalnega toka v odvisnosti od valovne dolžine in temperature (Planckov zakon).

Poznamo tako imenovane *radiacijske* pirometre, ki upoštevajo celoten svetlobni tok z merjenega telesa, in *optične* pirometre, ki upoštevajo le svetlobni tok v določenem območju valovnih dolžin. Telesa, ki niso sposobna absorbirati vse vpadne svetlobe, imenujemo siva telesa. Zanje veljajo podobni zakoni kot za črna telesa, le da je gostota svetlobnega toka z njih manjša za faktor emisivnosti  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{dj_{sivo}(\lambda, T)}{dj_{\text{črno}}(\lambda, T)}, \quad (2.11)$$

kjer  $\lambda$  predstavlja valovno dolžino,  $dj$  pa del gostote svetlobnega toka pri določenem intervalu  $d\lambda$  in temperaturi  $T$ . V primeru, da merimo temperaturo sivega telesa, moramo na pirometru nastaviti ustrezno emisivnost  $\varepsilon$ . S pirometrom, ki je umerjen na črno telo, namreč izmerimo nekoliko nižjo temperaturo, kot bi jo imelo črno telo z isto gostoto svetlobnega toka, kot jo ima merjeno sivo telo. Velja torej naslednja zveza:

$$\frac{dj_{sivo}}{d\lambda}(\lambda, T_{sivo}) = \frac{dj_{\text{črno}}}{d\lambda}(\lambda, T_{\text{črno}}), \quad (2.12)$$

s pomočjo katere ob uporabi rahlo poenostavljene enačbe (2.10) in enačbe (2.11) dobimo pravo temperaturo sivega telesa:

$$T_{sivo} = \left( \frac{1}{T_{\text{črno}}} + \frac{\lambda k}{hc} \ln \varepsilon(\lambda, T_{sivo}) \right)^{-1}. \quad (2.13)$$



Takšna poenostavitev je veljavna za nižje temperature (do nekaj tisoč kelvinov) in manjše valovne dolžine.

### 2.1.3 Oprema in pripomočki

1. Wheatstonov most
2. platinski uporovni termometer
3. bakrov uporovni termometer
4. termistor
5. živosrebrni termometer
6. oljna kopel z grelnikom
7. termoelementa železo-konstantan in nikelj-krom/nikelj
8. digitalni in analogni voltmeter
9. električna peč z variakom
10. stojalo z žarnico z volframovo nitko in variakom
11. optični digitalni Pirometer Infraterm IS 3D

#### 2.1.3.1 Wheatstonov most

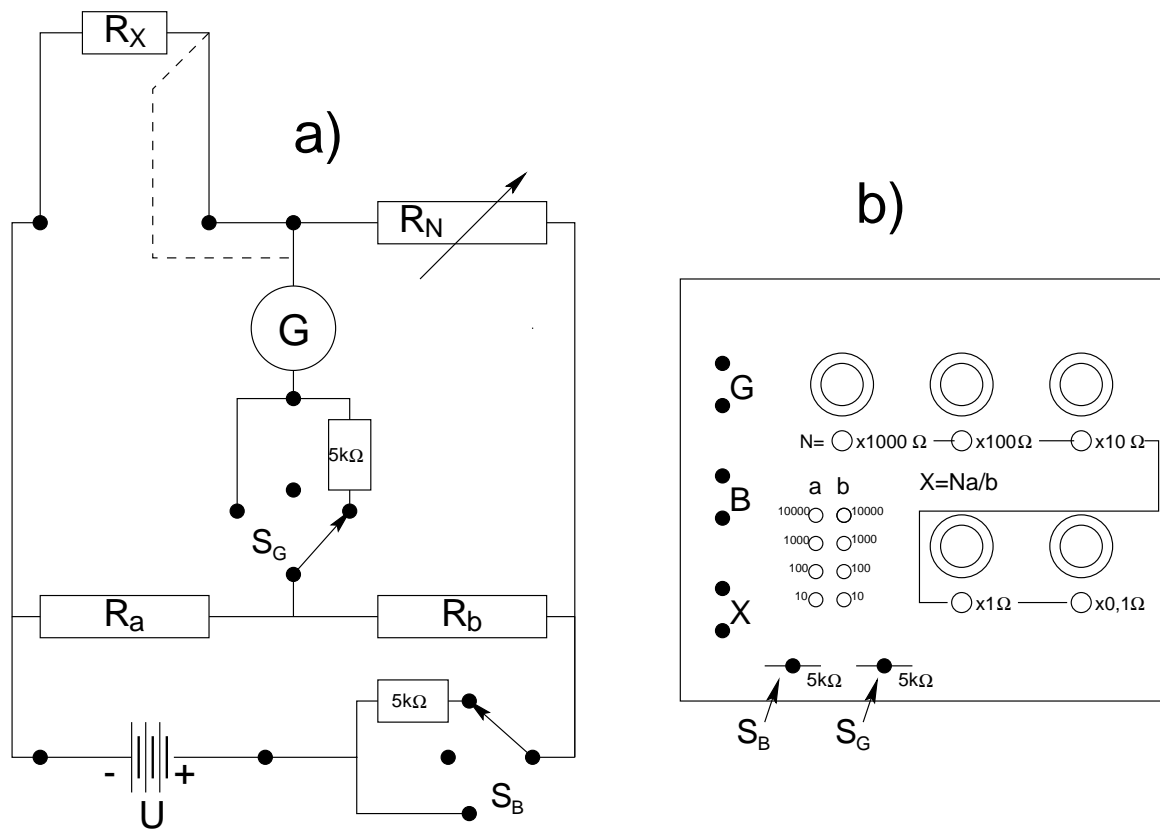
Osnove delovanja Wheatstonovega mostu so opisane v dodatku A. Tu bomo opisali izpopolnjen Wheatstonov most, s katerim bomo merili na vajah. Njegovo shemo kaže slika 2.3.

Uporovni termometer navadno priključimo v most z bakrenimi žicami. Pri običajni vezavi tipala izmerimo njegovo upornost skupaj z upornostjo dovodnih žic. Te morajo biti zato dovolj debele, da je njihova upornost le majhen del upornosti termometrovega čutila. Kadar je termometer precej oddaljen od mostu (v industrijskih obratih tudi več 10 m), bi morale imeti dovodne žice precejšen presek, da bi izpolnili zgornjo zahtevo. Lahko bi sicer njihovo upornost izmerili in jo potem odšteli, vendar se lahko temperatura žic in z njo njihova upornost med meritvijo spreminja. V tem primeru bi odštevali napačne vrednosti.

Zato uporabljamo tako imenovan kompenzacijski vod. To pomeni, da galvanometer vežemo tik ob čutilu, kot je s črtkano črto narisano na shemi. V tem primeru se vpliv upornosti obeh dovodnih žic izniči. Pri vaji kompenzacijskega voda ne uporabljamo.

Izpopolnitvi Wheatstonovega mostu sta:

1. Kaskadni spremenljivi upor, ki mu lahko spreminjamo upornost po desetiških faktorjih.
2. 5 k $\Omega$  predupora s stikali pri bateriji in galvanometru. Z njima lahko zelo zmanjšamo tok skozi galvanometer, kar je pomembno, kadar je most slabo uravnovešen, saj je galvanometer zelo občutljiv.



Slika 2.3: Shema a) in risba b) Whetstonovega mostu, ki ga uporabljamo pri vaji.

### 2.1.3.2 Merjenje napetosti s termočlenom

Napetost merimo z voltmetri. Ponavadi želimo, da ima voltmeter čim večjo upornost, zato da skozenj med merjenjem teče čim manjši tok. Čim manjši je tok, tem manjši je padeč napetosti na viru in bolj točna je naša meritev. Včasih je razlika med pravo in merjeno napetostjo tako velika, da se splača meritve računsko popraviti. To naredimo po enačbi:

$$U_0 = U_v \frac{R_v + R_0}{R_v} = U_v \left( 1 + \frac{R_0}{R_v} \right), \quad (2.14)$$

kjer je  $U_0$  prava napetost,  $U_v$  napetost, ki jo kaže voltmeter,  $R_0$  upornost napetostnega vira in  $R_v$  upornost voltmetra. Iz enačbe (2.14) vidimo, da če je upornost vira mnogo manjša od upornosti voltmetra, je izmerjena napetost približno enaka pravi.

### 2.1.4 Potek dela

1. V oljno kopel damo živosrebrni termometer in enega od uporovnih termometrov ali termistor, ki ga priključimo na Wheatstonov most. Z grelnikom segrevamo kopel. Vsakih  $5^\circ\text{C}$  odčitamo temperaturo na Hg termometru in izmerimo upornost uporovnega termometra oziroma termistorja. Vsaka meritev naj poteka po naslednjih korakih:

- Med segrevanjem kopeli morata biti obe stikali (na sliki 2.3 b) v srednjem, izključenem položaju.
- Ko se kopel dovolj segreje za naslednjo meritve, izključimo grelnik.
- Obe stikali pretaknemo v desni položaj, tako da sta v most vključena oba predupora.
- Kaskadni upor naravnamo tako, da je tok skozi galvanometer čim bliže ničli (največ eno črtico na skali).
- Stikalo baterije pretaknemo v desni položaj (izključimo predupor na bateriji). S tem se občutljivost mostu poveča in se zato poveča tudi odmik kazalca na galvanometru od ničelne lege.
- S kaskadnim uporom čimbolj zmanjšamo tok skozi galvanometer. POZOR, sedaj smemo spremeniti upor za največ  $10 \Omega$ !
- Izključimo galvanometrov predupor in do konca naravnamo spremenljivi upor. Upornost spremenljivega upora je sedaj enaka upornosti merjenega upora (uporovnega termometra ali termistorja).
- Zapišemo izmerjeno upornost in odčitamo temperaturo Hg termometra.
- Pretaknemo obe stikali v srednjo (izključeno) lego ter vključimo grelnik.

Kopel segrevamo do približno  $70^\circ\text{C}$ . Meritve zberemo v tabeli.

- Če umerjamo Hg termometer s Pt uporovnim termometrom, iz izmerjenih upornosti izračunamo temperature  $T_{\text{Pt}}$  in narišemo korekcijski diagram  $\Delta T = T_{\text{Pt}} - T_{\text{Hg}}$  v odvisnosti od  $T_{\text{Hg}}$ .
  - Če umerjamo Cu uporovni termometer s Hg termometrom, narišemo umeritveni diagram odvisnosti upornosti  $R_{\text{Cu}}$  od temperature  $T_{\text{Hg}}$ . Po enačbi (2.4) je graf premica. Na izmerjene točke prilagodimo linearno funkcijo po metodi najmanjših kvadratov (glej poglavje 1.5). Vstaviti moramo  $x_i = T_{\text{Hg}_i}$  in  $y_i = R_{\text{Cu}_i}$ . S tem dobimo konstanti  $R_0 = b$  in  $a = a/R_0$  (levi  $a$  je koeficient termočlena, desni pa naklon premice) iz enačbe (2.4). Za  $T_1$  vzamemo  $0^\circ\text{C}$ , za  $T_2$  pa  $T_{\text{Hg}}$ .
  - Pri umerjanju termistorja s Hg termometrom narišemo umeritveni diagram odvisnosti upornosti termistorja  $R_t$  od temperature  $T_{\text{Hg}}$ . Za vse meritve izračunamo vrednosti  $\ln R_t$  in  $1/T_{\text{Hg}}$  (temperatura mora biti v kelvinih) ter narišemo diagram odvisnosti  $\ln R_t$  od  $1/T_{\text{Hg}}$ . Izmerjenim točkam prilagodimo premico po metodi najmanjših kvadratov. Vstavimo  $x_i = 1/T_i$  in  $y_i = \ln R_t$  ter dobimo konstanti termistorja  $A = e^b$  in  $B = a$ .
2. V električno peč vtaknemo en spoj vsakega od termočlenov, drugi stik potopimo v zmes ledu in vode v Dewarjevi posodi. Variak je že nastavljen tako, da se peč segreva ravno prav hitro, zato ga ne premikajte. Odčitke zapisujemo v intervalih  $0,5 \text{ mV}$  napetosti termoelementa Ni-Cr/Ni. Zapišemo osem do deset odčitkov. Iz izmerjenih termonapetosti termoelementa železo-konstantan  $U_{\text{Fe-k}}$  dobimo temperature  $T_{\text{Fe-k}}$  z vaji priloženimi tabelami. Izmerjeno termonapetost

termočlena nikelj-krom/nikelj  $U_{Ni-CrNi}$  popravimo po (enačbi 2.14) in njeno odvisnost od temperature  $T_{Fe-k}$  narišemo na umeritveni diagram. Izmerjenim točkam prilagodimo premico po metodi najmanjših kvadratov. Vemo, da je napetost termočlena enaka nič, ko imata spoja enako temperaturo  $U(0\text{ °C}) = 0$ . Zato je  $b = 0$  in

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2}. \quad (2.15)$$

Vstaviti moramo  $x_i = T_{Fe-k_i}$ ,  $y_i = U_{Ni-CrNi_i}$ . S tem najbolj natančno dobimo koeficient termonapetosti  $a$  za termočlen  $Ni - CrNi$  glede na naše meritve. To vrednost vzamemo za rezultat. Napako koeficienta termonapetosti ocenimo tako, da na diagramu po svoji presoji narišemo premico, ki kar najboljše orisuje potek naših meritev. Z diagrama odčitamo naklon premice ter izračunamo razliko med odčitano vrednostjo naklona in po enačbi (2.15) izračunano vrednostjo koeficienta termonapetosti  $a$ . To razliko vzamemo kot absolutno napako naklona  $\Delta a$ . Rezultat pravilno zaokrožimo in ga zapišemo skupaj z oceno napake.

3. S pirometrom izmerite odvisnost temperature volframove nitke v žarnici od napetosti na žarnici. S pomočjo variaka zvišujte napetost od 40 V naprej po 20 V. Na pirometru nastavite emisivnost 0,35, kar ustreza emisivnosti volframa. Pri napetosti 100 V na žarnici je temperatura nitke enaka 1800 K. S pomočjo tega podatka lahko izračunate korekcijski faktor  $K$  za odčitke s pirometra in korigirate izmerjene vrednosti temperature volframove nitke  $T_{izmerjena}$ .

$$K = \frac{1800K}{T_{izmerjena}(U = 100V)} \quad (2.16)$$

in nato dejansko temperaturo izračunate

$$T_{prava} = K \cdot T_{izmerjena}. \quad (2.17)$$

To je seveda poenostavljen način korekcije, saj smo predpostavili, da je korekcija na celotnem območju izmerjenih temperatur enaka.

Narišite umeritveni diagram optičnega pirometra: odvisnost prave temperature volframove nitke v žarnici  $T_{prava}$  od izmerjene temperature  $T_{izmerjena}$ .

### 2.1.5 Vprašanja

1. S katerima točkama je definirana temperaturna skala? Naštej še nekaj drugih definicijskih točk po ITS-90.
2. Kako je električna upornost kovine odvisna od temperature?
3. Kako je upornost termistorja odvisna od temperature?
4. Zakaj kapljevinski termometer kaže premalo, če je segreta le bučka, kapilara pa ne?

5. Katero količino dejansko merimo s termoelementom in kako je povezana s temperaturo?
6. Za koliko odstotkov se razlikujeta izmerjena napetost in prava napetost vira, če je upornost voltmetra  $300\text{ k}\Omega$ , notranja upornost vira pa  $14\text{ k}\Omega$ ?

## 2.2 Merjenje tlaka

### 2.2.1 Naloga

- Z živosrebrnim U-manometrom preverite točnost manometra na Bourdonovo cev in manometra z mehkom.
- Umerite uporovni manometer.

### 2.2.2 Osnove

Tlak  $p$  je določen s silo  $F$ , ki deluje na ploskev  $S$ :  $p = F/S$ . Enota za tlak v SI-sistemu je pascal (Pa):

$$1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}.$$

V tehniki in meteorologiji pogosto uporabljajo tudi stotisoč krat večjo enoto bar:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}.$$

Včasih pa so uporabljali enoto atmosfero,

$$1 \text{ atm} = 1,01325 \text{ bar},$$

ki je ne uporabljamo več.

Tlak je iz varnostnega vidika raznih naprav zelo pomembna količina. Vrednosti tlaka, ki se pojavljajo v praksi segajo od absolutnega vakuumu do več tisoč barov. Zato je razvitih mnogo različnih vrst merilnikov tlaka, ki delujejo na osnovi različnih fizikalnih principov in so primerni za določeno področje tlakov. V območju od nekaj mbar do nekaj 100 barov so najpogostejši kapljevinski in prožnostni manometri.

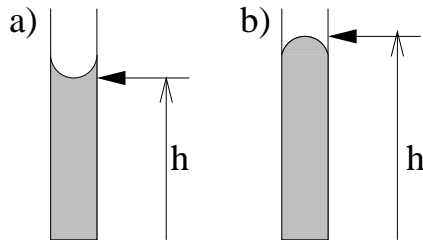
#### 2.2.2.1 Kapljevinski manometri

Pri kapljevinskih manometrih se merjeni tlak uravnovesi s hidrostatskim tlakom tekočine  $\Delta p = \rho gh$ . Poznamo različne izvedbe, med katerimi so pogoste: U-manometer, manometer s čašo, manometer z nagnjenim krakom itd. Z njimi merimo tlačne razlike ali absolutni tlak. Absolutni tlak merimo tako, da zapremo enega od krakov in poskrbimo, da je v tem kraku nad gladino manometriške kapljevine le njen parni tlak. Najpogostejše kapljevine za manometre so živo srebro, voda, etanol in silikonsko olje.

Kapljevinske manometre uporabljamo npr. za preverjanje tesnjenja plinskih napeljav. Napeljavo napolnimo z zrakom in z občutljivim kapljevinskim manometrom merimo, če nadtlak pada.

**Natančnost in občutljivost** kapljevinskih manometrov sta tem večji, čim manjša je gostota kapljevine, ker pri kapljevini z manjšo gostoto določena razlika tlakov (oziroma njena sprememba) povzroči večjo razliko v višini gladine v obeh krakih (oziroma spremembo te razlike). Večje razlike in njihove spremembe pa lažje odčitamo.

**POZOR!** Pri kapljevinah, ki omočijo steno manometrične cevi, odčitavamo višino dna meniskusa, pri tistih, ki stene ne omočijo, pa višine vrha (glej sliko 2.4). Včasih se zgodi, da ima npr. voda izbočen meniskus tako kot živo srebro. To se zgodi, če se je vodni stolpec dvigal (histereza). Takrat rahlo potresemo cevko, da se meniskus lepo oblikuje. Če cev ni čista, se stolpec lahko "zatika", kar povzroča napako pri meritvah. Zavedati se moramo, da je merjeni tlak uravnotežen s hidrostatskim tlakom stolpca tekočine in kapilarnim tlakom vrha stolpca v cevi.



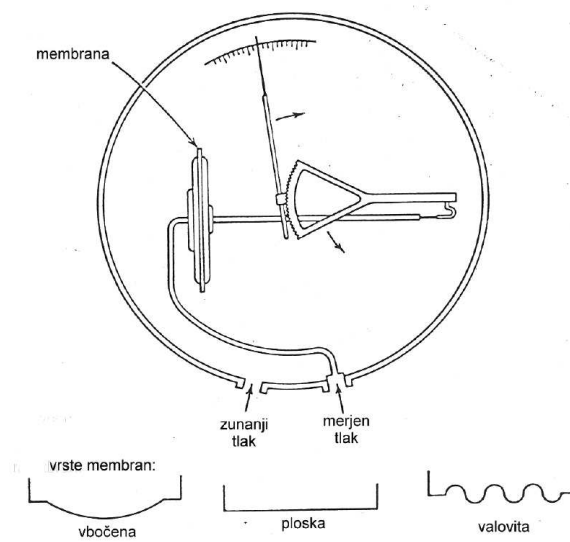
Slika 2.4: Višino kapljevinskega stolpca odčitavamo: a) na dnu meniskusa pri kapljevinah, ki omočijo stene (primer je voda na steklenih stenah) in b) na vrhu meniskusa pri kapljevinah, ki ne omočijo stene (primer je živo srebro na steklu).

### 2.2.2.2 Prožnostni manometri

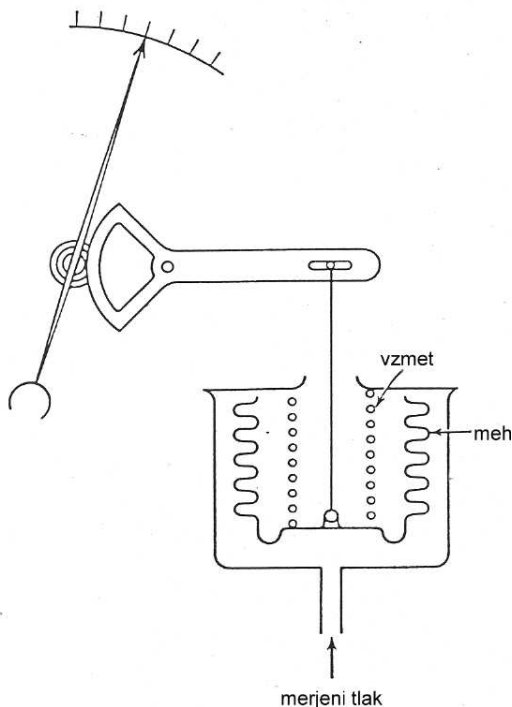
V prožnostnih manometrih se del instrumenta pod vplivom tlaka deformira. Silo tlaka torej uravnesimo s silo, ki je posledica deformacije prožnega materiala (npr. membrane, meha, vzmeti). Deformacijo merimo na več načinov, najpogosteje mehansko, ali pa jo prevedemo v električni signal.

Pri **manometru z membrano** (slika 2.5) je aktivni del vpeta membrana, ki se pod vplivom sile tlaka deformira. Včasih je prožna sama membrana, včasih jo podpira vzmet. Premike membrane, ki so ponavadi majhni, mehansko povečamo (npr. z zobatim kolesjem) in prikažemo na skali manometra.

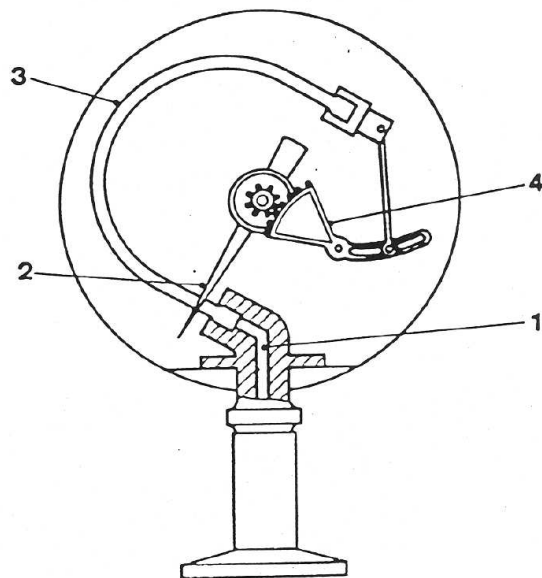
Prožni del **manometra z mehom** je meh (slika 2.6). To je tanka kovinska cev z nagubanim plaščem, ki je na eni strani zaprta. Meh se pod vplivom tlaka razteza



Slika 2.5: Manometer na membrano.



Slika 2.6: Manometer na meh.



Slika 2.7: Manometer na Bourdonovo cev: 1 dovodna cev, 2 kazalec, 3 Bourdonova cev, 4 vzvodni mehanizem.

predvsem v vzdolžni smeri.

Zelo znan in v praksi pogosto uporabljen manometer je **Bourdonova cev**. Njen glavni sestavni del je ukrivljena, na enem koncu zaprta prožna cev z ovalnim presekom (slika 2.7), na drugem koncu pa odprta, da vanjo lahko pride medij, ki je pod tlakom. Tlak je znotraj Bourdonove cevi konstanten. Glede na definicijsko enačbo tlaka in dejstvo, da sta sploščeni površini ovalne cevi zaradi različnih krivinskih radijev različni, so tudi sile nanju različne. Tako so sile na po površini manjšo sploščeno notranjo ploskev, ki deluje na Bourdonovo cev radialno navznoter, manjše od sil na zunanjo sploščeno ploskev, ki deluje na Bourdonovo cev radialno navzven. Zaradi neenakih površin se pri povečanju tlaka znotraj Bourdonove cevi sile navzven povečajo bolj kot sile navznoter, zato se Bourdonova cev z višanjem tlaka vedno bolj odpira. Premik, ki nastane zaradi tega odpiranja ojačimo z mehanizmom zobatih kolesc in ga prikažemo na skali. Odvisno od dimenzioniranja in izbire materiala za ovalno cev ima Bourdonova cev lahko zelo široko merilno območje tlakov (od zelo majhnih do nekaj 100 barov).

Deformacijo prožnega dela (npr. membrane) lahko zaznamo tudi z **uporovnim lističem** (angleško "strain gage"), ki je pritrjen (nalepljen) nanj. Skupaj z membrano se deformira tudi uporovni listič, zato se mu spremeni električni upor in tako tlak prevedemo v električni signal. Spremembo upora merimo z ohmmetrom ali Wheatstoneovim mostom. Uporovni listič je podrobneje opisan v dodatku A.

**Piezoelektrični pretvorniki tlaka** temeljijo na piezoelektričnosti nekaterih materialov (kremen, litijev sulfat, barijev titanat itd.). Piezoelektričnost je pojav, ko nastane pri deformaciji v snovi električno polje (in obratno, v električnem polju se piezoelektrična snov deformira). Če damo piezoelektrično snov med kovinski elektrodi



in jo deformiramo, se na elektrodah inducira napetost, ki je sorazmerna deformaciji in jo lahko merimo.

### 2.2.2.3 Umerjanje (kalibracija) manometrov

Točnost manometrov, katerih delovanje sloni na deformaciji elastičnega elementa, je treba občasno preverjati. Preverjamo jo z merjenjem znanega tlaka, ki ga določimo z drugim, točnim merilnikom. Zaželeno je, da njegovo delovanje ni odvisno od elastične deformacije. Navadno uporabljamo kot normale tekočinske manometre. Za visoke tlake uporabljajo manometer na bat. V rabi so tudi precizni kalibracijski prožnostni manometri. Točnost kalibracijskih manometrov mora biti večja od točnosti testiranih.

### 2.2.3 Oprema in pripomočki

1. tlačna napeljava z reducirnim ventilom (glej dodatek A) in igelnim ventilom
2. živosrebrni U-manometer
3. manometer na Bourdonovo cev
4. manometer z mehomo
5. uporovni manometer in ohmmeter

### 2.2.4 Potek dela

V zaprt sistem so povezani živosrebrni U-manometer, preciznostni manometer, uporovni manometer in Bourdonova cev. Z vsemi štirimi manometri hkrati merimo isti tlak. Vir tlaka je zrak iz tlačne napeljave, kjer je tlak nekaj deset barov. Tlak iz napeljave zmanjšamo z reducirnim ventilom na delovni tlak okrog enega bara. Z igelnim ventilom iz napeljave spuščamo v sistem zrak tako, da v sistemu višamo tlak od 0 barov do konca skale Bourdonove cevi po stopnjah približno 0,05 bara. Po približno enakih stopnjah tlak spet nižamo do nič. Tako preizkusimo, če ima kateri od manometrov histerezo (če manometer, kadar tlak manjšamo, kaže drugače, kot kadar tlak večamo). Na vsaki stopnji preberemo vrednost na vseh manometrih in vrednosti zapišemo v tabelo. Ocenimo in zapišemo natančnost izmerkov.

Rezultate predstavimo z umeritvenimi in korekcijskimi diagrami. Umeritveni diagram je graf odvisnosti merjene količine (tlaka, napetosti) od pravega tlaka. Korekcijski diagram je graf odvisnosti razlike med pravim tlakom in merjenim tlakom od merjenega tlaka (in NE pravega). Iz korekcijskega diagrama odčitamo, koliko moramo prišteti merjenemu tlaku, da dobimo pravi tlak.

1. Umeritveni diagrami:
  - (a) Narišemo graf odvisnosti tlaka preciznostnega manometra od pravega tlaka, ki ga kaže U-manometer.
  - (b) Narišemo graf odvisnosti tlaka Bourdonove cevi od pravega tlaka, ki ga kaže U-manometer.

- (c) Narišemo graf odvisnosti napetosti uporovnega manometra od pravega tlaka, ki ga kaže U-manometer.
2. Korekcijski diagrami:
- (a) Narišemo graf odvisnosti razlike med pravim tlakom in tlakom preciznostnega manometra od tlaka preciznostnega manometra.
- (b) Narišemo graf odvisnosti razlike med pravim tlakom in tlakom Bourdonove cevi od tlaka Bourdonove cevi.

### 2.2.5 Vprašanja

1. Katere so enote za tlak in kakšna so njihova medsebojna razmerja?
2. Od česa sta odvisni natančnost in občutljivost kapljevinskih manometrov in kako ju lahko izboljšamo?
3. Kako delujejo prožnostni manometri?
4. Kaj sta umeritveni in korekcijski diagram?

## 2.3 Umerjanje merilnikov pretoka

### 2.3.1 Naloga

S plinsko uro umeri reometer s kapilaro, reometer z zaslonko in rotameter.

### 2.3.2 Osnove

#### 2.3.2.1 Volumski in masni pretok

Volumski pretok  $\dot{V}$  je definiran kot volumen plina pretočenega v enoti časa:

$$\dot{V} = \frac{V}{t}. \quad (2.18)$$

Volumski pretok ima po SI enoto  $\text{m}^3/\text{s}$ , uporabljamo pa še enote:  $\text{l/s}$ ,  $\text{l/min}$ ,  $\text{l/h}$ ,  $\text{m}^3/\text{h}$  itd.

Za preračunavanje je pomembna relacija

$$1 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 60 \frac{\text{l}}{\text{min}} = 3600 \frac{\text{l}}{\text{h}}. \quad (2.19)$$

Masni pretok  $\dot{m}$  je definiran kot masa plina pretočenega v enoti časa in je volumski pretok pomnožen z gostoto tekočine:

$$\dot{m} = \frac{m}{t} = \frac{\rho V}{t} = \rho \frac{V}{t} = \rho \dot{V}, \quad (2.20)$$

enote so  $\text{kg/s}$ ,  $\text{kg/h}$ ,  $\text{g/s}$  itd.

#### 2.3.2.2 Reometri

Pogosto merimo pretok tekočine v cevi tako, da damo v cev definirano oviro. Za oviro je tlak manjši kot pred njo. Padeč tlaka na oviri je odvisen od pretoka. Če izmerimo padeč tlaka, posredno izmerimo tudi pretok tekočine. Merilnike pretoka, ki delujejo na ta način, imenujemo reometri. V reometrih uporabljamo različne vrste ovir (kapilara, zaslonka, šoba itd.).

V **reometru s kapilaro** je ponavadi kapilara izbrana tako, da je tok tekočine skozi laminaren. Tedaj velja za upor v kapilari linearni (Poiseuilleov) zakon, kjer je padeč tlaka v cevi premosorazmeren hitrosti oziroma pretoku tekočine:

$$\dot{V} = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8l\eta}. \quad (2.21)$$

V enačbi (2,12) je z  $\dot{V}$  označen volumski pretok, z  $r$  radij kapilare, z  $l$  dolžina kapilare, z  $\Delta p$  padeč tlaka na krajiščih kapilare in z  $\eta$  viskoznost tekočine.

**Reometer z zaslonko** ima vgrajeno oviro, skozi katero tok ni laminaren. Če je tok izrazito turbulenten ( $Re > 10^5$ ), velja za upor na oviri kvadratni zakon. To

pomeni, da je padec tlaka sorazmeren kvadratu volumskega pretoka. Volumski pretok tako izrazimo kot:

$$\dot{V} = \alpha S \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (2.22)$$

kjer je  $\alpha$  pretočni koeficient,  $S$  presek odprtine v zaslonki in  $\rho$  gostota tekočine.

V večini primerov tok skozi zaslonko ni niti laminaren niti izrazito turbulenten. Tedaj ne velja niti linearni niti kvadratni zakon upora, ampak je upor vsota obeh:

$$\Delta p = A\eta\dot{V} + B\rho\dot{V}^2, \quad (2.23)$$

$$\frac{\Delta p}{\eta\dot{V}} = A + B\frac{\rho}{\eta}\dot{V}. \quad (2.24)$$

Ker ne vemo, koliko prispeva kateri od obeh zakonov, moramo z meritvijo določiti odvisnost  $\Delta p$  od  $\dot{V}$ . To naredimo tako, da narišemo graf  $\Delta p/\eta\dot{V}$  proti  $\dot{V}$  in iz njega določimo konstanti  $A$  in  $B$ . Bolj podrobno je postopek opisan v podpoglavju 2.3.3 Potek dela.

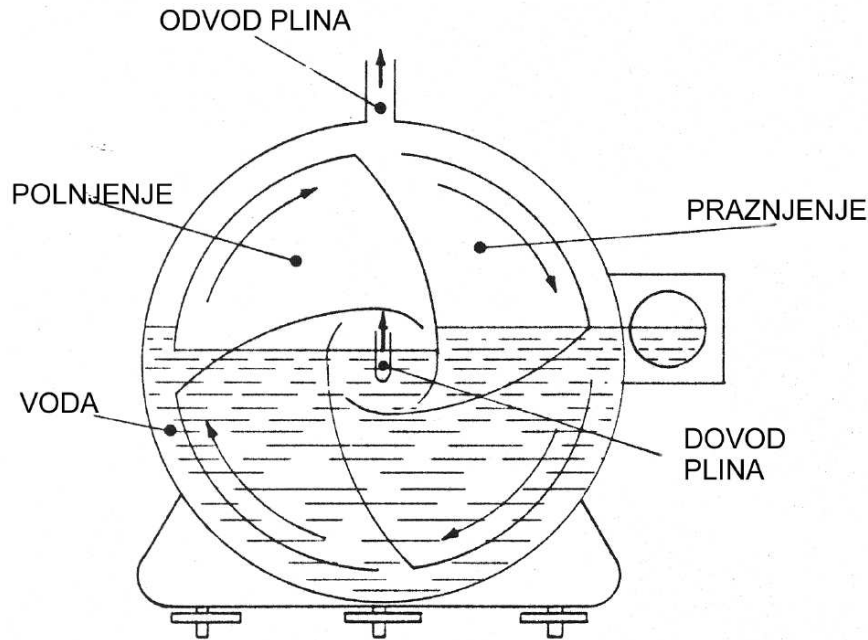
### 2.3.2.3 Rotameter

Rotameter je navpična cev, ki se širi navzgor. V njej je plovec, ki je lahko različnih oblik. Kapljevina teče po rotametrovi cevi navzgor. Plovec v toku kapljevine lebdi na določeni višini. Čim večji je volumski pretok tekočine, tem višje lebdi, ker nanj v toku kapljevine delujejo tri sile. Sila teže kaže navzdol, sila vzgona in sila upora pa navzgor. Če plovec miruje, so vse tri sile v ravnovesju:

$$F_g = F_V + F_u, \quad (2.25)$$

$$F_u = F_g - F_V. \quad (2.26)$$

Sila upora uravnovesi razliko med težo in vzgonom, ki se ne spreminjata. Plovec, ki predstavlja oviro na tok tekočine v cevi lebdi na taki višini, da je sila upora ravno pravšnja. Sila upora, ki deluje na oviro, je sorazmerna padcu tlaka na tej oviri. Padec tlaka pa je tem večji, čim bolj se cev pri oviri zoža. Ker je cev zgoraj širša,

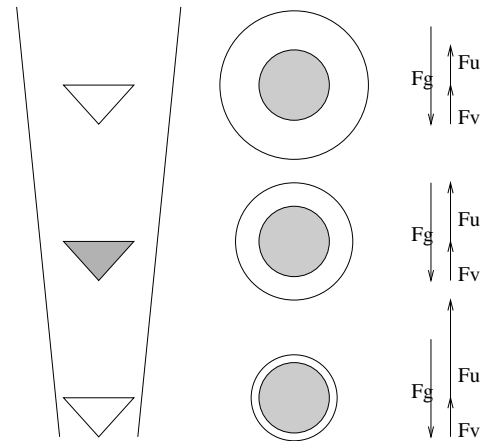


Slika 2.9: Plinska ura.

je tam zožitev manjša in bi bila zato sila upora pri enakem pretoku zgoraj manjša kot spodaj. Plovec se tako ustali na višini, kjer je sila upora ravno pravšnja (slika 2.8). Če pretok povečamo, se sila upora poveča in dvigne plovec vse do višine, kjer je vsota sil na plovec zopet enaka nič. Če pretok zmanjšamo, se plovec spusti nižje.

