

# Priručnik za laboratorijske vježbe iz toplinskih mjerenja

Ivan Pivac, Ivan Tolj, Frano Barbir

**PRIRUČNIK ZA LABORATORIJSKE VJEŽBE**

**IZ TOPLINSKIH MJERENJA**

IVAN PIVAC, IVAN TOLJ, FRANO BARBIR / PRIRUČNIK ZA LABORATORIJSKE VJEŽBE IZ  
TOPLINSKIH MJERENJA



Nakladnik  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE,  
STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Urednik  
Prof. dr. sc. Vladan Papić

Autori  
Doc. dr. sc. Ivan Pivac  
Izv. prof. dr. sc. Ivan Tolj  
Prof. emer. dr. sc. Frano Barbir

Recenzent  
Prof. dr. sc. Sandro Nižetić

ISBN 978-953-290-132-0



Ovo je djelo licencirano pod međunarodnom licencom CC BY-NC-ND 4.0 koja dopušta preuzimanje djela i dijeljenje s drugima, pod uvjetom da se navedu autori, te da se djelo ne smije mijenjati ili koristiti u komercijalne svrhe.

Autori i nakladnik ove knjige uložili su sve napore u njejoj pripremi sa željom da prenesu točne i mjerodavne informacije vezane s temom knjige. Autori i izdavač ni u kojem slučaju ne odgovaraju za slučajne ili posljedne štete povezane s izvedbom ili primjenom postupaka koji se u knjizi opisuju.

Prvo izdanje objavljeno u veljači 2024.g.

# **PRIRUČNIK ZA LABORATORIJSKE VJEŽBE IZ TOPLINSKIH MJERENJA**

Ivan Pivac, Ivan Tolj, Frano Barbir

Split, 2024.



## SADRŽAJ

1. Mjerenje temperature .....	3
○ Termometri na načelu širenja tekućina u spremniku .....	5
○ Termoelektrično mjerenje temperature .....	8
2. Mjerenje tlaka .....	16
3. Mjerenje protoka .....	20
4. Mjerenje vlažnosti .....	27
5. Mjerenja termodinamičkih veličina unutar termoenergetskog sustava .....	31
Literatura .....	32
PRILOG: Predlošci izvještaja s laboratorijskih vježbi za samostalno rješavanje i utvrđivanje gradiva .....	33

## PREDGOVOR

Priručnik za laboratorijske vježbe namijenjen je prvenstveno studentima Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje (FESB), Sveučilišta u Splitu, i to na stručnom studiju strojarstva, na kolegiju Mjerenja u tehnici (V semestar), u dijelu Toplinska mjerenja, ali i na srodnim kolegijima drugih studija.

Poglavlja ovog priručnika slijedno prate gradivo navedenog kolegija (u drugom dijelu semestra – dio Toplinska mjerenja) i u potpunosti su u skladu s planom izvođenja laboratorijskih vježbi navedenog kolegija, pa su ujedno i podloga studentima za njihovo uspješno provođenje, a očekujemo i da će im biti od velike pomoći za njihovu samostalnu pripremu za kolokvije i ispite iz ovoga kolegija, kao i za druge srodne kolegije na drugim studijima, te u daljnjem praktičnom radu u ovome području.

*Autori*



## 1. MJERENJE TEMPERATURE

**Temperatura** – posredno mjerljiva (temeljem nultog zakona termodinamike o toplinskoj ravnoteži), intenzivna (neovisna o veličini sustava/uzorka) termodinamička veličina stanja temeljena na molekularnoj teoriji, a predstavlja mjeru intenziteta/stupnja zagrijanosti nekog sustava/tijela:

$$T \quad \text{K}$$

Kelvinova/termodinamička/apsolutna temperaturna ljestvica  
(trojna točka vode dogovorno pri 273,16 i na tlaku 0,6106 kPa, a 0 pri teorijskom stanju materije u kojemu prestaje gibanje molekula)

-----  
 $t \text{ (}^\circ\text{C)} \rightarrow$  Celsiusova temperaturna skala/ljestvica

(0 pri zaleđivanju, a 100 pri isparavanju vode na tlaku 101,325 kPa)

$$T = t + 273,15 \quad \text{K}$$

$$t_{\text{F}} = \frac{9}{5}t + 32 = 1,8t + 32 \quad \text{°F}$$

$t_{\text{F}} \text{ }^\circ\text{F} \rightarrow$  Fahrenheitova temperaturna ljestvica

(32 pri zaleđivanju vode, a 212 pri isparavanju  $\rightarrow$  180 stupnjeva razlike)

$$t = \frac{5}{9}(t_{\text{F}} - 32) \quad \text{°C}$$

$$T = \frac{5}{9}(t_{\text{F}} + 459,67) \quad \text{K}$$

$T_{\text{R}} \text{ }^\circ\text{R} \rightarrow$  Rankineova apsolutna temperaturna ljestvica

(0 pri teorijskom stanju materije u kojemu prestaje gibanje molekula)

$$t = \frac{5}{9}(T_{\text{R}} - 491,67) \quad \text{°C}$$

$$T = \frac{5}{9}T_{\text{R}} \quad \text{K}$$

**Mjerenje temperature** je osnova za ispitivanje valjanosti rada toplinskih strojeva i uređaja na području termotehnike, energetike, te u regulacijskoj tehnici i u automatizaciji tih procesa, a pri njenom (posrednom) mjerenju se koriste različite pojave, a time i različiti mjerni uređaji:

- promjena volumena tvari s temperaturom uz konstantan tlak
  - o termometri na načelu širenja tekućina (živa, alkoholi, galij) u spremniku (staklu)
  - o termometri na načelu širenja metala (bimetalni i štapasti metalni termometri)
- promjena tlaka s temperaturom uz konstantan volumen
  - o termometri sa stlačenim plinom (plinski/manometarski termometri s N/He/Ar)
- promjena električnih svojstava tvari s temperaturom (el. otpor, termoelektrični efekt)
  - o otpornički termometri (RTD) najčešće na bazi Pt (rjeđe Ni ili Cu)
  - o termistori NTC i PTC
  - o termoparovi
- promjena (rezonantne) frekvencije s temperaturom  $\rightarrow$  kvarcni termometri
- promjena značajki dozračene energije od površine tijela čiju temperaturu mjerimo
  - o različiti kontaktni ili bezkontaktni termometri zračenja (npr. optički pirometri)



**Pogreške pri mjerenju** (npr. pomak nule i/ili osjetljivosti), s obzirom na porijeklo nastanka:

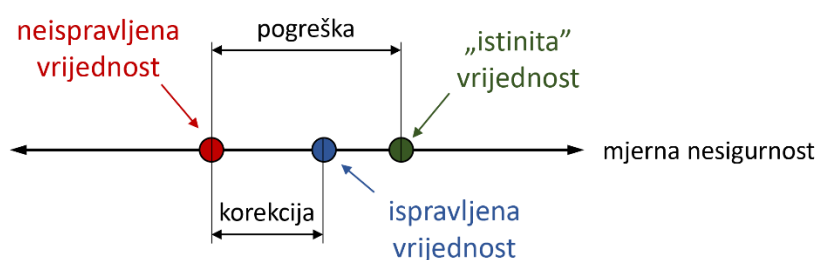
- grube (nedovoljna pozornost i/il manjkavo stručno znanje mjeritelja, neprikladna mjerna metoda...) → značajno odstupanje ponekog rezultata ( $> 3 \sigma$ ) → odbacivanje
- sustavne (nesavršenost mjerne metode/mjerala/veličine, previd pri istraživanju izvora pogreške...) → ponavljanjem mjerenja rezultati ostaju stabilni ili se mijenjaju na predvidiv način → netočnost rezultata → nužna korekcija
  - o metodičke pogreške (zbog mjerne metode/postupka)
  - o pogreške mjernih instrumenata:
    - unutarnje (progresivne, mjesne i periodičke)
    - vanjske (uzrokuju ih vanjski/okolišni fizikalni čimbenici poremećaja)
  - o osobne pogreške mjeritelja (zbog njegovih psihičkih i fizioloških nedostataka)
- slučajne, tj. neobjašnjive, neodredive, neobuhvatljive, neizbježne (nesavršenost mjera/mjernih instrumenata/ljudskih osjetila, utjecaj i promjenljivost utjecaja okoliša, nedovoljno mjerno iskustvo i znanje mjeritelja...) → ponavljanjem mjerenja rezultati se mijenjaju na nepredvidiv način → nepouzdanost rezultata

Toplinske sustavne pogreške su posljedica utjecaja temperature, kako na predmet mjerenja, tako i na mjerni instrument.

Standardni mjeriteljski uvjeti okoline:

- temperatura 20 °C,
- tlak 1013,25 mbar (hPa),
- relativna vlažnost 58%.

Ako su uvjeti pri provođenju mjerenja različiti od navedenih, potrebno ih je svakako navesti.



## **TERMOMETRI NA NAČELU ŠIRENJA TEKUĆINA U SPREMNIKU: stakleni termometar sa živom**

Općenito, volumen određenog krutog tijela, tekućine ili plina promjenom temperature, uz konstantan tlak, se mijenja, odnosno dovođenjem ili odvođenjem topline se širi ili skuplja, tj. toplinski dilatira:

$$V = V_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta t) = V_0 \cdot (1 + \beta \cdot (t - t_0))$$

gdje je:

$V$  – konačni volumen pri temperaturi  $t$ ,  $m^3$

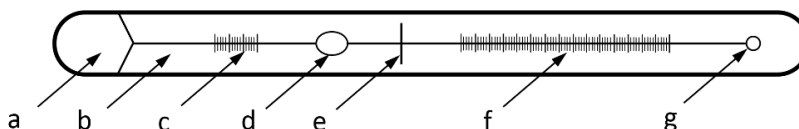
$V_0$  – početni volumen pri početnoj temperaturi  $t_0$ ,  $m^3$

$\beta$  – volumni koeficijent toplinskog širenja/rastezanja/dilatacije/ekspanzije tvari,  $K^{-1}$  ili  $^{\circ}C^{-1}$

### Zadatak za samostalno rješavanje:

- 1.1. Odrediti promjer kapilarne cjevčice u staklenom termometru da se živa u njoj podigne 1 mm za svaki  $^{\circ}C$  promjene temperature. Volumen žive u termometru iznosi  $0,1 \text{ cm}^3$ , dok je volumni koeficijent toplinskog širenja žive  $0,000182 \text{ }^{\circ}C^{-1}$ .

Dakle, načelo mjerenja staklenim termometrom se temelji na prividnoj razlici rastezanja žive i stakla koja je ovisna o temperaturi. Tipični mjerni interval za staklene termometre sa živom je između  $-30 \text{ }^{\circ}C$  (ograničena taljenjem pri  $-38,83 \text{ }^{\circ}C$ ) i  $630 \text{ }^{\circ}C$ , a njegovi sastavni dijelovi su:



- spremnik termometrijske tekućine, obično cilindričnog oblika od termometrijskog stakla (smjesa neorganskih oksida u kojima je glavni sastojak kremen, a toplinski je stabilna ( $< 1050 \text{ }^{\circ}C$ ) i obradiva)
- tijelo termometra koje može biti štapastog (debelostijena kapilara na koju je s vanjske strane urezana i podjela ljestvice) ili uložnog tipa (kapilarna cjevčica s tankom stijenkom od mliječnog stakla pričvršćena za ljestvicu i zajedno s njom uložena u omotnu staklenu cijev)
- pomoćna ljestvica s oznakom  $0 \text{ }^{\circ}C$  koja služi za umjeravanje termometra u ledenoj kupki (izvodi se samo kada glavna ljestvica ne obuhvaća temperaturu  $0 \text{ }^{\circ}C$ )
- kontrakcijska komora – izvodi se kod onih termometara gdje podjela na glavnoj ljestvici počinje iznad uobičajenih temperatura okoliša, odnosno gdje bi se termometrijska tekućina na sobnoj temperaturi povukla u spremnik (kod tih se termometara mogu pojaviti značajne pogreške ako postoji razlika u dubini uranjanja pri umjeravanju i mjerenju temperature)
- oznaka dubine uranjanja termometra pri kojoj je termometar umjeren/kalibriran/baždaren
- glavna mjerna ljestvica
- ekspanzijska komora na kraju kapilare – sprječava pojavu prevelikog tlaka kapilarnoga plina, a u slučaju da se termometar primijeni iznad gornje temperaturne granice, može primiti i određeni volumen tekućine

Iako su jednostavni za rukovanje i relativno jeftini, stakleni termometri su osjetljivi pri uporabi i lako lomljivi, a živini su i toksični. Ipak, današnja možda i najveća mana im je što ne daju digitalni izlazni signal poput termoparova i otporničkih termometara, pa se uglavnom koriste kao dodatna provjera u regulacijskim sustavima, a imaju i relativno sporo vrijeme odziva na dinamičku promjenu temperature, što se definira tzv. vremenskom konstantom termometra:

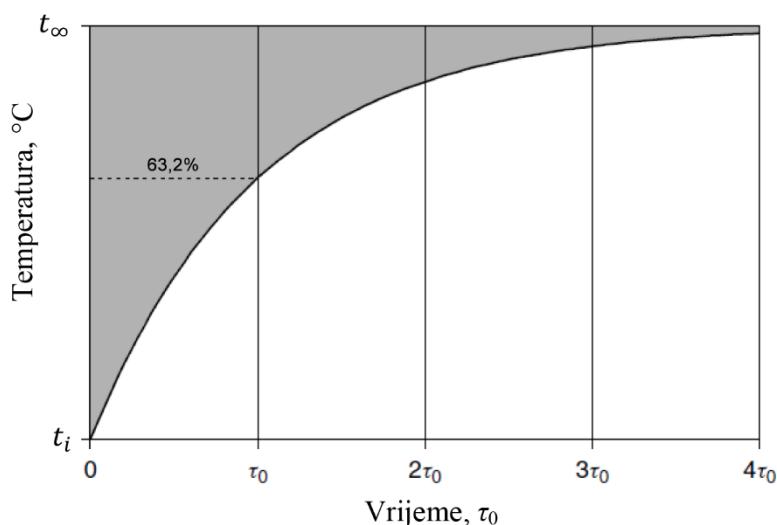
$$\tau_0 = \frac{\rho c V}{\alpha A} = \frac{m c}{\alpha A} \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \frac{\text{J} = \text{W s}}{\text{kg K}} \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2} \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}} = \text{s}$$

Dakle, termometar poput svakog sustava ima svoju dinamiku s kojom teži u stacionarnu vrijednost prilikom poremećaja, a uranjanjem termometra različite (početne) temperature  $t_i$  od medija u koji se uranja i kojemu se mjeri temperatura  $t_\infty$  potrebno je određeno vrijeme da bi se uspostavila toplinska ravnoteža, pa je greška koja nastaje pri mjerenju, odnosno razlika između stvarne  $t_\infty$  i očitane temperature sustava/medija  $t$  nakon nekog vremena  $\tau$ :

$$\Delta t_m = t_\infty - t = (t_\infty - t_i) \cdot e^{-\tau/\tau_0}$$

a za svaki vremenski interval jednak vremenskoj konstanti termometra smanjuje se za 63,2%:

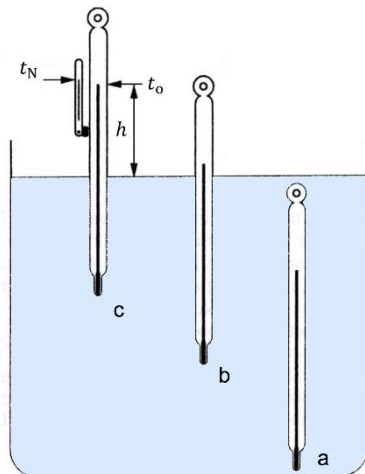
$$\Delta t_m = (t_\infty - t_i) \cdot e^{-\tau_0/\tau_0} = (t_\infty - t_i) \cdot e^{-1} = 0,368 \cdot (t_\infty - t_i)$$



#### Zadatak za samostalno rješavanje:

- 1.2. Odrediti koliko vremena treba držati termometar početne temperature 20 °C uronjen u posudu s vodom koja se održava na 100 °C da bi njegova greška pri mjerenju temperature iznosila manje od 1%, ako je vremenska konstanta korištenog termometra 40 s?