Ker je tok ob plovcu bolj ali manj turbulenten, je lahko plovec nemiren. Zato je pogosto izdelan tako, da se vrti okoli vzdolžne osi in je njegova lega stabilnejša.

Rotametri so ponavadi natančni na nekaj odstotkov na območju nad eno desetino maksimalnega pretoka. (Če je rotameter narejen tako, da lahko meri pretoke do, recimo, 30 l/min, je najmanjši pretok, ki ga lahko z njim dovolj zanesljivo merimo, 3 l/min.)



**Slika 2.8:** Cev rotametra se navzgor širi. Plovec najde tisto lego (osenčena), kjer so sile v ravnovesju. Če bi bil previsoko ali prenizko, sile ne bi bile uravnovešene. Narisane so tudi primerjave presekov cevi in plovec na različnih višinah. Manj kot ima tekočina prostora ob plovcu, večja je sila upora nanj.

### 2.3.2.4 Plinska ura

S plinsko uro merimo volumen pretočnega plina. Njena glavna dela sta vrtljivi boban s prekati in tesnjeno ohišje. Ohišje je do približno dveh tretjin napolnjeno z vodo (slika

2.9). Priključki za dotok in odtok plina so postavljeni tako, da mora plin teči skozi boben. Pri tem plin iz prekata izpodriva vodo in zato boben vrtil. Vrtenje bobna se mehansko prenese na kazalce, ki kažejo volumen pretočenega plina.

Ura kaže pravilno le pri določeni višini vodne gladine v ohišju. Zato je na uri pokazatelj te gladine. Ura mora stati vodoravno, zato je na njej vodna tehtnica.

Gostota plina je močno odvisna od temperature in tlaka. To vidimo iz plinske enačbe:

$$pV = \frac{m}{M}RT, \quad (2.27)$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT}. \quad (2.28)$$

Ura ima zato termometer, ki kaže temperaturo merjenega plina in diferenčni manometer, ki kaže razliko med zunanjim tlakom in tlakom plina v uri.

### 2.3.3 Potek dela

Najprej preverimo, če plinska ura stoji vodoravno in če je višina gladine vode v njej pravilna. Meritev opravimo tako, da s štoparico merimo čas, v katerem skozi plinsko uro preteče določen volumen plina (vsaj trije litri, kar pomeni en obrat velikega kazalca). Medtem na U-manometrih odčitamo višine vodnih stolpcev in lego plovca v rotametri. Zapišemo si tudi nadtak v cevi pred rotametrom, ki ga kaže tam priključen U-manometer. Merimo pri vsaj desetih pretokih. Začnemo pri največjem pretoku (okoli 230 l/h na rotametri) in potem zmanjšujemo pretok po 20 l/h. Pretok uravnavamo z igelnim ventilom.

1. Za vsako od meritev iz pretočenega volumna in časa izračunamo volumski pretok  $\dot{V}$  v litrih na uro.
2. Za rotameter narišemo umeritveni diagram odvisnosti volumskega pretoka, ki ga kaže rotameter  $\dot{V}_r$  od volumskega pretoka, ki ga dobimo s plinsko uro  $\dot{V}$ . Narišemo tudi korekcijski diagram  $(\dot{V} - \dot{V}_r)$  v odvisnosti od  $\dot{V}_r$ .
3. Za reometer s kapilaro narišemo umeritveni diagram  $\Delta p$  proti  $\dot{V}$ . Za vsako meritev izračunamo  $\Delta p/\dot{V}$  in narišemo krivuljo  $\Delta p/\dot{V}$  proti  $\dot{V}$ , ki bi glede na enačbo (2.21) morala biti konstanta.
4. Za reometer z zaslonko narišemo umeritveni diagram  $\Delta p$  proti  $\dot{V}$ . Izračunamo vrednosti  $\Delta p/\eta\dot{V}$  za vsako meritev in narišemo diagram  $\Delta p/\eta\dot{V}$  proti  $\dot{V}$ . Glede na enačbo (2.24), bi morale točke ležati na premici. Premico nanje prilagodimo po metodi najmanjših kvadratov, ki je opisana v podpoglavju 1.5. Sicer pa to naredimo takole.

Enačba (2.24) ima obliko linearne funkcije  $y = kx + n$ , kjer je  $y = \Delta p/\eta\dot{V}$ ,  $k = B \frac{\rho}{\eta}$ ,  $x = \dot{V}$  in  $n = A$ . Naše točke na grafu imajo koordinate:

$$x_i = \dot{V}_i, \quad y_i = \frac{\Delta p_i}{\eta \dot{V}_i}, \quad (2.29)$$

ki smo jih oštevilčili z  $i = 1, \dots, n$ , kjer je  $n$  število meritev. Metoda najmanjših kvadratov nam pravi, da je:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, \quad (2.30)$$

$$A = b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (2.31)$$

$$B = \frac{\eta}{\rho} a. \quad (2.32)$$

Izračunati moramo torej naslednje vsote

$$\sum_{i=1}^n x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_n,$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = y_1 + y_2 + \dots + y_n,$$

$$\sum_{i=1}^n x_i^2 = x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2,$$

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i = x_1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_n y_n,$$

jih vstaviti v zgornje enačbe ter izračunati naklon premice  $a$ , odsek na ordinatni osi  $A$  in konstanto  $B$ . Viskoznost zraka preberemo iz diagrama na sliki D.1 v dodatku D (pazite na red velikosti, ki je  $10^{-6} \text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ), njegovo gostoto pa izračunamo iz plinske enačbe. S tem najbolj natančno dobimo parametra  $a$  in  $A$  glede na naše meritve, zato ti vrednosti vzamemo za rezultat.

Njuno napako ocenimo tako, da na diagramu  $\Delta P / \eta \dot{V}$  proti  $\dot{V}$  po svoji presoji narišemo premico, ki kar najbolje orisuje potek točk, z diagrama odčitamo njen naklon in odsek na ordinatni osi ter izračunamo razliki med odčitanimi in izračunanima vrednostma za  $a$  in  $A$ . Ti razliki vzamemo kot absolutni napaki naklona  $\Delta a$  in odseka  $\Delta A$ . S pomočjo vrednosti  $\Delta a$  izračunamo še napako izračunane konstante  $B$ . Rezultate za  $a$ ,  $A$  in  $B$  pravilno zaokrožimo in jih zapišemo skupaj z oceno napake.

### 2.3.4 Vprašanja

1. Kako sta definirana volumski in masni pretok in kakšna je zveza med njima?
2. Kakšna je razlika med reometrom na kapilaro in reometrom na zaslonko in kako se to pozna na umeritvenem grafu?
3. Kako deluje rotameter?

4. Kako iz plinske enačbe izračunamo gostoto plina?
5. Zakaj uporabljamo igelni ventil?



## 2.4 Merjenje pretokov

### 2.4.1 Naloga

Z reometroma na zaslonko in šobo izmeri volumski pretok zraka v cevi in nanju umeri Venturijevo cev. Volumski pretok zraka v cevi izmeri tudi s pomočjo Pitotove cevi.

### 2.4.2 Osnove

#### 2.4.2.1 Volumski in masni pretok

Volumski pretok  $\dot{V}$  je definiran kot volumen plina, pretočenega v enoti časa:

$$\dot{V} = \frac{V}{t}. \quad (2.33)$$

Za volumski pretok uporabljamo enote: l/s, l/min, l/h, m<sup>3</sup>/s, m<sup>3</sup>/h itd. Za preračunavanje je pomembna relacija

$$1 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 60 \frac{\text{l}}{\text{min}} = 3600 \frac{\text{l}}{\text{h}}. \quad (2.19)$$

V cevi velja

$$\dot{V} = S\bar{v}, \quad (2.34)$$

kjer ja  $S$  presek cevi,  $\bar{v}$  pa povprečna hitrost tekočine v cevi.

Masni pretok  $\dot{m}$  je definiran kot masa plina, pretočenega v enoti časa in je volumski pretok pomnožen z gostoto tekočine:

$$\dot{m} = \frac{m}{t} = \frac{\rho V}{t} = \rho \frac{V}{t} = \rho \dot{V}, \quad (2.35)$$

enote so kg/s, kg/h, g/s itd.

#### 2.4.2.2 Pretakanje tekočin po ceveh

Če želimo, da tekočina v cevi teče, potrebujemo na koncih cevi tlačno razliko. Za idealen primer neoviranega toka nevizkozne tekočine po cevi zvezo že poznamo:

$$\Delta p_{id} = \frac{\rho \bar{v}^2}{2}. \quad (2.36)$$

V tem primeru tlačna razlika tekočino pospeši (npr. ko zrak sesamo iz prostora, kjer miruje, v cev, kjer se giblje s povprečno hitrostjo  $\bar{v}$ ).

Resnične tekočine so viskozne in se v njih pri pretakanju pojavljajo vrtinci (turbulence). Zaradi vrtničenja (turbulenc) ob stenah kanalov in na lokalnih ovirah (kolena, odcepi, lopute) ter zaradi notranjega trenja (viskoznost) tlak vzdolž cevi pada. To imenujemo upor.

Da padec tlaka v cevovodu lažje opišemo, ga razdelimo na različne prispevke:

1. Prvi prispevek je padec tlaka na ustju cevi, ki je zelo odvisen od oblike ustja. Opišemo ga z enačbo

$$\Delta p_{ust} = (1 + k) \frac{\rho \bar{v}^2}{2}. \quad (2.37)$$

Število  $k$  imenujemo *vstopni koeficient ustja*. Včasih uporabljamo *koeficient izgube ustja*  $C_e = 1/\sqrt{1+k}$  in enačbo 2.37 preoblikujemo v

$$\dot{V} = C_e \cdot S_{cev} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}. \quad (2.38)$$

V tabeli 2.2 so zbrani vstopni koeficienti ustij različnih oblik.

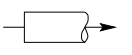
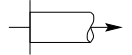
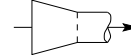
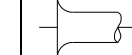
k	0,9	0,5	0,1	0,03
oblika				

Tabela 2.2: Vstopni koeficienti ustij različnih oblik.

2. Drugi prispevek je upor v ravnih delih cevi, ki je podan kot

$$\Delta p_{rav} = \lambda \frac{l}{D} \frac{\rho \bar{v}^2}{2}, \quad (2.39)$$

kjer je  $l$  dolžina ravnega odseka,  $D$  premer cevi na tem delu in  $\lambda$  koeficient upora v tem odseku cevi, ki je odvisen od vrste toka. Za laminaren tok velja:

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (2.40)$$

Pri turbulentnem toku moramo poleg Reynoldsovega števila  $Re$  poznati še relativno hrapavost cevi  $\varepsilon/D$ , ki je razmerje hrapavosti cevi  $\varepsilon$  in premera cevi  $D$ . Običajno  $\lambda$  odčitamo iz Colebrookovega (Moodyjevega) diagrama na sliki B.7. V tabeli 2.3 je podana značilna hrapavost cevi iz različnih materialov.

snov	hrapavost $\varepsilon/\text{mm}$
PVC	0,007
pločevina	0,15
vlečene cevi (steklo, Cu, medenina)	0,15
betonske cevi	0,18-0,8

Tabela 2.3: Nekatere značilne hrapavosti cevi.


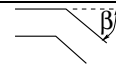
lok 90°		r/d	0,5	1,0	2,0	3,0
		$\xi$	1,0	0,35	0,20	0,15
kolena		$\beta$	90°	60°	45°	
		$\xi$	1,3	0,8	0,4	

Tabela 2.4: Koeficienti upora nekaterih oblik cevi.

3. Dodatni upor povzročajo lokalne ovire (kolena, odcepi, lopute, mreže itd.)

$$\Delta p_{ovi} = \xi \frac{\rho \bar{v}^2}{2}, \quad (2.41)$$

kjer je  $\xi$  koeficient lokalnega upora. V tabeli 2.4 so podani koeficienti lokalnega upora za ukrivljene cevi in kolena.

Celoten padec tlaka v cevi oz. tlak, ki je potreben za premagovanje vseh uporov, je vsota vseh posameznih prispevkov, ki ponavadi vključujejo več ravnih delov in lokalnih uporov:

$$\begin{aligned} \Delta p &= \Delta p_{ust} + \Delta p_{rav} + \Delta p_{ovi} \\ &= \frac{\rho \bar{v}^2}{2} \left[ (1 + k) + \sum_i \lambda_i \frac{l_i}{d_i} + \sum_j \xi_j \right]. \end{aligned} \quad (2.42)$$

Padec tlaka na lokalni oviri lahko uporabimo za merjenje pretoka. Za standardne ovire obstajajo diagrami, s katerimi iz izmerjenega padca tlaka izračunamo pretok. Podrobneje je to opisano v nadaljevanju.

### 2.4.2.3 Venturijeva cev

V Venturijevi cevi (slika 2.10a) se tok kapljevine zoža, zato je tam njegova hitrost večja in tlak manjši kot sicer v cevi. Iz razlike tlakov na ozkem in širokem delu (na sliki 2.10a sta to točki ① in ②) lahko izračunamo volumski pretok  $\dot{V}$ . To naredimo na naslednji način. Ker v Venturijevi cevi ni ostrih robov, se v njej ponavadi ohrani laminaren tok tekočine. Za tak tok Bernoulijeva enačba, ki opisuje ohranitev energije vsakega dela kapljevine vzdolž tokovnice brez upoštevanega trenja, dobro velja:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_0 + \frac{1}{2} \rho v_0^2 + \rho g h_0, \quad (2.43)$$

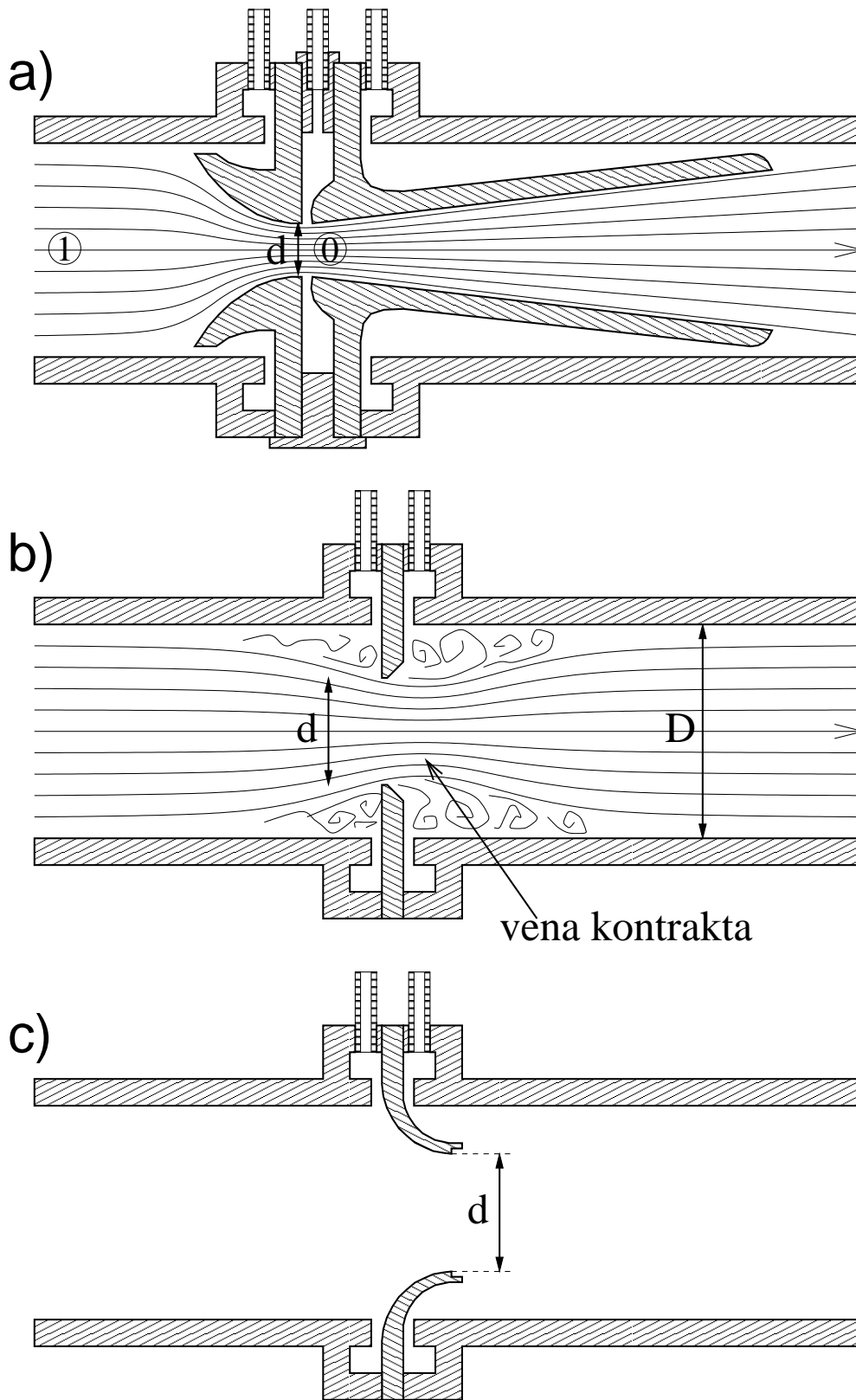
$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_0 + \frac{1}{2} \rho v_0^2. \quad (2.44)$$

V enačbi (2.44) smo upoštevali, da je cev vodoravna in se njena višina ne spremeni. Poleg Bernoulijeve velja pri nestisljivem mediju tudi kontinuitetna enačba:

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_0, \quad (2.45)$$

$$v_1 S_1 = v_0 S_0, \quad (2.46)$$

ker mora biti pretok skozi oba preseka pri točkah ① in ② enak. To velja, če se kapljevina ne stisne in če med točkama ne uhaja iz ali v cev. Če pa je kapljevina stisljiva, velja kontinuitetna enačba za množino kapljevine, torej  $\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} = konst.$



Slika 2.10: a) Venturijeva cev, b) zaslونka in c) šoba.

Iz Bernoulijeve enačbe (2.44) dobimo:

$$\Delta p = p_1 - p_0 = \frac{1}{2}\rho v_0^2 \left(1 - \frac{v_1^2}{v_0^2}\right) = \frac{1}{2}\rho v_0^2 (1 - f^2). \quad (2.47)$$

Z  $f$  smo za nestisljivo kapljevino označili razmerje med hitrostima:

$$f = \frac{v_1}{v_0} = \frac{S_0}{S_1}. \quad (2.48)$$

Iz enačb (2.29), (2.30) in (2.31) dobimo izraz za volumski pretok:

$$\dot{V} = S_0 v_0 = S_0 \frac{1}{\sqrt{1 - f^2}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}. \quad (2.49)$$

Če označimo

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - f^2}} \quad (2.50)$$

in  $\alpha$  imenujemo **pretočni koeficient**, dobimo enačbo (2.22) iz vaje 2.3:

$$\dot{V} = \alpha S_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}. \quad (2.22)$$

Pretočni koeficient lahko torej izračunamo iz razmerja presekov  $f$ . Če je  $f \ll 1$  lahko z razvojem v vrsto približno zapišemo:

$$\alpha = 1 + \frac{1}{2}f^2 = 1 + 0,5f^2. \quad (2.51)$$

To za Venturijevo cev dobro velja.

#### 2.4.2.4 Zaslونka in šoba

Zaslونka in šoba (slika 2.10a in 2.10b) se od Venturijeve cevi razlikujeta po tem, da

1. tok ni najožji v zaslonki (šobi), ampak šele malo za njo, na mestu, ki ga imenujemo *vena kontrakta*,
2. je tok okoli ovire *turbulenten*, zato pride do znatnega upora in padec tlaka ni le posledica hitrejšega toka, kot pri Venturijevi cevi.

Tlak za oviro je odvisen od hitrosti v veni kontrakti  $v_2$ , in ne od hitrosti v oviri  $v_0$ . Zato definiramo še razmerje teh dveh hitrosti:

$$u = \frac{v_0}{v_2}. \quad (2.52)$$

Na enak način kot prej dobimo:

$$\alpha = \frac{u}{\sqrt{1 - u^2 f^2}}, \quad (2.53)$$

$$\alpha = u + \frac{1}{2}u^2 f^2. \quad (2.54)$$

Zgornji izraz za  $\alpha$  bi dobro veljal, če ne bi bilo turbulence. Upor, ki se zaradi nje pojavi, pa ne prinese velikih preglavic, ker ga opišemo z enačbo, ki je popolnoma enaka enačbi (2.22), le pretočni koeficient je drugačen.

Oba opisana pojava opišemo na en mah tako, da prilagodimo pretočni koeficient:

$$\alpha = 0,60 + 0,4f^2 \quad \text{za zaslonko in} \quad (2.55)$$

$$\alpha = 0,98 + 0,4f^2 \quad \text{za šobo.} \quad (2.56)$$

Pri majhnih hitrostih tekočine moramo upoštevati tudi viskozni upor. Natančnejši kriterij je Reynoldsovo število:

$$Re = \frac{D\rho v}{\eta} = \frac{4\rho\dot{V}}{\pi\eta D}. \quad (2.58)$$

Čim manjše je  $Re$ , tem pomembnejši je viskozni upor. Pri vaji 2.3 smo ga upoštevali tako, da smo zapisali uteženo vsoto linearne in kvadratnega zakona upora:

$$\Delta p = A\eta\dot{V} + B\rho\dot{V}^2. \quad (2.23)$$

Tu bi radi obdržali preprosto obliko enačbe:

$$\dot{V} = \alpha S_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (2.22)$$

in bomo to tudi storili. Pretočni koeficient postane odvisen od pretoka v primeru, ko moramo upoštevati tudi viskozni upor. To se vidi iz grafa na slikah B.6 in B.5. Grafa kažeta, da pod nekim mejnim  $Re$  pretočni koeficient  $\alpha$  postane odvisen od  $Re$  oziroma pretoka  $\dot{V}$ . Mejno  $Re$  število je različno za različna razmerja radijev cevi in ovire (šobe ali zaslonke)  $d/D$ .

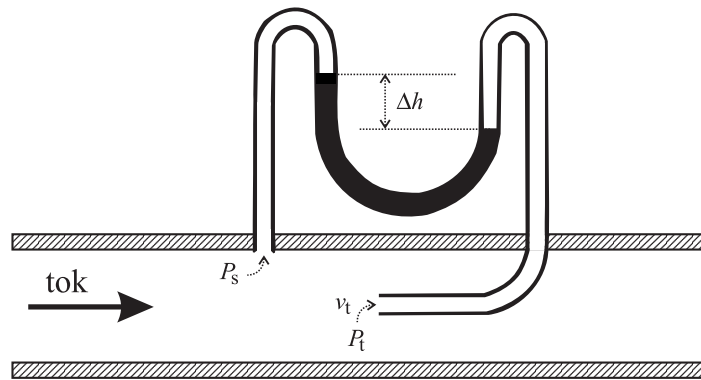
#### 2.4.2.5 Pitotova cev

Pretok zraka lahko merimo posredno tudi s pomočjo Pitotove cevi, ki jo je leta 1732 izumil in izoblikoval francoski inženir Henri Pitot.

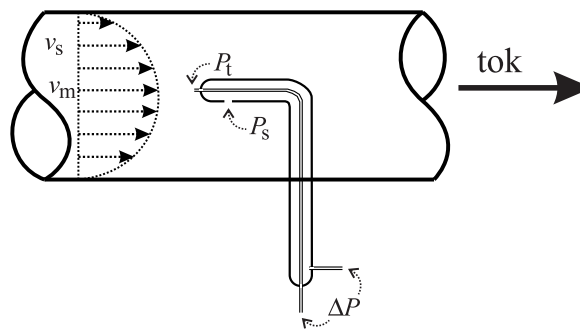
Pitotova cev deluje na osnovi pretvorbe kinetične energije v potencialno, do katere pride na ustju Pitotove cevi (slika 2.11). Medij se na ustju zaustavi (njegova hitrost  $\nu_t$  je enaka nič), tlak pa tam posledično naraste. Ta tlak imenujemo totalni tlak  $P_t$  in ga merimo glede na statični tlak medija  $P_s$ ; slednji je tlak v mediju pri katerem se medij pretaka skozi cev. Tako lahko dobimo tlačno razliko  $\Delta P = P_t - P_s$ , ki se imenuje tudi zastojni tlak. Če upoštevamo, da je  $\nu_t = 0$ , lahko iz Bernoullijeve enačbe (2.44) dobimo naslednjo enačbo za izračun hitrosti medija:

$$\nu_s = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}. \quad (2.59)$$

Zavedati se moramo, da s pomočjo Pitotove cevi izmerimo lokalno hitrost medija  $\nu_s$  v cevi na mestu, kjer se nahaja ustje Pitotove cevi. Lokalna hitrost medija se v cevi



Slika 2.11: Shematski prikaz Pitotove cevi.



Slika 2.12: Hitrostni profil viskoznega medija pri pretoku skozi cev in prikaz merjenja lokalne hitrosti zraka s Pitotovo cevjo.

spreminja z razdaljo od osi cevi; največja je v osi ( $v_m$ ) in je enaka nič tik ob steni cevi (slika 2.12).

V primeru laminarnega toka velja, da lahko s pomočjo maksimalne hitrosti  $v_m$  izračunamo efektivno hitrost  $v_{ef}$

$$v_{ef} = \frac{v_m}{2} \quad (2.60)$$

in naprej volumski pretok medija, ki je enak produktu preseka cevi  $S_1$  in efektivne hitrosti  $v_{ef}$ :

$$\dot{V} = v_{ef} S_1. \quad (2.61)$$

### 2.4.3 Oprema in pripomočki

- ventilator in variak
- medeninasta cev z vgrajeno Venturijevo cevjo, šobo in zaslonko
- manometri

- Pitotova cev
- univerzalni merilnik ALMEMO 2290-3

#### 2.4.4 Potek dela

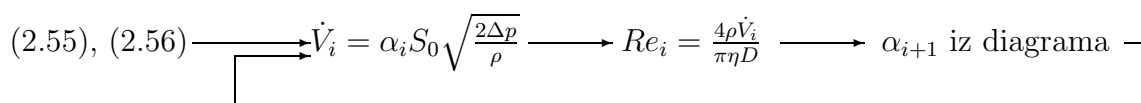
1. Na voljo imamo več različnih zaslonk. Najprej v cev vstavimo eno od njih. Venturijevo cev in šobo pustimo pri miru.
2. Z manometri izmerimo ustrezne tlake pri sedmih hitrostih zraka in meritve zberemo v tabeli. Opravimo tudi meritve pri zmanjševanju pretoka.
3. Za vse meritve izračunamo pretoke skozi zaslonko in šobo. To naredimo tako, da uporabimo enačbo (2.22):

$$\dot{V} = \alpha S_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}. \quad (2.22)$$

V njej nastopajo presek odprtine v oviri  $S_0 = \pi d^2/4$ , razlika tlakov  $\Delta p$ , ki smo jo izmerili, gostota zraka, ki jo izračunamo po plinski enačbi:

$$\rho = \frac{pM}{RT},$$

in pretočni koeficient  $\alpha$ , ki pa malo ponagaja. Odvisen je namreč od Reynoldsovega števila in ga moramo odčitati iz diagrama na sliki B.5 oziroma B.6. Da ga odčitamo, rabimo Reynoldsovo število  $Re$ . Da izračunamo  $Re$ , pa rabimo volumski pretok  $\dot{V}$ . Da izračunamo  $\dot{V}$ , rabimo pretočni koeficient  $\alpha$  in začarani krog je sklenjen. Težave se lotimo tako, da kot prvi približek za  $\alpha$  vzamemo kar vrednost dobljeno iz enačbe (2.55) oziroma (2.56). S tem izračunamo prvi približek za  $\dot{V}$  in z njim prvi približek za  $Re$  (Viskoznost zraka, ki nastopa v izrazu za  $Re$ , preberemo iz diagrama na sliki D.1 v dodatku D. Pri tem pazimo na red velikosti odčitane viskoznosti, ki je  $10^{-6} \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$ !). Sedaj iz diagrama na sliki B.5 oziroma B.6 preberemo drugi približek za  $\alpha$ , izračunamo drugi približek za  $\dot{V}$  itd. Na sliki 2.13 je to shematično prikazano. Približki so po vsaki ponovitvi boljši in ko se praktično ne spreminjajo več, smo z njimi zadovoljni. Za nas sta dovolj dve ponovitvi in tako tretji približek za pretok že vzamemo kot rezultat. Takemu računanju pravimo rekurzivno računanje.



Slika 2.13: Shema rekurzivnega računanja.

4. Predpostavimo, da smo s Pitotovo cevjo izmerili kar efektivno hitrost zraka skozi cev  $\nu_{ef}$ . S pomočjo enačbe (2.61) izračunajte pretoke zraka skozi cev. Pogoj za poenostavljeno in pravilno meritev je, da Pitotova cev s svojim presekom



ne zmanjša pomembno preseka cevi, v kateri merimo pretok, sicer moramo upoštevati popravek.

5. Za Venturijevo cev narišemo umeritveni diagram pretoka  $\dot{V}$  v odvisnosti od razlike tlakov  $\Delta p$ . Za vrednost pretoka  $\dot{V}$  vzamemo kar povprečne vrednosti pretoka, dobljenega z zaslonko, s šobo in s Pitotovo cevjo:

$$\dot{V}_i = \frac{\dot{V}_{i,zaslonka} + \dot{V}_{i,šoba} + \dot{V}_{i,Pitotovacev}}{3}. \quad (2.62)$$

6. Iz Colebrookovega (Moodyjevega) diagrama na sliki B.7 odčitamo koeficient upora cevi  $\lambda$ . Za vlečene cevi iz stekla, bakra in medenine za hrapavost vzamamo  $\varepsilon = 1,5 \cdot 10^{-4}$  m.

### 2.4.5 Vprašanja

1. Kaj je kriterij za turbulenten oziroma laminaren tok?
2. Zakaj se v Venturijevi cevi ohranja laminaren tok, na šobi in zaslonki pa ne?
3. Kako je pretočni koeficient za zaslonko in šobo odvisen od dimenzij odprtine?
4. Kako sta definirana koeficient ustja  $k$  in koeficient izgube ustja  $C_e$ ?

## 2.5 Prevajanje toplote

### 2.5.1 Naloga

Določite koeficient toplotne prevodnosti  $\lambda$  nekaterim snovem.

### 2.5.2 Osnove

Vsaka snov ima notranjo energijo. Če so v snovi temperaturne razlike, se notranja energija pretaka iz snovi z višjo proti snovi z nižjo temperaturo. To pretočeno notranjo energijo imenujemo toplota. Prenaša se na tri načine: s *prevajanjem*, s *konvekcijo* (prenašanjem snovi, npr. z vodo v centralni kurjavi) in s *sevanjem* (radiacijo). V realnih procesih imamo običajno opravka s kombinacijo večih načinov, čeprav pogosto prevladuje en sam.

Če eno stran telesa segrevamo, se kmalu segreje tudi druga stran. Toplota preide na drugo stran telesa in jo segreje. Pravimo, da telo toploto prevaja. Nekateri snovi prevajajo toploto hitreje, druge počasneje. Če npr. na razbeljeno ploščo položimo kocko, se zgornja stran kocke segreje pozneje, če je kocka opečna, kot če je železna.

Pri prevajanju toplote je pomembna količina *toplotni tok*  $\dot{Q}$ , ki pove množino toplote  $Q$ , ki v enoti časa preteče med dvema telesoma v toplotnem stiku:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} \rightarrow \frac{Q}{t}. \quad (2.63)$$

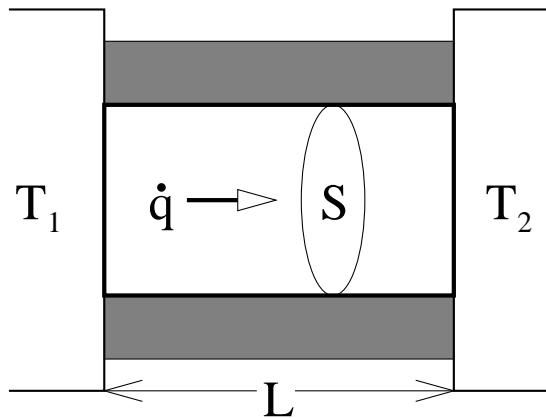
$dQ$  je množina toplote, ki v času  $dt$  steče skozi prečni presek ( $S$ ) snovi. Toplotni tok merimo v wattih (ali J/s, pogosto pa še vedno v kcal/h). Toplotni tok ima pri prevajanju toplote podobno vlogo kot volumski ali masni tok pri pretakanju tekočine ali kot električni tok pri prevajanju elektrine, le da gre v tem primeru za pretok toplote.

Temperatura v snovi, ki je v termičnem (toplotnem) ravnovesju, je na vsakem mestu enaka in se s časom ne spreminja-toplotni tok je nič. Če imajo različni deli snovi različno temperaturo, toplotni tok teče s toplejših na hladnejša mesta. Slednja se zato segrevajo, prva pa se ohlajajo. Toplotni tok poskuša izenačiti temperaturo različnih delov snovi. Zato se temperatura na posameznih mestih v snovi spreminja s časom, kot je prikazano na sliki 2.15 (krivulji (i), (ii)).

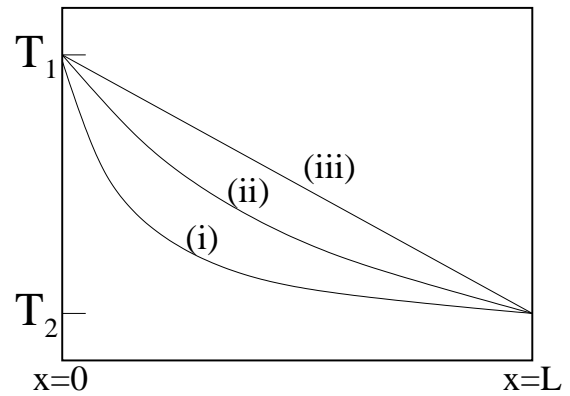
Če vzdržujemo stalno temperaturno razliko, je temperatura na različnih mestih različna, a se s časom ne spreminja. Pravimo, da v snovi vzdržujemo stacionarno porazdelitev temperature. Toplotni tok stalno teče s toplejšega na hladnejši del snovi in je v vsaki točki enak. Konstantnost toplotnega toka pri stacionarni porazdelitvi temperature je ekvivalentna stalnosti masnega toka pri stacionarnem pretakanju tekočine.

Volumski pretok pretakanja viskozne tekočine skozi cev je premo sorazmeren tlačni razliki  $\Delta p$ , ki tok poganja, ter obratno sorazmeren pretočnemu uporju  $R_p$ . Podobno je tudi toplotni tok  $\dot{Q}$ , ki teče s toplejšega na hladnejše mesto, premo sorazmeren temperaturni razliki obeh mest ( $\Delta T = T_2 - T_1$ ) in obratno sorazmeren toplotnemu uporju  $R_t$  (slika 2.14):

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_t}. \quad (2.64)$$



Slika 2.14: Homogen toplotni prevodnik. Osnovni ploskvi prizme ohranjamo pri različnih temperaturah. Toplota teče od višje temperature k nižji. Plašč mora biti dobro izoliran, da toplota ne teče tudi skozenj.