Tijekom preciznog mjerenja temperature nekog medija korištenjem staklenog termometra, posebnu pozornost treba obratiti prilikom tzv. uranjanja, odnosno da li je ono:



- potapanje – tijelo termometra potpuno uronjeno u tekućinu, čiju temperaturu mjerimo
- potpuno uranjanje – spremnik i stupac (žive) termometra uronjeni su taman toliko da stupac žive neznatno nadvisuju gornji rub (površinu) tekućine, čiju temperaturu mjerimo (dakle, što višu temperaturu termometar pokazuje, to ga više treba uroniti)
- djelomično uranjanje – dio stupca (žive) nije uronjen u tekućinu, čiju temperaturu mjerimo, pa je potrebno provesti korekciju:

$$t_{st} = t_o + h \cdot \beta \cdot (t_o - t_N)$$

gdje je:

$t_{st}$  – stvarna temperatura tekućine

$t_o$  – prividna temperatura očitana na termometru

$h$  – visina neuronjenog dijela mjernog stupca u termometru izražena u °C

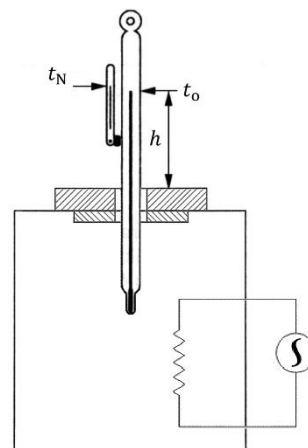
$\beta$  – razlika koeficijenta toplinskog širenja tekućine u mjernom stupcu u odnosu na staklo:

- za živu:  $\beta = 1/6300 \text{ °C}^{-1} = 0,00015873 \text{ °C}^{-1}$
- za organske tekućine:  $\beta = 1/800 \text{ °C}^{-1} = 0,00125 \text{ °C}^{-1}$

$t_N$  – prosječna temperatura neuronjenog dijela mjernog stupca korištenog termometra

Zadatak za samostalno rješavanje (uz popunjavanje lab. izvještaja 1):

Odrediti stvarnu temperaturu koja se održava u komori, ako nam je na raspolaganju stakleni termometar sa živom (Hg), koji je umjeren potpuno uronjen, a ovdje ga je tijekom mjerenja moguće samo jednim njegovim dijelom uroniti u komoru. Temperatura očitana na termometru iznosila je 500 °C, a visina neuronjenog dijela mjernog stupca žive u termometru iznosila je 300 °C. Temperatura neuronjenog dijela korištenog termometra, izmjerena na njegovoj stijenci dodatnim termoparom, i to na sredini prethodno izmjerene visine mjernog stupca, iznosila je 32,4 °C.



## TERMOELEKTRIČNO MJERENJE TEMPERATURE: termoelement / termočlanak / termopar

**Termoelement / Termočlanak / Termopar** – senzor/uređaj za mjerenje temperature u spoju dva različita homogena kovinska materijala (najčešće u obliku lemljenih žica u točki), a temeljen je na principu Seebeckovog termoelektričnog efekta (pretvaranja toplinske energiju u električnu), tj. pojave elektromotorne sile duž vodiča, odnosno razlike električnog napona zbog razlike temperatura između ta dva materijala u otvorenom strujnom krugu:



$$ems = \Delta U_{T_2-T_1} = U_{T_1} - U_{T_2} = \alpha_{A-B} (T_1 - T_2)$$

**Zakon različitih homogenih materijala** – pojava termoelektričnog efekta, tj. elektromotorne sile, nije moguća ukoliko se koristi samo jedan homogeni materijal bez obzira na promjenu njegovog poprečnog presjeka ili nehomogenost, tj. potrebna su barem dva različita materijala.

Prednosti zbog kojih su u širokoj primjeni u industriji i znanosti:

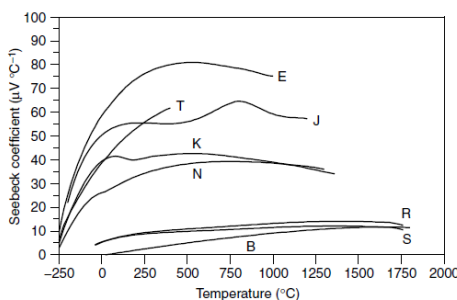
- široki mjerni raspon (od -270 °C pa sve do 1700 °C), a mjerenje je u jednoj točki
- jednostavnost, standardiziranost, robusnost, a relativno malih dimenzija i cijene
- mogućnost digitalnog izlaznog signala, a ne zahtijevaju vanjsku pobudu/pogon
- brzi vremenski odziv (zbog male mase spoja je i tromost mala), te prijenos na daljinu
- ...

Različiti parovi materijala, a koji su tehnički uporabljivi, daju različite razlike napone za istu razliku temperatura (najčešće se odabiru oni koji u određenom rasponu temperatura daju najveće razlike napona radi praktičnijeg očitavanja zbog ograničenja rezolucije mjernog uređaja), te se često oblažu i zaštitnom cijevi od metala ili keramike da bi se zaštitili od različitih kemijskih utjecaja tvari kojima se mjeri temperatura, a neki od najčešće korištenih su (3 klase):

tip	materijal (uz IEC oznaku boje*)		tipični mjerni raspon, °C	preporuka primjene	Seebeckov koef. osjetljivosti, $\mu V/^{\circ}C$	očekivana mjerna nesigurnost
	+	-				
B	70% Pt / 30% Rh	94% Pt / 6% Rh	0 do 1700	za visoke temperature, izbjegavati kontakt s metalima i onečišćenja	0,05	$\pm 1,7^{\circ}C$ ili 0,5%
E	kromel	konstantan	-200 do 900	velika osjetljivost, za niže temperature, nije za reducirajuću okolinu ili vakuum	60,9	$\pm 1,7^{\circ}C$ ili 0,5%
J	željezo	konstantan	0 do 750	neoksidirajuća okolina, za više temperature	51,7	$\pm 2,2^{\circ}C$ ili 0,75%
K	kromel	alumel	-200 do 1250	širok raspon temperatura, otporan na koroziju, reducirajuća okolina ili vakuum	40,5	$\pm 2,2^{\circ}C$ ili 0,75%
N	nicrosil	nisil	-270 do 1300	alternativa za K, ali stabilniji na visokim temperaturama	39	$\pm 2,2^{\circ}C$ ili 0,75%
R	87% Pt / 13% Rh	platina	0 do 1450	dugotrajna stabilnost, za visoke temperature, izbjegavati kontakt s metalima	5,93	$\pm 1,5^{\circ}C$ ili 0,25%
S	90% Pt / 10% Rh	platina	0 do 1450	dugotrajna stabilnost, za visoke temperature, izbjegavati kontakt s metalima	6,02	$\pm 1,5^{\circ}C$ ili 0,25%
T	bakar	konstantan	-200 do 350	reducirajuća okolina ili vakuum, dobro podnosi vlagu, za niže temperature	40,7	$\pm 1,0^{\circ}C$ ili 0,75%
BN		94% Pt / 6% Rh				
BP	70% Pt / 30% Rh					

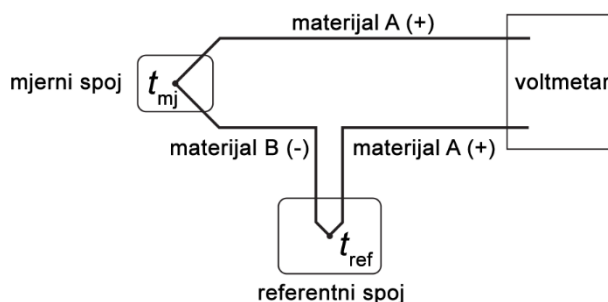
Legure:

- konstantan: 55% Cu 45% Ni
- kromel: 90% Ni 10% Cr
- alumel: 95% Ni 2% Al 2% Mn 1% Si
- nicrosil: 84,4% Ni 14,2% Cr 1,4% Si
- nisil: 95,5% Ni 4,4% Si 0,15% Mg



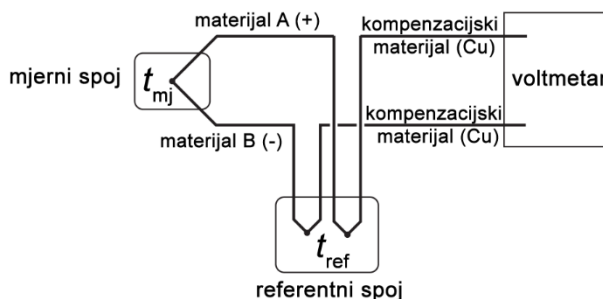
Al	aluminij
Cr	krom
Cu	bakar
Fe	željezo
Mg	magnezij
Mn	mangan
Ni	nikal
Pt	platina
Rh	rodij
Si	silicij

Dakle, mjerenje temperature se vrši posredno, i to mjerenjem elektromotorne sile, odnosno razlike električnog (termo) napona (u mV) zbog razlike temperatura između ta dva materijala pomoću voltmetra/potencijometra, temeljem *zakona posrednih materijala*, a koji može dati i izravno očitavanje razlike temperatura, ako je umjeren/kalibriran/baždaren u odnosu na poznatu i stabilnu referentnu temperaturu (najčešće je to ledena kupka pri 0 °C):



*Zakon posrednih/sukcesivnih materijala* – algebarski zbroj razlika napona u krugu, koji se sastoji od bilo kojeg broja različitih materijala, jednak je nuli ako je cijeli krug ujednačene temperature, tj. dopušteno je umetanje posrednih materijala u krug koji nisu materijali termoelementa, pa električna veza između mjernog uređaja i kruga termoelementa, koja tvori dodatne spojeve, ali pri istoj temperaturi, neće utjecati na mjereni izlazni napon kruga.

Dodatna praktična posljedica ovog zakona je da se mogu koristiti i dodatne produžne/kompensacijske žice (najčešće bakrene, radi cijene i robusnosti) za prijenos mjernog napona termoelementa na udaljeni mjerni uređaj, a bez utjecaja na njegovu vrijednost:



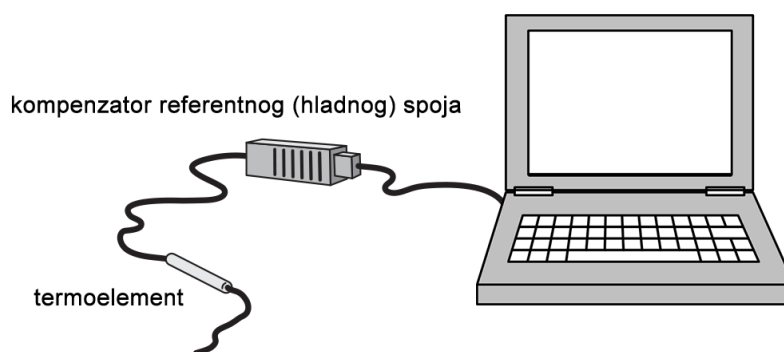
Umjeren/kalibriran/baždaren termoelement na jednoj temperaturi (najčešće pri referentnoj temperaturi 0 °C mjerenoj dodatnim termometrom) može se koristiti i pri nekoj drugoj  $t_{ref}$ , temeljem *zakona posrednih temperatura*, ali uz korekciju, pa je stvarna razlika napona pri toj traženoj stvarnoj temperaturi  $t_{st}$  mjerenja, u odnosu na referentnu umjeravanja pri 0 °C:

$$\Delta U_{0-t_{mj}} = \Delta U_{0-t_{ref}} + \Delta U_{t_{ref}-t_{mj}}$$

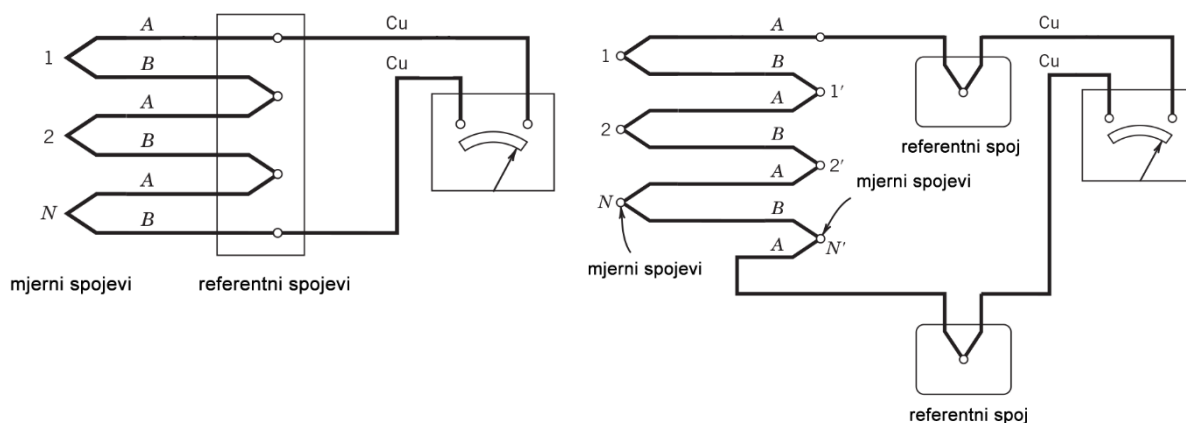
gdje se vrijednosti napona  $\Delta U_{0-t_{ref}}$  nalaze u prikladnim tablicama/dijagramima za određeni tip termoelementa (prema ITS-90), dok se vrijednosti  $\Delta U_{t_{ref}-t_{mj}}$  mjere, pa se tražena stvarna temperatura mjerenja, pri izračunatoj/korigiranoj  $\Delta U_{0-t_{mj}}$ , očita iz tih istih tablica/dijagrama.

*Zakon posrednih/sukcesivnih temperatura* – ako dva različita homogena materijala stvore napon  $U_1$  kad su im spojevi pri  $T_1$  i  $T_2$ , te stvore napon  $U_2$  kad su im spojevi pri  $T_2$  i  $T_3$ , tada je rezultirajući napon  $U_1+U_2$  kad su im spojevi pri  $T_1$  i  $T_3$ .

Provođenje navedene korekcije, odnosno tzv. kompenzacije hladnog spoja, ukoliko je referentna temperatura različita od 0 °C, najčešće je već ugrađeno ili unutar termoelementa ili u digitalnom sakupljaču mjernih podataka (engl. *Data Acquisition System*, DAS), a postiže se elektronički najčešće pomoću dodatnog termistora, diode ili otporničkog termometra (RTD), koji mjeri temperaturu na njegovom priključnom mjestu i mjereni napon interno korigira (izravno ili softverom), te ga onda mikroprocesor (ukoliko je ugrađen) dalje izravno pretvara u očitavanje stvarne temperature (tipična mjerna nesigurnost iznosi od 0,5 °C do 1,5 °C):



Ukoliko je u termoelementu prisutno više od dva (nužna) spoja različitih materijala, odnosno ako je više termoelemenata spojenih u seriju, tada nastaje tzv. termobaterija ili termoskupina (engl. *thermopile*), a koja može služiti za mjerenje prosječne temperature nekog tijela u više točaka (pa i za posredno mjerenje toplinskog toka), ili kao pojačalo mjerenog napona (smanjuje nesigurnost pri mjerenju, odnosno povećava osjetljivost, posebno pri manjim temperaturnim razlikama, jer raste rezolucija), te se koristi i kao izvor napajanja malih snaga:



$$N_{mj} \cdot \Delta U_{0-t_{mj}} = N_{ref} \cdot \Delta U_{0-t_{ref}} + \Delta U_{t_{ref}-t_{mj}}$$

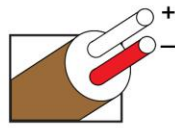
Referentne tablice\* za termoelemente tipa J, K i T dane su u nastavku.

\* preuzete i prilagođene iz <https://www.thermometricscorp.com/PDFs/Thermocouple-Charts/>

REFERENTNA TABLICA ZA TERMOELEMENTE TIPA J

Revised Thermocouple Reference Tables

TYPE J Reference Tables N.I.S.T. Monograph 175 Revised to ITS-90



Iron vs. Copper-Nickel



Thermocouple Grade

MAXIMUM TEMPERATURE RANGE

Thermocouple Grade 32 to 1382°F 0 to 750°C

Extension Grade 32 to 392°F 0 to 200°C

LIMITS OF ERROR (whichever is greater) Standard: 2.2°C or 0.75% Special: 1.1°C or 0.4%

COMMENTS, BARE WIRE ENVIRONMENT: Reducing, Vacuum, Inert; Limited Use in Oxidizing at High Temperatures; Not Recommended for Low Temperatures

TEMPERATURE IN DEGREES °C REFERENCE JUNCTION AT 0°C

Extension Grade

Thermoelectric Voltage in Millivolts

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-10	-8.076	-8.057	-8.037	-8.017	-7.996	-7.976	-7.955	-7.934	-7.912	-7.890
-9	-7.868	-7.846	-7.824	-7.801	-7.778	-7.755	-7.731	-7.707	-7.683	-7.659
-8	-7.634	-7.610	-7.585	-7.559	-7.534	-7.508	-7.482	-7.456	-7.429	-7.403
-7	-7.376	-7.348	-7.321	-7.293	-7.265	-7.237	-7.209	-7.181	-7.152	-7.123
-6	-7.094	-7.064	-7.035	-7.005	-6.975	-6.944	-6.914	-6.883	-6.853	-6.821
-5	-6.790	-6.759	-6.727	-6.695	-6.663	-6.631	-6.598	-6.566	-6.533	-6.500
-4	-6.467	-6.433	-6.400	-6.366	-6.332	-6.298	-6.263	-6.229	-6.194	-6.159
-3	-6.124	-6.089	-6.054	-6.018	-5.982	-5.946	-5.910	-5.874	-5.838	-5.801
-2	-5.764	-5.727	-5.690	-5.653	-5.616	-5.578	-5.541	-5.503	-5.465	-5.426
-1	-5.388	-5.350	-5.311	-5.272	-5.233	-5.194	-5.155	-5.116	-5.076	-5.037
0	-4.997	-4.957	-4.917	-4.877	-4.836	-4.796	-4.755	-4.714	-4.674	-4.633
1	-4.591	-4.550	-4.509	-4.467	-4.425	-4.384	-4.342	-4.300	-4.257	-4.215
2	-4.173	-4.130	-4.088	-4.045	-4.002	-3.959	-3.916	-3.872	-3.829	-3.786
3	-3.742	-3.698	-3.654	-3.610	-3.566	-3.522	-3.478	-3.434	-3.389	-3.344
4	-3.300	-3.255	-3.210	-3.165	-3.120	-3.075	-3.029	-2.984	-2.938	-2.893
5	-2.847	-2.801	-2.755	-2.709	-2.663	-2.617	-2.571	-2.524	-2.478	-2.431
6	-2.385	-2.338	-2.291	-2.244	-2.197	-2.150	-2.103	-2.055	-2.008	-1.961
7	-1.913	-1.865	-1.818	-1.770	-1.722	-1.674	-1.626	-1.578	-1.530	-1.482
8	-1.433	-1.385	-1.336	-1.288	-1.239	-1.190	-1.142	-1.093	-1.044	-0.995
9	-0.946	-0.896	-0.847	-0.798	-0.749	-0.699	-0.650	-0.600	-0.550	-0.501
10	-0.451	-0.401	-0.351	-0.301	-0.251	-0.201	-0.151	-0.101	-0.050	0.000
0	0.000	0.050	0.101	0.151	0.202	0.253	0.303	0.354	0.405	0.456
10	0.507	0.558	0.609	0.660	0.711	0.762	0.812	0.863	0.914	0.965
20	1.019	1.071	1.122	1.174	1.226	1.277	1.329	1.381	1.433	1.485
30	1.537	1.589	1.641	1.693	1.745	1.797	1.849	1.902	1.954	2.006
40	2.059	2.111	2.164	2.216	2.269	2.322	2.374	2.427	2.480	2.532
50	2.585	2.638	2.691	2.744	2.797	2.850	2.903	2.956	3.009	3.062
60	3.116	3.169	3.222	3.275	3.329	3.382	3.436	3.489	3.543	3.596
70	3.650	3.703	3.757	3.810	3.864	3.918	3.971	4.025	4.079	4.133
80	4.187	4.240	4.294	4.348	4.402	4.456	4.510	4.564	4.618	4.672
90	4.726	4.781	4.835	4.889	4.943	4.997	5.052	5.106	5.160	5.215
100	5.269	5.323	5.378	5.432	5.487	5.541	5.595	5.650	5.705	5.759
110	5.814	5.868	5.923	5.977	6.032	6.087	6.141	6.196	6.251	6.306
120	6.360	6.415	6.470	6.525	6.579	6.634	6.689	6.744	6.799	6.854
130	6.909	6.964	7.019	7.074	7.129	7.184	7.239	7.294	7.349	7.404
140	7.459	7.514	7.569	7.624	7.679	7.734	7.789	7.844	7.900	7.955
150	8.010	8.065	8.120	8.175	8.231	8.286	8.341	8.396	8.452	8.507
160	8.562	8.618	8.673	8.728	8.783	8.839	8.894	8.949	9.005	9.060
170	9.115	9.171	9.226	9.282	9.337	9.392	9.448	9.503	9.559	9.614
180	9.669	9.725	9.780	9.836	9.891	9.947	10.002	10.057	10.113	10.168
190	10.224	10.279	10.335	10.390	10.446	10.501	10.557	10.612	10.668	10.723
200	10.779	10.834	10.890	10.945	11.001	11.056	11.112	11.167	11.223	11.278
210	11.334	11.389	11.445	11.501	11.556	11.612	11.667	11.723	11.778	11.834
220	11.889	11.945	12.000	12.056	12.111	12.167	12.222	12.278	12.334	12.389
230	12.445	12.500	12.556	12.611	12.667	12.722	12.778	12.833	12.889	12.944
240	13.000	13.056	13.111	13.167	13.222	13.278	13.333	13.389	13.444	13.500
250	13.555	13.611	13.666	13.722	13.777	13.833	13.888	13.944	13.999	14.055
260	14.110	14.166	14.221	14.277	14.332	14.388	14.443	14.499	14.554	14.609
270	14.665	14.720	14.776	14.831	14.887	14.942	14.998	15.053	15.109	15.164
280	15.219	15.275	15.330	15.386	15.441	15.496	15.552	15.607	15.663	15.718
290	15.773	15.829	15.884	15.940	15.995	16.050	16.106	16.161	16.216	16.272
300	16.327	16.383	16.438	16.493	16.549	16.604	16.659	16.715	16.770	16.825
310	16.881	16.936	16.991	17.046	17.102	17.157	17.212	17.268	17.323	17.378
320	17.434	17.489	17.544	17.599	17.655	17.710	17.765	17.820	17.876	17.931
330	17.986	18.041	18.097	18.152	18.207	18.262	18.318	18.373	18.428	18.483
340	18.538	18.594	18.649	18.704	18.759	18.814	18.870	18.925	18.980	19.035
350	19.090	19.146	19.201	19.256	19.311	19.366	19.422	19.477	19.532	19.587
360	19.642	19.697	19.753	19.808	19.863	19.918	19.973	20.028	20.083	20.139
370	20.194	20.249	20.304	20.359	20.414	20.469	20.525	20.580	20.635	20.690
380	20.745	20.800	20.855	20.911	20.966	21.021	21.076	21.131	21.186	21.241
390	21.297	21.352	21.407	21.462	21.517	21.572	21.627	21.683	21.738	21.793
400	21.848	21.903	21.958	22.014	22.069	22.124	22.179	22.234	22.289	22.345
410	22.400	22.455	22.510	22.565	22.620	22.676	22.731	22.786	22.841	22.896
420	22.952	23.007	23.062	23.117	23.172	23.228	23.283	23.338	23.393	23.449
430	23.504	23.559	23.614	23.670	23.725	23.780	23.835	23.891	23.946	24.001
440	24.057	24.112	24.167	24.223	24.278	24.333	24.389	24.444	24.499	24.555
450	24.610	24.665	24.721	24.776	24.832	24.887	24.943	24.998	25.053	25.109
460	25.164	25.220	25.275	25.331	25.386	25.442	25.497	25.553	25.608	25.664
470	25.720	25.775	25.831	25.886	25.942	25.998	26.053	26.109	26.165	26.220
480	26.276	26.332	26.387	26.443	26.499	26.555	26.610	26.666	26.722	26.778
490	26.834	26.889	26.945	27.001	27.057	27.113	27.169	27.225	27.281	27.337
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
500	27.393	27.449	27.505	27.561	27.617	27.673	27.729	27.785	27.841	27.897
510	27.953	28.010	28.066	28.122	28.178	28.234	28.291	28.347	28.403	28.460
520	28.516	28.572	28.629	28.685	28.741	28.798	28.854	28.911	28.967	29.024
530	29.080	29.137	29.194	29.250	29.307	29.363	29.420	29.477	29.534	29.590
540	29.647	29.704	29.761	29.818	29.874	29.931	29.988	30.045	30.102	30.159
550	30.216	30.273	30.330	30.387	30.444	30.502	30.559	30.616	30.673	30.730
560	30.788	30.845	30.902	30.960	31.017	31.074	31.132	31.189	31.247	31.304
570	31.362	31.419	31.477	31.535	31.592	31.650	31.708	31.766	31.824	31.881
580	31.939	31.997	32.055	32.113	32.171	32.229	32.287	32.345	32.403	32.461
590	32.519	32.577	32.636	32.694	32.752	32.810	32.869	32.927	32.985	33.044
600	33.102	33.161	33.219	33.278	33.337	33.395	33.454	33.513	33.571	33.630
610	33.689	33.748	33.807	33.866	33.925	33.984	34.043	34.102	34.161	34.220
620	34.279	34.338	34.397	34.457	34.516	34.575	34.635	34.694	34.754	34.813
630	34.873	34.932	34.992	35.051	35.111	35.171	35.230	35.290	35.350	35.410
640	35.470	35.530	35.590	35.650	35.710	35.770	35.830	35.890	35.950	36.010
650	36.071									



REFERENTNA TABLICA ZA TERMOELEMENTE TIPA K

**MAXIMUM TEMPERATURE RANGE**

**Thermocouple Grade**  
 - 328 to 2282°F  
 - 200 to 1250°C

**Extension Grade**

32 to 392°F  
 0 to 200°C

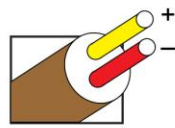
**LIMITS OF ERROR**

(whichever is greater)  
**Standard:** 2.2°C or 0.75% Above 0°C  
 2.2°C or 2.0% Below 0°C  
**Special:** 1.1°C or 0.4%

**COMMENTS, BARE WIRE ENVIRONMENT:**

Clean Oxidizing and Inert; Limited Use in Vacuum or Reducing; Wide Temperature Range; Most Popular Calibration