Slika 2.15: Spreminjanje temperature vzdolž palice. Na grafu so temperaturni profili ob različnih časih, in sicer (i) kmalu po začetku prevajanja toplote, (ii) kasneje in (iii) po dolgem času (stacionarno stanje).

Toplotni upor  $R_t$  homogene palice s prečnim prerezom  $S$  je premo sorazmeren dolžini vodnika toplote  $L$ . Pri stacionarni porazdelitvi temperature le ta linearno pada od  $T_1$  na toplejši strani prevodnika do  $T_2$  na hladni strani; gradient temperature je stalen (slika 2.15 (iii)). Meritve kažejo, da je toplotni upor obratno sorazmeren prečnemu prerezu palice  $S$ , torej velja:

$$R_t = \frac{1}{\lambda} \frac{L}{S}. \quad (2.65)$$

Uvedli smo parameter  $\lambda$ , ki mu pravimo toplotna prevodnost. Odvisna je le od snovi (analogija z električno prevodnostjo). Enačbo toplotnega toka zapišemo v obliki

$$\dot{Q} = \lambda S \frac{\Delta T}{L}. \quad (2.66)$$

Toplotni tok pogosto izrazimo tudi z gostoto toplotnega toka  $\dot{q}$ , ki pove, kako velik toplotni tok teče skozi enoto prečnega preseka prevodnika toplote:

$$\dot{q} = \frac{d\dot{Q}}{dS} = \frac{Q}{St}, \quad (2.67)$$

$$\dot{q} = -\lambda \frac{\Delta T}{L}. \quad (2.68)$$

Zadnji enačbi pravimo zakon o prevajanju toplote, ki pravi:

**Gostota toplotnega toka je premo sorazmerna gradientu temperature, to je padcu temperature na enoto dolžine v smeri pretakanja toplote.**

Enota gostote toplotnega toka je  $\text{W}/\text{m}^2$ .

Zakon prevajanja toplote je že leta 1822 zapisal Fourier in je po njem dobil ime Fourierov zakon. Pogosto ga zapišemo tudi v diferencialni obliki:

$$\dot{q} = -\lambda \frac{dT}{dx}. \quad (2.69)$$

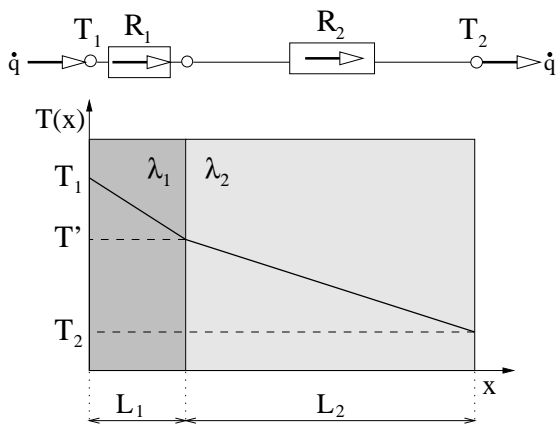
Enačba (2.69) je zveza med temperaturno porazdelitvijo in gostoto toplotnega toka  $\dot{q}$  za primer, ko se temperatura spreminja samo v eni smeri. V splošnem pa se temperatura v prevodnem mediju lahko spreminja v vseh smereh in za vsako smer lahko zapišemo analogno enačbo. Gostota toplotnega toka je vektor, ki ima smer največje spremembe temperature v snovi. Zato ga napišemo tudi v obliki  $\dot{q} = -\lambda \nabla T$ . Torej je proporcionalna gradientu temperature, toda nasprotno usmerjena: če temperatura v določeni smeri narašča, bo toplota tekla v drugo smer.

Toplotni tok je pri določeni obliki toplotnega prevodnika in pri določeni temperaturni razliki odvisen od toplotne prevodnosti snovi  $\lambda$ . Snov tem bolje prevaja toploto, čim večja je njena toplotna prevodnost, ki jo izražamo v W/(mK). Skoraj vse kovine so dobri prevodniki toplote in imajo razmeroma veliko toplotno prevodnost (100 – 400 W/(mK)), medtem ko tekočine slabše prevajajo toploto (1 W/(mK)). Toplotna prevodnost plinov je še slabša. Snovi z majhnim  $\lambda$  so toplotni izolatorji. Med najslabše prevodnike toplote spada mirujoči zrak. Nekatere vrednosti toplotne prevodnosti so podane v tabeli 2.5. Zlasti za pline je toplotna prevodnost odvisna tako od tlaka kot od temperature.

SNOV	$\lambda/\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	SNOV	$\lambda/\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
<b>kovine</b>		<b>druge snovi</b>	
srebro	420	bakelit	0,29
baker	390	beton	1,0 - 0,3
zlato	310	granit	3
aluminij	210	led	2,2
medenina	90	les	0,05 - 0,4
železo	70	opeka	0,6
jeklo	50	železobeton	1,55
svinec	35	penobeton	0,1
živo srebro	29	papir	0,15
<b>toplotni izolatorji</b>		usnje	0,15
steklena volna	0,04 - 0,08	polivinil	0,13
volnena klobočevina	0,05 - 0,06	voda	0,6
stiropor	0,04 - 0,06	zrak	0,025

Tabela 2.5: Toplotna prevodnost nekaterih snovi.

Toplotni prevodnik je lahko sestavljen iz večih plasti (slika 2.16) različnih debelin, npr.  $L_1$  in  $L_2$ , z različnimi toplotnimi prevodnostmi,  $\lambda_1$  in  $\lambda_2$ . Kolikšen toplotni tok teče skozi prečni prerez zidu, če sta znani temperaturi  $T_1$  in  $T_2$  na obeh straneh, izračunamo tako, da napišemo zakon toplotnega prevajanja za vsak prevodnik posebej in upoštevamo, da je toplotni tok skozi vse plasti isti (stacionarno stanje),  $T'$  pa je



Slika 2.16: Sestavljen toplotni prevodnik; a) toplotni tok in shema toplotnih uporov, b) temperaturni profil. V plasti z manjšo prevodnostjo je  $T$ -profil bolj strm (temperaturni gradient je večji), a v plasti z večjim uporom je padec temperature večji.

temperatura na meji obeh prevodnikov. Za primer na sliki 2.16 tako zapišemo:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dot{Q}, \quad (2.70)$$

$$\lambda_1 S \frac{T_1 - T'}{L_1} = \lambda_2 S \frac{T' - T_2}{L_2}. \quad (2.71)$$

Temperaturo  $T'$  izrazimo iz zgornje enačbe kot:

$$T' = \frac{\lambda_1 L_2 T_1 + \lambda_2 L_1 T_2}{\lambda_1 L_2 + \lambda_2 L_1} \quad (2.72)$$

ter toplotni tok kot:

$$\dot{Q} = S \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 L_2 + \lambda_2 L_1} (T_1 - T_2). \quad (2.73)$$

Preprosteje je, če po analogiji z električnim tokom sestavljeni zid obravnavamo kot zaporedno vezana toplotna upornika. Celotni toplotni upor zidu  $R_t$  bo torej vsota posameznih uporov:

$$R_t = R_{t1} + R_{t2} = \frac{L_1}{S\lambda_1} + \frac{L_2}{S\lambda_2}. \quad (2.74)$$

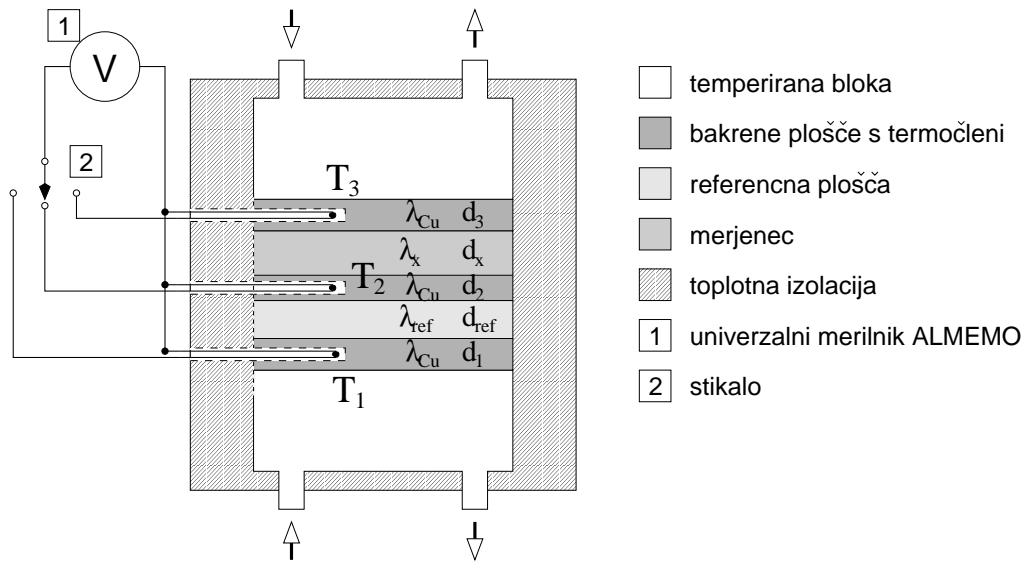
$R_t$  je torej upor celega zidu. Vstavimo ga v enačbo toplotnega toka (2.64) in dobimo prejšnji rezultat. Seveda za  $\Delta T$  vstavimo razliko temperatur na eni in drugi stani celega zidu:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_t} = \frac{T_1 - T_2}{R_{t1} + R_{t2}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L_1}{S\lambda_1} + \frac{L_2}{S\lambda_2}} = S \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 L_2 + \lambda_2 L_1} (T_1 - T_2). \quad (2.75)$$

Če je plasti več, je problem podoben, saj spet le seštejemo njihove upore.

### 2.5.3 Oprema in pripomočki

- dva termostata
- merilni blok s sestavljenim toplotnim prevodnikom (slika 2.17)
- termočleni
- univerzalni merilnik ALMEMO 2290 -3



Slika 2.17: Shema aparature za določanje koeficienta toplotne prevodnosti snovi.

## 2.5.4 Potek dela

Aparaturo sestavljata dva masivna bloka. S pomočjo termostatov med njima vzdržujemo stalno temperaturno razliko. Spodnji ima temperaturo okoli  $60^\circ\text{C}$ , zgornji pa okoli  $25^\circ\text{C}$ . Zaradi konstantne temperaturne razlike je konstanten tudi toplotni tok skozi toplotni prevodnik, ki ga sestavimo iz (glej sliko 2.17):

- treh bakrenih merilnih plošč s toplotno prevodnostjo  $\lambda_{ref}$  in debelinami  $d_1$ ,  $d_2$  in  $d_3$ . V njih s termočleni merimo temperature  $T_1$ ,  $T_2$  in  $T_3$ ,
- referenčne plošče (steklo ali baker) z debelino  $d_{ref}$  in toplotno prevodnostjo  $\lambda_{ref}$ ,
- plošče iz preiskovane snovi z debelino  $d_x$  in toplotno prevodnostjo  $\lambda_x$ .

Ploščam izmerimo debelino ( $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ ,  $d_{ref}$  in  $d_x$ ) in jih vstavimo kot kaže slika. Potem počakamo približno deset minut, da se temperature  $T_1$ ,  $T_2$  in  $T_3$  ustalijo ter jih odčitamo. Ker poznamo tudi toplotno prevodnost referenčne in merilnih plošč ( $\lambda_{Cu} = 397 \text{ W}/(\text{mK})$  in  $\lambda_{steklo} = 1 \text{ W}/(\text{mK})$ ), lahko iz vseh teh podatkov izračunamo toplotno prevodnost merjenca.

Toplotni tok zaradi izolacije teče le pravokotno na plošče in je njegova gostota povsod enaka. Zapišimo, da je gostota toplotnega toka med termometroma 1 in 2 enaka tisti med termometroma 2 in 3:

$$\dot{q}_{ref} = \dot{q}_x, \quad (2.76)$$

$$\frac{T_1 - T_2}{S \cdot R_{ref}} = \frac{T_2 - T_3}{S \cdot R_x}. \quad (2.77)$$

Med termometroma 1 in 2 imamo  $(d_1 + d_2)/2$  bakra in  $d_{ref}$  referenčne snovi (baker ali steklo). Zato zapišemo:

$$S \cdot R_{ref} = \frac{d_1 + d_2}{2\lambda_{Cu}} + \frac{d_{ref}}{\lambda_{ref}} \quad (2.78)$$

in podobno na strani merjenca

$$S \cdot R_x = \frac{d_2 + d_3}{2\lambda_{Cu}} + \frac{d_x}{\lambda_x}. \quad (2.79)$$

Iz tega dobimo končno enačbo

$$\lambda_x = \frac{d_x}{\left(\frac{d_1 + d_2}{2\lambda_{Cu}} + \frac{d_{ref}}{\lambda_{ref}}\right) \cdot \frac{T_2 - T_3}{T_1 - T_2} - \frac{d_2 + d_3}{2\lambda_{Cu}}}. \quad (2.80)$$

Na ta način določimo koeficient toplotne prevodnosti dvema kovinama in dvema izolatorjema ter jih primerjamo z vrednostmi, podanimi v literaturi. Serijo meritev izvedemo trikrat. Za vsak merjenec tako dobimo za koeficient toplotne prevodnosti tri vrednosti. Rezultat podamo kot srednjo (povprečno) vrednost meritev in z razponom:  $\lambda = \bar{\lambda} \pm \Delta\lambda$ ;  $\Delta\lambda = \frac{1}{2}(\lambda_{min} - \lambda_{max})$ .

Napake pri merjenju so najmanjše, če sta toplotni prevodnosti merjenca in reference približno enaki. Zato pri izolatorjih vzamemo kot referenco steklo, pri kovinah pa baker.

### 2.5.5 Vprašanja

1. Kaj je termostat?
2. Kje v meritvi pride do največjih napak?
3. Zakaj bakrena ploščica ne more biti referenčna tudi za izolatorje?

## 2.6 Toplotne razmere

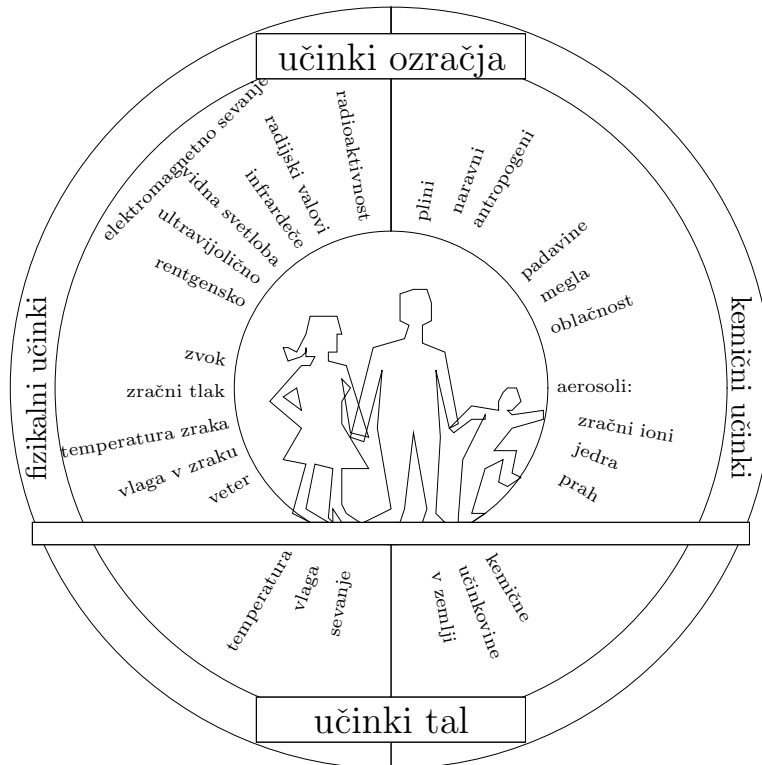
### 2.6.1 Naloge

1. Izmerite časovni potek temperature dveh globus termometrov.
2. Izmerite temperaturo, hitrost gibanja zraka in relativno vlažnost.
3. Določite efektivno in korigirano efektivno temperaturo v prostoru.
4. Določite vrednost *PMV*.
5. Določite vrednost *WBGT*.

### 2.6.2 Osnove

Zaznavanje okolja je odvisno od številnih istočasnih dražljajev iz okolja in drugih vplivov (fizikalni, psihološki, zdravstveno stanje, delo, ritem idr.). Človek se neprestano prilagaja na dražljaje okolja. Če dražljaji presegajo fiziološke zmožnosti prilagajanja, lahko nastanejo poškodbe ali okvare.

Ker je zaznavanje okolja rezultat istočasno delujočih najrazličnejših dražljajev, smemo proučevati reagiranje organizma na posamezni vpliv (npr. na toplotne razmere) ločeno od ostalih le s pridržkom. Nekatere vplive okolja na organizem shematično ponazarja slika 2.18.



Slika 2.18: Shema vplivov okolja na človeka.



Ena od stalnic človeškega organizma je fiziološka zahteva vzdrževati stalno telesno temperaturo okrog 37 °C. Za to skrbi termoregulacijski sistem, ki aktivno vzdržuje **ravnovesje med toploto, ki v telesu nastaja, in toploto, ki jo telo oddaja okolici**. Termoregulacijski mehanizem lahko v različnih toplotnih razmerah ravnovesje vzdržuje brez napora, z naporom ali pa ga ne more vzdrževati. Zato ločimo toplotne razmere na:

- **udobne,**
- **neudobne,**
- **nevarne ali škodljive** (podhladitev, pregretje).

Oglejmo si, kako toplota v telesu nastaja, kako jo telo izmenjuje z okolico in kako to opišemo.

### 2.6.2.1 Metabolizem

Z metabolizmom se v telesu sprošča energija. Stopnja metabolizma ali presnove je definirana kot sproščena energija na enoto časa in na enoto površine človeka, torej kot moč na enoto površine človeka. Metabolizem označimo z  $M$ , izražamo pa ga s fizikalno enoto  $W/m^2$  ali v fiziološki enoti met ( $1 \text{ met} = 58,15 \text{ W/m}^2$ ). Pogosto predpostavimo, da je površina človeka  $1,8 \text{ m}^2$ .

Metabolizem merimo s porabo kisika v vdihnjemem in s koncentracijo  $CO_2$  v izdihanem zraku ali posredno z drugimi metodami (frekvenca srčnega utripa, rektalna, kožna temperatura ipd.). Majhen del energije (do ca. 20 %), sproščene pri presnovi, se porabi za delo mišic. Ostalo, torej  $M(1 - \eta)$  ( $\eta$  je mehanski izkoristek), je toplota. V tabeli G.2, G.3 in G.4 so vrednosti metabolizma za različna opravila.

### 2.6.2.2 Izmenjava toplote med telesom in okolico

Telo izmenjuje toploto z okolico prek različnih fizikalnih mehanizmov. Izmenjava toplote je odvisna od:

- toplotnih razmer v okolju in
- izolativnosti obleke.

Naloga strokovnjaka za toplotno tehniko je **prilagoditi toplotne razmere v okolju** tako, da je za dano delo toplotno občutenje okolja udobno. Pogosto je v prostoru več ljudi, ki **opravljajo različno naporna dela** (fizična, psihična itd.), zato se njihov metabolizem razlikuje. V tem primeru poskrbimo za takšne razmere v okolju, pri katerih se dobro počutijo tisti z bolj napornim delom. Občutek hladu za tiste z lažjim delom in individualne razlike pri posamezniku izravnavamo z **izbiro izolativnosti obleke**.

Oglejmo si mehanizme izmenjave toplote, še prej pa dejavnike, od katerih je izmenjava toplote odvisna.

**Toplotne razmere v okolju** določajo v prvem približku naslednje fizikalne veličine:

- temperaturo zraka  $T_z$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), merimo jo s termometrom,
- temperaturo sevanja  $T_r$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), merimo jo z globus termometrom ali z električnimi merilniki toplotnega (infrardečega) sevanja,
- hitrostjo gibanja zraka  $v$  (m/s), merimo jo z anemometri in
- delnim tlakom vodne pare  $p$  (Pa) v zraku oziroma relativno vlažnostjo  $\eta$  (%), ki jo merimo s higrometri.

Občutenje okolja je odvisno tudi od drugih vplivov, kot so barve prostora, spreminjanje temperature z višino v prostoru, razlike med temperaturo v prostoru in zunaj (poleti), temperature zraka, s katerim človeka opihavamo, in od drugih subjektivnih vzrokov. Premislite o tem!

**Izolativnost obleke**  $I_{cl}$  merimo v  $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$  ali v enotah clo (clothing),  $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ . Pomemben je tudi faktor  $f_{cl}$ , ki pove, kolikokrat večja je zunanja površina obleke od površine golega telesa. V tabeli G.1 so podane vrednosti  $I_{cl}$  in  $f_{cl}$  za različne vrste oblačil.

**Du Boisova površina** je površina telesa  $A_{Du}$ . Večja kot je površina, večja je izmenjava toplote. Če nimamo boljšega podatka, vzamemo za človeka povprečne rasti  $A_{Du} = 1,8 \text{ m}^2$ .

**Načini izmenjeve toplote** med telesom in okolico so:

1. **Prevajanje (kondukcija)** je pretok toplote skozi snov, ne da bi se snov pri tem pretakala. Toplota se prenaša pri prevajanju med telesom in okolico preko snovi, s katerimi je telo neposredno v stiku. Toplotni tok, ki s prevajanjem teče iz telesa v dotično snov ali obratno, je odvisen od temperature snovi (npr. razlika je, če ima ročaj, ki ga držimo, temperaturo  $-10^{\circ}\text{C}$  ali pa  $20^{\circ}\text{C}$ ), velikosti stične površine, toplotne prevodnosti snovi (npr. različen toplotni tok teče, če sedimo na kamniti ali leseni klopi, čeprav imata obe enako temperaturo) in izolativnosti obleke (obutve, rokavic), če je ta med predmetom in kožo. Toplotni tok je odvisen tudi od izolativnosti kože in podkožnega tkiva. Ta se lahko spreminja tudi s krčenjem ali širjenjem kapilar.
2. **Prestopnost (konvekcija)** je prenos toplote med površino telesa (oz. obleke) in gibajočim se okoliškim zrakom. Toplotni tok, ki se prenaša s konvekcijo s telesa na okoliški zrak, je odvisen od temperature okoliškega zraka, izolativnosti obleke in njene površine.

Toplotni tok zaradi prestopnosti je odvisen tudi od hitrosti gibanja zraka okrog telesa. Govorimo o naravni konvekciji, ko se ogret zrak ob telesu dviga samo zaradi lastnega vzgona, in o vsiljeni konvekciji, ko je človek izpostavljen tudi vetru ali z lastnim gibanjem ustvari gibanje zraka.

3. **Difuzija in izparevanje vodne pare.** Izguba toplote telesa zaradi izparevanja je odvisna od količine vode, ki izpari. Hitrost izparevanja vode je odvisna od difuzije vodne pare skozi kožo, prepustnosti obleke za paro (npr. polivinilasta pelerina pare ne prepušča), od vlažnosti okoliškega zraka in vlažnosti zraka neposredno ob koži. Čim večja je razlika v relativni vlažnosti zraka ob koži in v okolici, hitreje voda (pot) hlapi. Ker potrebuje voda za izparevanje veliko toplote (izparilna toplota vode je 2500 kJ/kg), je odvajanje toplote z izparevanjem lahko eden najmočnejših mehanizmov za ohlajanje organizma, ali celo edini, če je temperatura zraka večja od temperature telesa. Izparevanje telesa lahko merimo npr. s tehtanjem človeka v časovnih presledkih. Pot, ki odteče, ali ga obrišemo, ne odvaja toplote z izparevanjem, če ne hlapi. Vedeti je treba tudi, da voda ne izpareva le iz kože, temveč tudi v dihalnih organih.
4. **Sevanje (radiacija).** Toplotni tok zaradi sevanja telesa  $q_r$  je po Stefanovem zakonu sorazmeren Stefanovi konstanti  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ , velikosti površine, ki seva (v našem primeru  $A_{Du}$ ), temperaturi površine  $T$  (v K) na četrto potenco in koeficientu emisivnosti  $\epsilon$ . Sevalni tok je torej:

$$q_r = \epsilon \sigma A_{Du} T^4. \quad (2.81)$$

Koeficient emisivnosti  $\epsilon$  je odvisen od vrste sevalne površine. Pri sevanju teles, ki imajo nizko temperaturo (do ca. 100 °C), je največ sevane energije v infrardečem (IR) področju. Za IR sevanje je večina površin (razen kovin) skoraj črnih, torej je  $\epsilon \approx 1$ . Zato vzamemo za sevalni koeficient kože in drugih snovi, razen kovin,  $\epsilon = 0,95$ .

Telo seva v okolico in istočasno sprejema sevano toploto iz nje. Zato je ohlajanje ali ogrevanje zaradi sevanja razlika med toploto, ki jo v okolico sevamo in toploto, ki jo s sevanjem prejemamo iz okolice:

$$q_r = q_{telo} - q_{okolica}. \quad (2.82)$$

Če je razlika temperatur med telesom  $T$  in okolico  $T'$  majhna, lahko razliko med sevanim tokom, ki ga oddaja telo, in sevanim tokom, ki ga telo prejme iz okolice, napišemo približno:

$$q_r = q_{telo} - q_{okolica} = 3\epsilon\sigma A_{Du} T_{telo}^3 (T_{telo} - T_{okolica}). \quad (2.83)$$

Temperature površin v okolju so različne (npr. okno, peč, stena, tla, strop). Celotno sevanje okolice je vsota sevanj vseh površin. To sevanje opišemo s *srednjo temperaturo sevanja*  $T_r$  in je po definiciji tista temperatura, ki bi jo imele površine v okolju, če bi imele vse enako temperaturo in bi sevale enak energijski tok, kot ga okolica seva v resnici.

5. **Izmenjava mas.** Toploto izmenjujemo z okolico tudi s hrano, pijačo, izločki, dihanim zrakom.

V področju udobja in hladnih razmer sta najpomembnejša prestopnost in sevanje, vključno z upoštevanjem izolativnosti obleke. V vročih razmerah je najpomembnejši in najučinkovitejši (v izjemnih razmerah edini) mehanizem za odvajanje odvečne toplote s telesa izparevanje.

### 2.6.2.3 Merila za oceno toplotnih razmer

Merila za oceno toplotnih razmer so različna. Sodobna merila združujejo več ali manj podatkov v skupno merilo (skupne, integralne kazalce). Merila se razlikujejo po namenu uporabe, zahtevnosti znanja in opreme za njihovo določitev ter glede na toplotne razmere. Po namenu uporabe jih delimo na merila za:

- toplotno udobje,
- velike obremenitve,
- delo na mrzlem.

Ločimo jih tudi na:

- fizikalna merila, ki temeljijo na podatkih o okolju, delu in obliki in
- fiziološka merila, ki temeljijo na reakciji organizma na razmere.

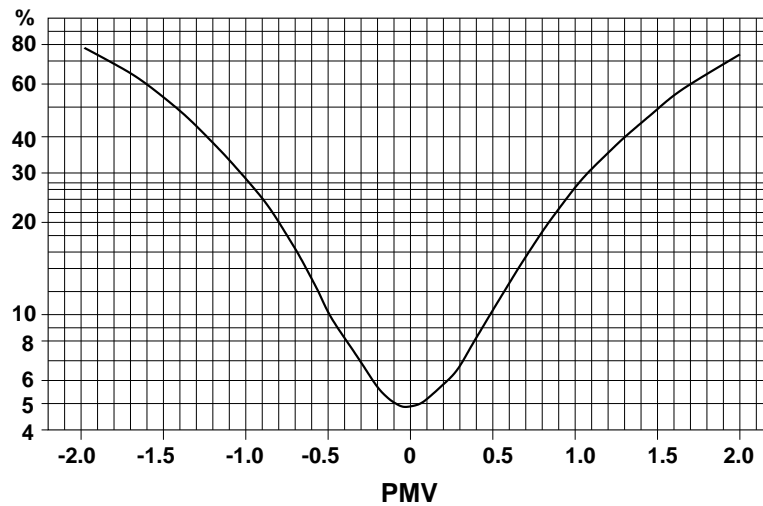
Nekatera od skupnih meril so:

1. **Efektivna (korigirana efektivna) temperatura**  $T_{ef}(T_{ef,kor})$  je eno od prvih skupnih meril toplotnih razmer, je temelj za primerjavo z drugimi merili vendar, ga danes ne uporabljamo več. Izraža se v °C. Za določitev efektivne temperature potrebujemo podatke o temperaturi zraka  $T_z$ , temperaturi globus termometra  $T_g$ , relativni vlažnosti zraka (temperaturi vlažnega termometra  $T_v$ , kako jo izmerimo, bomo spoznali pri vaji) in o hitrosti gibanja zraka  $v$ . V tabeli 2.6 so vrednosti efektivne temperature  $T_{ef}$  za udobje in največje dopustne vrednosti pri različno napornih opravilih. Efektivno temperaturo lahko odčitamo z nomograma na sliki B.1.

aktivnost	M/met	$T_{ef}/^{\circ}\text{C}$	
		za udobje	največja dopustna meja
mentalno delo	< 1,5	20-22	31-32
fizično lahko delo	1,5-3	20-21	31-32
fizično srednje težko delo	3-6	17	29
fizično težko delo	> 6	15	27

Tabela 2.6: Vrednosti efektivne temperature  $T_{ef}$  za udobje in največje dopustne vrednosti za različno naporna opravila.

2. **Merilo udobja**  $PMV$  (Predicted Mean Vote), pove, koliko % ljudi bo verjetno občutilo okolje ugodno, hladno ali vroče.  $PMV$  se izraža v številčni vrednosti  $-3 < PMV < +3$ . Pri negativni vrednosti občutimo okolje prehladno, pri  $PMV = 0$  je nevtralnno (udobno), pri pozitivni vrednosti pa je pretoplo. Pričakovano število nezadovoljnih v odvisnosti od vrednosti  $PMV$  ponazarja slika 2.19. Udobje štejemo kot zadovoljivo, če je  $PMV$  med  $-0,5$  in  $+0,5$  ter odvisno od zahtevane kakovosti okolja (objekta).



Slika 2.19: Pričakovano relativno število nezadovoljnih v % v odvisnosti od vrednosti  $PMV$ .

$PMV$  lahko izračunamo, če poznamo naslednje podatke:

- za okolje: temperaturo zraka, temperaturo sevanja, relativno vlažnost ali delni tlak vodne pare in hitrost gibanja zraka,
- napor, podan v  $W/m^2$  ali met in
- izolativnost obleke, podane v  $m^2K/W$  ali v clo!

S temi podatki, če so izraženimi v met ali clo, izračunamo vrednost  $PMV$  po formuli (SIST EN ISO 7730):

$$\begin{aligned}
 PMV = & (0,303e^{-2,100M} + 0,028) \left( 58,15(M - W) \right. \\
 & - 3,05 \cdot 10^{-3} (5733 - 406,7(M - W) - p_a) \\
 & - 24,42((M - W) - 1) \\
 & - 10^{-3}M(5876 - p_a) \\
 & - 0,0814M(34 - T_a) \\
 & - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} ((T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4) \\
 & \left. - f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \right), \tag{2.84}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_{cl} = & 35,7 - 1,628(M - W) \\
 & - 0,155 I_{cl} \left( 3,96 \cdot 10^{-8} I_{cl} ((T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4) \right. \\
 & \left. + f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \right), \tag{2.85}
 \end{aligned}$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38(T_{cl} - T_a)^{0,25} & \text{za } 2,38(T_{cl} - T_a)^{0,25} > 12,1\sqrt{v_a} \\ 12,1\sqrt{v_a} & \text{za } 2,38(T_{cl} - T_a)^{0,25} < 12,1\sqrt{v_a} \end{cases}, \quad (2.86)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 0,2I_{cl} & \text{za } I_{cl} < 0,5\text{clo} \\ 1,05 + 0,1I_{cl} & \text{za } I_{cl} > 0,5\text{clo} \end{cases}. \quad (2.87)$$

V zgornjih formulah rabimo naslednje veličine:

$M$	metabolizem, met
$W$	zunanje delo, met (večinoma nič)
$I_{cl}$	izolativnost obleke, clo
$f_{cl}$	razmerje med površino oblečenega in slečenega delavca
$T_{cl}$	temperatura površine obleke, °C
$T_a$	temperatura zraka, °C
$T_r$	srednja temperatura sevanja, °C
$v_a$	hitrost gibanja zraka, m/s
$p_a$	parcialni tlak vode, Pa
$h_c$	koeficient prestopnosti, W/m <sup>2</sup> K

V enačbi spreminjamo parametre za temperaturo ali izolativnost obleke toliko časa, da za zahtevani napor in druge pogoje (hitrost gibanja zraka, sevanje, vlažnost) dobimo vrednost  $PMV$  čim bližje 0.  $PMV$  lahko tudi odčitamo na diagramih za nekatere izbrane vrednosti napora, ustrezne izolativnosti obleke pri relativni vlažnosti 50 %, glej SIST EN ISO 7730.

### 3. Velike toplotne obremenitve

**Merilo  $WBGT$**  (Wet Bulbe Globe Temperature, SIST EN 27243) izražamo v °C. Izračunamo ga po enačbi:

$$WBGT = \begin{cases} 0,7T_{nv} + 0,3T_g & \text{v prostoru/zunaj brez sončnega obsevanja} \\ 0,7T_{nv} + 0,2T_g + 0,1T_z & \text{na prostem s sončnim obsevanjem.} \end{cases} \quad (2.88)$$

Temperature v gornjih enačbah so v °C.  $T_{nv}$  je naravna vlažna temperatura (kako jo merimo, bomo spoznali pri izvedbi vaje). Obstajajo še podrobnejše enačbe, ki upoštevajo tudi barvo obleke.

Opazite, da je merilo  $WBGT$  zelo preprosto? Zato velja le v omejenem območju razmer (velike obremenitve)! Največje dopustne vrednosti po merilu  $WBGT$  so zapisane v tabeli 2.7. Merilo  $WBGT$  dovoljuje tudi oceno, koliko odmora mora imeti delavec vsako uro dela. To razberemo iz diagrama na sliki B.4.

dejavnost	mejna vrednost WBGT/ °C	
	klimatizirani	neklimatizirani
mentalno delo	33	32
fizično lahko delo	30	29
fizično srednje težko delo	28	26
fizično težko delo	25 <sup>♡</sup> , 26 <sup>♠</sup>	22 <sup>♡</sup> , 23 <sup>♠</sup>
fizično zelo težko delo	23 <sup>♡</sup> , 25 <sup>♠</sup>	18 <sup>♡</sup> , 20 <sup>♠</sup>

Tabela 2.7: Največje dopustne vrednosti po merilu *WBGT*. Opomba: oznaka ♡ pomeni vrednost, ko ni zaznavnega gibanja zraka, in oznaka ♠ vrednost ob zaznavnem gibanju zraka. Podrobno glej SIST EN 27243.

Za rutinske meritve največkrat uporabljajo za oceno udobja *PMV* in za oceno velikih obremenitev *WBGT*. Meril za udobje in velike obremenitve je še več, vendar druga merila redkeje uporabljajo. Za delo na hladnem uporabljamo merilo *IREQ* in *WCI*, glej SIST ENV ISO 11079.

### 2.6.3 Oprema in pripomočki

1. globus termometer
2. rotacijski psihrometer na vlažni in suhi termometer
3. naravni - vlažni termometer
4. anemometer Testo 445 in trifunkcijska sonda
5. termometer od  $-10$  do  $+100$  °C
6. namizna svetilka 100 W
7. PC in programska oprema za računanje rel. vlažnosti,  $T_{ef}$  in *PMV*
8. meter
9. destilirana voda in kapalka
10. stojalo in prižeme

### 2.6.3.1 Globus termometer

Pogosto moramo pri analizi delovnega mesta poznati tudi srednjo temperaturo sevanja  $T_r$ . To pride v poštev predvsem pri industrijskih delih z večjimi viri toplote in delih na soncu.