**TEMPERATURE IN DEGREES °C**  
**REFERENCE JUNCTION AT 0°C**



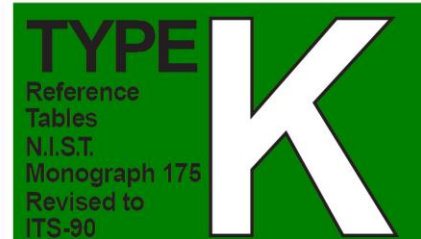
Thermocouple Grade

Nickel-Chromium  
 vs.  
 Nickel-Aluminum



Extension Grade

Revised Thermocouple Reference Tables



Thermoelectric Voltage in Millivolts

-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	°C	°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-6.458	-6.457	-6.456	-6.455	-6.454	-6.452	-6.450	-6.448	-6.446	-6.444	-6.441	-260	250	10.153	10.194	10.235	10.276	10.316	10.357	10.398	10.439	10.480	10.520
-6.438	-6.435	-6.432	-6.429	-6.425	-6.421	-6.417	-6.413	-6.408	-6.404	-6.400	-250	260	10.561	10.602	10.643	10.684	10.725	10.766	10.807	10.848	10.889	10.930
-6.399	-6.393	-6.388	-6.382	-6.377	-6.370	-6.364	-6.358	-6.351	-6.344	-240	270	10.971	11.012	11.053	11.094	11.135	11.176	11.217	11.259	11.300	11.341	11.381
-6.337	-6.329	-6.322	-6.314	-6.306	-6.297	-6.289	-6.280	-6.271	-6.262	-230	280	11.382	11.423	11.465	11.506	11.547	11.588	11.630	11.671	11.712	11.753	11.793
-6.252	-6.243	-6.233	-6.223	-6.213	-6.202	-6.192	-6.181	-6.170	-6.158	-220	290	11.795	11.836	11.877	11.919	11.960	12.001	12.043	12.084	12.126	12.167	12.207
-6.147	-6.135	-6.123	-6.111	-6.099	-6.087	-6.074	-6.061	-6.048	-6.035	-210	300	12.209	12.250	12.291	12.333	12.374	12.416	12.457	12.499	12.540	12.582	12.623
-6.021	-6.007	-5.994	-5.980	-5.965	-5.951	-5.936	-5.922	-5.907	-5.891	-200	310	12.624	12.665	12.707	12.748	12.790	12.831	12.873	12.915	12.956	12.998	13.039
-5.876	-5.861	-5.845	-5.829	-5.813	-5.797	-5.780	-5.763	-5.747	-5.730	-190	320	13.040	13.081	13.123	13.165	13.206	13.248	13.290	13.331	13.373	13.415	13.456
-5.713	-5.695	-5.678	-5.660	-5.642	-5.624	-5.606	-5.588	-5.569	-5.550	-180	330	13.457	13.498	13.540	13.582	13.624	13.665	13.707	13.749	13.791	13.833	13.874
-5.531	-5.512	-5.493	-5.474	-5.454	-5.435	-5.415	-5.395	-5.374	-5.354	-170	340	13.874	13.916	13.958	14.000	14.042	14.084	14.126	14.167	14.209	14.251	14.292
-5.333	-5.313	-5.292	-5.271	-5.250	-5.228	-5.207	-5.185	-5.163	-5.141	-160	350	14.293	14.335	14.377	14.419	14.461	14.503	14.545	14.587	14.629	14.671	14.712
-5.119	-5.097	-5.074	-5.052	-5.029	-5.006	-4.983	-4.960	-4.936	-4.913	-150	360	14.713	14.755	14.797	14.839	14.881	14.923	14.965	15.007	15.049	15.091	15.132
-4.889	-4.865	-4.841	-4.817	-4.793	-4.768	-4.744	-4.719	-4.694	-4.669	-140	370	15.133	15.175	15.217	15.259	15.301	15.343	15.385	15.427	15.469	15.511	15.552
-4.644	-4.618	-4.593	-4.567	-4.542	-4.516	-4.490	-4.463	-4.437	-4.411	-130	380	15.554	15.596	15.638	15.680	15.722	15.764	15.806	15.848	15.891	15.933	15.974
-4.384	-4.357	-4.330	-4.303	-4.276	-4.249	-4.221	-4.194	-4.166	-4.138	-120	390	15.975	16.017	16.059	16.102	16.144	16.186	16.228	16.270	16.313	16.355	16.396
-4.110	-4.082	-4.054	-4.025	-3.997	-3.968	-3.939	-3.911	-3.882	-3.852	-110	400	16.397	16.439	16.482	16.524	16.566	16.608	16.651	16.693	16.735	16.778	16.819
-3.823	-3.794	-3.764	-3.734	-3.705	-3.675	-3.645	-3.614	-3.584	-3.554	-100	410	16.820	16.862	16.904	16.947	16.989	17.031	17.074	17.116	17.158	17.201	17.242
-3.523	-3.492	-3.462	-3.431	-3.400	-3.368	-3.337	-3.306	-3.274	-3.243	-90	420	17.243	17.285	17.328	17.370	17.413	17.455	17.497	17.540	17.582	17.624	17.666
-3.211	-3.179	-3.147	-3.115	-3.083	-3.050	-3.018	-2.986	-2.953	-2.920	-80	430	17.667	17.709	17.752	17.794	17.837	17.879	17.921	17.964	18.006	18.049	18.091
-2.887	-2.854	-2.821	-2.788	-2.755	-2.721	-2.688	-2.654	-2.620	-2.587	-70	440	18.091	18.134	18.176	18.218	18.261	18.303	18.346	18.388	18.431	18.473	18.515
-2.553	-2.519	-2.485	-2.450	-2.416	-2.382	-2.347	-2.312	-2.278	-2.243	-60	450	18.516	18.558	18.601	18.643	18.686	18.728	18.771	18.813	18.856	18.898	18.940
-2.208	-2.173	-2.138	-2.103	-2.067	-2.032	-1.996	-1.961	-1.925	-1.889	-50	460	18.941	18.983	19.026	19.068	19.111	19.154	19.196	19.239	19.281	19.324	19.366
-1.854	-1.818	-1.782	-1.745	-1.709	-1.673	-1.637	-1.600	-1.564	-1.527	-40	470	19.366	19.409	19.451	19.494	19.537	19.579	19.622	19.664	19.707	19.750	19.792
-1.490	-1.453	-1.417	-1.380	-1.343	-1.305	-1.268	-1.231	-1.194	-1.156	-30	480	19.792	19.835	19.877	19.920	19.962	20.005	20.048	20.090	20.133	20.175	20.217
-1.119	-1.081	-1.043	-1.006	-0.968	-0.930	-0.892	-0.854	-0.816	-0.778	-20	490	20.218	20.261	20.303	20.346	20.389	20.431	20.474	20.516	20.559	20.602	20.644
-0.739	-0.701	-0.663	-0.624	-0.586	-0.547	-0.508	-0.470	-0.431	-0.392	-10	500	20.644	20.687	20.730	20.772	20.815	20.857	20.900	20.943	20.985	21.028	21.070
-0.353	-0.314	-0.275	-0.236	-0.197	-0.157	-0.118	-0.079	-0.039	0.000	0	510	21.071	21.113	21.156	21.199	21.241	21.284	21.326	21.369	21.412	21.454	21.496
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	520	21.497	21.540	21.582	21.625	21.668	21.710	21.753	21.796	21.838	21.881	21.923
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	530	21.924	21.966	22.009	22.052	22.094	22.137	22.179	22.222	22.265	22.307	22.350
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.001	1.041	1.081	1.122	1.163	540	22.350	22.393	22.435	22.478	22.521	22.563	22.606	22.649	22.691	22.734	22.776
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	550	22.776	22.819	22.862	22.904	22.947	22.990	23.032	23.075	23.117	23.160	23.202
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	560	23.203	23.245	23.288	23.331	23.373	23.416	23.458	23.501	23.544	23.586	23.628
50	2.023	2.064	2.106	2.147	2.188	2.230	2.271	2.312	2.354	2.395	570	23.629	23.671	23.714	23.757	23.799	23.842	23.884	23.927	23.970	24.012	24.054
60	2.436	2.478	2.519	2.561	2.602	2.644	2.685	2.727	2.768	2.810	580	24.055	24.097	24.140	24.182	24.225	24.267	24.310	24.353	24.395	24.438	24.480
70	2.851	2.893	2.934	2.976	3.017	3.059	3.100	3.142	3.184	3.225	590	24.480	24.523	24.565	24.608	24.650	24.693	24.735	24.778	24.820	24.863	24.905
80	3.267	3.308	3.350	3.391	3.433	3.474	3.516	3.557	3.599	3.640	600	24.905	24.948	24.990	25.033	25.075	25.118	25.160	25.203	25.245	25.288	25.330
90	3.682	3.723	3.765	3.806	3.848	3.889	3.931	3.972	4.013	4.055	610	25.330	25.373	25.415	25.458	25.500	25.543	25.585	25.627	25.670	25.712	25.754
100	4.096	4.138	4.179	4.220	4.262	4.303	4.344	4.385	4.427	4.468	620	25.755	25.797	25.840	25.882	25.924	25.967	26.009	26.052	26.094	26.136	26.178
110	4.509	4.550	4.591	4.633	4.674	4.715	4.756	4.797	4.838	4.879	630	26.179	26.221	26.263	26.306	26.348	26.390	26.433	26.475	26.517	26.560	26.602
120	4.920	4.961	5.002	5.043	5.084	5.124	5.165	5.206	5.247	5.288	640	26.602	26.644	26.687	26.729	26.771	26.814	26.856	26.898	26.940	26.983	27.025
130	5.328	5.369	5.410	5.450	5.491	5.532	5.572	5.613	5.653	5.694	650	27.025	27.067	27.109	27.152	27.194	27.236	27.278	27.320	27.363	27.405	27.447
140	5.735	5.775	5.815	5.856	5.896	5.937	5.977	6.017	6.058	6.098	660	27.447	27.489	27.531	27.574	27.616	27.658	27.700	27.742	27.784	27.826	27.868
150	6.138	6.179	6.219	6.259	6.299	6.339	6.380	6.420	6.460	6.500	670	27.869	27.911	27.953	27.995	28.037	28.079	28.121	28.163	28.205	28.247	28.289
160	6.540	6.580	6.620	6.660	6.701	6.741	6.781	6.821	6.861	6.901	680	28.289	28.332	28.374	28.416	28.458	28.500	28.542	28.584	28.626	28.668	28.710
170	6.941	6.981	7.021	7.060	7.100	7.140	7.180	7.220	7.260	7.300	690	28.710	28.752	28.794	28.835	28.877	28.919	28.961	29.003	29.045	29.087	29.129
180	7.340	7.380	7.420	7.460	7.500	7.540	7.579	7.619	7.659	7.699	700	29.129	29.171	29.213	29.255	29.297	29.339	29.380	29.422	29.464	29.506	29.548
190</																						

**MAXIMUM TEMPERATURE RANGE**

**Thermocouple Grade**  
 - 328 to 2282°F  
 - 200 to 1250°C

**Extension Grade**  
 32 to 392°F  
 0 to 200°C

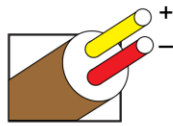
**LIMITS OF ERROR**

(whichever is greater)  
**Standard:** 2.2°C or 0.75% Above 0°C  
 2.2°C or 2.0% Below 0°C  
**Special:** 1.1°C or 0.4%

**COMMENTS, BARE WIRE ENVIRONMENT:**

Clean Oxidizing and Inert; Limited Use in Vacuum or Reducing; Wide Temperature Range; Most Popular Calibration

**TEMPERATURE IN DEGREES °C**  
**REFERENCE JUNCTION AT 0°C**



Thermocouple Grade

**Nickel-Chromium**  
**VS.**  
**Nickel-Aluminum**



Extension Grade

**Revised Thermocouple Reference Tables**



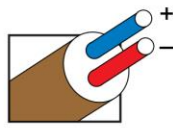
Thermoelectric Voltage in Millivolts

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
800	33.275	33.316	33.357	33.398	33.439	33.480	33.521	33.562	33.603	33.644
810	33.685	33.726	33.767	33.808	33.848	33.889	33.930	33.971	34.012	34.053
820	34.093	34.134	34.175	34.216	34.257	34.297	34.338	34.379	34.420	34.460
830	34.501	34.542	34.582	34.623	34.664	34.704	34.745	34.786	34.826	34.867
840	34.908	34.948	34.989	35.029	35.070	35.110	35.151	35.192	35.232	35.273
850	35.313	35.354	35.394	35.435	35.475	35.516	35.556	35.596	35.637	35.677
860	35.718	35.758	35.798	35.839	35.879	35.920	35.960	36.000	36.041	36.081
870	36.121	36.162	36.202	36.242	36.282	36.323	36.363	36.403	36.443	36.484
880	36.524	36.564	36.604	36.644	36.685	36.725	36.765	36.805	36.845	36.885
890	36.925	36.965	37.006	37.046	37.086	37.126	37.166	37.206	37.246	37.286
900	37.326	37.366	37.406	37.446	37.486	37.526	37.566	37.606	37.646	37.686
910	37.725	37.765	37.805	37.845	37.885	37.925	37.965	38.005	38.044	38.084
920	38.124	38.164	38.204	38.243	38.283	38.323	38.363	38.402	38.442	38.482
930	38.522	38.561	38.601	38.641	38.680	38.720	38.760	38.799	38.839	38.878
940	38.918	38.958	38.997	39.037	39.076	39.116	39.155	39.195	39.235	39.274
950	39.314	39.353	39.393	39.432	39.471	39.511	39.550	39.590	39.629	39.669
960	39.708	39.747	39.787	39.826	39.866	39.905	39.944	39.984	40.023	40.062
970	40.101	40.141	40.180	40.219	40.259	40.298	40.337	40.376	40.415	40.455
980	40.494	40.533	40.572	40.611	40.651	40.690	40.729	40.768	40.807	40.846
990	40.885	40.924	40.963	41.002	41.042	41.081	41.120	41.159	41.198	41.237
1000	41.276	41.315	41.354	41.393	41.431	41.470	41.509	41.548	41.587	41.626
1010	41.665	41.704	41.743	41.781	41.820	41.859	41.898	41.937	41.976	42.014
1020	42.053	42.092	42.131	42.169	42.208	42.247	42.286	42.324	42.363	42.402
1030	42.440	42.479	42.518	42.556	42.595	42.633	42.672	42.711	42.749	42.788
1040	42.826	42.865	42.903	42.942	42.980	43.019	43.057	43.096	43.134	43.173
1050	43.211	43.250	43.288	43.327	43.365	43.403	43.442	43.480	43.518	43.557
1060	43.595	43.633	43.672	43.710	43.748	43.787	43.825	43.863	43.901	43.940
1070	43.978	44.016	44.054	44.092	44.130	44.169	44.207	44.245	44.283	44.321
1080	44.359	44.397	44.435	44.473	44.512	44.550	44.588	44.626	44.664	44.702
1090	44.740	44.778	44.816	44.853	44.891	44.929	44.967	45.005	45.043	45.081
1100	45.119	45.157	45.194	45.232	45.270	45.308	45.346	45.383	45.421	45.459
1110	45.497	45.534	45.572	45.610	45.647	45.685	45.723	45.760	45.798	45.836
1120	45.873	45.911	45.948	45.986	46.024	46.061	46.099	46.136	46.174	46.211
1130	46.249	46.286	46.324	46.361	46.398	46.436	46.473	46.511	46.548	46.585
1140	46.623	46.660	46.697	46.735	46.772	46.809	46.847	46.884	46.921	46.958
1150	46.995	47.033	47.070	47.107	47.144	47.181	47.218	47.256	47.293	47.330
1160	47.367	47.404	47.441	47.478	47.515	47.552	47.589	47.626	47.663	47.700
1170	47.737	47.774	47.811	47.848	47.884	47.921	47.958	47.995	48.032	48.069
1180	48.105	48.142	48.179	48.216	48.252	48.289	48.326	48.363	48.399	48.436
1190	48.473	48.509	48.546	48.582	48.619	48.656	48.692	48.729	48.765	48.802
1200	48.838	48.875	48.911	48.948	48.984	49.021	49.057	49.093	49.130	49.166
1210	49.202	49.239	49.275	49.311	49.348	49.384	49.420	49.456	49.493	49.529
1220	49.565	49.601	49.637	49.674	49.710	49.746	49.782	49.818	49.854	49.890
1230	49.926	49.962	49.998	50.034	50.070	50.106	50.142	50.178	50.214	50.250
1240	50.286	50.322	50.358	50.393	50.429	50.465	50.501	50.537	50.572	50.608
1250	50.644	50.680	50.715	50.751	50.787	50.822	50.858	50.894	50.929	50.965
1260	51.000	51.036	51.071	51.107	51.142	51.178	51.213	51.249	51.284	51.320
1270	51.355	51.391	51.426	51.461	51.497	51.532	51.567	51.603	51.638	51.673
1280	51.708	51.744	51.779	51.814	51.849	51.885	51.920	51.955	51.990	52.025
1290	52.060	52.095	52.130	52.165	52.200	52.235	52.270	52.305	52.340	52.375
1300	52.410	52.445	52.480	52.515	52.550	52.585	52.620	52.655	52.689	52.724
1310	52.759	52.794	52.828	52.863	52.898	52.932	52.967	53.002	53.037	53.071
1320	53.106	53.140	53.175	53.210	53.244	53.279	53.313	53.348	53.382	53.417
1330	53.451	53.486	53.520	53.555	53.589	53.623	53.658	53.692	53.727	53.761
1340	53.795	53.830	53.864	53.898	53.932	53.967	54.001	54.035	54.069	54.104
1350	54.138	54.172	54.206	54.240	54.274	54.308	54.343	54.377	54.411	54.445
1360	54.479	54.513	54.547	54.581	54.615	54.649	54.683	54.717	54.751	54.785
1370	54.819	54.852	54.886							
1380										
1390										
1400										
1410										
1420										
1430										
1440										
1450										
1460										
1470										
1480										
1490										
1500										