Za merjenje temperature sevanja najpogosteje uporabljamo globus termometer. Standardni globus termometer je votla bakrena krogla, premera 15 cm, pobarvana s črno barvo brez sijaja. Krogla absorbira sevano toploto. V središču je živosrebrni termometer. Če je temperatura okoliških predmetov večja od temperature zraka, pokaže termometer večjo temperaturo od tiste, ki jo kaže običajni termometer v prostoru. Na temperaturo globus termometra vpliva tudi gibanje zraka v okolici, ki ga ohlaja. Pred odčitavanjem vrednosti na globus termometru je potrebno počakati okoli 20 minut, dokler se temperatura ne ustali.

Za izračun srednje temperature sevanja  $T_r$  je potrebno poleg poznavanja temperature standardnega globus termometra poznati tudi hitrost gibanja zraka v okolici in temperaturo okoliškega zraka:

$$T_r = [(T_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \cdot v_a^{0,6} (T_g - T_a)]^{1/4} - 273. \quad (2.89)$$

### 2.6.3.2 Psihrometer po Assmannu ali rotacijski psihrometer

Psihrometri so instrumenti za določanje relativne ali absolutne vlažnosti. Psihrometer po Assmannu ima dva enaka živosrebrna ali alkoholna termometra. Bučka enega od termometrov je obdana s krpico, ki je napojena z destilirano vodo. Termometer, ki ima vlažno krpico, imenujemo *vlažni termometer*, drugega pa *suhi*. Z vrtenjem naprave ali kako drugače zagotovimo dovolj veliko hitrost zraka ob bučkah obeh termometrov, tako da je temperatura vlažnega odvisna le od relativne vlažnosti in ne tudi od hitrosti zraka.

Na vajah bomo uporabili navadni rotacijski psihrometer. Rotacijski psihrometer ima termometra, vstavljeni v lesen okvir. Okvir s termometroma vrtimo okoli ročice nekaj minut. Ko se obe temperaturi ustalita, ju odčitamo in relativno vlažnost poiščemo s pomočjo nomograma na sliki B.2 ali preko psihrometske enačbe.

Pomanjkljivost rotacijskega psihrometra je, da ni zavarovan pred okoliškim toplotnim sevanjem.

### 2.6.3.3 Naravni vlažni termometer

Naravni vlažni termometer je termometer, ki ima bučko ovito s krpico, napojeno z destilirano vodo. Prosto ga postavimo ali obesimo na stojalo na mesto merjenja. Temperatura naravnega vlažnega termometra  $T_{nv}$  je odvisna od temperature zraka, relativne vlažnosti in hitrosti naravnega gibanja zraka na mestu merjenja.

### 2.6.3.4 Kombinirani anemometer (Testo 445)

Pri sodobnem načinu merjenja uporabljamo elektronske instrumente. Takšen je tudi elektronski kombinirani anemometer, namenjen za merjenje pretokov zraka, relativne vlažnosti in temperature zraka v prostoru.



Instrument je sestavljen iz glavnega pomnilno-prikazovalnega dela ter ima kombinirane tri sistemske sonde. Sonda vsebuje senzorje za vlažnost, temperaturo in senzor za merjenje hitrosti zraka.

Termični senzorji za merjenje hitrosti zraka se uporabljajo v spodnjem območju hitrosti pretokov, to je med 0 in 10 m/s, ter pri ugotavljanju vleka iz neznanih smeri.

Sam senzor (termistor) je v aluminijasti kroglici in je konstantno segret na 100 °C. Toploto preko aluminijaste kroglice oddaja v okolje. Zrak, ki kroži okoli kroglice, njeno površino ohlaja, s tem pa narašča upornost senzorja, kar posredno pokaže instrument v obliki hitrosti zračnega toka.

Termični senzor potrebuje po vklopu aparata 10 - 30 sekund, preden doseže končno temperaturo.

### 2.6.4 Potek dela

#### 1. Izmerite časovni potek temperature dveh globus termometrov!

Standardni in mali globus termometer vpnemo v stojalo! Postavimo ju na enako razdaljo ca. 40 cm od namizne svetilke. Za sevanje uporabimo svetilko, ki jo prižgemo, tako da sveti v globus termometra. Temperature obeh globus termometrov zapisujemo vsakih 5 min, čas merimo s stoparico. Meritve zaključimo takrat, ko temperatura na obeh globus termometrih ne narašča več. Rezultate meritev navedemo tabelarično za oba globus termometra. Primerjamo razliko v porastu temperatur med termometroma in ugotovimo čas, potreben za ustalitev temperatur. Ob globus termometrih izmerimo hitrost gibanja zraka in temperaturo zraka.

1. Za oba globus termometra narišemo diagram  $T_g$  v odvisnosti od časa  $t$ .
2. Izračunamo srednjo temperaturo sevanja  $T_r$  in ocenimo napako.
3. Odgovorite na naslednja vprašanja:
  - Kaj vpliva na porast temperature v globus termometru?
  - Kako razložimo različne hitrosti v naraščanju temperature v malem in velikem globus termometru?
  - Pri analizi katerih delovnih mest je treba uporabiti globus termometre?

#### 2. Določite efektivno in korigirano efektivno temperaturo v prostoru!

Izmerimo vlažno temperaturo: psihrometru dobro navlažimo srajčko mokrega termometra s kapalko z destilirano vodo. Psihrometer previdno vrtimo nekaj minut (vrtite toliko časa, da se vlažna temperatura ustali) in odčitamo temperaturo suhega termometra  $T_z$  in temperaturo vlažnega termometra  $T_v$ . Obe zapišemo. Izmerimo še hitrost gibanja zraka  $v$  na višini 10 cm od tal, v višini trebuha (90 cm) in na višini približno 120 - 140 cm.

1. Rezultate vnesemo v tabelo.
2. Iz meritev določimo relativno vlažnost na dva načina:

- S pomočjo nomograma na sliki B.2 jo določimo tako, da na referenčne osi nanesemo suho temperaturo  $T_z$  in razliko med suho in vlažno temperaturo  $T_z - T_v$ .
  - Druga možnost je, da izračunamo relativno vlažnost s pomočjo psihrometerske enačbe s programom Gwbasic. Za pomoč pri uporabi programa prosite asistenta.
3. Izračunamo efektivno  $T_{ef}$  in efektivno korigirano temperaturo  $T_{ef,kor}$ . Uporabimo računalniški program.
  4. Odgovorite na naslednja vprašanja:
    - Kako razložimo razliko med temperaturami zraka, vlažnega termometra in globus termometra?
    - Poizkusite navesti nekaj prednosti uporabe rotacijskega psihrometra. Delovanje rotacijskega psihrometra razložite s fizikalnimi zakoni.
    - Poiščite še druge možne izvedbe psihrometrov in jih opišite.
    - Ocenite, ali je ugotovljena efektivna (korigirana efektivna) temperatura v optimalnih mejah?
    - Ali je izmerjena relativna vlažnost primerna? (Uporabite literaturo!)
    - Ali je izmerjena hitrost gibanja zraka primerna?

### 3. Določite $PMV$ !

Za izračun uporabimo podatke o okolju iz vaj 1. in 2. Ocenimo temperaturo sevanja  $T_r$  s pomočjo temperature zraka  $T_z$ , temperature globus termometra  $T_g$  in hitrost zraka po enačbi (2.89). Temperature so v °C, hitrost zraka v m/s. Primerjamo rezultat z odčitkom  $T_r$  po nomogramu na sliki B.3. Oba rezultata zapišemo.

Poženemo program za izračun merila udobja  $PMV$ ! (Program poženemo z ukazom: GWBASIC PMV1.) Izberemo podatke za napor  $M$  (met), mehanski izkoristek in izolativnost obleke  $I_{cl}$  (clo) in jih vstavimo v program. Vnesemo izmerjene podatke o prostoru.

1. Sestavimo tabelo z dvema stolpcema ali vrsticama. V prvem stolpcu naj bodo podatki za izbrani  $M$  (met),  $I_{cl}$  (clo) in izmerjeni podatki o prostoru ( $T_z$  (°C),  $T_r$  (°C), relativna vlažnost %,  $v$  (m/s)) in na koncu  $PMV$ , dobljen iz teh podatkov. V drugem stolpcu zapišemo podatke, ki smo jih spremenili tako, da z njimi dobimo optimalen  $PMV$  (čim bližje nič).
2. Odgovorite na vprašanja:
  - Kakšna je razlika med izračunano in odčitano temperaturo sevanja?
  - Kaj pomeni kratice merila udobja  $PMV$ ?
  - Komentirajte podatke, s katerimi smo opisali merilo udobja, in razmislite o tem, katere podatke lahko spreminjamo in kateri so konstantni. Se vaše občutenje izmerjenega okolja ujema z rezultatom?
  - Ali lahko rečemo, da je merilo udobja  $PMV$  univerzalno?

#### 4. Določite *WBGT*!

V stojalo vpnemo termometer in naravni vlažni termometer (slednji ima bučko prekrito z bombažno srajčko). Srajčko naravnega vlažnega termometra dobro omočimo z destilirano vodo. Stojalo pustimo mirovati in počakamo, da se temperatura obeh termometrov ustali.

1. Odčitamo temperaturi  $T_z$  in  $T_{nv}$  in s pomočjo nomograma na sliki B.2, ki smo ga uporabili v 2. vaji, ugotovimo relativno vlažnost.
2. Z enačbo (2.88) izračunamo *WBGT*. Za temperaturo globus termometra uporabimo podatke iz 1. vaje.
3. Odgovorite na vprašanja:
  - Kaj vpliva na temperaturo naravnega vlažnega termometra  $T_{nv}$ ?
  - Zakaj je temperatura naravnega vlažnega termometra  $T_{nv}$  drugačna kot temperatura vlažnega termometra  $T_{vl}$  v rotacijskem psihrometru?
  - Komentirajte rezultat in ocenite, ali je *WBGT* v dopustnih mejah.

## 2.7 Hrup

### 2.7.1 Naloga

1. Spoznajte se z merilniki hrupa.
2. Izmerite raven hrupa v laboratoriju.
3. Izmerite raven konstantnega hrupa in opravite oktavno analizo.
4. Izmerite ekvivalentno raven spremenljivega hrupa.
5. V naselju ob cestah izmerite značilne ravni hrupa, ki ga povzročajo različni izvori.
6. Izmerite raven hrupa v bivalnem naselju.
7. Izračunajte ekvivalentno raven spremenljivega hrupa.

### 2.7.2 Osnove

#### 2.7.2.1. Zvok

Zvok je longitudinalno mehansko valovanje v snovi. V vakuumu zvoka ni. Izvori zvoka so nihajoča telesa oz. ploskve, ki jih imenujemo zvočila. Ti povzročajo nihanje tlaka v okoliški snovi (npr. v zraku tik ob zvočnikovi opni). Tako nastala tlačna motnja se v snovi širi v obliki valovanja. Zvočno valovanje prenaša energijo. To pomeni, da zvočilo s tem, ko oddaja zvok, oddaja energijo. Prav tako zvočni sprejemniki z zvokom prejemaajo energijo. Sprejemniki za zvok so telesa, ki zvok pretvorijo v neke vrste signal. Uho pretvori zvok v živčni signal, mikrofona pa v električni.

#### 2.7.2.2. Opis zvoka

Zvok opišemo z naslednjimi veličinami:

- Zvočna hitrost  $c$  pove, kakšno razdaljo prepotuje zvok v enoti časa. Enota je m/s.
- Frekvenca  $\nu$  pomeni število nihajev v časovni enoti. Enota je hertz:  $1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$ .
- Valovna dolžina  $\lambda$  je razdalja med dvema sosednjima točkama z enako fazo v smeri širjenja valovanja. Merimo jo v metrih ali ostalih dolžinskih enotah.

Hitrost, frekvenco in valovno dolžino med seboj enolično povezuje naslednja enačba:

$$c = \lambda\nu. \quad (2.90)$$

Hitrost zvoka je v različnih snoveh različna, glej tabelo 2.8. Če primerjamo dve različni snovi, v katerih je zvočna hitrost različna, pravimo da je snov z večjo zvočno hitrostjo valovno redkejša, druga pa valovno gostejša.

Snov	$c$ (m/s)
zrak (20 °C)	340
vodik	1300
voda (20 °C)	1500
človeško telo (povprečno)	1560
mehak les	3350
beton	3400
jeklo	5000
steklo	5200

Tabela 2.8: Hitrost zvoka v različnih snoveh.

Zvočno hitrost določajo lastnosti snovi. V trdnih snoveh je odvisna od gostote  $\rho$  in prožnostnega (Youngovega) modula  $E$ :

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (2.91)$$

V kapljevinah je odvisna od gostote  $\rho$  in stisljivosti  $\chi$ , ter je:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho\chi}}. \quad (2.92)$$

Zvočna hitrost v plinih je

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho\chi_S}} = \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}} = \sqrt{\frac{\kappa RT}{M}}, \quad (2.93)$$

pri čemer je  $\chi_S = 1/\kappa p$  izentropna stisljivost plina.  $\kappa = c_p/c_V$  je razmerje med specifično toploto pri konstantnem tlaku  $c_p$  in pri konstantni prostornini  $c_V$ . Za dvoatomne pline je približno  $7/5 = 1,4$ .  $R = 8,314$  J/molK je splošna plinska konstanta,  $M$  molska masa in  $T$  absolutna temperatura. V enačbi (2.93) smo uporabili plinsko enačbo:  $p/\rho = RT/M$ .

### 2.7.2.3. Jakost zvoka $j$

Kot smo že dejali, zvočilo z oddajanjem zvoka seva energijo. Energijo, ki jo zvočilo odda v časovni enoti, imenujemo *zvočna moč* zvočila. Označimo jo s  $P$ . Enota za moč je watt (W). Zvočilo lahko oddaja v različne smeri različno zvočno moč (na primer, če stojimo pred trobentačem, ga bolje slišimo, kot če stojimo za njim). Tako zvočilo imenujemo *anizotropno*. Zvok je tem šibkejši, čim dlje smo od zvočila.

Na opazovanem mestu (npr. pri glavi delavca) zvok ovrednotimo z gostoto energijskega toka ali **jakostjo** zvoka (s tujko intenziteta). Jakost je moč, ki jo zvok prenaša skozi enoto površine pravokotno na smer širjenja valovanja. Označimo jo z  $j$  in ima dimenzijo W/m<sup>2</sup>. Jakost zvoka v neki točki v prostoru (npr. v uhlju) je povezana

s tem, kako močno tam niha tlak. V uhlju niha zračni tlak. Povezavo med amplitudo tlaka in jakostjo podaja enačba:

$$j = \frac{\Delta p_{max}}{2\rho c}. \quad (2.94)$$

Čutila in merilniki zaznavajo spremembe tlaka. Ker se tlak zelo hitro spreminja, uho in zvokometer (glej dalje) to časovno spreminjanje izpovprečijo in zato posredno zaznavajo jakost. Časovni potek je možno opazovati z mikrofonom priključenim na osciloskop.

Jakost zvoka pada, če se oddaljujemo od zvočila. Kako si to razložimo? Zamislimo si zvočni val, ki se širi v prostor, kot balon, ki ga napihujemo. Ta val s sabo nosi energijo. Ker se val širi, je ista energija porazdeljena po vedno večji površini, če v sredstvu ni absorpcije. Ker se površina krogle povečuje s kvadratom oddaljenosti od izvora, lahko zaključimo, da **jakost zvoka kot ploskovna gostota zvočne moči pada s kvadratom oddaljenosti od zvočila**. To napišemo:

$$j \propto \frac{P}{r^2}, \quad (2.95)$$

kjer je  $r$  oddaljenost od zvočila z močjo  $P$ .

#### 2.7.2.4. Spekter zvoka

Le redko ima zvok le eno frekvenco. Tak zvok lahko elektronsko generiramo, zelo pa se temu idealu približa enakomeren žvižg. Največkrat zvok tvori zmes zelo veliko frekvenc, pogosto celo neskončno. Nekatere med njimi so močnejše od drugih, nekaterih pa skoraj ni. Funkcijo, ki pove, kako je jakost zvoka porazdeljena po frekvencah, imenujemo **spekter zvoka**. Spekter je diskreten ali pa zvezen. V praksi lahko frekvenčno območje razsekamo na intervale in spekter predstavimo kot histogram.

Če so intervali taki, da je zgornja frekvenčna meja intervala dvakratna spodnja

$$\nu_{max} = 2\nu_{min}, \quad (2.96)$$

pravimo tem intervalom **oktave**. Oktavo označimo s frekvenco  $\nu_{sred}$ , ki je geometrična sredina spodnje in zgornje:

$$\nu_{sred} = \sqrt{\nu_{max}\nu_{min}}. \quad (2.97)$$

Iz enačb (2.96) in (2.97) sledi

$$\nu_{sred} = \sqrt{2}\nu_{min} = \frac{\nu_{max}}{\sqrt{2}}. \quad (2.98)$$

Širina terčnega pasu je 1/3 oktavnega.

#### 2.7.2.5. Zaznavanje zvoka

Človek zaznava zvok s frkvencami med 20 Hz in 20000 Hz. Zvok s frekvencami nižjimi od 20 Hz imenujemo infrazvok, zvok s frekvencami višjimi od 20000 Hz pa ultrazvok. Meje so približne in se razlikujejo od človeka do človeka. Zlasti zgornja

meja se s starostjo precej zniža. Zelo so meje odvisne tudi od količine ušesnega masla v sluhovodu.

Zvok je dražljaj za organ sluha, ki posreduje signal preko slušnega živca v možgane. Možgani ga analizirajo in spoznajo kot zvok. Dojemanje zvoka je zato zapleten fizikalno-fiziološko-psihični proces.

Fizikalno-fiziološka zaznava ima naslednje lastnosti:

1. Jakost zvoka mora presegati *prag* zaznave, ki mu pravimo tudi meja slišnosti. Pod pragom zaznave zvoka ne občutimo.
2. Občutek povečanja zaznave je sorazmeren relativnemu povečanju dražljaja (Fechner Weberjev zakon).

Obe lastnosti matematično najbolje opiše logaritemski odnos med občutkom, označimo ga z  $Z$ , in dražljajem, označimo ga z  $j$ :

$$Z = \log \left( \frac{j}{j_0} \right), \quad (2.99)$$

kjer je  $j_0$  zvočna jakost na meji slišnosti in je pri frekvenci 1 kHz privzeta kot  $j_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ . Zaradi logaritmičnega odnosa je smiselno za mero glasnosti vpeljati namesto jakosti  $j$  novo mero: **raven (nivo) zvoka**. Raven označimo z  $L$ , izražamo jo v dB (decibelih). Definirana je kot:

$$L = 10 \log \left( \frac{j}{j_0} \right). \quad (2.100)$$

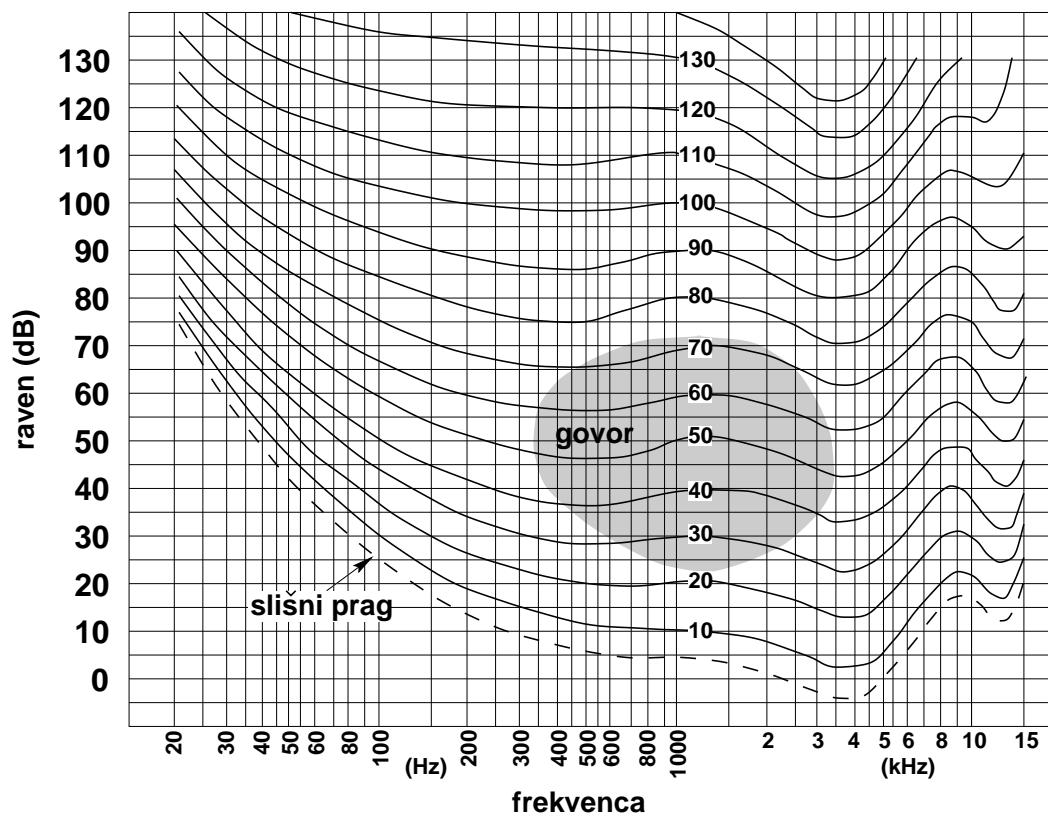
3. Človeku se signali sicer enakih jakosti (ravni) vendar različnih frekvenc ne zdijo enako glasni. Najbolj je uho občutljivo za frekvence med 2 kHz in 5 kHz. Glasnost preberemo iz diagrama na sliki 2.20, ki kaže krivulje enake glasnosti (izofone) v odvisnosti od frekvence in zvoka.

### 2.7.2.6. Hrup

Enake dražljaje lahko dojemamo zelo različno: nekatere vrste zvoka so prijetne, druge neprijetne, moteče ali škodljive. **Hrup je zvok, ki moti, je neprijeten ali škoduje.** Zaradi subjektivnega dojemanja zvoka definicija hrupa ni eksaktna in zato enoličnega merila za hrup ni. Spomnimo se npr. da moj otrok lepo kriči, sosedovega pa ni mogoče prenašati, da je glasna glasba najstniku prijetna, sosedu v sosednjem stanovanju pa je lahko kljub bistveno manjši ravni neznosna. Zvok, ki ga proizvajamo sami, manj moti kot zvok, ki ga proizvajajo drugi ipd. Kljub temu iz praktičnih razlogov tudi hrup izražamo z ravni  $L$  v dB.

Raven zvoka največkrat ni konstantna, ampak se v danem okolju spreminja. Najnižjo raven (stalno prisoten zvok) v nekem okolju imenujemo ozadje, najvišjo pa vrh, vršno raven ali konico. Spomnimo se na hrup cestnega prometa, pogovor, kovačijo, šum vetra, valov ipd.

Utemeljena je domneva, da je akustična travma odvisna od energije zvoka, s katerim je obremenjeno uho. Zato pri spremenljivem hrupu merimo *energijsko ekvivalentno*



Slika 2.20: Krivulje enake glasnosti za človeka-izofone.

*raven*. Označimo jo z  $L_{eq}$ . Ekvivalentna raven je tista konstantna navidezna raven, ki bi bila enaka sicer spremenljivi dejnski zvočni energiji v izbranem časovnem intervalu. Po tej definiciji je torej ekvivalentna raven enaka:

$$L_{eq} = 10 \log \left( \frac{1}{t_0} \int 10^{\frac{L(t)}{10}} dt \right), \quad (2.101)$$

kjer je  $t_0$  opazovani časovni interval in  $L(t)$  je trenutna raven v trenutku  $t$ . Če lahko razdelimo časovni potek hrupnega dogajanja na končno število časovnih intervalov  $\Delta t_i$ , za katere so značilne ravni  $L_i$ , lahko prejšnjo enačbo napišemo v obliki:

$$L_{eq} = 10 \log \left( \frac{1}{\sum \Delta t_i} \sum 10^{\frac{L_i}{10}} \Delta t_i \right). \quad (2.102)$$

Zapomnimo si, da je  $L_{eq}$  tista raven, ki je po **energiji** enaka s časom se spreminjajoči ravni  $L(t)$  v času opazovanja  $t_0$ .

$L_{eq}$  lahko direktno merimo z instrumenti, ki so za to prilagojeni, ali jo izračunamo po enačbi (2.102).  $L_{eq}$  v svetu uporabljajo za oceno tveganja za akustično travmo in tudi za oceno motenj zaradi hrupa, čeprav za slednjo ni najprimernejše merilo.

Kriterije za dovoljen hrup ločimo na:

- kriterije za ohranitev neokrnjene slušne zmožnosti (za varovanje pred akustično travmo),



- kriterije za nemoteno opravljanje različnih dejavnosti in
- kriterije za dopustne ravni v naravnem okolju in v bivalnih prostorih.

### 2.7.2.7. Merjenje hrupa na delovnem mestu

Čas merjenja hrupa na delovnem mestu izberemo tako, da zajamemo vse značilne vire hrupa na delovnem mestu. Ta čas je lahko enak referenčnemu času  $T_0 = 8$  ur, lahko je krajši ali pa tudi v več različnih intervalih. Če je čas  $T$  krajši od 8 ur in se deli v več različnih intervalov, izračunamo ekvivalentno raven po naslednji enačbi:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left( \frac{1}{T} \sum_{i=1}^m T_i \cdot 10^{0,1L_{Aeq,T_i}} \right), \quad (2.103)$$

pri čemer je  $L_{Aeq,T_i}$  ekvivalentna raven hrupa izmerjena v posameznem časovnem intervalu  $T_i$ ,  $T$  je dejansko trajanje opazovanja in  $T_i$  je podinterval enake ravni hrupa.

Pri merjenju hrupa na delovnem mestu je treba upoštevati tudi impulzni značaj hrupa, ker izkušnje kažejo, da je impulzni hrup bolj škodljiv od ekvivalentne ravni. Impulzni značaj hrupa se upošteva na ta način, da se izmerjeni ekvivalentni ravni hrupa prišteje razliko med to izmerjeno ekvivalentno ravno hrupa in povprečno ravno hrupa, izmerjeno z dinamiko I (Impulse). Razlika se prišteje le tedaj, če je večja kot 2 dB(A). Če je razlika večja kot 6 dB(A), se prišteje 6 dB(A). Ekvivalentno raven hrupa in povprečno raven hrupa, izmerjeno z dinamiko I (Impulse), je potrebno meriti istočasno. S popravkom  $K_I$  dobimo iz ekvivalentne *ocenjeno raven* v izbranem časovnem intervalu  $T$  in jo označimo z  $L_{Ar,T}$ :

$$L_{Ar,T} = L_{Aeq,T} + K_I. \quad (2.104)$$

*Raven dnevne izpostavljenosti*  $L_{EX,sh}$  je ocenjena raven  $L_{Ar}$  tekom standardnega osemurnega delavnika. Dnevno izpostavljenost izračunamo torej po naslednji enčbi:

$$L_{EX,sh} = L_{Aeq,T_e} + 10 \log \frac{T_e}{T_o}, \quad (2.105)$$

pri čemer je  $T_e$  je dejansko trajanje izpostavljenosti hrupu in  $T_o = 8$  ur ali 28800 s.

Poleg dnevne izpostavljenosti hrupu moramo včasih upoštevati tudi tedensko ali 5-dnevno izpostavljenost hrupu, ki jo izračunamo z naslednjo enačbo:

$$L_{EX,w} = 10 \log \left( \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 10^{0,1(L_{EX,sh})_i} \right). \quad (2.106)$$

Pravilnik o varovanju delavcev pred tveganji zaradi izpostavljenosti hrupu pri delu (Uradni list RS, št. 17/2006 (18/2006-popravek)) predpisuje naslednje mejne vrednosti izpostavljenosti in opozorilne vrednosti izpostavljenosti v osemurnem delavniku ter naslednje konične ravni zvočnih tlakov:

- mejni vrednosti izpostavljenosti: ločeno za  $L_{EX,sh} = 87$  dB(A) in  $p_{peak} = 200$  Pa (140 dB(C) glede na referenčni tlak  $20 \mu\text{Pa}$ );

- zgornji opozorilni vrednosti izpostavljenosti: ločeno za  $L_{EX,sh} = 85$  dB(A) in  $p_{peak} = 140$  Pa (137 dB(C) glede na referenčni tlak  $20 \mu\text{Pa}$ );
- spodnji opozorilni vrednosti izpostavljenosti: ločeno za  $L_{EX,sh} = 80$  dB(A) in  $p_{peak} = 112$  Pa (135 dB(C) glede na referenčni tlak  $20 \mu\text{Pa}$ ).

Delo je moteno, če so pri značilnih opravilih na delovnem mestu presežene v času delovanja motnje, ekvivalentne ravni hrupa ( $L_{Aeq}$ ), kot je navedeno v tabeli 2.9.

Zap. številka	Vrsta delovnih opravil	Dopustna ekvivalentna raven hrupa na delovnem mestu v dB(A)	
		a	b
1.	Najzahtevnejše mentalno delo.	45	40
2.	Pretežno mentalno delo, pri katerem je potrebna velika koncentracija in/ali ustvarjalno mišljenje ali so potrebne daljnosežne odločitve, sejne dvorane, pouk v šolah, zdravniški pregledi in posegi, znanstveno delo, raziskave, razvoj programov, zahtevnejša pisarniška dela, telefonske centrale.	55	45
3.	Enostavna pisarniška in njim primerljiva dela, prodaja, zahtevna montaža in njej primerljiva pretežno fizična dela, zahtevno krmiljenje sistemov.	65	55
4.	Manj zahtevno krmiljenje sistemov, manj zahtevna fizična dela, ki zahtevajo zbranost in pazljivost in njim podobna dela.	70	60
5.	Pretežno rutinska fizična dela, ki zahtevajo slušno spremljanje okolja.	80	75
6.	Noseče ženske.	80	55

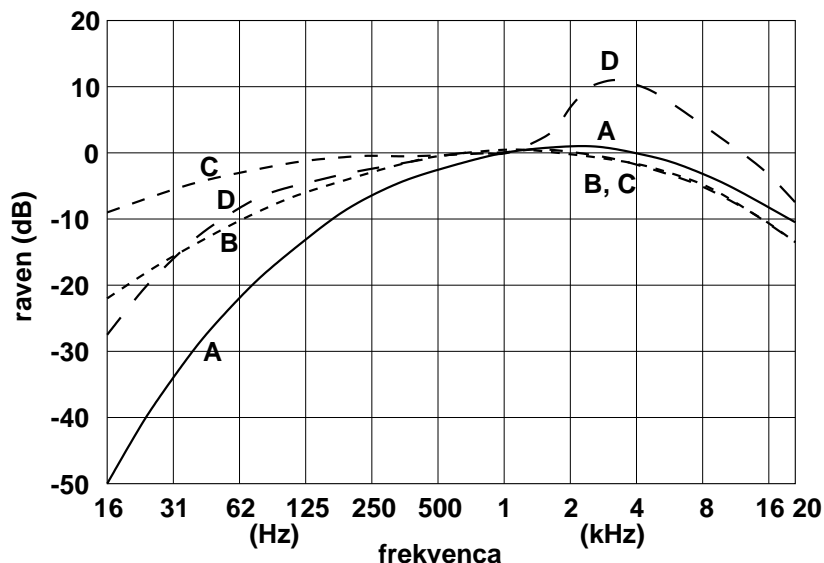
a - velja za splošni hrup na delovnem mestu zaradi drugih proizvodnih virov v okolici delovnega mesta;

b - velja za hrup na delovnem mestu zaradi neproizvodnih virov (ventilacija, klimatizacija, sosednji obrati, hrup prometa ipd.).

Tabela 2.9: Največje dopustne ekvivalentne ravni hrupa za nemoteno delo pri posameznih vrstah delovnih opravil.

#### 2.7.2.8. Zvokomer

Raven hrupa merimo z merilniki zvoka oz. zvokomeri. Zvokomer ima mikrofoni, ojačevalnik, atenuatorje, usmernik, kazalo (analogno ali digitalno) in frekvenčne filtre.



Slika 2.21: Prepustne karakteristike različnih širokopasovnih filtrov.

Nihanje tlaka zaniha membrano mikrofona. Nihanje membrane povzroči izmenični električni signal. Ojačevalnik ga ojači, usmernik pretovori v enosmernega, kazalo pa pokaže njegovo velikost v dB.

Zapomnimo si: z zvokometrom neposredno merimo efektivno vrednost (RMS) tlaka zvočnega valovanja, ker pa je od tlaka odvisna jakost, merimo posredno tudi jakost zvoka.

Zvokomer ima vgrajene pasovne frekvenčne filtre, da lahko opravimo frekvenčno analizo zvoka. Frekvenčni filter prepušča le signale s frekvenco, ki leži v prepustnem frekvenčnem pasu (intervalu) filtra. Zvokomeri imajo navadno oktavni (oznaka 1/1) ali/in terčni filter (oznaka 1/3), kar pomeni, da lahko pasove, ki jih filter prepušča, izbiramo po oktavah ali tercah.

Zapomnimo si: oktavni filter, ki je označen s srednjo frekvenco, npr. 16 Hz, prepušča frekvence od 11 do 22 Hz, oktavni filter z oznako 500 Hz prepušča frekvence od 354 do 707 Hz, oktavni filter z oznako 8000 Hz frekvence od 5660 do 11 300 Hz itd. Terčni filtri imajo trikrat ožje prepustno frekvenčno področje.

Zvokomer, kot smo ga opisali, zazna zvočni tlak ne glede na frekvenco zvoka. Z njim torej dobimo pri enaki zvočni ravni enak odčitek pri poljubni frekvenci, lahko tudi v področju ultrazvoka in infrazvoka v mejah frekvenčnega obsega instrumenta. Pravimo, da v tem primeru merimo *linearno raven*  $L_{lin}$  in jo označimo z dB.

Želimo pa si, da bi zvokomer zaznaval zvok glede na frekvenco podobno "glasno", kot ga zazna človek. Zato so v zvokomer vgrajeni frekvenčni filtri, ki ne prepuščajo niti ultrazvoka niti infrazvoka, visoke in nizke tone pa dušijo podobno, kot jih tudi človek slabše zaznava. Frekvenčna propustnost takšnih filtrov je z mednarodnimi standardi natančno definirana. Praviloma uporabljamo filtre z oznako "A". Za posebne namene so v rabi še filtri "B", "C", "D". Prepustne karakteristike filtrov "A", "B", "C", "D" so na sliki 2.21.

Pozor! Filtri "A", "B", "C" in "D" so *širokopasovni filtri* in to torej niso že prej omenjeni ozkopasovni oktavni ali terčni filtri. Kadar merimo raven z vključenim filtrom

”A”, označimo rezultat meritev z enoto dB(A), včasih krajše dBA.

Zapomnimo si, da zvokomer brez vključenega filtra ”A” pokaže ravni zvoka enako ne glede na frekvenco, z vklopljenim filtrom ”A” (ali za posebne namene z drugimi filtri) pa zvokomer zvoke različnih frekvenc ”sliši” podobno ”glasno” kot človek in približno kaže glasnost. Približno pravimo zato, ker je filter ”A” prilagojen frekvenčni občutljivosti ušesa pri zvočnih ravneh okrog  $50 \div 70$  dB, pri drugih pa je odsopanje znatno.

### 2.7.3 Oprema in pripomočki

1. zvokomer Brüel & Kjær, tip 2260 Investigator
2. trinožno stojalo
3. vir hrupa

#### 2.7.3.1. Precizni zvokomer Brüel & Kjær

Precizni zvokomer Brüel & Kjær, tip 2260 Investigator je instrument za merjenje hrupa. Instrument ima vgrajen terčno/oktavni filter. Takšen instrument omogoča meritev s filtri A in C ter ”linearno”. Instrument je programiran s programskim modulom, ki iz opravljenih meritev prikaže več različnih akustičnih karakteristik, ki jih imenujemo parametri. Mednje spadajo:

- $L_{Xeq}$ : Ekvivalentna stalna raven za čas merjenja, kot to določa standard IEC 60804.
- $L_{Xpk}$ : Vršna raven.
- $L_{xIm}$ : Ekvivalentna stalna impulzna raven za čas merjenja, kot to določa standard IEC 804, dodatek B.
- $L_{Aeq,d}$ : Dnevna izpostavljenost hrupu, kot to določa standard EEC 88/186.
- $L_{Aeq,w}$ : Tedenska izpostavljenost hrupu.
- $L_{xy}(SPL)$ : Najvišja RMS raven v intervalu 1 sekunde, kot je določeno po standardu IEC 60651.
- $L_{xy}(Max)$ : Najvišja srednja raven zabeležena v času trajanja meritve.
- $L_{xy}(Min)$ : Najnižja raven v času trajanja meritve.
- Elapsed Time: Čas, ki je že pretekel od začetka meritve.

Med delom bomo uporabljali parametre  $L_{ax}(SPL)$ ,  $L_{Aeq}$ ,  $L_{Cpk}$ ,  $L_{xIm}$ , MINL in MAXL.

Merilno območje instrumenta je (pri mikrofONU tip 4189) v razponu od 20 dB(A) do 140 dB(A). Frekvenčni obseg instrumenta je od 6,3 Hz do 20 kHz pri linearni in pri širokopasovni nastavitvi. Napaka instrumenta je  $\pm 0,5$  dB pri obsegu od  $-10^{\circ}\text{C}$  do  $+50^{\circ}\text{C}$ .

Instrument je treba periodično tudi umerjati (kalibrirati). Za kalibriranje bomo uporabili zvočni kalibrator Brüel & Kjær tip 4230.

## 2.7.4 Potek dela

### 1. Spoznajte se z merilniki hrupa!

Oglejmo si instrument. Pazimo, da se ne dotaknemo mikrofona, ker je izredno občutljiv (in drag!). Z instrumentom ravnamo previdno in brez sile. Za začetek prosimo za pomoč in razlago asistenta. Vedeti je treba:

1. kako vključite zvokomer in izberete ustrezno programsko opremo,
2. kako opravimo oktavno ali ternčno analizo zvoka,
3. kako nastavimo merilnik hrupa, da meri ustrezne veličine,
4. kaj pomenijo oznake na merilniku:  $L_{min}$ ,  $L_{max}$ , SPL,  $L_{ax(SPL)}$ ,  $L_{Aeq}$ ,  $L_{Cpk}$ , in  $L_{AIm}$ ,
5. kje izberemo merilno območje.

Navadno mikrofona pokrijemo z varovalno gobo. Goba varuje mikrofona pred poškodbo in zmanjša motnje zaradi vetra.

### 2. Izbira merilnega mesta

Mikrofona mora biti med merjenem hrupa na delovnem mestu v višini ušesa delavca (po možnosti brez njegove navzočnosti) na razdalji od 0,1 do 0,3 m oziroma približno 0,2 m od glave. Mikrofona naj bo obrnjen proti izvoru hrupa, tako da med virom in mikrofonom ni ovir. Če se položaj delavca med delom spreminja (npr. pri delu na stružnici), merimo pri stoječem delavcu na višini  $1,5 \text{ m} \pm 0,075 \text{ m}$  od tal. Če pa delavec sedi, mora biti lega mikrofona na višini  $0,91 \text{ m} \pm 0,05 \text{ m}$  od sredine sedežne površine. Če je delavec v ležeči legi pa na višini 0,6 m.

### 3. Izmerite raven hrupa v laboratoriju!

Vklopimo instrument in preverimo če so nastavitve merilnika take, da bo meril  $L_{Aeq}$ , funkcija SPL (Sound Pressure Level) in dinamika "fast".

Zapišemo, kolikšna je raven, kadar je tišina, kadar govorimo-tiho, normalno ali glasno (instrument držimo približno 1 m od sebe)!

Rezultate podamo tabelarično tako, da navedemo vrednosti za najnižjo, najvišjo in srednjo raven pri tihem, srednjem in glasnem govoru. Navedemo tudi raven ozadja.

Zapišemo, kolikšna je približna raven pri normalnem govoru! Spremenimo nastavitve dinamike na "slow"! Ponovimo meritev in zapišemo, kaj opazimo?

### 4. Izmerite raven konstantnega hrupa in opravite oktavno analizo!

1. Zvokomer postavimo na razdaljo približno 30 cm od vira konstantnega hrupa. Primerjamo med vrednostmi, izmerjenimi z dinamikama "slow" ter "fast". Rezultate zapišemo. Hrup merimo s filtrom "A" in "linearno". Rezultate odčitamo in zapišemo vrednosti.

2. Razpored naprav naj bo enak kot prej. Zvokomer nastavimo na "Lin" in oktave: 1/1. Frekvenčni pas nastavimo na center oktavnega pasu 16 Hz. Odčitamo raven v frekvenčnem pasu 16 Hz in jo zapišemo. Premaknemo filter na naslednji pas (32 Hz) in tako dalje. Rezultate podamo v tabeli in v histogramu.

3. Odgovorite!

- Kaj pridobimo, če merimo s filtrom "A"?
- Komentirajte razliko med odčitkoma v dB(A) in dB(lin) in jo opišite.
- Komentirajte razliko med odčitkoma pri nastavitviah "slow" ter "fast" in jo opišite.
- V katerem oktavnem pasu je bila največja izmerjena raven?
- Kako bi razložili rezultate meritev pri oktavni analizi?

## 5. V zunanjem okolju izmerite raven hrupa, ki ga povzročajo različni izvori!

Na parkirišču in ob cesti merimo ravni hrupa, ki jih povzročajo različni viri (hoja pešcev, promet). Opišemo mesto merjenja (oddaljenost od ceste, višina zvokomera, atmosferske razmere itd.). Instrument nastavimo na trajanje meritve 5 min. V tabelo vpisujemo parametre  $L_{Aeq}$ ,  $L_{min}$  in  $L_{max}$ .

Na enak način opravimo tri meritve tudi na parkirišču, ki niso neposredno ob cestišču. Opišemo mesto merjenja (oddaljenost od ceste, višina zvokomera, atmosferske razmere itd.)! Instrument nastavimo na trajanje meritve 5 min. V tabelo vpisujemo parametre  $L_{Aeq}$ ,  $L_{min}$  ter  $L_{max}$ .

Kako je bil med meritvijo nastavljen instrument (filtri, dinamika itd)? Komentirajte rezultate. Kateri viri povzročajo največji hrup? Poiščite in navedite veljavne predpise, ki se nanašajo na hrup v naravnem okolju.

## 6. Izmerite raven hrupa v prostorih!

1. Na treh mestih v prostoru, kjer opravljamo vajo, izmerimo ravni  $L_{Aeq}$ ,  $L_{min}$  in  $L_{max}$  (z dinamiko "fast" in "slow"). Rezultate podamo tabelarično.
2. V predprostoru ob vhodu v laboratorij izmerimo  $L_{Aeq}$ ,  $L_{min}$  in  $L_{max}$ , tako da po dve meritvi opravimo pri zaprtih steklenih vratih in po dve pri odprtih vratih. Instrument naj bo med vsemi štirimi meritvami na istem mestu. Upoštevamo občutljivost (območje) instrumenta, ki mora biti ob zaprtih vratih nastavljena drugače kot med meritvijo pri odprtih. Med meritvijo ne povzročamo hrupa, saj sicer ne bo veljavna.

Vse rezultate podamo tabelarično. Podamo tudi razlike med srednjimi vrednostmi posameznih ravni pri odprtih in zaprtih vratih. Koliko v danem okolju dušijo vrata?

3. Komentirajte rezultate meritev v prostoru. Poiščite in navedite veljavne predpise, ki se nanašajo na hrup v delovnem okolju.

**7. Izračunajte ekvivalentno raven spremenljivega hrupa!**

V izbranem časovnem intervalu  $t_0$  merimo značilne ravni  $L_i$  in njihovo trajanje  $t_i$ . Na podlagi enačbe (2.102) za izračun ekvivalentne ravni izračunajmo ekvivalentno raven vzorca. Vhodne podatke za izračun prikažemo tabelarično. Zapišemo ekvivalentno raven vzorca.

Kaj je to ekvivalentna raven? V predpisih poiščite ekvivalentne ravni za delovno okolje in jih navedite. Kako vaša izračunana ekvivalentna raven ustreza predpisom?

## 2.8 Vibracije

### 2.8.1 Naloga

1. Opazujte vibracije nebalansiranega elektromotorja na elastični podlagi in izmerite osnovno in nekaj višjih frekvenc.
2. Naredite Fourierjevo analizo vibracij poskusnega sistema.
3. Poiščite lastno frekvenco sistema.
4. Spoznajte se z veljavno zakonodajo in mejnimi vrednostmi za dopustne vibracije.

### 2.8.2 Osnove

#### 2.8.2.1. Nihanje elastičnega sistema

Najenostavnejši mehanski sistem, ki lahko zaniha okrog stabilne ravnovesne lege, tvorijo: nihajoča masa  $m$ , prožna vez (vzmet) s konstanto prožnosti  $k$ , na kateri je masa, in dušilni element s koeficientom dušenja  $\beta$ . Shematično ga ponazarja slika 2.22.

Če nihajo različne mase med seboj povezane z različnimi elastičnimi vezmi, pravimo, da imamo sklopljeno nihanje.

Pri predpostavki, da je zveza med silo  $F$  na maso in odmikom  $x$  linearna:  $F = -kx$ , je nihanje harmonično. Če je nihanje tudi dušeno ( $\beta \neq 0$ ), se amplitude nihanj s časom eksponentno zmanjšujejo (slika 2.23a). Večje kot je dušenje, hitreje se amplitude zmanjšujejo. Če postane dušenje dovolj veliko, nihanje preneha in se iz mirovne lege odmaknjena masa počasi vrne v mirovno lego, ne da bi zanihala. Temu rečemo kritično dušenje (slika 2.23b). Pri dušenem nihanju je razmerje med dvema zaporednima amplitudama  $x_n/x_{n+1}$  konstantno. Imenujemo ga logaritmični dekrement in ga označimo z  $\Lambda$ .

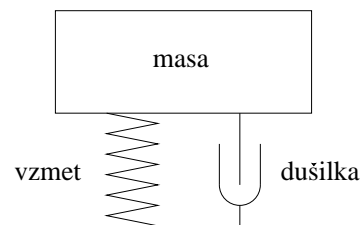
Elastični sistem, odmakjen iz mirovne lege in prepuščen sam sebi, zaniha z lastno frekvenco  $\nu_d$ . Pripadajoča krožna frekvenca  $\omega_d = 2\pi\nu_d$  je

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}, \quad (2.107)$$

kjer je  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$  lastna frekvenca nedušenega sistema in  $\beta$  koeficient dušenja.

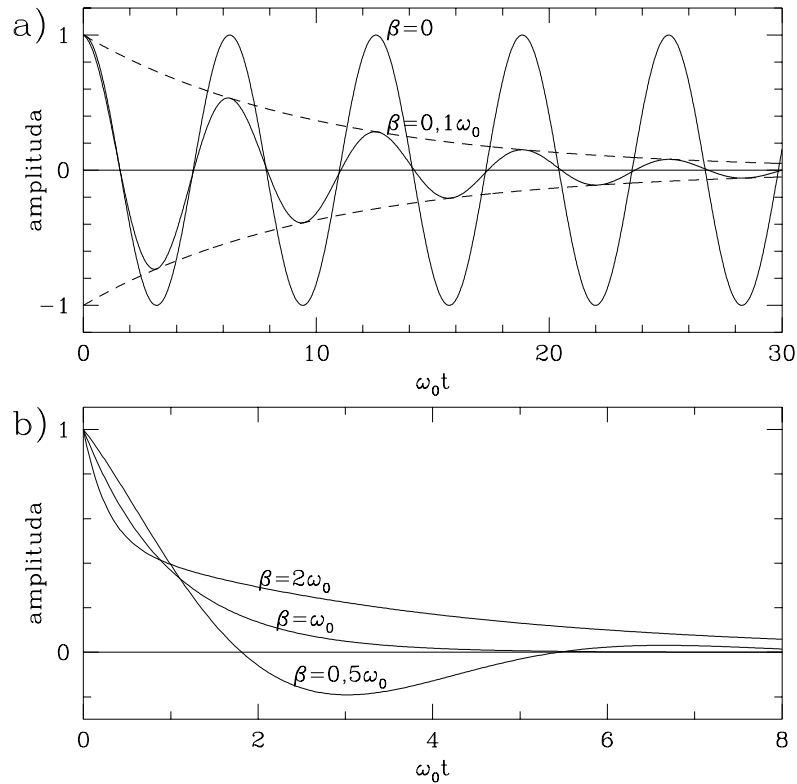
Elastični sistem pod vplivom zunanje periodične sile  $F_0$ , ki deluje na sistem z visljeno krožno frekvenco  $\omega$ , zaniha s frekvenco vzbujevala. Vendar je amplituda nihanja (odziv sistema) odvisna od razmerja med frekvenco vsiljenega nihanja in lastno frekvenco sistema ter dušenja (slika 2.24a). Amplituda sistema  $A$  je:

$$A = \frac{F_0}{m} \frac{1}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}, \quad (2.108)$$

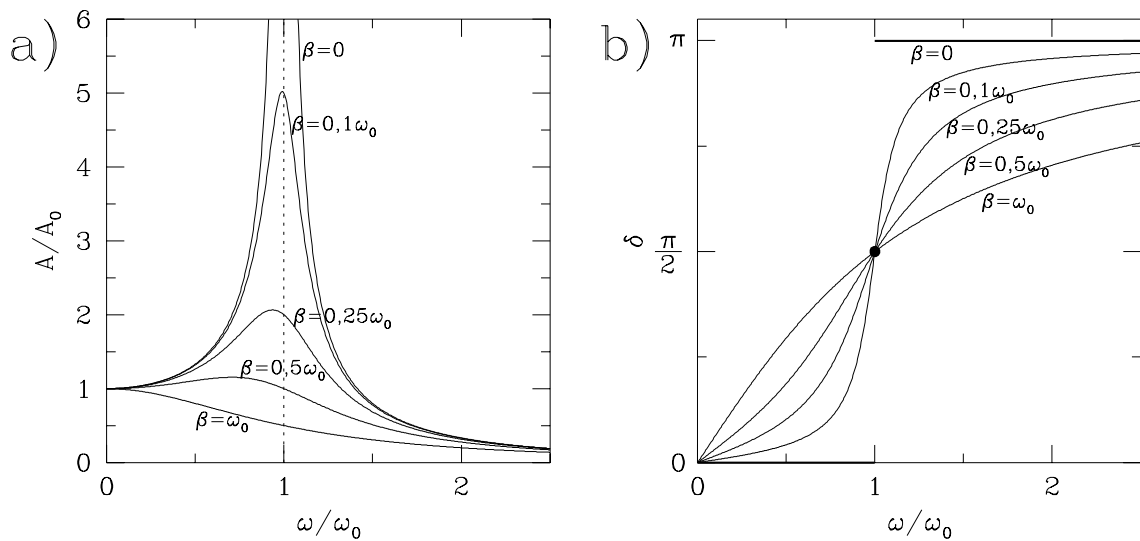


Slika 2.22: Shema preprostega nihajočega sistema.





Slika 2.23: a) Nedušeno in dušeno nihanje. b) Kritično, podkritično in nadkritično dušeno nihanje.



Slika 2.24: a) Resonančna krivulja-odvisnost amplitude od frekvence. b) Frekvenčna odvisnost faznega zamika med nihalom in vzburjanjem.

kjer je  $F_0$  amplituda periodične sile, ki vzbuja sistem. Med amplitudo sistema in silo vzbujanja je fazna razlika (slika 2.24b). Fazni kot  $\delta$  je definiran z enačbo:

$$\delta = \frac{2\beta\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)}. \quad (2.109)$$

Pri zelo majhni frekvenci vsiljevanja glede na lastno frekvenco, je amplituda odziva sistema  $A = F_0/k$ . Amplituda je največja, ko je krožna frekvenca vzbujanja  $\omega_{max} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$ . Takrat pravimo, da je sistem v resonanci. Če gre dušenje proti 0, amplituda v resonanci teoretično raste proti neskončnemu. V praksi ni tako, ker je vedno nekaj dušenja, pri velikih amplitudah pa se sistem ne odziva več linerano ali se poruši. Če je dušenje veliko, postane izraz (2.107) pod korenem imaginaren in je resonanca onemogočena. Če frekvenca vzbujanja raste preko lastne frekvence sistema, se amplituda nihanja sistema zmanjšuje.

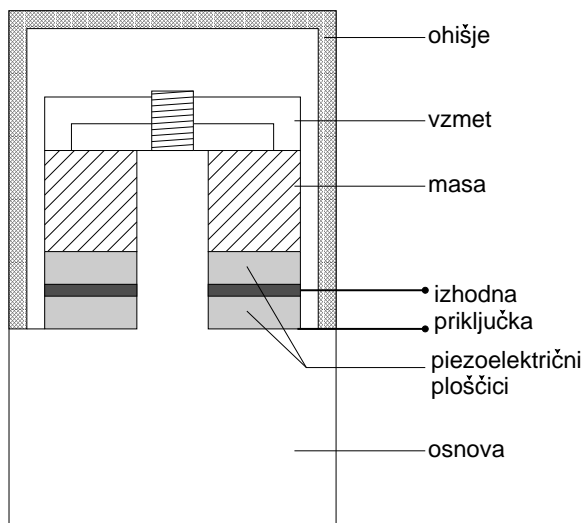
Torej, če želimo čim manjše nihanje sistema, ki ga vzbuja periodična sila, poskrbimo za veliko dušenje in za majhno lastno frekvenco v primerjavi s frekvenco vzbujanja. Preko lastne frekvence pa mora sistem preiti čim hitreje, npr. pri zagonu stroja. Pri stroju vzbujajo nihanje nebalansirani vrteči se deli. Ti so lahko statično nebalansirani, če težišče ni v osi (nebalansirano kolo na osi se zavrti vedno tako, da je težišče pod osjo). Lahko pa so deli statično sicer balansirani, ne pa dinamično. To je takrat, kadar nebalansirane mase delujejo na os z navorom, ki je pravokoten na os.

### 2.8.2.2. Merjenje vibracij

Vibracije praviloma merimo kot pospeške v enoti  $\text{ms}^{-2}$ , včasih lahko tudi kot raven vibracij v dB. Pospeške merimo s tipalom, ki ima na piezoelektrični ploščici pritrjeno določeno maso (slika 2.25). Masa, ki s tipalom vibrira, povzroča na piezoelektrični ploščici silo  $F = ma$ , ki je sorazmerna pospešku, sila pa povzroča na priključkih piezoelektrične ploščice električni signal, ki je torej tudi sorazmeren pospešku. Ta električni signal nadalje merimo z merilnikom vibracij.

V nekaterih primerih, zlasti pri vplivu vibracij na stroje ali zgradbe, merijo raje hitrost vibracij namesto pospeškov. Hitrost merijo induktivno tako, da inducira s signalom vibracij nihajoči magnet v obdajajočem ga navitju električno napetost, ki jo nadalje merimo z merilnikom.

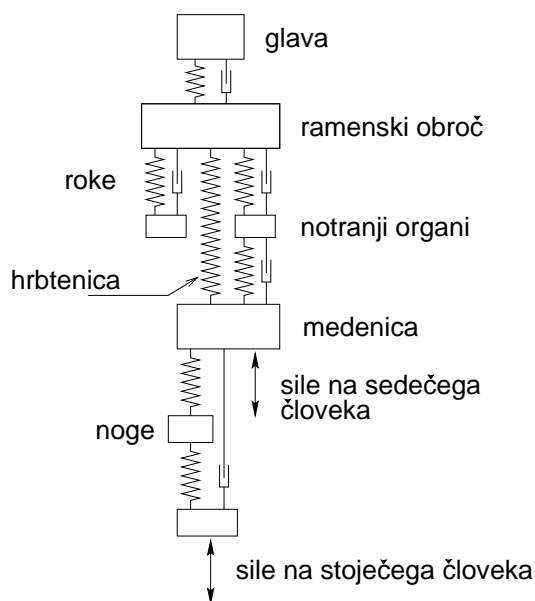
V naši vaji bomo uporabljali piezoelektrično tipalo za pospeške, kot merilnik pa bomo uporabili zvokomer Brüel & Kjær tip 2209, ki je namenjen razen za merjenje zvoka tudi za merjenje vibracij.



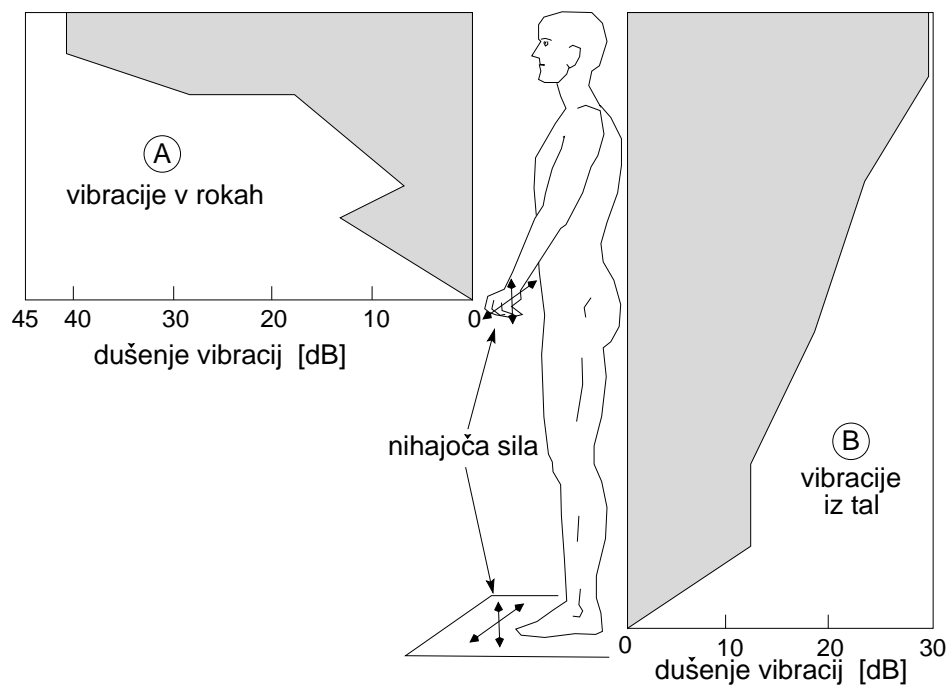
Slika 2.25: Shema tipala za pospeške.

### 2.8.2.3. Človek kot nihajoči elastični sistem

Posamezne mase človekovega organizma si lahko predočimo kot sistem mas, povezanih med seboj z elastičnimi vezmi in dušilnimi elementi, kot vidimo na sliki 2.26. Navadno človekov organizem vzbujamo z nihanji - rečemo z vibracijami - preko nog, če stoji na nihajoči podlagi, preko sedala, če sedi na nihajočem sedežu, ali preko rok, če drži v rokah vibrirajoče orodje. Posamezni deli organizma so v "mehanskem smislu" izrazitejši in so podvrženi značilnim lastnim resonancam (glava, oko, trebušna votlina ipd.). Z mesta vzbujanja se vibracije prenašajo na telo in se širijo po njem, pri tem pa jih organizem duši. Dušenje je tem večje, čim večja je frekvenca vibracij. Dušenje pri širjenju nihanja v odvisnosti od mesta vzbujanja vidimo na sliki 2.27.



Slika 2.26: Ponazoritev človeškega telesa kot sistema elastično povezanih mas.



Slika 2.27: Dušenje vibracij v tkivih človeka v odvisnosti od mesta vzbujanja za frekvenco 50 Hz.

#### 2.8.2.4. Vpliv vibracij na človeka

Reakcija človeka na vibracije je odvisna zlasti od

- frekvence,
- amplitude,
- mesta vzbujanja,
- smeri vzbujanja (vzdolžno, prečno),
- trajanja vzbujanja in
- stanja organizma (ogreta/ohlajena tkiva ipd.).

Vibracije so lahko za človeka:

- prijetne,
- nadležne ali
- škodljive.

V odvisnosti od frekvence so značilni odzivi organizma naslednji:

- $\nu < 0,5$  Hz: velike individualne razlike, kinetoze, kot je morska bolezen ipd.,
- $0,5 \text{ Hz} < \nu < 80$  Hz: najpomembnejše področje, kjer so lastne frekvence nekaterih organov (trebušna prepona, srce, drobovje 3 do 6 Hz, glava 20 Hz, očesno jabolko 80 Hz),
- $\nu > 80$  Hz: močno dušene vibracije že pri prenosu na telo; vibracije delujejo predvsem na kožno tkivo, bližnji kapilarni sistem, na hrustance in kostno tkivo.

Vibracije lahko povzročajo vibracijsko poklicno bolezen, za katero so značilne zlasti okvare kapilarnega in žilnega sistema rok, npr. pri delu z motorno žago ali drugimi vibrirajočimi orodji, znane so celo okvare trdih tkiv, bolezni in poškodbe opornega aparata, zlasti hrbtenice ipd. Škodljive posledice so odvisne od pospeškov oz. hitrosti nihanj, s katerimi delujemo na organizem, od trajanja izpostavljenosti; večje so nevarnosti pri ohlajenih tkivih (npr. vibrirajoča orodja v neogretyh rokah), manjše so nevarnosti pri isti dnevni izpostavljenosti, če ni trajna, ampak je prekinjena z odmori.

V Sloveniji opredeljuje zahteve za dopustno izpostavljenost človeka vibracijam Pravilnik o varovanju delavcev pred tveganji zaradi izpostavljenosti vibracijam pri delu, Uradni list RS, št. 94/2005. Pravilnik določa zahteve za varovanje delavcev pred tveganji za njihovo zdravje in varnost, ki izhajajo ali bi lahko izhajale iz izpostavljenosti mehanskim vibracijam. V pravilniku so opredeljene mejne opozorilne in mejne vrednosti za vibracije dlani in rok ter vibracije celotnega telesa, ki znašajo:

- mejna vrednost dnevne izpostavljenosti, normalizirana na referenčno obdobje osmih ur za vibracije dlan-roka je  $5 \text{ m/s}^2$ , opozorilna vrednost znaša  $2,5 \text{ m/s}^2$ ;

- mejna vrednost dnevne izpostavljenosti, normalizirana na referenčno obdobje osmih ur za vibracije celotnega telesa je  $1,15 \text{ m/s}^2$ , opozorilna vrednost znaša  $0,5 \text{ m/s}^2$ .

V Pravilniku o varovanju delavcev pred tveganji zaradi izpostavljenosti vibracijam pri delu, Uradni list RS, št. 94/2005 so v prilogi opredeljena tudi navodila za oceno izpostavljenosti in opravljanje meritev vibracij v delovnem okolju.

### 2.8.3 Oprema in pripomočki

1. merilnik pospeškov Brüel & Kjær, tip 2209
2. poskusna naprava in variak
3. računalnik s programsko opremo PCS32 z vmesnikom

### 2.8.4 Potek dela

**Zvežite in priključite naprave:**

- Preverite, da je variac izklopljen in ga nastavite na 0.
  - Preverite povezavo elektromotor-usmernik-variak.
  - Povežite tipalo za vibracije in merilnik/zvokomer (posebej pazljivo ravnajte s povezovalnim kablom!) in povežite merilnik/zvokomer (Output AC) s kanalom 2 (CH 2) na vmesniku PCS 321.
  - Povežite izhod usmernika  $\sim 4 \text{ V}$  s kanalom 1 (CH 1) na vmesniku.
  - Priključite vmesnik PCS 321 na računalnik na paralelni vhod za tiskalnik.
  - Priključite napajalnik za PCS 321 na omrežje.
  - Vključite računalnik in v File Managerju poiščite in odprite menu pcs32 in poženite program pcs32.bat.
  - Nastavite merilnik/zvokomer (občutljivost: na 100 dB, Ext. filter: na lin) in ga vklopite (na Batt. Rec).
  - Vključite PCS321 (stikalo: na ON) in preklopite drugi kanal (CH 2) na izmenično napetost (AC).
1. **Opazujte vibracije nebalansiranega elektromotorja na elastični podlagi in izmerite osnovno in nekaj višjih frekvenc!**
    1. Izberite zaslon DSO (osciloskop), izklopite proženje (trig: OFF), na obeh kanalih nastavite napetost na 5 V in time division na 20 ms.

2. Opazujete na zaslonu signal izmenične napetosti  $\sim 4$  V na kanalu CH 1! Izmerite njegovo frekvenco in amplitudo napetosti.
3. Nastavite napetost na variaciu približno na 90 V, da se motorček prične enakomerno vrteti. Opazujte signal iz tipala za vibracije, ki je pritrjeno na ploščadi elektromotorja! Ko je signal sinusen, ga zamrznite s pritiskom tipke na zaslonu na: OFF! Opazujte obliko signala! Izmerite glavno in višje frekvence s pomikanjem vertikalnih linij na zaslonu (povlečete se s kazalčkom z miško).

## 2. Naredite Fourierjevo analizo vibracij poskusnega sistema!

1. Preklopite zaslon na FFT ter izberite tipke: WAVE in ON.
2. Opazujte obliko signala. Naredite Fourierjevo analizo signala tako, da preklopite iz WAVE na FTT. Pokaže se črtast spekter. Ko je signal primeren, ga zamrznite s preklopom z ON na OFF. Izmerite nekaj glavnih frekvenc, jih zapišite in jih primerjajte s tistima, ki ste jih izmerili pri nastavitvi na DSO.

## 3. Poiščite lastno frekvenco sistema!

1. Napetost na variaciu povečujte od 90 do 250 V po korakih 10 V in pri vsakem koraku izmerite frekvenco in amplitudo. V bližini resonance (okrog 180 V) zmanjšajte korak na 2 V. Takrat naj obvezno prisostvuje asistent.
2. Narišite diagram odvisnosti amplitude pospeška od frekvence.

## 4. Spoznajte se z zakonodajo za dopustne vibracije!

1. Spoznajte se s škodljivim delovanjem vibracij na človeka.
2. Poiščite Pravilniku o varovanju delavcev pred tveganji zaradi izpostavljenosti vibracijam pri delu, Uradni list RS, št. 94/2005 ter navedite zahteve, ki jih mora glede na zahteve pravilnika za zmanjšanje izpostavljenosti vibracijam na delovnem mestu izpolnjevati delodajalec.

### 2.8.5 Vprašanja

1. Komentirajte ugotovitve.
2. Kratko opišite glavne značilnosti in parametre, ki jih uporabljajo standardi ISO za presojo dopustnosti izpostavljenosti človeka vibracijam. Odgovorite: kaj je "K" in kakšen je njegov pomen?
3. Glede na Pravilnik o varovanju delavcev pred tveganji zaradi izpostavljenosti vibracijam pri delu, Uradni list RS, št. 94/2005 navedite ukrepe, ki bi jih moral delodajalec izvajati, če bi na delovnem mestu izmeril raven vibracij, kot smo jih izmerili na vajah.

## 2.9 Merjenje koncentracije prahu v zraku

### 2.9.1 Naloga

Z osebnim dozimetrom in prenosnim merilnikom prahu zasledujete koncentracijo prahu v prašni komori.

### 2.9.2 Osnove

Disperzni sistemi so zmesi različnih snovi, različnih agregatnih stanj ali faz: trdne, tekoče, plinaste. Dvofazni sistemi imajo še druga specifična imena: suspenzija, aerosol, pena, emulzija. Disperzni sistem s fino razpršeno tekočo ("spray", megla) ali trdno fazo (prah, dim) v zraku imenujemo aerosol. V strokovni literaturi mejo med prahom in dimom ter meglo in "sprayem" predstavlja velikost delcev: če so v zraku razpršeni delci velikosti do 1  $\mu\text{m}$  govorimo o dimu, če so delci večji pa o prahu; oz. zmes kapljic do 10  $\mu\text{m}$  in zraka predstavlja "spray", če pa so kapljice večje pa meglo.

Iz Pravilnika o varovanju delavcev pred tveganji zaradi izpostavljenosti kemičnim snovem pri delu (Uradni list RS 100/2001 z dne 11. 12. 2001) ter Pravilnika o spremembah in dopolnitvah Pravilnika o varovanju delavcev pred tveganji zaradi izpostavljenosti kemičnim snovem pri delu (Uradni list RS 39/2005 z dne 19. 4. 2005, v nadaljevanju Pravilnik) lahko povzamemo:

**Prah** pomeni disperzno porazdeljene trdne snovi v zraku, ki nastanejo z mehanskimi postopki ali mešanjem. K prahovom prištevamo tudi dim iz termičnih ali kemičnih procesov. **Dim** pomeni disperzno porazdeljene trdne snovi v zraku, ki nastanejo s toplotnimi in/ali kemičnimi procesi/postopki. Vidimo lahko, da je Pravilnik v svojih definicijah nedosleden.

S pojmom prah v pogovornem jeziku pogosto poimenujemo vsako zmes trdne snovi in zraka. Tudi v nadaljevanju bomo zaradi boljše preglednosti uporabljali le pojem prah.

Praviloma je tak sistem razmeroma nestabilen, zato se prah iz zraka useda in ga je mogoče lažje odstraniti kot npr. hlape ali pline, ki z zrakom tvorijo homogeno zmes. Izjema so izredno drobni delci trdne ali tekoče faze v zraku, katerih velikost se približuje velikosti molekul v zraku in zato tvorijo razmeroma stabilno zmes. Dejstvo, da se prah v zraku obnaša kot tujek, je pomembno tudi za metode merjenja koncentracije prahu v zraku in za vpliv prahu na dihalni sistem.

Prah v okolju je škodljiv iz več razlogov:

- Škodljivo vpliva na naprave in orodja, ker povečuje obrabo zaradi povečane abrazije (brušenja) in trenja.
- Lahko povzroča eksplozije ali požare.
- Zaprašeno okolje vpliva na kakovost izdelka. V npr. optični in farmacevtski industriji ter v proizvodnji mikrovezij so ostre zahteve po brezprašnem okolju.
- Prah ljudi moti in jim lahko škoduje (motnje, bolezni, poklicne bolezni).

Tveganje za zdravstveno okvaro zaradi izpostavljenosti prahu je odvisno od več dejavnikov, predvsem od:

- koncentracije prahu v okolju,
- vrste prahu,
- granulacijskega spektra prahu,
- oblike delcev prahu,
- trajanja izpostavljenosti,
- načina dela.

Koncentracijo prahu v zraku praviloma izražamo gravimetrično kot maso merjene snovi v kubičnem metru zraka (npr.  $\text{mg}/\text{m}^3$ ). Izjema so vlaknasti delci, pri katerih koncentracijo izražamo s številom vlaken v kubičnem metru (azbest, steklena vlakna, vlakna mineralne volne).

Zaprašenosť v delovnem okolju ni povsod in stalno enaka, ampak je koncentracija odvisna od mesta in časa. Koncentracija je torej funkcija kraja in časa ( $c = f(x, y, z; t)$ ). Za oceno ogroženosti delavca je pomembna zlasti časovna odvisnost koncentracije prahu na mestu dela. Primer spreminjanja koncentracije s časom prikazuje slika 2.28.b).