REFERENTNA TABLICA ZA TERMOELEMENTE TIPA T

Revised Thermocouple Reference Tables

**TYPE T**  
Reference Tables  
N.I.S.T.  
Monograph 175  
Revised to ITS-90



Thermocouple Grade

MAXIMUM TEMPERATURE RANGE

Thermocouple Grade  
- 328 to 662°F  
- 200 to 350°C

Extension Grade

- 76 to 212°F  
- 60 to 100°C

LIMITS OF ERROR

(whichever is greater)

Standard: 1.0°C or 0.75% Above 0°C

1.0°C or 1.5% Below 0°C

Special: 0.5°C or 0.4%

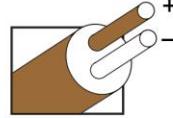
COMMENTS, BARE WIRE ENVIRONMENT:

Mild Oxidizing, Reducing Vacuum or Inert; Good Where Moisture Is Present; Low Temperature and Cryogenic Applications

TEMPERATURE IN DEGREES °C

REFERENCE JUNCTION AT 0°C

Copper vs. Copper-Nickel



Extension Grade

Thermoelectric Voltage in Millivolts

-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	°C	°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-6.258	-6.256	-6.255	-6.253	-6.251	-6.248	-6.245	-6.242	-6.239	-6.236	-6.232	-260	50	2.036	2.079	2.122	2.165	2.208	2.251	2.294	2.338	2.381	2.425
	-6.228	-6.223	-6.219	-6.214	-6.209	-6.204	-6.198	-6.193	-6.187	-6.180	-250	60	2.468	2.512	2.556	2.600	2.643	2.687	2.732	2.776	2.820	2.864
	-6.174	-6.167	-6.160	-6.153	-6.146	-6.138	-6.130	-6.122	-6.114	-6.105	-240	70	2.909	2.953	2.998	3.043	3.087	3.132	3.177	3.222	3.267	3.312
	-6.096	-6.087	-6.078	-6.068	-6.059	-6.049	-6.038	-6.028	-6.017	-6.007	-230	80	3.358	3.403	3.448	3.494	3.539	3.585	3.631	3.677	3.722	3.768
	-5.996	-5.985	-5.973	-5.962	-5.950	-5.938	-5.926	-5.914	-5.901	-5.888	-220	90	3.814	3.860	3.907	3.953	3.999	4.046	4.092	4.138	4.185	4.232
	-5.876	-5.863	-5.850	-5.836	-5.823	-5.809	-5.795	-5.782	-5.767	-5.753	-210	100	4.279	4.325	4.372	4.419	4.466	4.513	4.561	4.608	4.655	4.702
	-5.739	-5.724	-5.710	-5.695	-5.680	-5.665	-5.650	-5.634	-5.619	-5.603	-200	110	4.750	4.798	4.845	4.893	4.941	4.988	5.036	5.084	5.132	5.180
	-5.587	-5.571	-5.555	-5.539	-5.523	-5.506	-5.489	-5.473	-5.456	-5.439	-190	120	5.228	5.277	5.325	5.373	5.422	5.470	5.519	5.567	5.616	5.665
	-5.421	-5.404	-5.387	-5.369	-5.351	-5.334	-5.316	-5.297	-5.279	-5.261	-180	130	5.714	5.763	5.812	5.861	5.910	5.959	6.008	6.057	6.107	6.156
	-5.242	-5.224	-5.205	-5.186	-5.167	-5.148	-5.128	-5.109	-5.089	-5.070	-170	140	6.206	6.255	6.305	6.355	6.404	6.454	6.504	6.554	6.604	6.654
	-5.050	-5.030	-5.010	-4.989	-4.969	-4.949	-4.928	-4.907	-4.886	-4.865	-160	150	6.704	6.754	6.805	6.855	6.905	6.956	7.006	7.057	7.107	7.158
	-4.844	-4.823	-4.802	-4.780	-4.759	-4.737	-4.715	-4.693	-4.671	-4.648	-150	160	7.209	7.260	7.310	7.361	7.412	7.463	7.515	7.566	7.617	7.668
	-4.626	-4.604	-4.581	-4.558	-4.535	-4.512	-4.489	-4.466	-4.443	-4.419	-140	170	7.720	7.771	7.823	7.874	7.926	7.977	8.029	8.081	8.133	8.185
	-4.395	-4.372	-4.348	-4.324	-4.300	-4.275	-4.251	-4.226	-4.202	-4.177	-130	180	8.237	8.289	8.341	8.393	8.445	8.497	8.550	8.602	8.654	8.707
	-4.152	-4.127	-4.102	-4.077	-4.052	-4.026	-4.000	-3.975	-3.949	-3.923	-120	190	8.759	8.812	8.865	8.917	8.970	9.023	9.076	9.129	9.182	9.235
	-3.897	-3.871	-3.844	-3.818	-3.791	-3.765	-3.738	-3.711	-3.684	-3.657	-110	200	9.288	9.341	9.395	9.448	9.501	9.555	9.608	9.662	9.715	9.769
	-3.629	-3.602	-3.574	-3.547	-3.519	-3.491	-3.463	-3.435	-3.407	-3.379	-100	210	9.822	9.876	9.930	9.984	10.038	10.092	10.146	10.200	10.254	10.308
	-3.350	-3.322	-3.293	-3.264	-3.235	-3.206	-3.177	-3.148	-3.118	-3.089	-90	220	10.362	10.417	10.471	10.525	10.580	10.634	10.689	10.743	10.798	10.853
	-3.059	-3.030	-3.000	-2.970	-2.940	-2.910	-2.879	-2.849	-2.818	-2.788	-80	230	10.907	10.962	11.017	11.072	11.127	11.182	11.237	11.292	11.347	11.403
	-2.757	-2.726	-2.695	-2.664	-2.633	-2.602	-2.571	-2.539	-2.507	-2.476	-70	240	11.458	11.513	11.569	11.624	11.680	11.735	11.791	11.846	11.902	11.958
	-2.444	-2.412	-2.380	-2.348	-2.316	-2.283	-2.251	-2.218	-2.186	-2.153	-60	250	12.013	12.069	12.125	12.181	12.237	12.293	12.349	12.405	12.461	12.518
	-2.120	-2.087	-2.054	-2.021	-1.987	-1.954	-1.920	-1.887	-1.853	-1.819	-50	260	12.574	12.630	12.687	12.743	12.799	12.856	12.912	12.969	13.026	13.082
	-1.785	-1.751	-1.717	-1.683	-1.648	-1.614	-1.579	-1.545	-1.510	-1.475	-40	270	13.139	13.196	13.253	13.310	13.366	13.423	13.480	13.537	13.595	13.652
	-1.440	-1.405	-1.370	-1.335	-1.299	-1.264	-1.228	-1.192	-1.157	-1.121	-30	280	13.709	13.766	13.823	13.881	13.938	13.995	14.053	14.110	14.168	14.226
	-1.085	-1.049	-1.013	-0.976	-0.940	-0.904	-0.867	-0.830	-0.794	-0.757	-20	290	14.283	14.341	14.399	14.456	14.514	14.572	14.630	14.688	14.746	14.804
	-0.720	-0.683	-0.646	-0.608	-0.571	-0.534	-0.496	-0.459	-0.421	-0.383	-10	300	14.862	14.920	14.978	15.036	15.095	15.153	15.211	15.270	15.328	15.386
	-0.345	-0.307	-0.269	-0.231	-0.193	-0.154	-0.116	-0.077	-0.039	0.000	0	310	15.445	15.503	15.562	15.621	15.679	15.738	15.797	15.856	15.914	15.973
0	0.000	0.039	0.078	0.117	0.156	0.195	0.234	0.273	0.312	0.352		320	16.032	16.091	16.150	16.209	16.268	16.327	16.387	16.446	16.505	16.564
10	0.391	0.431	0.470	0.510	0.549	0.589	0.629	0.669	0.709	0.749		330	16.624	16.683	16.742	16.802	16.861	16.921	16.980	17.040	17.100	17.159
20	0.790	0.830	0.870	0.911	0.951	0.992	1.033	1.074	1.114	1.155		340	17.219	17.279	17.339	17.399	17.458	17.518	17.578	17.638	17.698	17.759
30	1.196	1.238	1.279	1.320	1.362	1.403	1.445	1.486	1.528	1.570		350	17.819	17.879	17.939	17.999	18.060	18.120	18.180	18.241	18.301	18.362
40	1.612	1.654	1.696	1.738	1.780	1.823	1.865	1.908	1.950	1.993		360	18.422	18.483	18.543	18.604	18.665	18.725	18.786	18.847	18.908	18.969
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		370	19.030	19.091	19.152	19.213	19.274	19.335	19.396	19.457	19.518	19.579
												380	19.641	19.702	19.763	19.825	19.886	19.947	20.009	20.070	20.132	20.193
												390	20.255	20.317	20.378	20.440	20.502	20.563	20.625	20.687	20.748	20.810

Zadaci za samostalno rješavanje:

1.3. Kolika je temperatura fluida čiju temperaturu mjerimo termoelementom tipa J, ako temperatura referentnog spoja iznosi 0 °C, a voltmetar spojen u krugu s termoelementom pokazuje:

- a) 9,669 mV → iz Tab. →  $t_{mj} =$
- b) 4,187 mV → iz Tab. →  $t_{mj} =$
- c) 16,936 mV → iz Tab. →  $t_{mj} =$
- d) 41,138 mV → iz Tab. →  $t_{mj} =$
- e) 0,405 mV → iz Tab. →  $t_{mj} =$
- f) -0,201 mV → iz Tab. →  $t_{mj} =$
- g) -3,698 mV → iz Tab. →  $t_{mj} =$
- h) 2,374 mV → iz Tab. →  $t_{mj} =$
- i) 25,942 mV → iz Tab. →  $t_{mj} =$

Koliku vrijednost bi pokazao voltmetar ukoliko bi navedeni termoelement tipa J zamijenili u trenutku dok pokazuje vrijednost 9,669 mV, i to s tipom T, a koliku s tipom K?

1.4. Temperatura referentnog spoja termoelementa tipa J iznosi 30 °C, a voltmetar spojen u krugu s termoelementom pokazuje 8,132 mV. Kolika je temperatura medija čiju temperaturu mjerimo? Koliku vrijednost bi pokazao voltmetar ukoliko bi termoelement zamijenili s tipom T, a koliku s tipom K?

1.5. Devet termoelemenata tipa J povezano je u seriju, prema slici, tako da ih pet mjeri temperaturu ploče naizmjenično s ostala četiri koja su izložena okolnoj temperaturi 25 °C. Odredite traženu temperaturu ploče, ukoliko voltmetar spojen u seriju s ovom termoskupinom pokazuje:

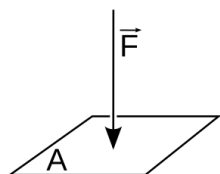
- a) 11,537 mV
- b) 16,555 mV

Zadatak za samostalno rješavanje (uz popunjavanje lab. izvještaja 2):

U laboratorijsku kadu s kemijski čistom, deioniziranom vodom, koja može održavati vodu pri različitim temperaturama (<80 °C), ovisno o zahtjevima, uronite termoelemente tipa K, i to jedan priključen izravno na multifunkcionalni digitalni voltmetar, a drugi na 4-kanalni sakupljač podataka s ugrađenom elektroničkom kompenzacijom referentne temperature i izravnim očitavanjem temperature. Podešavajući temperaturu vode u kadi s 30 °C do 60 °C, s korakom od 10 °C, očitajte mjerne odzive ovih dvaju korištenih termoelemenata, te usporedite njihove dobivene temperature s temperaturom vode u kadi u svim mjernim točkama, uz izračun pojedinih mjernih pogrešaka izraženih u postotku. Također, grafički prikazite ovisnost izmjerene i korigirane elektromotorne sile termoelementa u odnosu na temperaturu vode, tj. izradite tzv. kalibracijski dijagram korištenog termoelementa tipa K u odgovarajućem mjerilu.