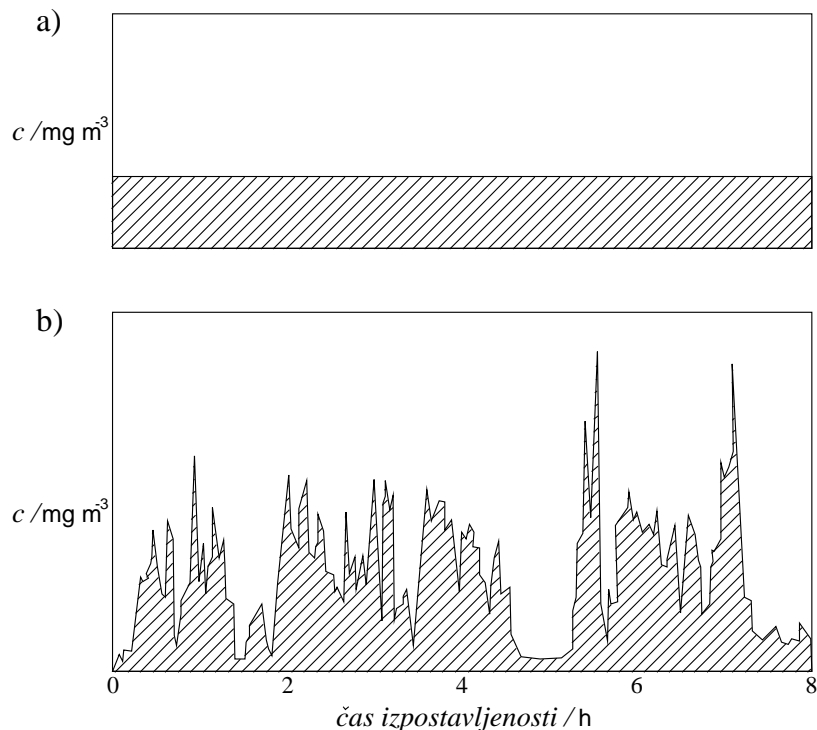
Prah se iz zraka s časom izloča pod vplivom težnosti, centrifugalne sile, temperaturnega gradienta ali električnega polja. Odvisno od velikosti delcev oz. aerodinamičnega premera se prah useda na različnih mestih oziroma različno globoko v dihalih.

Od celotnega prahu, ki pri nekem postopku nastaja, se zelo veliki delci zaradi težnosti izločijo (usedejo) iz zraka že v neposredni bližini mesta nastanka in zato niti ne dospejo v območje dihal. Ostali delci manj ali dalj časa lebdiijo v zraku in lahko dospejo tudi do dihal človeka. Od teh delcev ločimo v grobem dve frakciji, ki sta najpomembnejši za praktične namene nadzora zaprašenosťi v delovnem okolju. Pravilnik ju podaja takole:

- **Inhalabilna (inspirabilna ali groba) frakcija (I)** pomeni del celotnega prahu ali dima, ki ga delavec vdihne skozi usta iz območja vdihavanja.
- **Alveolarna (respirabilna ali fina) frakcija (A)** pomeni del vdihanega prahu ali dima, ki ga delavec vdihne skozi usta iz območja vdihavanja in ki vsebuje dovolj majhne delce, da pridejo v alveole (pljučne mešičke).

Kot inhalabilno v praksi šteujemo tisto frakcijo, ki jo vsrka (zajame) sesalna šoba instrumenta za merjenje prahu, če je volumski pretok vsesanega zraka  $1,7 \text{ dm}^3/\text{min}$  (včasih se definira tudi hitrost vsesanega zraka na ustju šobe:  $1,25 \text{ m/s}$ ). Inhalabilna frakcija je pomembna pri ocenjevanju tveganja tistih vrst prahu, ki lahko škodljivo delujejo že v zgornjih dihalnih poteh, ki se v dihalnem ali prebavnem traktu lahko topijo in tako preidejo v človekov organizem. Praviloma so to vse toksične snovi in tiste, ki dražijo in poškodujejo zgornje dihalne poti ali nosno votlino (spojine vanadija,





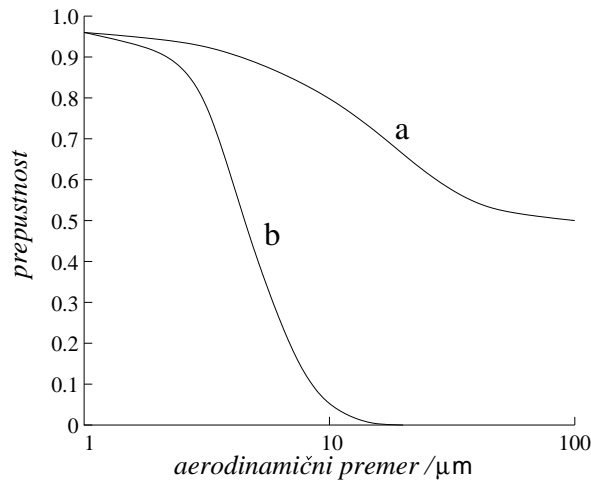
Slika 2.28: Primer časovnega poteka koncentracije v praksi; a) povprečna koncentracija, b) dejanska koncentracija. Šrafirani površini sta po definiciji povprečne vrednosti pri a) in b) enaki.

kromati). Enako velja za vse vrste prahov, ki škodljivo, dražeče ali obremenjujoče delujejo zlasti v zgornjih dihalih.

Alveolarna frakcija predstavlja del vdihanega prahu, ki uide obrambnemu sistemu gornjih dihalnih poti in se deponira v pljučnem tkivu na območju bronhiol in alveol. Ta frakcija je pomembna za vse vrste prahu, ki povzročajo škodljive posledice globoko v pljučih, npr. za fibrogeni prah, ki povzroča razraščanje in brazgotinjenje pljučnega veznega tkiva (kremen, barit, azbest).

Škodljivost prahu je odvisna od njegove vrste in koncentracije. Mera, s katero opišemo škodljivost določene snovi, je mejna vrednost ( $MV$ ). Priloga I Pravilnika pravi, da mejna vrednost pomeni povprečno koncentracijo nevarne kemične snovi v zraku na delovnem mestu, znotraj območja vdihavanja, ki na splošno ne škoduje zdravju delavca, če delavec dela pri koncentraciji nevarnih kemičnih snovi v zraku na delovnem mestu, ki je manjša ali enaka mejni vrednosti nevarne kemične snovi, 8 ur na dan 40 ur na teden polno delovno dobo, pri normalnih mikroklimatskih razmerah in pri fizično lahkem delu. Mejna vrednost velja za 8 urno izpostavljenost in je podana pri temperaturi  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  in tlaku  $1,013 \cdot 10^5\text{ Pa}$ . Za prah jo izražamo v  $\text{mg/m}^3$  ali ali številu vlaken v  $\text{m}^3$ .

Kratkotrajna vrednost ( $KTV$ ) pomeni koncentracijo nevarne kemične snovi v zraku na delovnem mestu znotraj območja vdihavanja, ki ji je delavec brez nevarnosti za zdravje lahko izpostavljen krajši čas. Izpostavljenost kratkotrajni vrednosti lahko traja



Slika 2.29: Značilna definicijska karakteristika za propustnost inhalabilne (a) in alveolarne (b) frakcije prahu.

največ 15 min in se ne sme ponoviti več kot štirikrat v delovni izmeni, med dvema izpostavljenostima tej koncentraciji pa mora preteči najmanj 60 minut. Kratkotrajna vrednost za prah se tudi izraža v  $\text{mg}/\text{m}^3$ , podana pa je kot mnogokratnik dovoljene prekoračitve mejne vrednosti.

Z vidika predpisov je *MV* številčno točno določena vrednost, ki je predpisana kot pravna norma. Tabela 2.10 podaja vrednosti *MV* za alveolarno oz. inhalabilno frakcijo ter *KTV* za nekatere vrste prahu, kot so navedene v Prilogi I Pravilnika.

vrsta prahu	<i>MV</i> /mg · m <sup>-3</sup>	<i>KTV</i>
antimon	0.5(I)	4
cinkov oksid	5(A)	4
grafit	6(A)	
kadmijeve spojine (bio razpoložljive)	0.03(I)	4
kositrove spojine	0.1(I)	
kremen	0.15 (A)	
lesni prah trdih lesov *	5(I)	4
lesni prah	5(I)	4
portlandski cement (prah)	5(I)	
silikagel	4(I)	
smukec-brez azbestnih vlaken	2(A)	
svinec-bio razpoložljiv **	0.1(I)	4
titanov dioksid	6(A)	
živo srebrove spojine (anorganske) ***	0.1 (I)	4
živo srebrove spojine (organske) ***	0.01 (I)	4

Tabela 2.10: Vrednosti *MV* in *KTV* za nekatere vrste prahu iz Priloge I Pravilnika.

\* Prah trdih lesov je kancerogen, zato je v Prilogi I Pravilnika opomba TDK, EU. To pomeni,

da je navedena vrednost dejansko tehnično dosegljiva koncentracija, ki je podana za rakotvorne snovi in pomeni koncentracijo snovi v zraku na delovnem mestu, ki je dosegljiva s stanjem tehnike in je določena je na ravni Evropske unije.

\*\* V Prilogi I Pravilnika je opomba BAT. To je okrajšava za biološko mejno vrednost, ki pomeni opozorilno raven nevarne kemične snovi in njenih metabolitov v tkivih, telesnih tekočinah ali izdihanem zraku, ne glede na to, ali je nevarna kemična snov vnesena v organizem z vdihavanjem, zaužitjem ali skozi kožo.

\*\*\* V Prilogi I Pravilnika je opomba K, BAT. Oznaka K pomeni, da ima snov lastnost lažjega prehajanja snovi v organizem skozi kožo.

$MV$  je največkrat določena na temelju epidemioloških študij na večjem ali manjšem vzrocu populacije ljudi ali na živalih in je zato ne moremo jemati kot ostro ločnico med absolutno neškodljivim in absolutno škodljivim okoljem. Razen tega so posamezniki za škodljive vplive različno dojemljivi. Pri nekaterih škodljivih snoveh lahko postanejo posledice obremenitve z določeno snovjo očitne šele pri poznejših generacijah, čeprav je bila ekspozicija človeka nižja od sedaj veljavne  $MV$ .  $MV$  je torej potrebno uporabljati kritično in previdno.

Za škodljivost je pomembna obremenitev dihal. Zato moramo pri uporabi  $MV$  upoštevati tudi težo dela (minutni volumen vdihavanja zraka).

V praksi uporabljamo za hitro in nazorno predstavitev stanja v delovnem okolju pojem prekoračitve  $MV$ , ki ga označimo z  $i$  in je definiran z enačbo:

$$i = c/MV. \quad (2.110)$$

Delovno okolje je v smislu predpisov varno, če je prekoračitev  $i \leq 1$ .

Praviloma v zraku ni samo ena vrsta snovi, ampak je prah zmes več vrst delcev prahu. Pri pogoju, da vse vrste v zraku prisotnega prahu na organizem delujejo enako ali podobno (npr. vse fibrogeno ali vse toksično), je zaprašenosť v predpisanih mejah, če je:

$$i = \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{MV_i} \leq 1. \quad (2.111)$$

Kadar različne vrste prahu delujejo na organizem na popolnoma različni način, uporaba formule (2.111) ni smiselna, ampak za nobeno od teh snovi posebej prekoračitev ne sme preseči vrednosti 1.

Meritev zaprašenosťi v delovnem okolju zahteva veliko znanja in izkušenj. Predvsem moramo poznati proizvodni postopek in v njem udeležene snovi, da vemo, za kakšno vrsto prahu gre. Tako lahko predvidevamo škodljivi učinek prahu na človeka in si izberemo najprimernejši kraj, čas in trajanje merjenja.

Vzorčenje mora v vsakem primeru trajati vsaj eno uro, da se izravnajo naključna nihanja koncentracije med meritvijo, ki jih pogojujejo spremembe dela ter smeri in hitrosti zračnega toka, ki raznašajo prah po prostoru. Merilnik izberemo glede na škodljivi učinek prahu na človeka:

- Če je prah toksičen oz. deluje škodljivo na zgornje dihalne poti, moramo uporabiti merilnik za merjenje inhalabilne frakcije (tudi če prah deluje škodljivo na sluznice, kožo, oči ipd.).

- Za fibrogeni prah ali prah, ki učinkuje izrazito na pljuča, moramo izbrati izključno merilnik alveolarne frakcije.

Sodobni merilniki omogočajo meritve obeh frakcij z uporabo ustreznega ustja za posamezno frakcijo (običajno ciklon, kaskadni impaktor ali horizontalni elutriator).

Za snovi, ki so navedene v Pravilniku, nam izbiro merilnika olajšata tudi oznaki za inhalabilno (I) in alvearno (A) frakcijo.

### 2.9.3 Oprema in pripomočki

- prašna komora z ventilatorjem
- osebni dozimeter za merjenje koncentracije inhalabilnega prahu
- rotameter za kontrolo volumskega pretoka zraka
- Prenosni merilnik prahu (DustTrack<sup>TM</sup> Aerosol Monitor TSI Model 8520)
- analitska tehtnica

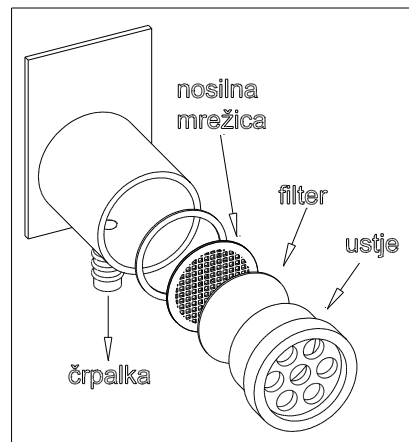
#### 2.9.3.1. Osebni dozimeter za merjenje koncentracije inhalabilnega prahu

Glavni sestavni deli osebnega dozimetra so:

- glava z ustjem in filtrom (slika 2.30),
- črpalka z regulatorjem in merilnikom pretoka.

Iz razlike mase filtra pred in po vzorčenju izračunamo maso prahu, ki se je v tem času nabrala. Kot rezultat podamo koncentracijo prahu, ki jo izračunamo:

$$c \left[ \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right] = \frac{\text{masa prahu} [\text{mg}]}{\text{pretok} [\text{l}/\text{min}] \cdot 10^{-3} \cdot \text{čas} [\text{min}]} \quad (2.112)$$



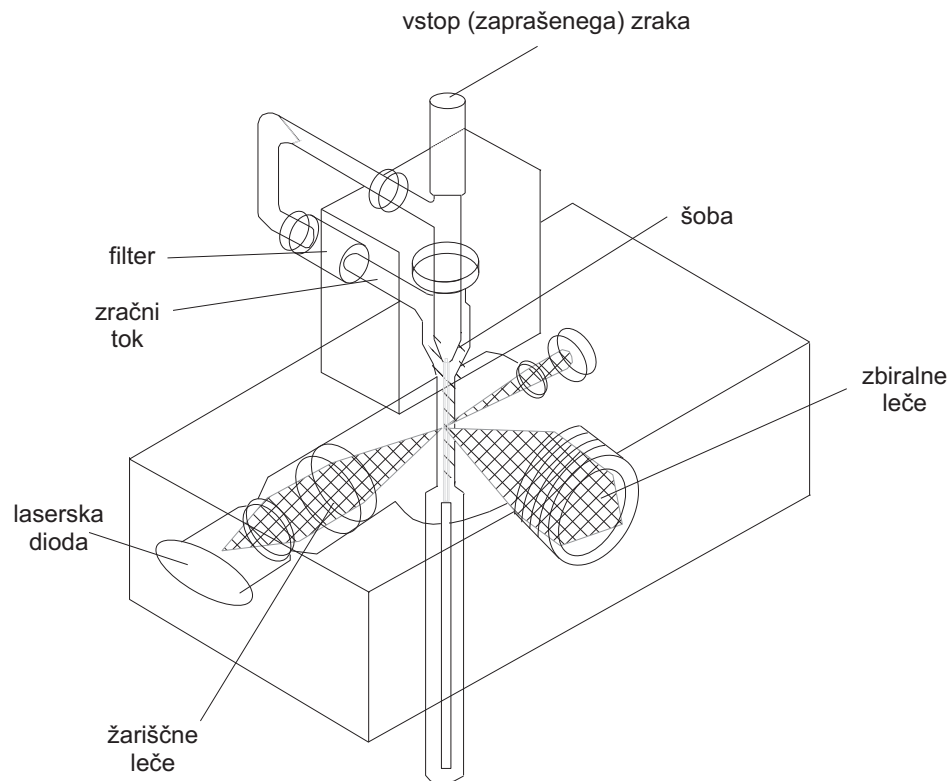
Slika 2.30: Konstrukcija glave s filtrom in ustjem za merjenje koncentracije inhalabilnega prahu.

#### 2.9.3.2. Stacionarni laserski merilnik za določanje koncentracije alveolarnega prahu (DustTrack<sup>TM</sup> Aerosol Monitor TSI Model 8520)

Merilnik za merjenje prahu DustTrack 8520 (slika 2.31) je prenosni laserski fotometer.

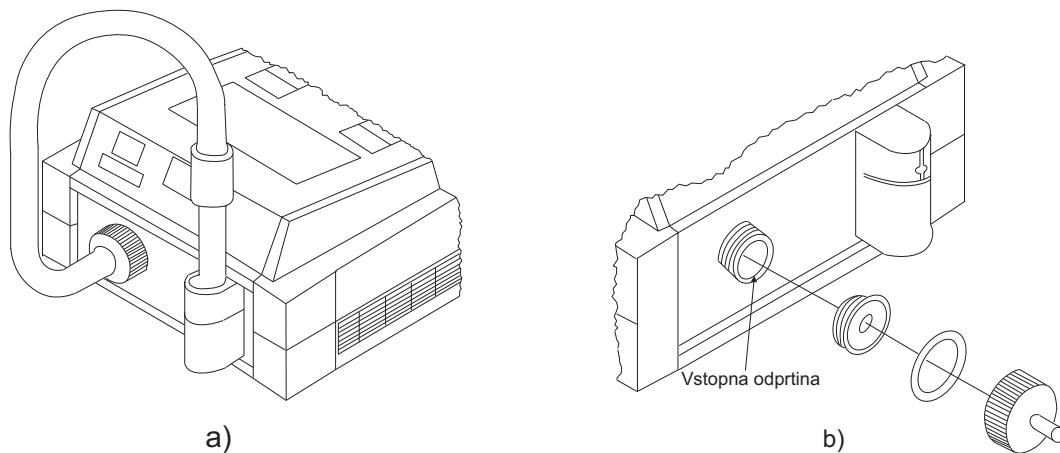
Izvor laserske svetlobe je laserska dioda, ki je usmerjena v aerosolni tok. Laserska svetloba se sipa na delcih v zaprašenem zraku. Večja je koncentracija sipalcev v zraku, intenzivnejše je sipanje; odvisno pa je tudi od velikosti delcev.

Razpršena svetloba se zbira preko leč na fotodetektorju, ki je glede na snop svetlobe postavljen pod kotom 90°. Intenzivnejše je sipanje, močnejši je signal na detektorju.



Slika 2.31: Shema stacionarnega laserskega merilnika za določanje koncentracije alveolarnega prahu (DustTrack<sup>TM</sup> Aerosol Monitor TSI Model 8520).

Rezultat meritve odčitamo na zaslonu v  $\text{mg}/\text{m}^3$  delcev v zraku. Glede na uporabo ustja merilnika (slika 2.32), ki zadrži grobe delce, lahko ocenimo koncentracijo delcev v zraku tudi po velikosti. Z uporabo ciklona je velikostni prag, podan z aereodinamičnim premerom merjenih delcev,  $4 \mu\text{m}$  pri pretoku  $1.7 \text{ dm}^3/\text{min}$  in z uporabo impaktorja  $1$  oz.  $2.5 \mu\text{m}$ .



Slika 2.32: Izvedba ustja merilnika s ciklonom in impaktorjem.

### 2.9.4 Potek dela

V prašni komori ustvarite zaprašeno okolje! Filter osebnega dozimetra pred vzorčenjem v tehtiču natančno stehtajte. Nato ga s pinceto vložite na nosilno mrežico v glavo. Ko merilnik vklopite (zvežete z baterijo), začnete meriti čas vzorčenja s štoparico. Črpalka osebnega dozimetra črpa zaprašeni zrak skozi ustje in glavo, prah se nabira na filtru. Med vzorčenjem kontrolirajte, če je pretok konstanten ( $1,7 \text{ dm}^3/\text{min}$ ). Prah namreč maši pore v filtru, ki tako predstavlja za tok zraka dodatni upor. Po približno eni uri (če se filter ne zamaši prej - odvisno od zaprašenosti v komori) izklopite črpalko in istočasno ustavite štoparico. Filter s prahom previdno s pinceto prenesite v tehtič in ponovno stehtajte. Iz razlike mase filtra pred in po vzorčenju izračunajte maso prahu, ki se je v tem času nabrala. Kot rezultat podajte koncentracijo prahu, ki jo izračunate po enačbi (2.112). Koncentracijo katere frakcije prahu ste izmerili? Ocenite napako in ugotovite, katera količina najbolj vpliva na točnost rezultata.

Z merilnikom DustTrack<sup>TM</sup> Aerosol Monitor TSI Model 8520 vsakih 10 minut izmerite koncentracijo prahu v komori (vsaj 10 meritev). Pred uporabo skrbno preberite navodila in se ravnajte po napotkih asistenta.

Navodila za uporabo DustTrack<sup>TM</sup> Aerosol Monitor TSI Model 8520:

1. Pritisnite gumb ON/OFF (vklop). Program na začetku preveri delovanje merilnika. V primeru, da pride do napake izpiše na zaslonu SERVICE. O napaki se takoj posvetujte z asistentom!
2. Preveri nastavitvev TIME CONSTANT. Privzeta nastavitvev je 10 sekund. To pomeni, da merilnik prikaže povprečje vzorčenja za zadnjih 10 sekund. Časovno konstanto lahko nastavite na 1, 5, 10, 15 ali 30 sekund.
3. Meritev začnemo s pritiskom na gumb SAMPLE.
4. Po preteku izbranega časa na zaslonu odčitajte koncentracijo (v  $\text{mg}/\text{m}^3$ ).
5. Meritev zaključite s pritiskom na gumb SAMPLE.
6. Ko je vzorčenje končano merilnik avtomatično prikaže statistiko (povprečje, minimum, maksimum in čas vzorčenja) vzorca. Vrednosti odčitajte tako, da pritisnete gumb STATISTICS.
7. Merilnik izključite pritiskom na ON/OFF.

Narišite diagram, kot je na sliki 2.28b in ocenite povprečno koncentracijo prahu.

### 2.9.5 Vprašanja

1. Zakaj se vrednost, določena z osebnim dozimetrom, razlikuje od ocenjene povprečne koncentracije, določene z merilnikom DustTrack<sup>TM</sup> Aerosol Monitor TSI Model 8520?
2. Ali je bila presežena vrednost  $MV$ ? Kolikšna je prekoračitev?

3. Katera frakcija je v našem primeru odločujoča za oceno škodljivosti?
4. Kakšne so prednosti in pomanjkljivosti DustTrack<sup>TM</sup> Aerosol Monitor TSI Model 8520?
5. V kakšnem primeru bi se odločili za uporabo enega ali drugega merilnika?

## 2.10 Piroliza in temperatura plamena

### 2.10.1 Naloga

1. Spoznajte se s pirolizo lesa.
2. Izmerite temperaturo lesnih sekancev med segrevanjem.
3. Izmerite temperaturo plamena.
4. Ocenite količino plina, ki nastaja ob pirolizi.

### 2.10.2 Osnove

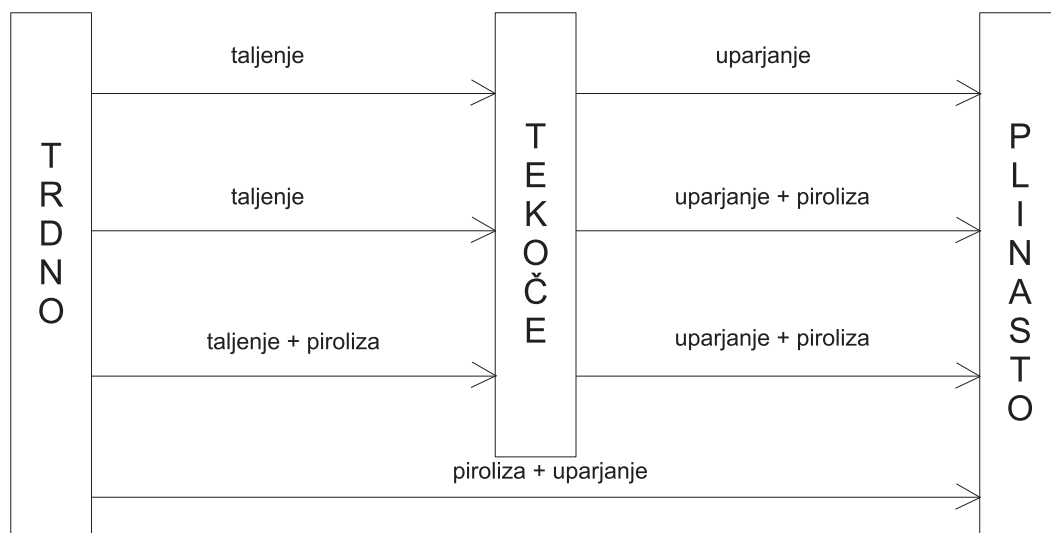
#### 2.10.2.1. Gorenje in piroliza

Pri gorenju gre za kemijsko reakcijo, pri kateri se gorivo in kisik spajata v zgorevalne produkte. Vsi zgorevalni procesi so eksotermni-sprošča se toplota. Sproščeno energijo imenujemo zgorevalna (tudi sežigna) toplota in jo definiramo kot celotno količino toplote, ki se sprosti, ko enota goriva (mol, kg) zgori (oksidira) v celoti.

Gorenje ostalih trdnih goriv navadno poteka s tvorbo plinastega goriva, ki zgoreva s plamenom. Uplinjanje lahko poteka z uparjanjem ali pirolizo. Piroliza je termični razkroj polimernih molekul pri višji temperaturi trdne snovi.

Prehod trdnega goriva v plinasto je odvisen od vrste goriva, kot prikazuje slika (2.33).

Snovi z nizkim tališčem se pri segrevanju raztalijo, nato gorijo kot tekočine, to je z uparjanjem na površini, pare pa zgorevajo v vzgonskem plamenu (vosek, parafin). Pri nekaterih raztaljenih trdnih gorivih, ki imajo višje vrelišče, pride pri uplinjanju poleg uparjanja tudi do pirolize. Delno se lahko pojavi piroliza tudi že obenem s taljenjem. Trdno gorivo, ki se pri segrevanju ne raztali, se uplinja samo s pirolizo.



Slika 2.33: Prehod trdnega goriva v plinasto.



Plinasto gorivo, ki nastaja pri pirolizi trdnega goriva je zmes številnih snovi. Nekatero od teh so plini ali lahko hlapne tekočine in jih sestavljajo enostavne molekule (vodik, ogljikov monoksid, etilen). Druge so tekočine z veliko molekulsko maso, so težko hlapne in izhlapevajo samo pri visoki temperaturi na površini trdne snovi, iz katere nastajajo. Pri gorenju tudi te snovi zgorijo v plamenu.

Pri samostojnem gorenju je za potek pirolize potrebna toplota, ki doteka iz plamena kot pri gorenju tekočin.

Hitrost zgorevanja je odvisna od hitrosti uplinjanja. Hitrost samostojnega zgorevanja je:

$$\dot{m} = \frac{q_{pl} - q_{iz}}{U}, \quad (2.113)$$

kjer je  $U$  je toplota uplinjanja,  $\dot{m}$  predstavlja hitrost samostojnega zgorevanja v  $\text{kg/m}^2\text{s}^2$ ,  $q_{pl}$  je toplotni tok, ki ga oddaja plamen (v  $\text{W/m}^2$  in  $q_{iz}$  toplotni tok, ki se izgublja v okolici (v  $\text{W/m}^2$ ).

Površina goreče tekočine se lahko segreje le do vrelišča, površina trdne snovi se lahko segreje višje in piroliza lahko poteka. Temperatura površine goreče trdne snovi je navadno nad  $350^\circ\text{C}$ , zato so tudi izgube toplote s površine v notranjost goriva ( $q_{iz}$ ) večje. Tudi toplota uplinjanja ( $U$ ) je večja, ker vključuje toploto za pirolizo in toploto za uparjanje. Hitrost zgorevanja je zato ob enakih pogojih manjša kot pri tekočinah.

Toplotne izgube ( $q_{iz}$ ) so lahko tako velike da toplotni tok iz plamena na površino goriva ( $q_{pl}$ ) ne zadostuje za pokrivanje izgub in za uplinjanje ( $U$ ). Uplinjanje se zmanjša in plamen ugasne. Sama goreča snov ne daje dovolj toplote za samostojno gorenje. V takih primerih je gorenje mogoče samo ob dodatnem zunanem viru toplote (npr. gorenje v okolici), kar lahko pokažemo z enačbo:

$$\dot{m} = \frac{q_z + q_{pl} - q_{iz}}{U}, \quad (2.114)$$

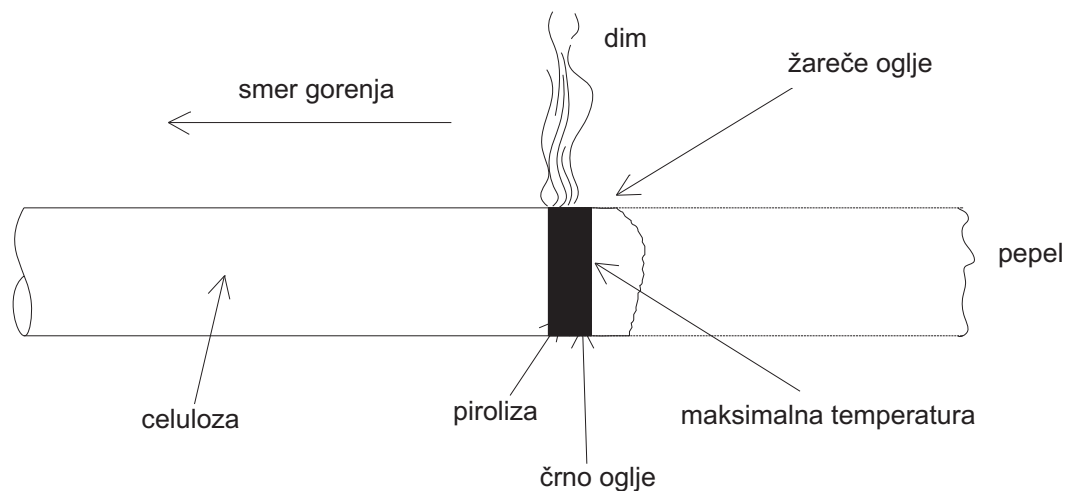
kjer je  $q_z$  toplotni tok iz zunanjega vira.

Ker je sevanje prevladujoč način prenosa toplote, je za samostojno gorenje pomembna emisivnost plamena. Emisivnost plamena in toplota uplinjanja sta lastnosti goriva, na katere okolje malo vpliva.

Samostojno gorenje s tlenjem (brez plamena) lahko poteka pri poroznih snoveh, ki pri pirolizi tvorijo trdno oglje. Takih snovi je veliko (celuloza, papir, žaganje, iverne plošče, pena iz lateksa, pena iz plastičnih snovi). Potek samostojnega tlenja lahko opazujemo na palici iz celuloznih vlaken.

Med zgorevanjem se pojavijo tri območja:

- Območje pirolize. Snov se segreva, začne se piroliza, produkti pirolize pa odtekaajo nezgoreli.
- Pooglenelo območje. Nastajanje produktov pirolize preneha, oglje zažari.
- Območje poroznih ostankov oglja in/ali pepela ne žari več in se ohlaja.



Slika 2.34: Primer gorenja palice iz celuloznih vlaken.

Za pooglenitev večine organskih snovi je potrebna temperatura 280 do 300 °C. V pooglenem območju, kjer poteka gorenje oglja (površinska oksidacija), nastopijo najvišje temperature. Temperatura tlenja celuloznih snovi v mirnem zraku je 600 do 700 °C. Toplota se prevaja v svežo celulozo in začne se piroliza.

### 2.10.2.2. Gorenje lesa

Za razliko od sintetičnih polimerov je les nehomogen material. To je zmes naravnih polimerov z veliko molsko maso. Glavne sestavine so:

- celuloza (polimer heksoznega sladkorja)( $\approx 50\%$ ),
- hemiceluloza (polimer pentoznega sladkorja)( $\approx 25\%$ ),
- lignin (bolj komplicirana sestava)( $\approx 25\%$ ).

Hlapni produkti pirolize se začnejo izločati iz teh polimerov pri različni temperaturi:

- iz hemiceluloze pri 200 do 260 °C,
- iz celuloze pri 240 do 350 °C,
- iz lignina pri 280 do 500 °C.

Pri pirolizi čiste celuloze pri 300 °C ostane okrog 5 % oglja. Pri pirolizi lignina med 400 in 450 °C se ga uplini samo 50 %, ostalo je oglje. Pri lesu kot celoti pri pirolizi nad 480 °C ostane 15 do 25 % kot oglje, večino tega nastaja iz lignina. Pri pirolizi 100 kg lesa nastane 60 do 80 m<sup>3</sup> plinastih snovi. Plinasti produkti pirolize so:

- gorljivi plini (vodik, ogljikov monoksid, metan idr.),
- inertni plini (ogljikov dioksid, dušik idr.),

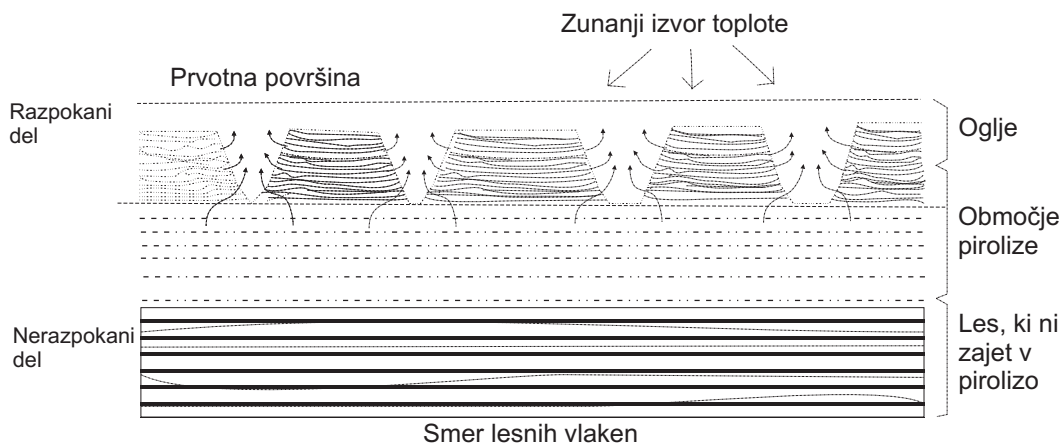
- uparjene tekočine (metanol, očetna kislina, aceton, smole) in
- trdni ostanek (ogljik in pepel).

Sestava produktov pirolize je odvisna od temperature (hitrosti zgorevanja), od vrste in količine anorganskih snovi v lesu. Spreminja se vrsta hlapnih snovi, nastajanje oglja in kot posledica tega se spremeni tudi obnašanje lesa pri gorenju (impregnacija lesa za zmanjšanje gorljivosti).

Ko se nabere sloj oglja, ta varuje (toplotno izolira) neprizadeti les pod njim in za uplinjanje je potreben večji toplotni tok in zato višja površinska temperatura. Višja temperatura površine pomeni večjo izgubo toplote. Površinska oksidacija oglja pa nekaj prispeva k toplotni bilanci.

Številne lastnosti lesa se spreminjajo s smerjo - vzdolžno ali prečno (npr. natezna trdnost). Toplotna prevodnost lesa je vzdolžno dvakrat večja kot prečno pravokotno na vlakna. Še večja je razlika v propustnosti plinov (1000 krat). Pare, ki nastajajo pod površino, veliko lažje stečejo vzdolžno kot pa pravokotno na površino. Pojav curkov par in plamena na koncu gorečega lesa ali ob grči to dokazuje.

Že dolgotrajno segrevanje na temperaturo nad 120 °C ima določen učinek na strukturo lesa. Les se obarva in začne ogleneti pri temperaturi nad 200 do 250 °C. Fizikalna struktura se začne hitro spreminjati pri temperaturi nad 300 °C. V oglju se najprej na poogljeneli površini pojavijo prečne razpoke pravokotno na smer lesnih vlaken. To param omogoči, da lahko uidejo iz sloja, kjer poteka piroliza.



Slika 2.35: Primer gorenja palice iz celuloznih vlaken.

Razpoke se postopno širijo, ko se sloj oglja debeli, kar vodi do značilne oblike, ki ji pogosto pravijo *krokodilja koža*.

Gorenje lesa je očitno veliko bolj komplicirano kot gorenje sintetičnih polimerov, tudi če ti pooglenijo. Sestavljenost lesa oteži predstavitev obnašanja pri gorenju z enačbo (2.114).

Enačba hitrosti uplinjanja in s tem gorenja bi bila ob prisotnosti sloja oglja veliko bolj komplicirana. Upoštevati je treba tudi medsebojni vpliv sloja vročega oglja in lesa. Oglje na površini oksidira že pri majhni koncentraciji kisika, ki pride do površine.

To prispeva nekaj toplote za uplinjanje (pirolizo) lesa in zmanjša potrebno toploto iz plamena.

Oglje, ki nastaja na površini, gori z žarenjem tudi še potem, ko plamen ugasne. Pri lesu se precejšen del zgorevalne toplote (okrog 30 %) sprosti z žarenjem preostalega oglja.

Pogosto se dogaja, da debela plošča lesa ne gori samostojno. Toplota iz plamena približno pokriva toplotne izgube iz te ploskve, uplinjanje pa se ne more nadaljevati. Gorenje lahko poteka le s pomočjo sevanja ali konvekcije toplote iz drugega vira (npr. iz plamena sosednje goreče površine). Tanki kosi lesa (letvice, vžigalice) se razmeroma lahko vnamejo in gorenje se nadaljuje samostojno tudi po odstranitvi izvora toplote. Izguba toplote s površine v notranjost lesa je v tem primeru minimalna.

### 2.10.3 Oprema in pripomočki

- epruveta na prižemi
- plinski gorilnik
- lesno žaganje
- toplotna kamera s pirometrom

### 2.10.4 Potek dela

1. V epruveto vsujete lesno žaganje in epruveto vpnete v prižemo na stojalu.
2. Prižgite plinski gorilnik in ga postavite pod epruveto.
3. Zabeležite čas začetka izvedbe vaje.
4. S termo kamero (ali pirometrom) izmerite temperaturo plamena, ki ga oddaja plinski gorilnik.
5. Opazujte lesno žaganje ter beležite spremembe.
6. Ko začne lesno žaganje postajati temno rumeno, z vžigalnikom poskusite vžgati pirolizne pline. Postopek ponavljajte, dokler se plini ne vžgejo.
7. Opazujte barvo in velikost plamena med zgorevanjem piroliznih plinov.
8. S termo kamero (ali pirometrom) izmerite temperaturo plamena med zgorevanjem piroliznih plinov.

### 2.10.5 Vprašanja

1. Opišite proces pirolize lesnega žaganja, ki ste ga uporabili na vaji!
2. Kako temperatura vpliva na začetek in razvoj pirolize?
3. Kako bi na začetek pirolize vplivala večja vlažnost lesnega žaganja?

4. Pri kakšni temperaturi bi stekla oksidacija ostankov lesnega žaganja, ki so po zaključku vaje še bili v epruveti?

## 2.11 Ocena razmer v delovnem okolju

### 2.11.1 Naloga

Ocenite razmere v delovnem prostoru.

### 2.11.2 Osnove

Razmere v delovnem prostoru določajo dejavniki, ki jih delimo na:

1. fizikalne:
  - mikroklima
  - hrup
  - vibracije
  - osvetlitev
  - neionizirana sevanja
  - ionizirna sevanja
2. kemične:
  - prah
  - plini in pare v zraku
3. biogene škodljivosti :
  - virusi
  - bakterije
  - paraziti itd.

Razen teh dejavnikov, ki jih imenujemo dejavniki delovnega okolja v ožjem pomenu na razmere vplivajo še drugi, kot je organiziranost, oblikovna zasnova, motiviranost, odnosi med ljudmi itd. Dejavniki, ki določajo razmere v ožjem pomenu, so predpisani. Ali so razmere v predpisanih mejah, ugotovimo z meritvami. Meritve ločimo na:

- prve (za obratovalno dovoljenje, ob vsaki spremembi stanja) in
- periodične, s predpisanimi najdaljšimi roki.

Meritve opravimo tako, da lahko z minimalnimi potrebnimi sredstvi odgovorimo za vsakega delavca v podjetju, ali so dejavniki okolja na njegovem delovnem mestu v predpisanih mejah ali ne.

Meritve posameznih dejavnikov ne dajejo vedno odgovora na vprašanje, ali je delavec v povprečju izpostavljen škodljivim vplivom le toliko, da so dejavniki v dovoljenih mejah. Razmere se neprestano spreminjajo in v primeru, da je rezultat meritve blizu mejne vrednosti, ena sama meritev ne da dovolj zanesljivega odgovora. V takšnem primeru so poleg prvih in periodičnih meritev potrebne še kontrolne meritve.

### 2.11.3 Oprema in pripomočki

1. termometer
2. rotacijski psihrometer
3. merilnik hitrosti gibanja zraka
4. merilnik hrupa
5. luksmeter
6. indikatorske cevke
7. merilnik za prah

### 2.11.4 Potek dela

Vajo bomo opravljali v proizvodnih prostorih ene slovenskih tovarn. Pred preiskavami delovnega okolja si naredimo načrt meritev. V njem označimo, katere meritve so potrebne in na katerih mestih. Po tem načrtu izvedemo meritve fizikalnih in kemijskih veličin, s katerimi ocenimo posamezne dejavnike delovnega okolja. Izberemo delovni prostor, naredimo načrt meritev in ocenimo rezultate.

Naredi načrt meritev.

Pri delu si pomagamo z vnaprej pripravljenimi obrazci. Najprej vpišemo pomembne splošne podatke: datum, ime in vrsto podjetja, oddelek, delovni prostor ter čas začetka in na konca meritev, temperaturo zraka in relativno vlažnost na prostem ob začetku in koncu meritev. Pred in po merjenju naravne osvetljenosti izmerimo in zapišemo še zunanjo osvetljenost severnega neba.

Pri meritvi v obrazec vpišite mesto merjenja (pazite, da bo vpis nezamenljiv in dovolj jasen) ter ustrezne rezultate meritev, ki so potrebne (so relevantne) na preiskovanem delovnem metu. Po potrebi dodajte opombe.

Po opravljenih meritvah opravite potrebne dodatne analize vzorcev in iz zbranih podatkov izračunajte končne kazalce relevantnih razmer. Poiščite in navedite predpise mejnih vrednosti. Naredite zaključke z ugotovitvami, ali so parametri v predpisanih mejah. Posebej navedite tiste, ki niso in zahtevajte ukrepe.

	delovno mesto	mikroklima						osvetlitev			
		$T_{120}$	$T_{10}$	$T_{vl}$	$T_g$	$v$	$T_{ef}$	$PMV$	$E_{um}$	$E_{komb}$	$E_{nar}$
1											
2											
3											
4											
5											
6											
		$T_{zun} =$						$E_{zun} =$			

	delovno mesto	hrup				prah		
		$t$	$SPL$	$L_{Aeq}$	$L_{min}$	$L_{max}$	$c$	$MV$
1								
2								
3								
4								
5								
6								



# Dodatki

## A Delovanje naprav

### A.1 Uporovni listič

Uporovni listič uporabljamo za merjenje deformacij raznih podlag. Narejen je tako, da je nanj pritrjena zvita prevodna žička (glej sliko A.1). Pritrjen na podlago (ponavadi je prilepljen). Če se podlaga deformira, se z njo deformirata tudi listič in žička. Zato se žički spremeni upornost. Spremembo upornosti merimo na primer z Wheatstonovim mostom. Sprememba upornosti je sorazmerna deformaciji. Razložimo!

Upornost žice je sorazmerna njeni dolžini  $l$  in obratno sorazmerna preseku  $S$ :

$$R = \zeta \frac{l}{S}. \quad (\text{A.1})$$

Sorazmernostni koeficient  $\zeta$  imenujemo specifična upornost in je za različne snovi različna. Radi bi vedeli, kako je sprememba upora odvisna od spremembe dolžine in preseka, zato enačbo (A.1) logaritmujemo in odvajamo:

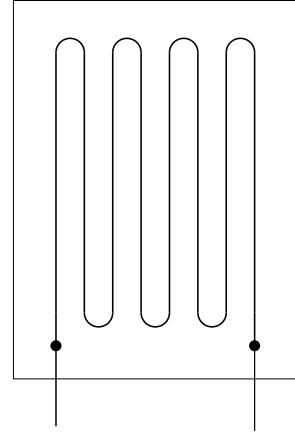
$$\ln R = \ln \zeta + \ln l - \ln S, \quad (\text{A.2})$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\zeta}{\zeta} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S}. \quad (\text{A.3})$$

Upoštevamo še  $dS/S = 2dD/D$ , kjer je  $D$  premer žice, in definicijo Poissonovega števila  $\mu = -(dD/D)/(dl/l)$ , ki pove, koliko se pri raztegovnju žice spreminja njen premer. Vse naštetu združimo v izraz:

$$\frac{dR}{R} = \left( 1 + 2\mu + \frac{d\zeta/\zeta}{dl/l} \right) \frac{dl}{l}. \quad (\text{A.4})$$

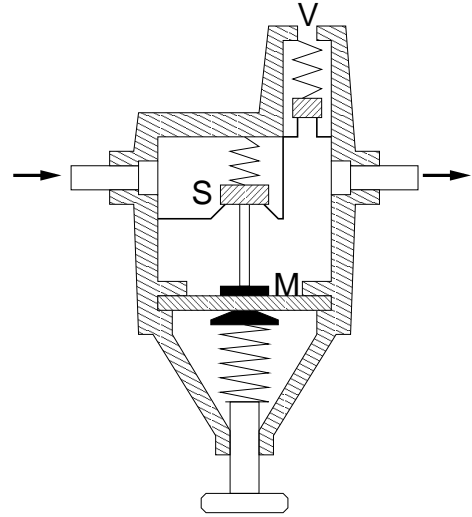
Torej relativna sprememba upornosti ( $dR/R$ ) je sorazmerna relativni spremembi dolžine žičke ( $dl/l$ ). Izraz v oklepaju je sorazmernostni koeficient. Njegov prvi člen odraža spreminjanje upornosti zaradi spreminjanja dolžine žice, drugi zaradi spreminjanja njenega preseka, tretji člen pa opisuje tako imenovani peizorezistivni pojav, ko se specifična upornost snovi zaradi deformacije spreminja.



Slika A.1: Uporovni listič.

## A.2 Reducirni ventil

Reducirni ventil je priprava, ki nek visok tlak (npr. v jeklenki) zmanjša na delovni tlak in ga vzdržuje. Zgradbo reducirnega ventila pojasnjuje slika A.2. S spodnjim vijakom stisnemo pero (vzmet), ki pritisne na membrano M. Ta se vboči in dvigne tesnilo, ki zapira odprtino S. Zato skoznjo začne pritekati plin. Če je pritok plina večji od porabe, tlak plina v ventilu naraste, plin potisne membrano navzdol in zmanjša oziroma ustavi dotok plina. Na ta način ostaja tlak v ventilu konstanten. Reducirni ventil ima tudi varnostni ventil, ki se odpre, ko tlak v reducirnem ventilu naraste prek največje dovoljene vrednosti.



Slika A.2: Reducirni ventil.

## A.3 Wheatstonov most

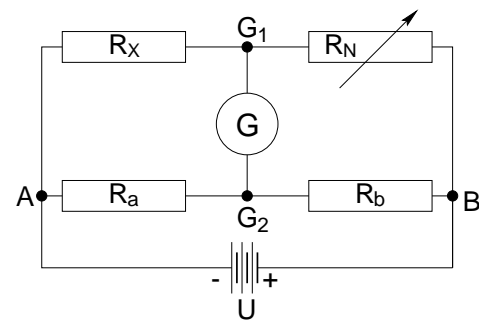
Wheatstonov most je naprava za natančno merjenje uporov. Vezje ima dve veji s po dvema upornikoma (glej sliko A.3). En upornik (merjeni) je neznan, trije pa so znani. Med znanimi uporniki je ponavadi vsaj eden spremenljiv (obstaja veliko različnih izvedb). Galvanometer (občutljiv merilnik toka) je kot most vezan med obe veji. Upornost neznanega upornika izmerimo tako, da spreminjamo spremenljiv upor, dokler galvanometer ne kaže nobenega toka. Takrat je med priključkoma galvanometra  $G_1$  in  $G_2$  napetost enaka nič. Zato je napetost med točkama A in  $G_1$  enaka napetosti med A in  $G_2$ . Tudi napetost med B in  $G_1$  je enaka napetosti med B in  $G_2$ . Z Ohmovim zakonom zapišemo:

$$I_1 R_x = I_2 R_a \quad \text{in} \quad I_1 R_N = I_2 R_b. \quad (\text{A.5})$$

Enačbi delimo in dobimo:

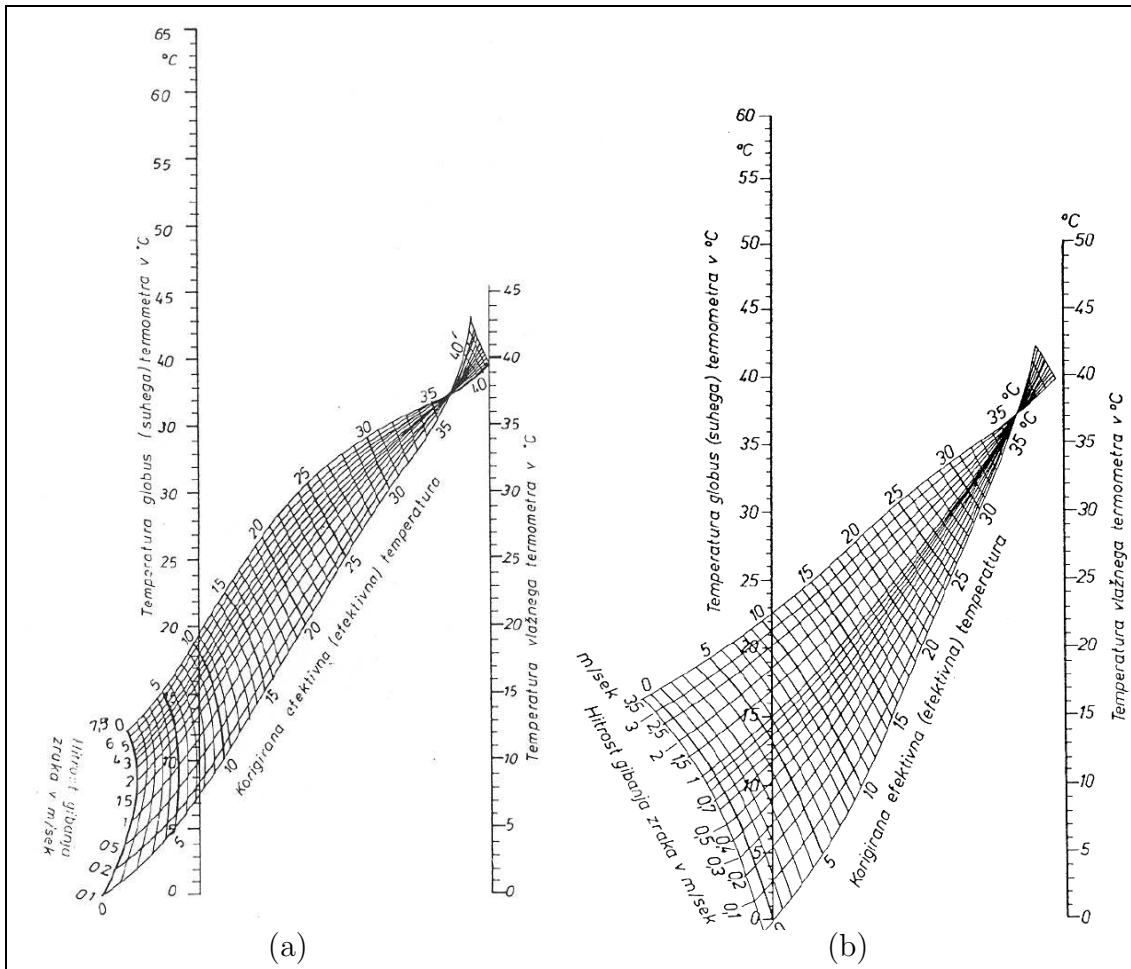
$$R_x = R_N \frac{R_a}{R_b}. \quad (\text{A.6})$$

Občutljivost in natančnost Wheatstonovega mostu sta najboljši, ko so vsi štiri upori približno enako veliki.

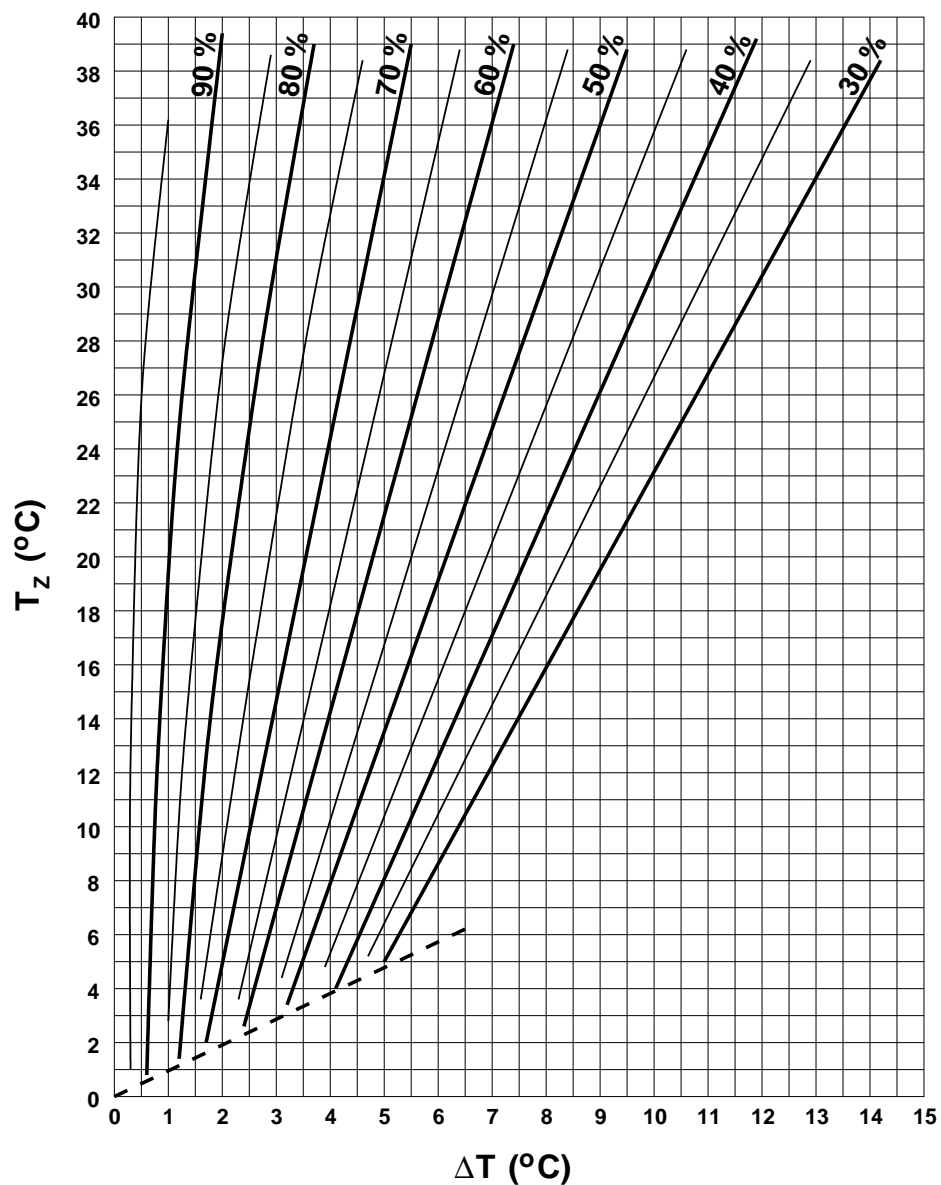


Slika A.3: Shema Wheatstonovega mostu.

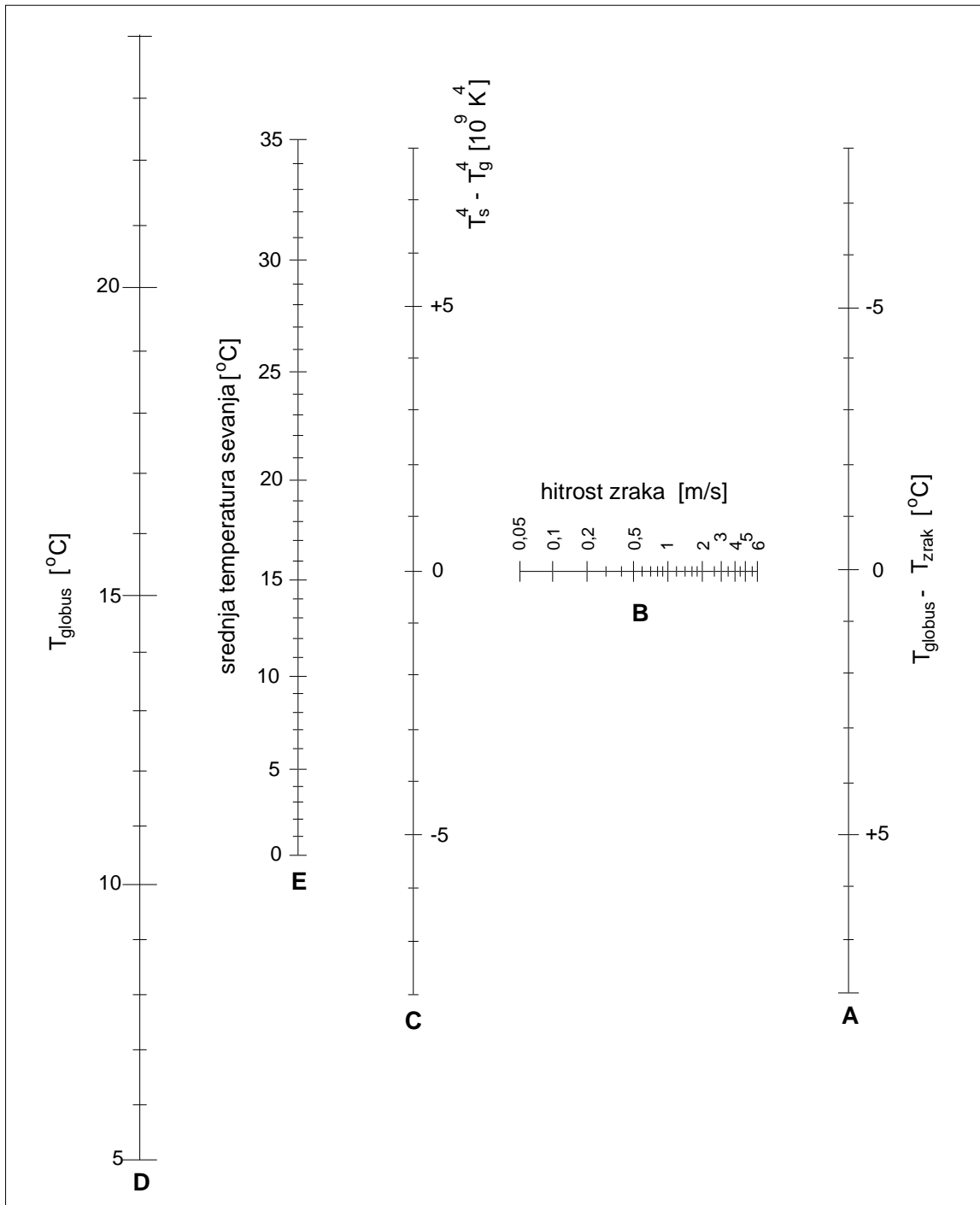
## B Razni diagrami in nomogrami



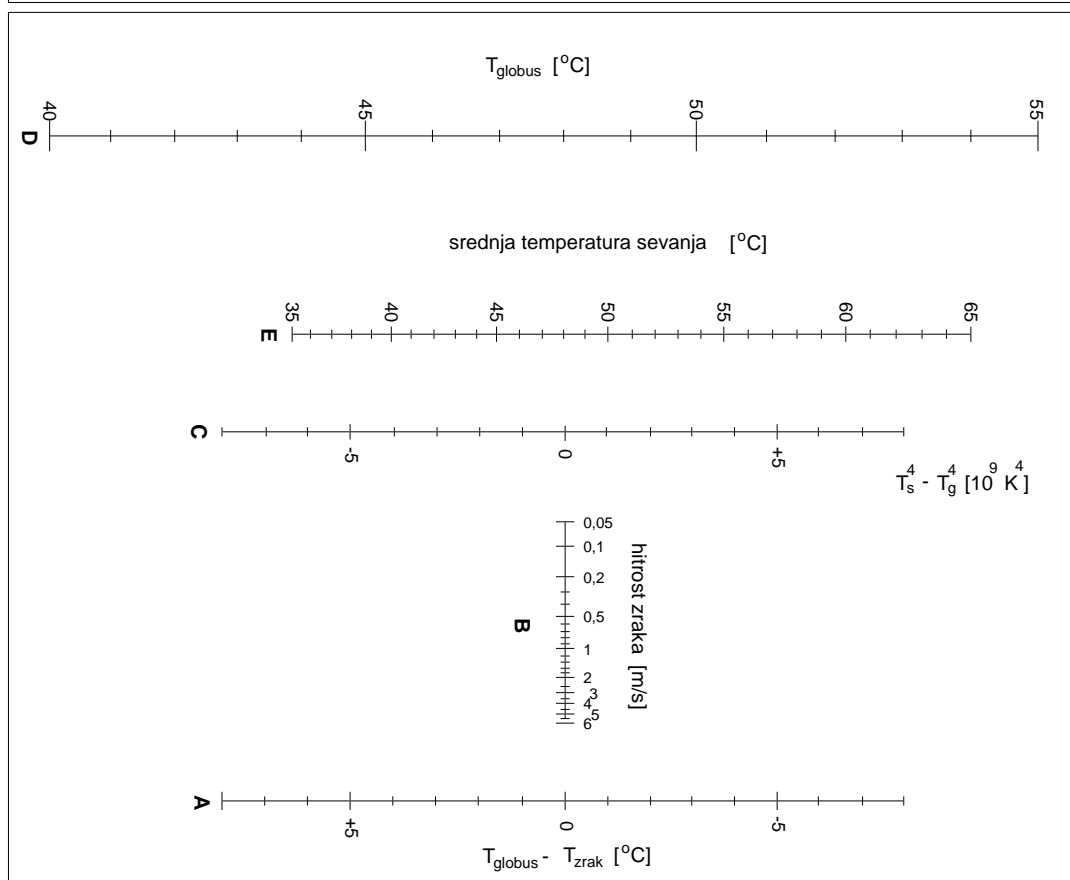
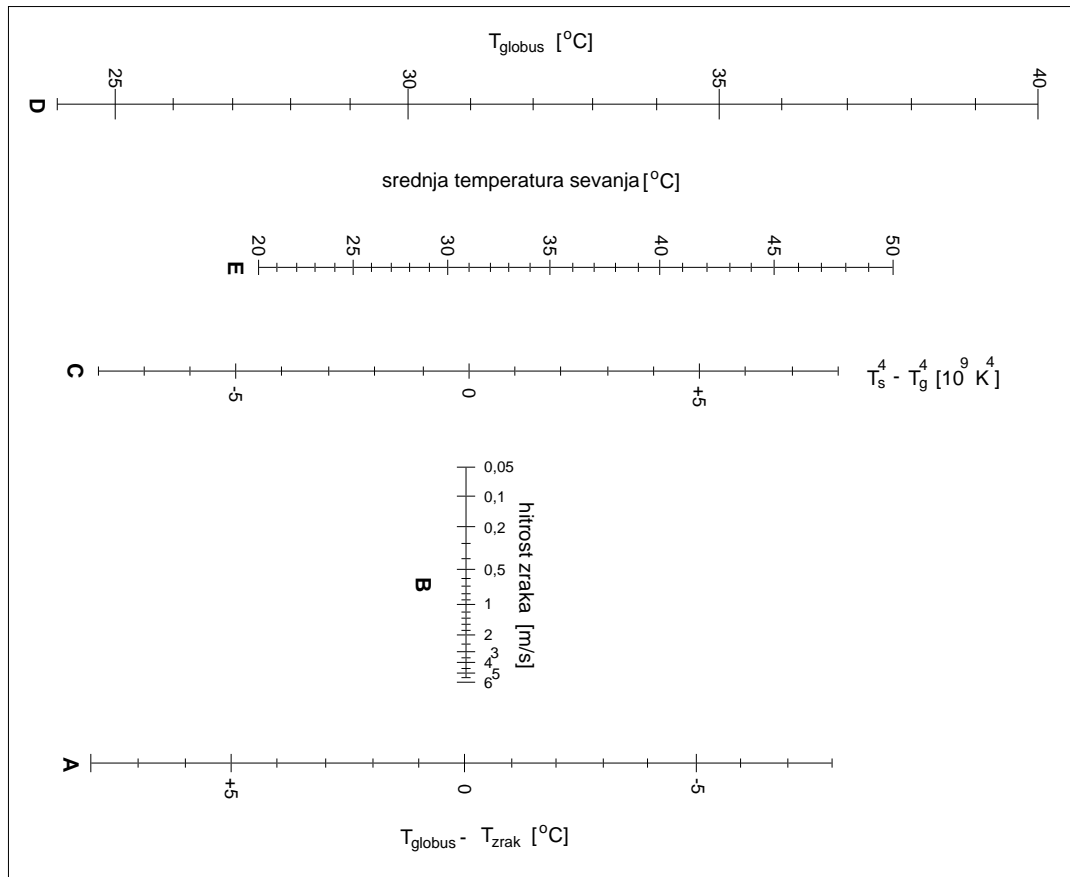
Slika B.1: Nomogram za določanje ефективne temperature (a) oblečenega in (b) do pasu gola delavca. Če je pomembno tudi sevanje, naneseemo na ordinatno os namesto temperature zraka temperaturo globus termometra! Obstajajo tudi algoritmi za izračun ефективne temperature.

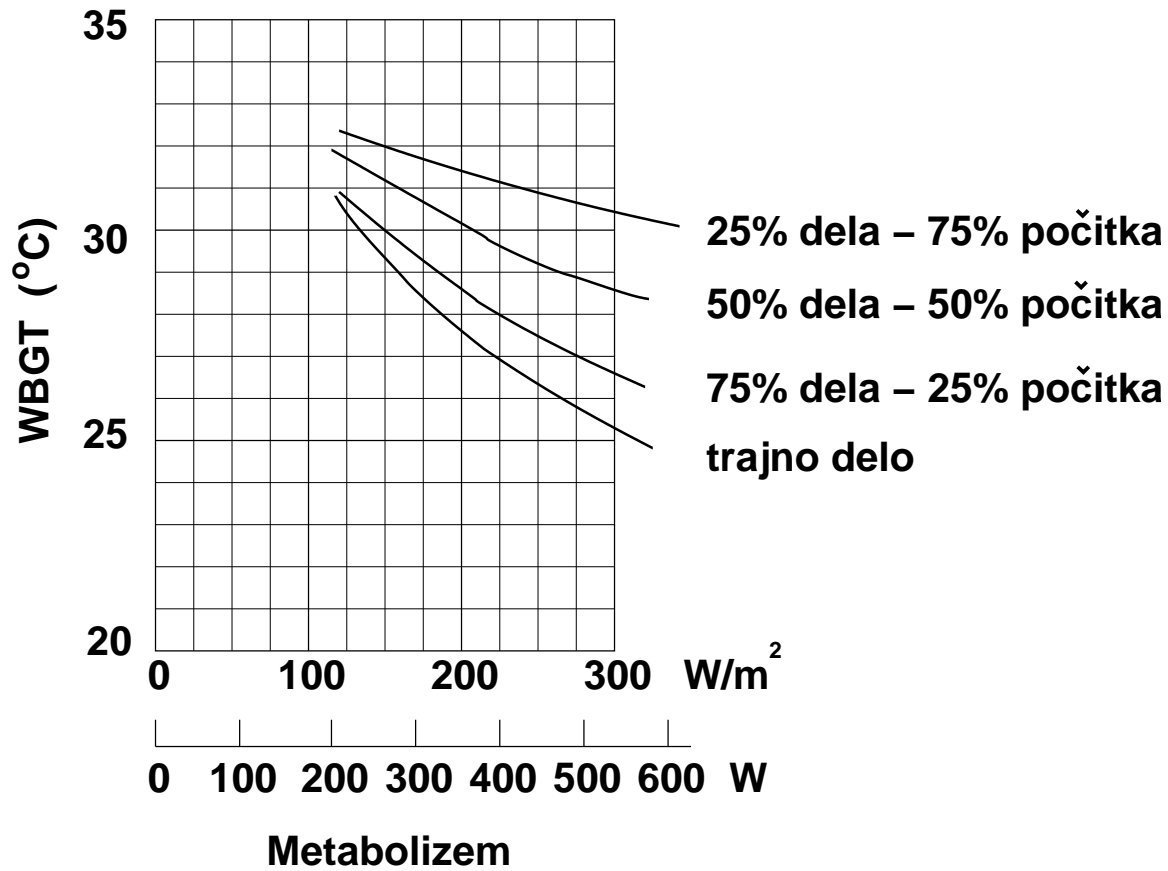


Slika B.2: Nomogram za določanje relativne vlažnosti s psihrometrom.  $T_z$  je temperatura suhega termometra,  $\Delta T$  pa razlika med temperaturo suhega termometra  $T_z$  in temperaturo vlažnega termometra  $T_v$ .



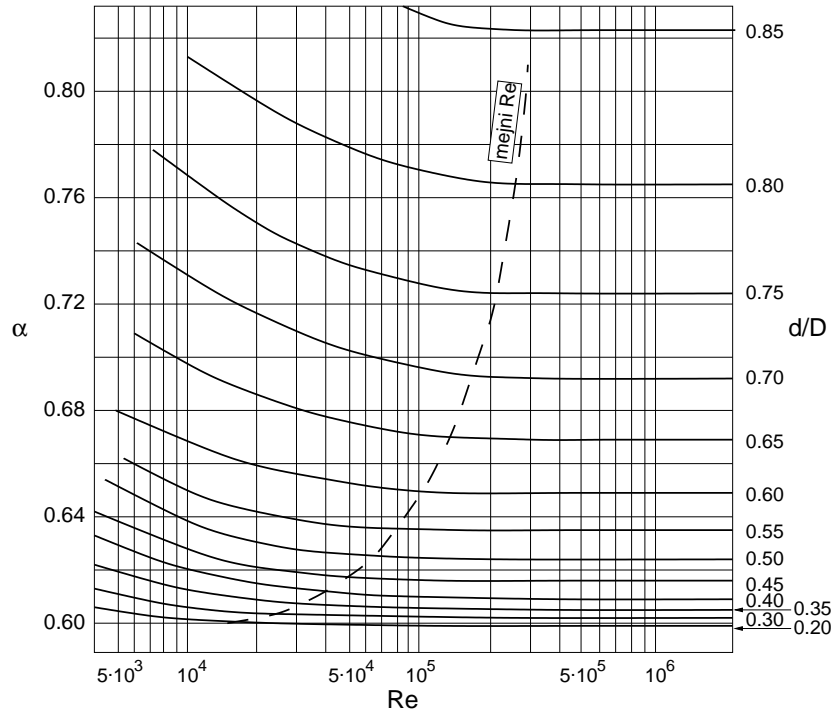
Slika B.3: Nomogrami za odčitavanje temperature sevanja na različnih temperaturnih območjih. Navodilo za uporabo: Izberemo nomogram za ustrezno območje temperature globus termometra, ki je nanesena na osi D. Izračunamo razliko med temperaturo globus termometra in temperaturo zraka ter jo označimo na osi A. Na vodoravni osi B v nomogramu označimo izmerjeno hitrost zraka v prostoru. Skozi zadnji dve označeni točki potegnemo premico tako, da seka os C. To presečišče in oznako na osi D povežemo s premico, ki seka os E pri srednji temperaturi sevanja.