## 2. MJERENJE TLAKA

**Tlak** – sila kojom sustav djeluje (okomito) na jedinicu površine svoje opne (granice):



$$p = \frac{F}{A} \quad \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Pa}$$

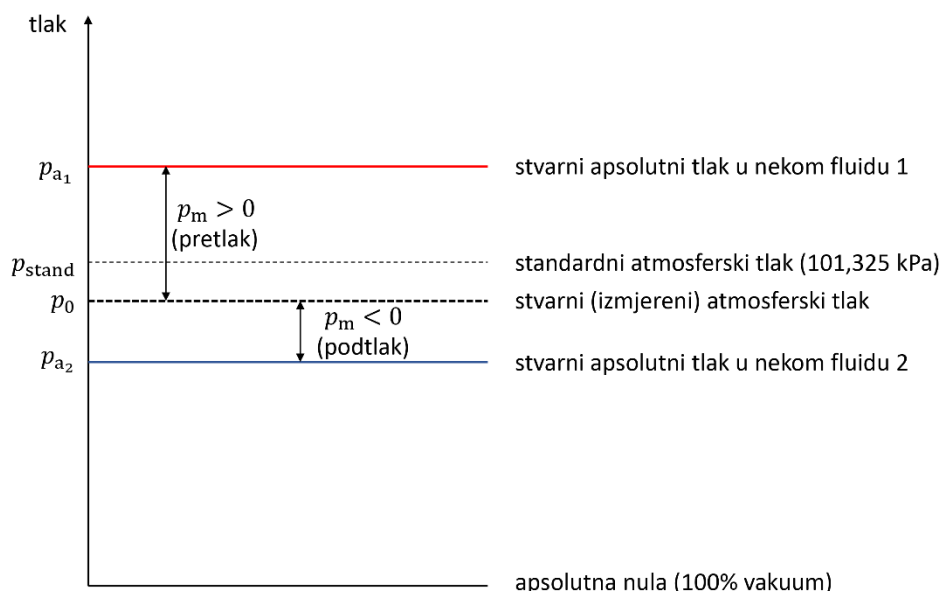
$$1 \text{ bar} \approx 750 \text{ torr} \approx 750 \text{ mmHg} \approx 14,504 \text{ psi} = 10^5 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} \approx 14,696 \text{ psi} = 1,01325 \text{ bar} = 101325 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ hPa} = 1 \text{ mbar} = 0,001 \text{ bar} \approx 0,014504 \text{ psi} = 100 \text{ Pa} = 0,1 \text{ kPa}$$

Atmosferski (barometarski) tlak  $p_0$  ili  $p_b$  – apsolutni tlak okolnog atmosferskog zraka koji ovisi o geodetskoj visini i meteorološkim uvjetima.

Manometarski tlak  $p_m$  (ili  $p_g$ ) – razlika apsolutnog tlaka  $p_a$  u nekom fluidu i atmosferskog  $p_0$  (ako je  $p_m > 0$ , tada se zove pretlak (*gauge*) i mjeri se manometrom, a ako je  $p_m < 0$ , tada se zove podtlak i mjeri se vakuummetrom, odnosno njegova apsolutna vrijednost je vakuum  $p_v$ )



### Zadaci za samostalno rješavanje:

2.1. Manometar priključen na automobilsku gumu pokazuje 2 bar pri 20 °C, dok barometar postavljen pored automobila pokazuje 768 mm visine živina (Hg) stupca.

- Odrediti apsolutan tlak (u kPa) u automobilskoj gumi.
- Odrediti atmosferski tlak zraka (u hPa) na vrhu planine, ako znamo da je tada apsolutni tlak zraka u automobilskoj gumi bio 1% niži u odnosu na onaj prethodno izračunati, te uz uvjet da je ventil ove automobilske gume s apsolutnom nepropusnošću.
- Odrediti apsolutan tlak (u bar) u automobilskoj gumi ako auto upadne u more ( $\rho_m = 1025 \text{ kg/m}^3$ ) na dubinu od 30 m, a uz uvjet apsolutne nepropusnosti ventila.

2.2. Za stanje okoline pri 20 °C i 101325 Pa, odrediti kotlovski tlak koji se može mjeriti pomoću U-cijevi u kojoj je živa ( $\rho = 13545,7 \text{ kg/m}^3$ ), koja pokazuje ukupnu razliku visine od 200 cm.

**Mjerenje tlaka** može se vršiti različitim mjernim uređajima (tlakomjerima), i to:

- za mjerenje apsolutnog tlaka:
  - barometri:
    - živin (Torricellijev) barometar
    - vodeni (Goetheov) barometar ( $1 \text{ mmH}_2\text{O}$  pri  $4 \text{ °C} = 9,80665 \text{ Pa}$ )
    - aneroid ili suhi barometar (na temelju deformacije evakuirane metalne kutije koja zbog promjene tlaka zraka sustavom poluga i kazaljkom pokazuje (apsolutni) tlak zraka u mmHg ili u mbar)
  
- za mjerenje relativnog tlaka (diferencijski tlakomjeri):
  - manometri (hidraulični, mehanički ili električni) → za mjerenje pretlaka:
    - hidraulični U-manometar
    - manometar s nagnutom cijevi (povećana osjetljivost za  $1/\sin\theta$ )
    - mikromanometar s fino podesivim navojem
    - instrument/uređaj s utegom
    - uređaj s izvrnutim zvonom
    - pretvarači tlaka (engl. *pressure transducers*), koji deformaciju elastičnog elementa pretvaraju u mehanički ili električni signal, različitih izvedbi:
      - Bourdonova cijev
      - harmonika ili mijeh
      - dijafragma/membrana (ravna ili valovita)
      - kapsula
    - tlačne posude ili ćelije
    - mjerači tlaka putem električnog otpora
  - vakuummetri (hidraulični, mehanički ili električni) → za mjerenje podtlaka:
    - U-cijev kojoj otvoreni kraj nije izložen atmosferskomu tlaku nego tlaku u posudi u kojoj se određuje vakuum
    - pretvarač tlaka s Bourdonovom cijevi spojen na vakuumsku posudu
    - McLeodov instrument
    - triodni ionizacijski vakuummetar s komorama (npr. Bayard-Alpertov)
    - instrument temeljen na toplinskoj vodljivosti (npr. Piranijev)
  
- za mjerenje zaustavnog ili totalnog (ukupnog) tlaka (zbroj statičkog i dinamičkog tlaka):
  - udarne sonde (npr. Pitot-cijev ili Prandtl-Pitotova cijev, Kiel sonda i sl.)
  - pretvarač tlaka s dijafragmom/membranom
  - ...

Zadatak za samostalno rješavanje:

2.3. Pad tlaka pri protoku zraka ( $\rho=1,2 \text{ kg/m}^3$ ) kroz cijev iznosi 2 kPa. Kolika će biti razlika u visini (u mm) stupaca živinog ( $\rho=13545,7 \text{ kg/m}^3$ ) U-manometra, ako je jedna strana priključena na ulaz, a druga na izlaz cijevi? Odrediti i osjetljivost manometra (u mm/kPa).

Uzroci čestih sustavnih pogreški pri mjerenju tlaka različitim tlakomjerima:

- promjena temperature, odnosno gustoće radnog ili okolnog fluida u odnosu na standardne uvjete → npr. korekcija gustoće žive ( $\rho_0$  pri 0 °C) s temperaturom ( $t$  u °C):

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta \cdot t} = \frac{13595}{1 + 0,000182 \cdot t}$$

- promjena nadmorske visine  $z$  [m] i geografske širine mjernog mjesta  $\varphi$  [°] u odnosu na 45°, odnosno lokalna varijacija gravitacijskog ubrzanja → korekcijski faktor iznosi:

$$e_1 = -(2,637 \cdot 10^{-3} \cdot \cos 2\varphi + 2,9 \cdot 10^{-8} \cdot z + 5 \cdot 10^{-5})$$

- efekt uzgona zraka zbog razlike u gustoćama zraka i materijala utega (slučaj kod instrumenata/testera s utegom) → korekcijski faktor iznosi:

$$e_2 = -(\rho_{\text{zrak}}/\rho_{\text{masa}})$$

Dakle, stvarna vrijednost tlaka  $p_{\text{st}}$ , uzevši u obzir korekciju izmjenog tlaka  $p_{\text{mj}}$ , iznosi:

$$p_{\text{st}} = p_{\text{mj}} \cdot (1 + e_1 + e_2)$$

Zadatak za samostalno rješavanje:

2.4. Instrument/uređaj s utegom (gustoće materijala 7945 kg/m<sup>3</sup>) postavljen je na Mosoru (geografska širina 43°, nadmorska visina 1339 m), gdje na manometru pokazuje tlak od 500 kPa, dok tlak okolnog zraka iznosi 1000 hPa, a gustoća 1,2 kg/m<sup>3</sup>. Odredite stvarni apsolutni tlak u sustavu (u Pa), te pogrešku očitavanja u postotku.

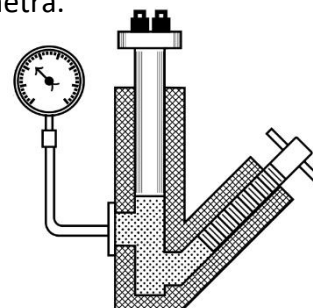
Zadatak za samostalno rješavanje (uz popunjavanje lab. izvještaja 3):

Instrumentom s utegom (engl. *deadweight tester*), koji se koristi kao referentni uređaj za mjerenje tlaka i za statičko umjeravanje/kalibraciju/baždarenje pretvarača tlaka, odrediti razred točnosti manometra nepoznatog odziva korištenjem raspoloživih utega/etalona poznate mase, i to provođenjem mjerenja tlaka i usporedbom ili s mjernim rezultatima drugog manometra većeg razreda točnosti, ako je priključen na instrument, ili s izračunatim nazivnim tlakom prilikom inkrementalnog opterećivanja, a zatim i tijekom rasterećivanja sustava.

Dobivene mjerne i izračunate podatke prikažite tablično, te skicirajte dijagrame tlačenja i popuštanja mjernog sustava, uz označavanje dobivene histereze, odnosno odstupanja u odnosu na nazivne vrijednosti tlakova. Također, prikažite tzv. štapićasti dijagram ovisnosti apsolutne vrijednosti mjernog odmaka (varijacije) očitavanja manometra nepoznatog odziva u odnosu na nazivne vrijednosti tlakova, uz označavanje maksimalne vrijednosti odmaka na temelju koje se i utvrđuje razred (klasa) točnosti korištenog manometra.

Zadani podaci:

- masa stapa/klipa na instrumentu s utegom: 1 kg
- površina poprečnog presjeka cilindra: 98,1 mm<sup>2</sup>
- mjerni raspon manometra: 0 – 40 bar
- raspoloživi utezi: 9 x 2 kg
- okolni tlak zraka: 1 bar



## Pravilnik o mjeriteljskim zahtjevima za manometre, vakuumometre i manovakuumometre (Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, NN 18/2002)

Oznaka razreda (klase) točnosti mjerila (K) – broj koji označava apsolutnu vrijednost najveće dopuštene pogreške pokazivanja mjerila, izražene u %-cima za cijelo mjerno područje uređaja:

Razred točnosti	Granice dopuštenih pogrešaka (%)	
	pri prvom ovjeravanju	pri ponovnom ovjeravanju
0,1	±0,08	±0,10
0,2	±0,16	±0,20
0,3	±0,24	±0,30
0,6	±0,48	±0,60
1,0	±0,80	±1,00
1,6	±1,28	±1,60
2,0	±1,60	±2,00
2,5	±2,00	±2,50
4,0	±3,20	±4,00

Relativna pogreška mjerenja  $G$  (u %-cima), koja ne smije premašivati granice apsolutne vrijednosti najvećih dopuštenih pogrešaka (GDP) za određeni razred točnosti mjernog uređaja (K), u odnosu na cijelo područje/raspon mjernog uređaja ( $\Delta p_{inst}$ ):

$$G = \frac{|\Delta p_{gr}|}{\Delta p_{inst}} \cdot 100 = \frac{|p_{mj_{sr}} - p_{st}|}{p_{max_{inst}} - p_{min_{inst}}} \cdot 100 = \frac{\left| \frac{p_{mj_{opt}} + p_{mj_{rast}}}{2} - p_{st} \right|}{p_{max_{inst}} - p_{min_{inst}}} \cdot 100 \quad \%$$

gdje je:

$\Delta p_{gr}$  mjerni odmak (varijacija) očitavanja mjerila, tj. razlika u pokazivanju mjerila pri opadanju tlaka ( $p_{mj_{rast}}$ ) i pri povećanju tlaka ( $p_{mj_{opt}}$ ) za određeni izmjereni tlak (srednja vrijednost,  $p_{mj_{sr}}$ ) i pripadajuće očitane vrijednosti koju pokazuje etalon  $p_{st}$ .

Generiranje tlaka tijekom utvrđivanja razreda točnosti obavlja se inkrementalno, i to:

- po 1/5 ili manje od deklarirane vrijednosti mjernog područja (K: 1,6; 2,5 i 4),
- po 1/10 ili manje od deklarirane vrijednosti mjernog područja (K: 0,1; 0,2; 0,3; 0,6 i 1,0),

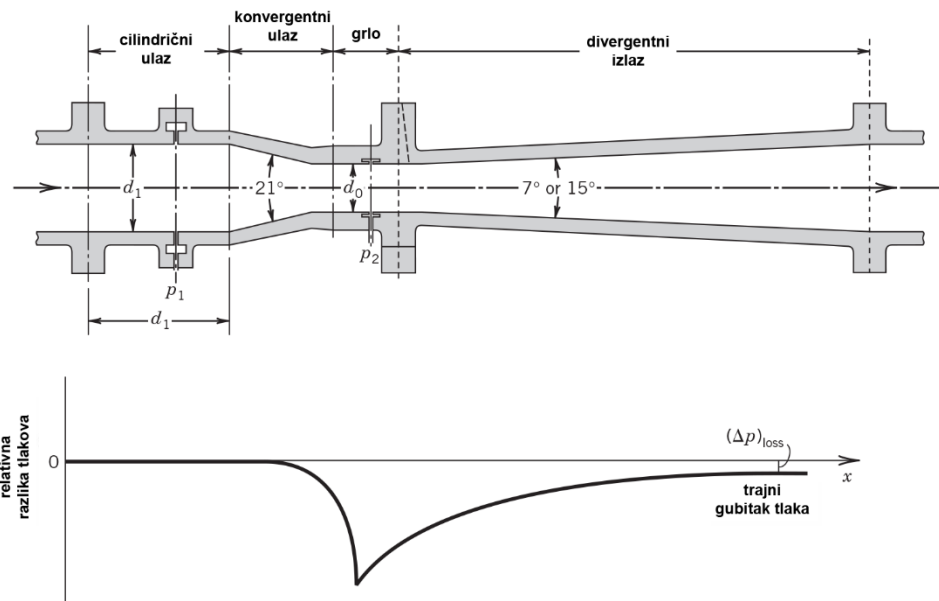
a vrši se u najmanje:

- 4 mjerne točke mjernog područja mjerila (K: 4,0),
- 5 mjernih točaka mjernog područja mjerila (K: 1,0; 1,6 i 2,5),
- 10 mjernih točaka mjernog područja mjerila (K: 0,1; 0,2; 0,3 i 0,6).

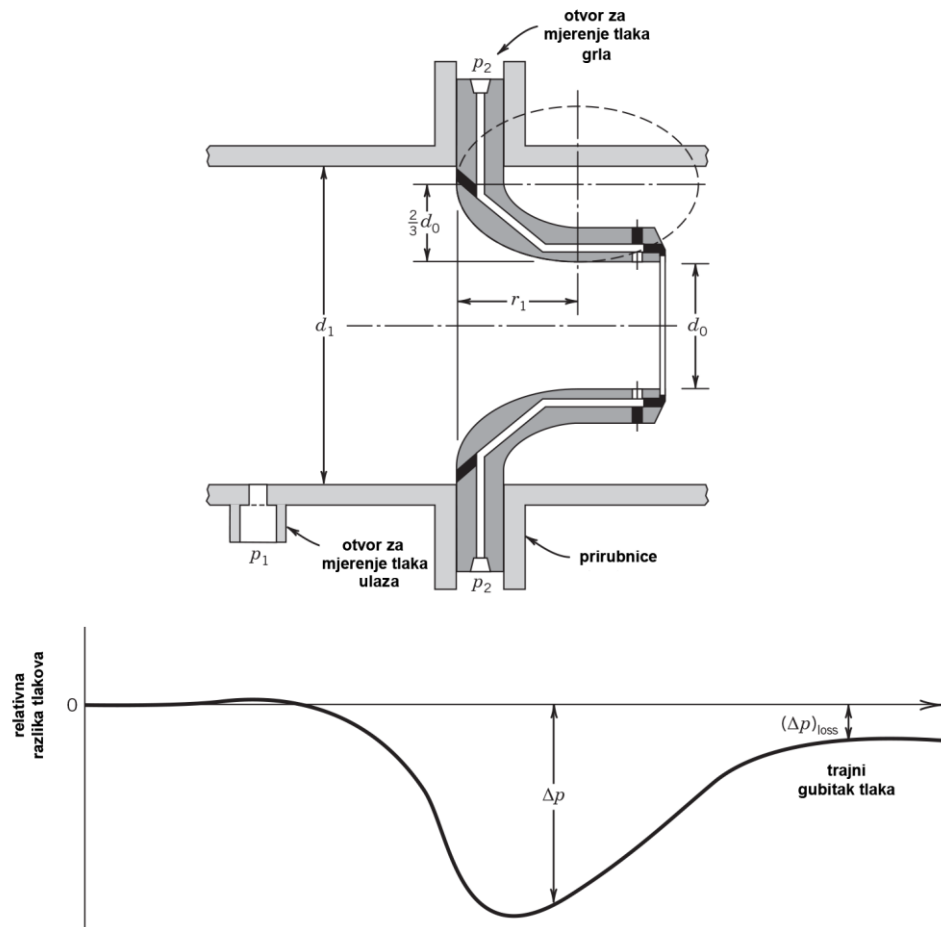




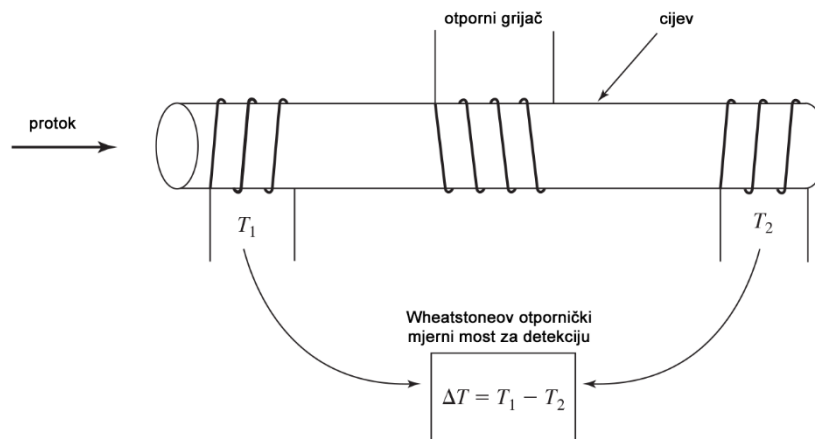
- **Venturi-mlaznice** → inicijalno skuplja rješenja, ali znatno manji trajni pad tlaka, što rezultira i nižim operativnim troškovima sustava za pumpu ili ventilator da nadoknade pad tlaka



- **sapnice** (engl. *flow nozzles*) → potrebno im je manje prostora za ugradnju od Venturi-mlaznica, uz 20% manji početni trošak, dok im je trajni gubitak tlaka veći, ali i znatno manji u odnosu na prigušnice

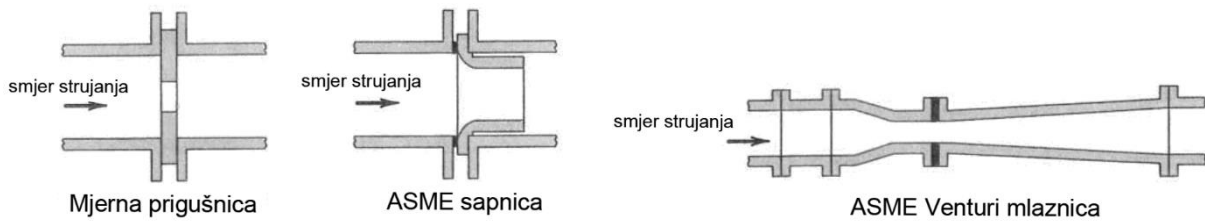


- mehanički:
    - s promjenjivim poprečnim presjekom → **rotametri** → temelje se na ravnoteži sila koje djeluju na plovak u cijevi promjenjivog presjeka
    - **turbinski** ili propelerni → koriste zakretni moment, a brzina okretaja rotora proporcionalna je protoku fluida
  - **elektromagnetski** (samo za tekućine) → induciranje elektromotorne sile, tj. el. potencijala u provodniku koji se kreće određenom brzinom kroz magnetski tok
  - **vtložni** (engl. *vortex*) → protok preko oštih rubova izaziva vrtloženje, a frekvencija pojavljivanja vrtloga je proporcionalna brzini strujanja fluida
  - **na principu pozitivnog istisnog volumena** (engl. *positive-displacement*)
- za mjerenje (i regulaciju) masenih protoka:
- **termodinamički**/termalni/toplinski → toplina se razvija u namotaju žice oko cijevi i prenosi kondukcijom kroz stijenku, te konvekcijom sa stijenke na protočni fluid u cijevi, a temperatura se mjeri prije i poslije grijača, u spoju termometara u tzv. Wheatstoneovom otporničkom mjernom mostu, pa je mjerni signal masenog protoka razlika napona (temperatura) na granama mjernog mosta → praktički nema pada tlaka i velika točnost, ali mjerni signal ovisi o sastavu plinova i temperaturi, pa se mora posebno umjeriti za svaki plin

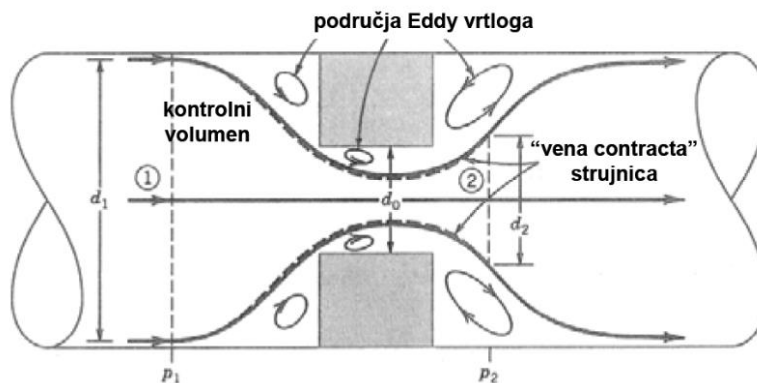


- **Coriolis** → stvaranje Coriolisovog ubrzanja i mjerenje rezultirajuće sile

## Određivanje protoka fluida opstrukcijskim mjerачima protoka



Kontrolni volumen → količina fluida gustoće  $\rho$  koji proteče kroz kontrolni volumen  $V$  ovisi o neto količini fluida koji prođe kroz kontrolne površine:



Iz Bernoullijeve jednadžba strujanja idealnog (nestlačivog) fluida između presjeka 1 i 2 (bez dovođenja/odvođenja topline i rada):

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{\bar{u}_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\bar{u}_2^2}{2g} + h_{L1-2}$$

gdje su  $h_{L1-2}$  gubici (pad tlaka) uslijed trenja između presjeka, uz jednadžbu kontinuiteta, odnosno zakon očuvanja mase (nepromjenjivost protoka fluida u vremenu):

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &= \dot{V}_2 \\ \bar{u}_1 \cdot A_1 &= \bar{u}_2 \cdot A_2\end{aligned}$$

proizlazi da je ulazni (volumni) protok nestlačivih fluida:

$$\dot{V}_1 = \bar{u}_2 \cdot A_2 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} + 2g h_{L1-2}}$$

a budući da se presjek opstrukcijom naglo mijenja, efektivno područje protoka nakon suženja, odnosno  $d_2$ , nije nužno jednako presjeku cijevi, jer se stvara tzv. središnji tok *vena contracta*, gdje su brzine strujanja veće, jer je ograničen područjima sporijeg strujanja uslijed vrtloženja uz stijenke, pa se zbog ove nepoznanice uvodi koeficijent suženja (kontrakcijski koeficijent):

$$C_C = \frac{A_2}{A_0}$$

a uz uvođenje frikcijskog koeficijenta  $C_f$ , koji obuhvaća gubitke (pad tlaka) uslijed trenja, te uz njegov umnožak s kontrakcijskim koeficijentom, odnosno uvođenjem koeficijenta pražnjenja  $C$  (engl. *discharge coefficient*), koji predstavlja omjer stvarnog i idealnog protoka kroz mjerач za izmjereni pad tlaka, proizlazi konačni izraz:

$$\dot{V}_1 = \frac{C A_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{C_c A_0}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} = C E A_0 \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} = K_0 A_0 \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}$$

gdje je  $E$  faktor prilazne brzine:

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{C_c A_0}{A_1}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

a  $\beta$  predstavlja omjer promjera opstrukcije  $d_0$  i ulaznog promjera  $d_1$ , dok je  $K_0$  koeficijent protoka (umnožak  $C$  i  $E$ ) i može se naći u prikladnim tablicama i dijagramima (u nastavku), i to u ovisnosti o  $Re_d$  i  $\beta$ , te geometriji opstrukcije.

Za stlačive fluide (plinove), kada je:

$$\frac{p_1 - p_2}{p_1} \geq 0,1$$

tada se ulazni (volumni) protok može računati kao:

$$\dot{V} = \dot{V}_1 \cdot Y = C E A_0 Y \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_1}} = K_0 A_0 Y \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_1}}$$

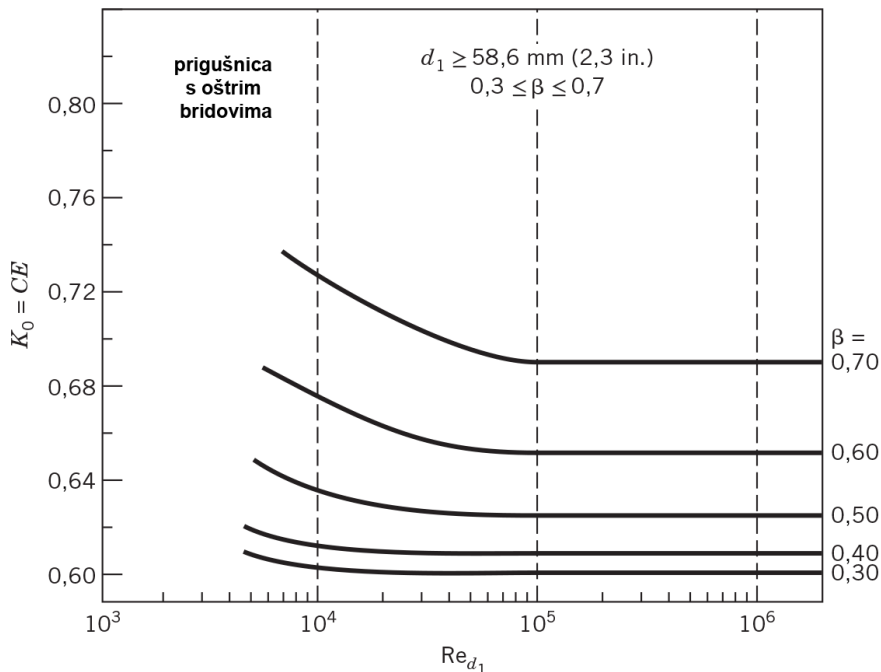
gdje je  $Y$  ekspanzijski koeficijent, odnosno omjer stvarnog i nestlačivog protoka, i može se naći u prikladnim tablicama i dijagramima (u nastavku), a  $\rho_1$  je gustoća fluida na ulazu.

### Zadaci za samostalno rješavanje:

- 3.1. Mjerna prigušnica s oštrim bridovima promjera 10 cm koristi se za mjerenje protoka vode temperature 16 °C kroz cijev promjera 200 mm. Ako pad tlaka, izmjeren U-cijevnim manometrom, kroz prigušnicu iznosi 40 mmHg, odredite protok vode (u m<sup>3</sup>/h i kg/s).
- 3.2. Zrak temperature 20 °C struji kroz cijev promjera 60 mm, a za mjerenje protoka se koristi mjerna prigušnica s oštrim bridovima, čiji je omjer promjera opstrukcije i ulaznog promjera 0,4. Ako je pad tlaka izmjeren na prigušnici 2500 mmH<sub>2</sub>O, a apsolutni tlak prije prigušnice 93,7 kPa, odredite protok zraka kroz cijev i trajni pad tlaka uslijed korištenja prigušnice.
- 3.3 Odredite operacijske troškove za nadvladavanje gubitaka tlaka iz prethodnog zadatka, ako je cijena električne energije 0,17 €/kWh, dok se kompresor koristi 6000 h/god, uz učinkovitost od 60%.