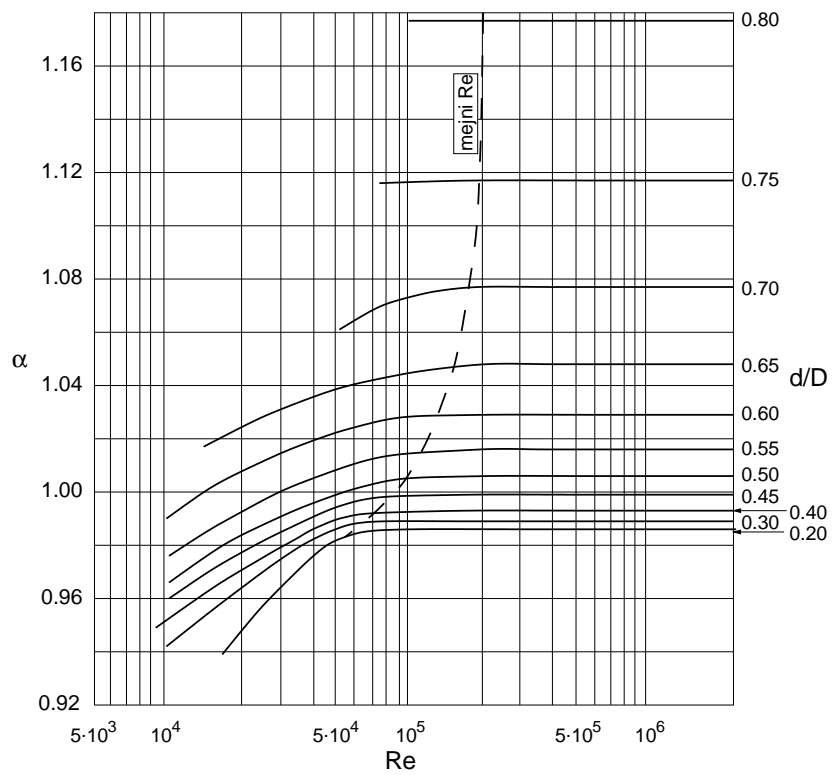


Slika B.4: Nomogram za določanje dolžine vsakournega počitka z indeksom *WBGT*.

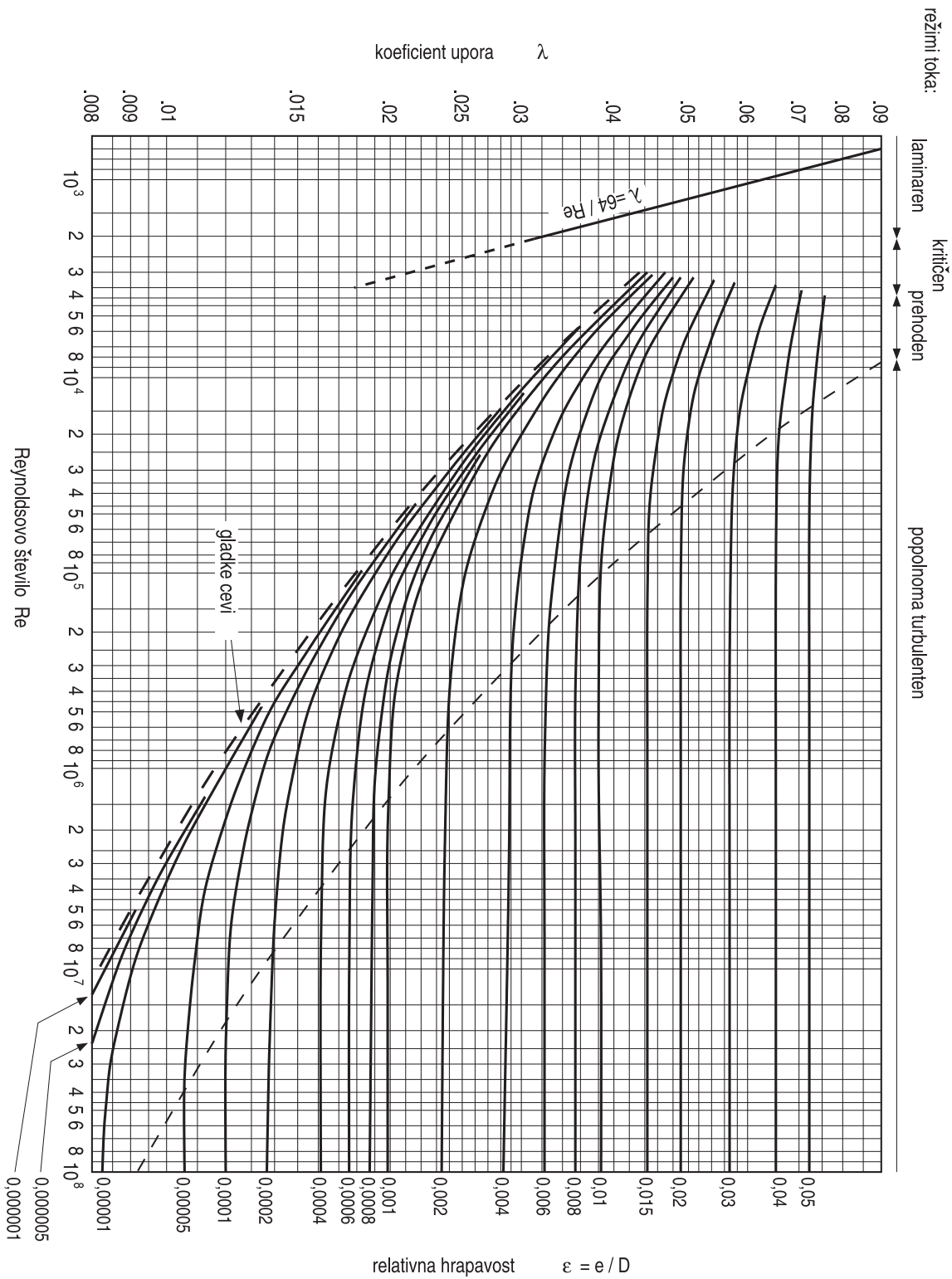




Slika B.5: Odvisnost pretočnega koeficienta zaslonke  $\alpha$  od Reynoldsovega števila  $Re$  pri različnih razmerjih premerov zaslonke in cevi  $d/D$ .



Slika B.6: Odvisnost pretočnega koeficienta šobe  $\alpha$  od Reynoldsovega števila  $Re$  pri različnih razmerjih premerov šobe in cevi  $d/D$ .



Slika B.7: Moodyjev diagram za določanje koeficienta upora cevi iz Reynoldsovega števila in relativne hrapavosti.

## C Definicija temperaturne skale ITS-90

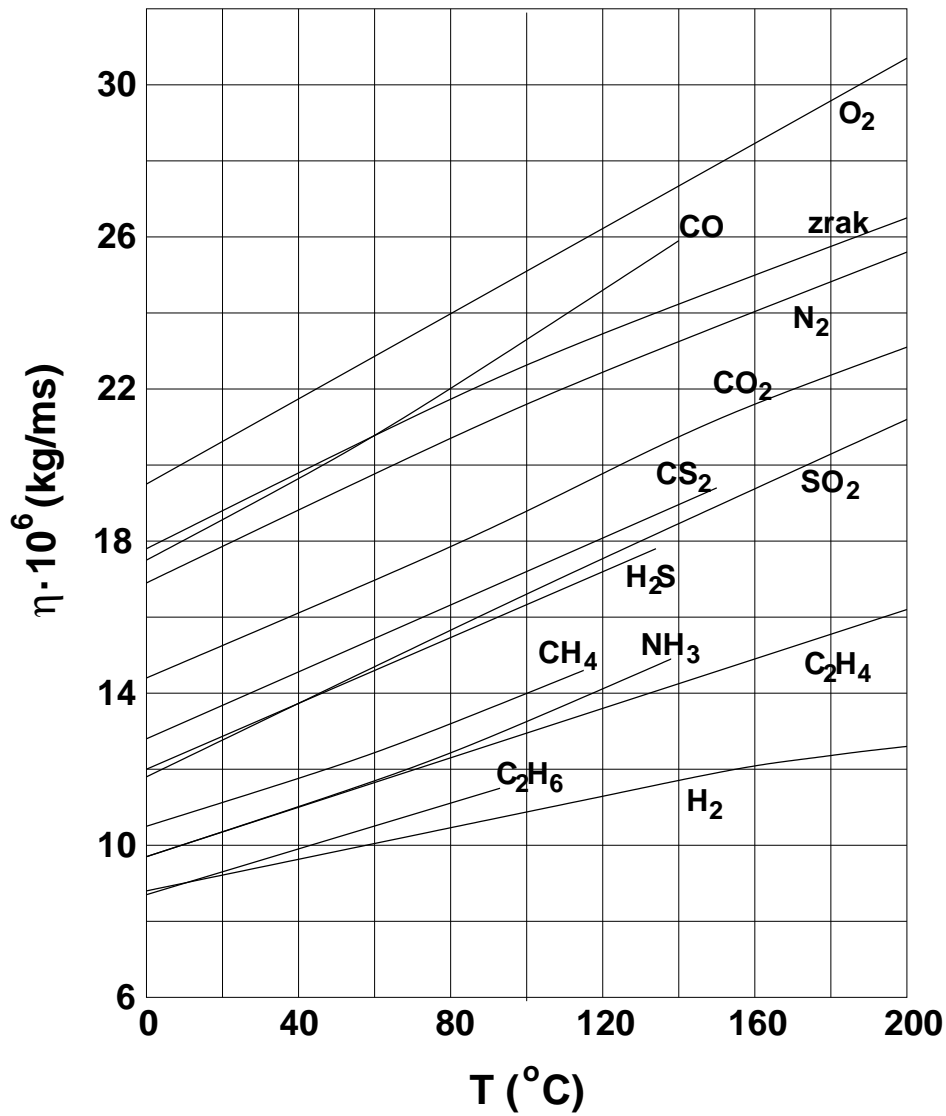
V tabeli C.1 so navedene točke mednarodne temperaturne skale ITS-90, ki so *definirane* z mednarodnim dogovorom. Dogovor ITS-90 določa tudi standardne načine za merjenje temperature med definiranimi točkami:

1. V območju od 0,65 do 5,0 K merimo temperaturo s helijevim parnim termometrom in je definirana z enačbo odvisnosti parnega tlaka  $^3\text{He}$  in  $^3\text{He}$  od temperature.
2. V območju med 3,0 K in trojno tečko neona 24,5561 K je standardni inštrument za merjenje temperature helijev plinski termometer s konstantno prostornino. Umerjen mora biti pri treh temperaturah: v trojni točki neona, v trojni točki vodika 13,8033 K in pri temperaturi med 3,0 in 5,0 K, ki jo izmerimo s helijevim parnim termometrom.
3. Standardni termometer med trojno točko vodika 13,8033 K in strdiščem srebra 1234,93 K je platinski uporovni termometer. Umerjen mora biti za območje uporabe v ustreznih definicijskih točkah.
4. V območju nad strdiščem srebra je temperatura določena s Planckovim zakonom sevanja in se meri z optičnim pirometrom.

$T/\text{K}$	snov <sup>♣</sup>	stanje <sup>◇</sup>	$R(T)/R(273,16\text{K})$
3 do 5	He	V	
13,8033	H <sub>2</sub>	T	0,001 190 07
17 {	H <sub>2</sub>	V	
	He	G	
20,3 {	H <sub>2</sub>	V	
	He	G	
24,5561	Ne	T	0,008 449 74
54,3584	O <sub>2</sub>	T	0,091 718 04
83,8058	Ar	T	0,215 859 75
234,3156	Hg	T	0,844 142 11
273,16	H <sub>2</sub> O	T	1,000 000 00
302,9146	Ga	M	1,118 138 89
429,7485	In	F	1,609 801 85
505,078	Sn	F	1,892 797 68
692,677	Zn	F	2,568 917 30
933,473	Al	F	3,376 008 60
1234,93	Ag	F	4,286 420 53
1337,33	Au	F	
1357,77	Cu	F	

Tabela C.1: Z dogovorom določene temperaturne točke ITS-90. <sup>♣</sup>Vse snovi razen  $^3\text{He}$  so naravne izotopske snovi. <sup>◇</sup>Simboli imajo naslednji pomen: V ravnotežje med paro in kapljevino (parni termometer), T trojna točka, G plinski termometer, M tališče, F strdišče.

## D Snovne lastnosti



Slika D.1: Odvisnost viskoznosti plinov  $\eta$  od temperature  $T$ .

Pazite! Odčitana vrednost viskoznosti je reda velikosti  $10^{-6} \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$  in ne reda velikosti  $10^{+6} \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$ .

## E Fizikalne enote in konstante

mnogokratnik		predpona	oznaka
1 000 000 000 000 000 000 000 000	= $10^{24}$	jota	Y
1 000 000 000 000 000 000 000	= $10^{21}$	zeta	Z
1 000 000 000 000 000 000	= $10^{18}$	eksa	E
1 000 000 000 000 000	= $10^{15}$	peta	P
1 000 000 000 000	= $10^{12}$	tera	T
1 000 000 000	= $10^9$	giga	G
1 000 000	= $10^6$	mega	M
1 000	= $10^3$	kilo	k
100	= $10^2$	hekto*	h
10	= $10^1$	deka*	da
0,1	= $10^{-1}$	deci	d
0,01	= $10^{-2}$	centi*	c
0,001	= $10^{-3}$	mili	m
0,000 001	= $10^{-6}$	mikro	$\mu$
0,000 000 001	= $10^{-9}$	nano	n
0,000 000 000 001	= $10^{-12}$	piko	p
0,000 000 000 000 001	= $10^{-15}$	femto	f
0,000 000 000 000 000 001	= $10^{-18}$	ato	a
0,000 000 000 000 000 000 001	= $10^{-21}$	zepto	z
0,000 000 000 000 000 000 000 001	= $10^{-24}$	jokto	y

\* ti izrazi niso zaželeni

Tabela E.1: Mnogokratniki osnovnih enot.

Osnovna veličina	Ime	Simbol
dolžina	meter	m
masa	kilogram	kg
čas	sekunda	s
električni tok	amper	A
termodinamična temperatura	kelvin	K
množina snovi	mol	mol
svetilnost	kandela, candela	cd

Tabela E.2: Osnovne enote SI.

Izpeljana veličina	Posebno ime	Simbol	Izražena z osnovnimi in izpeljanimi enotami SI
ravninski kot	radian	rad	$1 \text{ rad} = 1 \text{ m/m} = 1$
prostorski kot	steradian	sr	$1 \text{ sr} = 1 \text{ m}^2/\text{m}^2 = 1$
frekvenca	hertz	Hz	$1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$
sila	newton	N	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$
tlak	pascal	Pa	$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}/\text{m}^2$
energija, delo, toplota	joule	J	$1 \text{ J} = 1 \text{ N}\cdot\text{m}$
moč	watt	W	$1 \text{ W} = 1 \text{ J}/\text{s}$
električna upornost	ohm	$\Omega$	$1 \Omega = 1 \text{ V}/\text{A}$
svetlobni tok	lumen	lm	$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd}\cdot\text{sr}$
osvetljenost	luks, lux	lx	$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm}/\text{m}^2$
gostota	-	$\rho$	$\text{kg}/\text{m}^3$
hitrost	-	v	m/s
toplotna prevodnost	-	$\lambda$	$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$

Tabela E.3: Izpeljane fizikalne veličine.

## F Periodni sistem elementov

## Periodni sistem elementov

z relativnimi atomskimi masami 1993 po IUPAC-u

1 (I)	2 (II)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 (III)	14 (IV)	15 (V)	16 (VI)	17 (VII)	18 (VIII)																														
1 H 1,00794																	2 He 4,002602																														
3 Li 6,941	4 Be 9,012182	Vrstno število Simbol Rel. at. masa*										5 B 10,811	6 C 12,011	7 N 14,00674	8 O 15,9994	9 F 18,9984032	10 Ne 20,1797																														
11 Na 22,989768	12 Mg 24,3050											13 Al 26,981539	14 Si 28,0855	15 P 30,973762	16 S 32,066	17 Cl 35,4527	18 Ar 39,948																														
19 K 39,0983	20 Ca 40,078	21 Sc 44,955910	22 Ti 47,867	23 V 50,9415	24 Cr 51,9961	25 Mn 54,93805	26 Fe 55,845	27 Co 58,93320	28 Ni 58,6934	29 Cu 63,546	30 Zn 65,39	31 Ga 69,723	32 Ge 72,61	33 As 74,92159	34 Se 78,96	35 Br 79,904	36 Kr 83,80																														
37 Rb 85,4678	38 Sr 87,62	39 Y 88,90585	40 Zr 91,224	41 Nb 92,90638	42 Mo 95,94	43 Tc (98)	44 Ru 101,07	45 Rh 102,90550	46 Pd 106,42	47 Ag 107,8682	48 Cd 112,411	49 In 114,818	50 Sn 118,710	51 Sb 121,760	52 Te 127,60	53 I 126,90447	54 Xe 131,29																														
55 Cs 132,90543	56 Ba 137,327	La- Lu	72 Hf 178,49	73 Ta 180,9479	74 W 183,84	75 Re 186,207	76 Os 190,23	77 Ir 192,217	78 Pt 195,08	79 Au 196,96654	80 Hg 200,59	81 Tl 204,3833	82 Pb 207,2	83 Bi 208,98037	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)																														
87 Fr (223)	88 Ra (226)	Ac- Lr	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (263)	107 Bh (262)	108 Hs (265)	109 Mt (266)	**																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td>57 La 138,9055</td> <td>58 Ce 140,115</td> <td>59 Pr 140,90765</td> <td>60 Nd 144,24</td> <td>61 Pm (145)</td> <td>62 Sm 150,36</td> <td>63 Eu 151,965</td> <td>64 Gd 157,25</td> <td>65 Tb 158,92534</td> <td>66 Dy 162,50</td> <td>67 Ho 164,93032</td> <td>68 Er 167,26</td> <td>69 Tm 168,93421</td> <td>70 Yb 173,04</td> <td>71 Lu 174,967</td> </tr> <tr> <td>89 Ac (227)</td> <td>90 Th (232,0381)</td> <td>91 Pa (231,03588)</td> <td>92 U (238,0289)</td> <td>93 Np (237)</td> <td>94 Pu (239)</td> <td>95 Am (243)</td> <td>96 Cm (247)</td> <td>97 Bk (247)</td> <td>98 Cf (251)</td> <td>99 Es (252)</td> <td>100 Fm (257)</td> <td>101 Md (258)</td> <td>102 No (259)</td> <td>103 Lr (262)</td> </tr> </tbody> </table>																		57 La 138,9055	58 Ce 140,115	59 Pr 140,90765	60 Nd 144,24	61 Pm (145)	62 Sm 150,36	63 Eu 151,965	64 Gd 157,25	65 Tb 158,92534	66 Dy 162,50	67 Ho 164,93032	68 Er 167,26	69 Tm 168,93421	70 Yb 173,04	71 Lu 174,967	89 Ac (227)	90 Th (232,0381)	91 Pa (231,03588)	92 U (238,0289)	93 Np (237)	94 Pu (239)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (262)
57 La 138,9055	58 Ce 140,115	59 Pr 140,90765	60 Nd 144,24	61 Pm (145)	62 Sm 150,36	63 Eu 151,965	64 Gd 157,25	65 Tb 158,92534	66 Dy 162,50	67 Ho 164,93032	68 Er 167,26	69 Tm 168,93421	70 Yb 173,04	71 Lu 174,967																																	
89 Ac (227)	90 Th (232,0381)	91 Pa (231,03588)	92 U (238,0289)	93 Np (237)	94 Pu (239)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (262)																																	

\* Relativna atomska masa glede na  $A_r(^{12}\text{C}) \equiv 12$  (IUPAC "Atomic Weights of the Elements 1993", *Pure and Applied Chemistry*, **1994**, 66(12), 2423-2444). Za elemente brez stabilnih izotopov je masno število za najstabilnejši izotop podano v oklepaju oziroma za Th, Pa in U relativna atomska masa po IUPAC-u za naravno izotopsko zmes na Zemlji.

\*\* Kemični simboli za elemente 104 – 109 po IUPAC "Names and Symbols of Transfermium Elements (IUPAC Recommendations 1997)", *Pure and Applied Chemistry*, **1997**, 69(12), 2471-2473.

Copyright © 1995 - 1998 by Mats Dahlgren.

## G Tabela standardov

### G.1 Izolativnost obleke SIST EN ISO 9920

Delovna obleka	$I_{cl}$ (clo)	$I_{cl}$ (m <sup>2</sup> K/W)	Dnevna obleka	$I_{cl}$ (clo)	$I_{cl}$ (m <sup>2</sup> K/W)
spodnje hlače, kombinezon, nogavice, čevlji	0,7	0,11	ženske spodnje hlačke, majica s kratkimi rokavi, kratke hlače, tenke nogavice, sandali	0,3	0,05
spodnje hlače, srajca, hlače, nogavice, čevlji	0,75	0,115	ženske spodnje hlačke, žensko spodnje krilo, dolge nogavice, lahka obleka z rokavi, sandali	0,45	0,07
spodnje hlače, srajca, kombinezon, nogavice, čevlji	0,8	0,125	spodnje hlačke, srajca z rokavi, tanke hlače, tenke nogavice, čevlji	0,5	0,8
spodnje hlače, srajca, hlače, jopič, nogavice, čevlji	0,85	0,135	ženske spodnje hlačke, dolge nogavice, srajca s kratkimi rokavi, krilo, sandali	0,55	0,085
spodnje hlače, srajca, hlače, delovna obleka, nogavice, čevlji	0,9	0,14	spodnje hlače, srajca, tenke hlače, nogavice, čevlji	0,6	0,095
spodnje perilo z kratkimi rokavi in hlačnicami, srajca, hlače, jopič, nogavice, čevlji	1	0,155	hlačke, žensko spodnje krilo, dolge nogavice, ženska obleka, čevlji	0,7	0,105
spodnje perilo z kratkimi hlačnicami in rokavi, hlače, kombinezon, nogavice, čevlji	1,1	0,17	spodnje hlače, srajca, hlače, nogavice, čevlji	0,7	0,11
spodnje perilo z dolgimi hlačnicami in rokavi, termo pulover, nogavice, čevlji	1,2	0,185	spodnje hlače, trenirka, dolge nogavice, športni copati	0,75	0,115
spodnje hlače z kratkimi rokavi in hlačnicami, srajca, hlače, jopič, termo pulover, nogavice, čevlji	1,25	0,19	ženske spodnje hlačke, žensko spodnje krilo, srajca, krilo, tanke dokolenke, čevlji	0,8	0,12



<b>Delovna obleka</b>	$I_{cl}$ (clo)	$I_{cl}$ (m <sup>2</sup> K/W)	<b>Dnevna obleka</b>	$I_{cl}$ (clo)	$I_{cl}$ (m <sup>2</sup> K/W)
spodnje hlače z kratkimi rokavi in hlačnicami, kombinezon, termo pulover in hlače, nogavice, čevlji	1,4	0,22	žensko spodnje hlačke, srajca, krilo, pulover z okroglim ovratnikom, dokolenke, čevlji	0,9	0,14
spodnje hlače z kratkimi rokavi in hlačnicami, srajca, hlače, jopič, termo pulover in hlače, nogavice, čevlji	1,55	0,225	spodnje hlače, telovnik z kratkimi rokavi, srajca, hlače, pulover na V-izrez, nogavice, čevlji	0,95	0,145
spodnje hlače z kratkimi rokavi in hlačnicami, srajca, hlače, jopič, debel podložen suknjič in pajac	1,85	0,285	spodnje žensko hlačke, srajca, hlače, jopič, nogavice, čevlji	1	0,155
spodnje hlače z kratkimi rokavi in hlačnicami, srajca, hlače, jopič, debel podložen suknjič in pajac, nogavice, čevlji, kapa, rokavice	2	0,285	ženske spodnje hlače, dolge nogavice, srajca, krilo, spodnja majica, jopič	1	0,155
spodnje hlače z dolgimi rokavi in hlačnicami, termo pulover in hlače, zunanji termo pulover in hlače, nogavice, čevlji	2,2	0,34	spodnje hlače, telovnik s kratkimi rokavi, srajca, hlače, jopič, nogavice, čevlji	1,1	1,17
-	-	-	spodnje hlače, telovnik z kratkimi rokavi, hlačno krilo, spodnja majica, jopič, nogavice, čevlji	1,15	0,18
-	-	-	spodnje hlače z dolgimi rokavi in hlačnicami, srajca, hlače, pulover na v-izrez, jopič, nogavice, čevlji	1,3	0,2
-	-	-	spodnje hlače z kratkimi rokavi in hlačnicami, srajca, hlače, spodnja majica, jopič, plašč, nogavice, čevlji	1,5	0,23

## G.2 Metabolizem SIST EN ISO 8996

Razred	met	W/m <sup>2</sup>	W (A <sub>Du</sub> = 1,8m <sup>2</sup> )	Zgledi
0 počitek	1,1	65	115	počitek
1 majhna metabolična stopnja	1,7	100	180	<p>mirno sede: lahko ročno delo (pisanje, tipkanje, risanje, šivanje, knjigovodstvo); delo z roko in gornjo okončino (majhna namizna orodja, kontrola, zbiranje ali sortiranje lahkih predmetov); delo z zgornjo okončino in nogo (prevažanje z vozičkom pri običajnih razmerah, posluževanje nožnega stikala ali pedala)</p> <p>stoje: vrtanje (majhnih delov); strojno rezkanje (majhnih delov); navijanje tuljav; navijanje majhnih armatur; strojna obdelava z orodji majhne moči; občasna hoja (do 3,5 km/h)</p>
2 srednja metabolična stopnja	2,8	165	295	<p>trajno delo z roko ali gornjo okončino (zabijanje žebeljev, polnjenje); delo z zgornjo okončino in nogo; vožnja tovornjakov izven cest, traktorja ali gradbene opreme); delo gornje okončine in trupa (delo s pnevmatičnim kladivom, štukiranje, rokovanje s srednje težkimi bremenami s prekinitvami, pletje, okopavanje, nabiranje sadja ali zelenjave, potiskanje in vlečenje lahkih vozičkov ali samokolnice, hoja 3,5 do 5,5 km/h, kovanje)</p>
3 velika metabolična stopnja	4,0	230	415	<p>intenzivno delo gornjih okončin in telesa; nošnja težkih bremen; delo z lopato, delo s težkim kovaškim kladivom; žaganje; skobljanje, rezbarjenje trdega lesa; ročna košnja; kopanje, hoja 5,5 do 7 km/h.</p> <p>porivanje ali vlečenje težko naloženih vozičkov ali samokolnice; čiščenje odlitkov; polaganje betonskih blokov.</p>
4 zelo velika metabolična stopnja	5,0	290	520	<p>zelo intenzivna dejavnost na meji maksimalnega tempa; krampanje; intenzivno delo z lopato; vzpenjanje po stopnicah, klančinah ali lestvah; hitra hoja z majhnimi koraki; tek; hoja nad 7 km/h</p>

## G.3 SIST EN ISO 8996: Ocena po poklicnih dejavnostih

<b>poklic</b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>	<b>met</b>
<b>obrniki</b>		
urar	55-70	0,9-1,2
steklar	90-125	1,5-2,1
pleskar	100-130	1,7-2,2
mesar	105-140	1,8-2,4
pek	110-140	1,9-2,4
zidar	110-160	1,9-2,8
tesar	110-175	1,9-3,0
<b>rudarstvo</b>		
upravljalec vleke	70-85	1,2-1,5
kopač premoga	115-175	2,0-3,0
koksar	140-240	2,4-4,1
<b>železarstvo in jeklarska industrija</b>		
strojni kalupar	105-165	1,8-2,8
delavec pri elektropeči	125-145	2,1-2,5
ročni kalupar	140-240	2,4-4,1
livar	140-240	2,4-4,1
delavec pri plavžu	170-220	2,9-3,8
<b>jeklarska in kovinsko predelovalna industrija</b>		
finomehanik	70-110	1,2-1,9
varilec	75-125	1,3-2,1
strugar	75-125	1,3-2,1
delo z vrtnim strojem	80-140	1,4-2,4
kovač	90-200	1,5-3,4
<b>grafična industrija</b>		
ročni stavec	70-95	1,2-1,6
knjigovez	75-100	1,3-1,7
<b>kmetijstvo</b>		
voznik traktorja	85-110	1,5-1,9
vrtnar	115-190	2,0-3,3
<b>promet</b>		
šofer avta	70-90	1,2-1,5
voznik dvigala	65-145	1,1-2,5
šofer avtobusa	75-125	1,3-2,5
voznik tramvaja	80-115	1,4-2,0
voznik trolejbusa	80-125	1,4-2,1
<b>različni poklici</b>		
tajnica	70-85	1,2-1,5
laborant	85-100	1,5-1,7
učitelj	85-100	1,5-1,7
prodajalka	100-120	1,7-2,1

## G.4 SIST EN ISO 8996: Presnova po tipičnih dejavnostih

dejavnost	W/m <sup>2</sup>	met
<b>temeljne dejavnosti</b>		
hoja po ravnem, naravnost		
2 km/h	110	1,9
3 km/h	140	2,4
4 km/h	165	2,8
5 km/h	200	3,4
<b>hoja navzgor, 3 km/h</b>		
5 °	195	3,3
10 °	275	4,7
15 °	390	6,7
<b>hoja navzdol, 5 km/h</b>		
5 °	130	2,2
10 °	115	2,0
15 °	120	2,1
<b>hoja po stopnicah navzgor</b> (0,172 m/stopnico)		
80 stopnic/min	440	7,6
<b>hoja po stopnicah navzdol</b> (0,172 m/ stopnico)		
80 stopnic/min	155	2,7
<b>nošenje bremen po ravnem, 4 km/h</b>		
10 kg	185	3,2
30 kg	250	4,3
50 kg	360	6,2
<b>poklici</b>		
<b>graditeljstvo</b>		
polaganje zidakov (gradnja zidu na istem nivoju)		
polni zidaki (3,8 kg)	150	2,6
votlaki (4,2 kg)	140	2,4
votlaki (15,3 kg)	125	2,1
votlaki (23,4 kg)	135	2,3
priprava in finiširanje betona,		
priprava in odstranjevanje opaža (plošča s prenapetim betonom)	180	3,1
polaganje armature	130	2,2
ulivanje betona (plošča iz prenapetega betona)	180	3,1
stanovanjska gradnja		
mešanje betona	155	2,7
vlivanje betona za temelje	275	4,7
kompaktiranje betona z vibriranjem	220	3,8
oblikovanje modelov	180	3,1
nalaganje kamenja in malte na samokolnico	275	4,7

dejavnost	W/m <sup>2</sup>	met
<b>železarstvo in jeklarska industrija</b>		
plavž		
priprava vlivnika za prebod	340	5,8
prebijanje	430	3,4
formanje (ročno)		
srednje velikih kosov	285	4,9
razbijanje s pnevmatskim kladivom	175	3,0
formanje majhnih kosov	140	2,4
strojno formanje		
ulivanje odlitkov	125	2,1
ulivanje, žlica za enega	220	3,8
ulivanje, žlica za dva	210	3,6
ulivanje iz ponve na žerjavu	190	3,3
<b>šport</b>		
tek		
9 km/h	435	7,5
12 km/h	485	8,3
15 km/h	550	9,4
smučanje po ravnem, dober sneg		
7 km/h	350	6,0
9 km/h	405	6,9
12 km/h	510	8,7
drsanje		
12 km/h	225	3,8
15 km/h	285	4,9
18 km/h	360	6,2
<b>domača opravila</b>		
čiščenje stanovanja	100 – 200	1,7 – 3,4
kuhanje	80 – 135	1,4
pomivanje posode, stoje	145	2,5
ročno pranje, likanje stoje	120 – 220	2,1 – 3,8
britje, umivanje, oblačenje	100	1,7



# Literatura

- [1] P. Gspan, *Ekologija dela, priročnik*, Iskra TOZD Telematika, Kranj, 1984.
- [2] P. Gspan, *Prah v proizvodnji*, ZVD RS, 1993.
- [3] J. Sušnik, *Toplotna obremenitev in obremenjenost*, Univerzitetni zavod za zdravstveno in socialno varnost, Ljubljana, 1990.
- [4] V. Moody, R. Jaklete, *Dust Control Handbook*, Noyes Data Corporation, New Jersey, 1988.
- [5] F. C. McQuiston, J. D. Parker, *Heating, Ventilating and Airconditioning, Analysis and Design*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994.
- [6] J. H. Vincent, *Aerosol Science for Industrial Hygienists*, Elsevier Science Limited, 1995.
- [7] J. R. Hassall, K. Zaveri, *Acoustic noise measurements*, Bruel and Kjaer, Denmark, 1988.
- [8] Skupina avtorjev, *Noise Control*, Bruel and Kjaer, Denmark, 1988.
- [9] *Laboratorijske vaje iz fizikalne kemije*, FKKT, Ljubljana 1998.
- [10] *Praktikum iz merjenj, regulacije in avtomatizacije*, FKKT, Ljubljana 1998.
- [11] R. Kladnik, *Osnove fizike I*, DZS, Ljubljana 1974.
- [12] J. Strnad *Fizika, 1. del, Mehanika, Toplota (6. natis)*, DMFAS, Ljubljana, 1990.
- [13] J. Strnad *Fizika, 2. del, Električna, Optika (4. natis)*, DMFAS, Ljubljana, 1992.
- [14] *Praktikum iz instrumentalnih metod*, FKKT, Ljubljana, 2003.
- [15] Grm B, Stevanovič B., *Kemija v gasilstvu*, Gasilska zveza Slovenije, 2000.
- [16] Drysdale D., *Introduction to Fire Dynamics*, 2nd Edition, 1997.
- [17] Karlsson B., Quintiere James G.; *Enclosure Fire Dynamics*, CRC press, 1999 (tudi spletna izdaja).
- [18] SIST EN ISO 7730 - *Ergonomija toplotnega okolja – Analitično ugotavljanje in interpretacija toplotnega udobja z izračunom indeksov PMV in PPD ter merili za lokalno toplotno udobje (ISO 7730:2005)*.
- [19] SIST ENV ISO 11079 - *Vrednotenje hladnih okolij - Ugotavljanje zahtevane izolacije oblačil (REQ) (ISO/TR 11079:1993)*.

- [20] SIST EN 27243 - *Vroča okolja - Ocenitev toplotnega stresa na delavcu na podlagi kazalnika WBGT (ISO 7243:1989).*
- [21] SIST EN ISO 9920 - *Ergonomija toplotnega okolja – Ocena toplotne izolativnosti in izparilne odpornosti oblačil (ISO 9920:1995).*
- [22] SIST EN ISO 8996 - *Ergonomija toplotnega okolja – Ugotavljanje presnovne toplote (ISO 8996:2004).*
- [23] SIST ISO 1999 - *Akustika - Ugotavljanje izpostavljenosti hrupu pri delu in ocena okvare sluha zaradi hrupa.*
- [24] SIST ISO 9612 - *Akustika - Smernice za merjenje in oceno izpostavljenosti hrupu v delovnem okolju.*