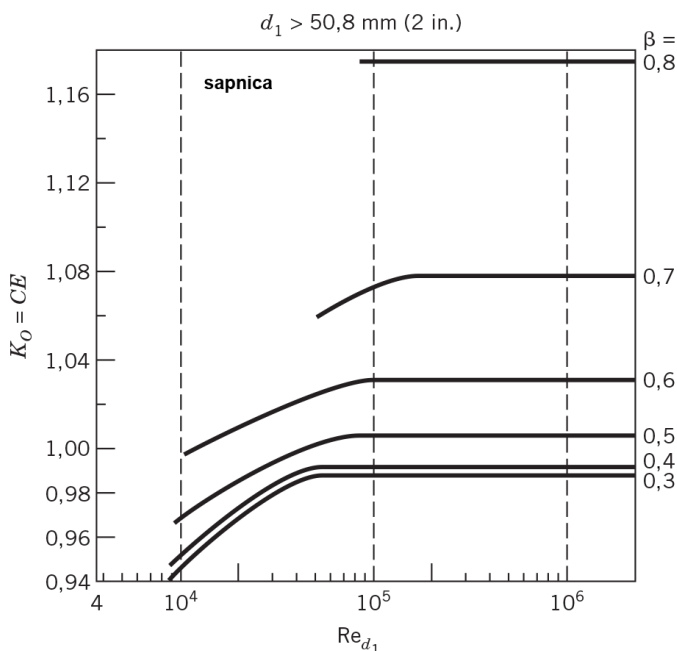
## DIJAGRAMI ZA OPSTRUKCIJSKE MJERAČE PROTOKA\*

Koeficijent protoka  $K_0$  za mjerne prigušnice:



$$K_0 = \frac{1}{(1 - \beta^4)^{1/2}} (0,5959 + 0,0312\beta^{2,1} - 0,184\beta^8 + 91,71\beta^{2,5}Re_{d_1}^{-0,75})$$

Koeficijent protoka  $K_0$  za sapnice:



$$K_0 = CE = \left( 0,9975 - \frac{6,53\sqrt{\beta}}{\sqrt{Re_{d_1}}} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \right)$$

Koeficijent protoka  $K_0$  za Venturi-mlaznice:

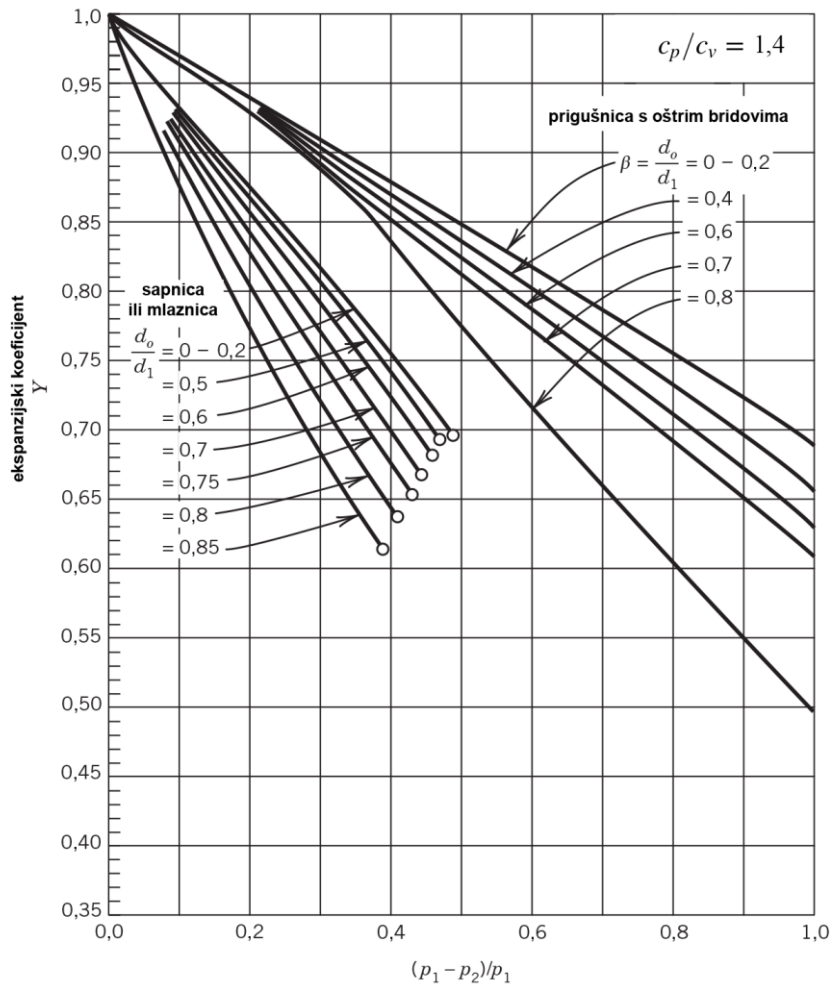
$$K_0 = CE = C \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

gdje koeficijent pražnjenja  $C$  ovisi o različitim tehnologijama izrade:

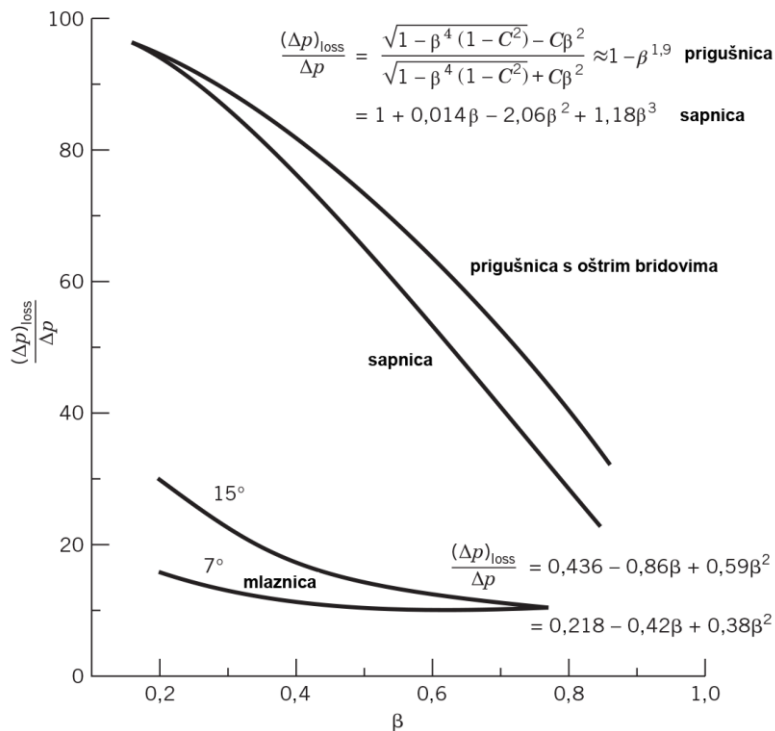
lijevane izvedbe	$100 < d_0 < 800$ $0,3 < \beta < 0,75$ $2 \cdot 10^5 < Re_d < 2 \cdot 10^6$	$C = 0,984$
zavareni metalni lim	$200 < d_0 < 1200$ $0,4 < \beta < 0,7$ $2 \cdot 10^5 < Re_d < 2 \cdot 10^6$	$C = 0,985$
precizno strojno obrađene	$50 < d_0 < 250$ $0,4 < \beta < 0,75$ $2 \cdot 10^5 < Re_d < 2 \cdot 10^6$	$C = 0,995$

\* preuzeti i prilagođeni iz [Figliola, R.S., Beasley, D.E.: "Theory and Design for Mechanical Measurements", 6th Ed., John Wiley & Sons, 2015]

Ekspanzijski koeficijent  $Y$  (za plinove s  $\kappa=1,4$ ) za mjerne prigušnice, sapnice i Venturi-mlaznice:



Trajni pad tlaka (u %) uslijed protoka kroz mjerne prigušnice, sapnice i Venturi-mlaznice:



#### 4. MJERENJE VLAŽNOSTI

**Vlažni zrak** – smjesa plinova, od kojih je najviše dušika i kisika, zatim vodene pare, a izuzme li se **vodena para** kojoj je udio promjenjiv, tada ga zovemo **suhi zrak**, nepromjenjivog sastava:

sastav suhog zraka	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Ar	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	He + Ne + Kr + Xe
volumni %	78,03	20,99	0,93	0,03	0,01	0,01
maseni %	75,47	23,20	1,28	0,046	0,001	0,003

te ga smatramo idealnih plinom, osim pri vrlo visokim tlakovima (>100 bar) i vrlo niskim temperaturama (<-100 °C), ali u prirodi i inženjerskoj praksi on nikad nije potpuno suh, međutim, udio vodene pare je relativno mali, kao i njen parcijalni tlak u zraku, a budući da joj je temperatura jednaka temperaturi zraka, ta je vlaga u zraku zapravo pregrijana para i ponaša se poput idealnog plina, pa je i vlažni zrak zapravo **smjesa ta dva idealna plina**:

$$M_z = 28,9645 \text{ kg/kmol} \quad R_z = 287 \text{ J/(kg K)} \quad \kappa_z = 1,4 \quad c_{p,z} = 1,005 \text{ kJ/(kg K)}$$

$$M_{vp} = 18,016 \text{ kg/kmol} \quad R_{vp} = 461,5 \text{ J/(kg K)} \quad \kappa_{vp} = 1,31 \quad c_{p,vp} = 1,93 \text{ kJ/(kg K)}$$

Apsolutna vlažnost zraka (udio/količina/sadržaj vodene pare/vlage u suhom zraku):

$$x = \frac{m_{vp}}{m_z} = \frac{\frac{p_{vp} V}{R_{vp} T}}{\frac{p_z V}{R_z T}} = \frac{p_{vp}}{R_{vp}} = \frac{R_z}{R_{vp}} \frac{p_{vp}}{p - p_{vp}} = \frac{287}{461,5} \frac{p_{vp}}{p - p_{vp}} = 0,622 \frac{\varphi p_{zas}}{p - \varphi p_{zas}} \quad \text{kg}_{vp}/\text{kg}_z$$

ili

$$x = \frac{m_{vp}}{m_z} = \frac{M_{vp}}{M_z} \frac{n_{vp}}{n_z} = \frac{18,016}{28,9645} X = 0,622 X = 0,622 \frac{p_{vp}}{p - p_{vp}} = 0,622 \frac{\varphi p_{zas}}{p - \varphi p_{zas}}$$

gdje je:  $M$  molekularna masa,  $X$  molni/množinski udio vlage u suhom zraku,  $n$  množina/količina tvari,  $\varphi$  relativna vlažnost zraka (%),  $p$  ukupni tlak smjese (uglavnom standardni tlak 101,3 kPa, ukoliko nije navedeno drukčije), a  $p_{zas}$  tlak zasićenosti vodene pare pri određenoj  $t$  [°C], koji se može naći u tablicama (Tab. XI [Kostelić]) ili se približno računa pomoću empirijskog izraza:

$$p_{zas} = e^{aT^{-1} + b + cT + dT^2 + eT^3 + f \ln T} =$$

$$= e^{-5800,2206 T^{-1} + 1,3914993 - 0,048640239 T + 0,000041764768 T^2 - 0,000000014452093 T^3 + 6,5459673 \ln T}$$

Relativna vlažnost zraka (omjer parcijalnog tlaka vodene pare i tlaka zasićenosti vodene pare):

$$\varphi = \frac{p_{vp}}{p_{zas}} = \frac{p \cdot x}{p_{zas} \cdot (0,622 + x)}$$

Stupanj zasićenosti zraka:

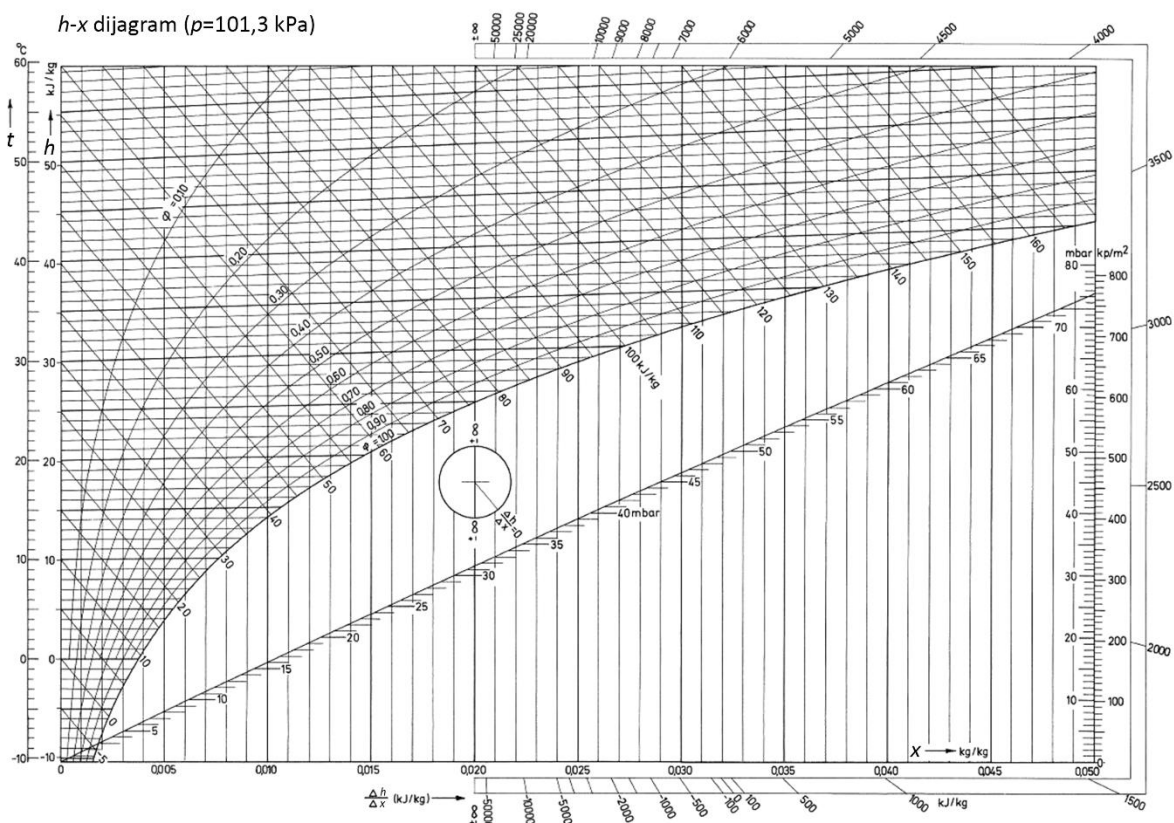
$$\chi = \frac{x_{vp}}{x_{zas}} = \frac{0,622 \frac{p_{vp}}{p - p_{vp}}}{0,622 \frac{p_{zas}}{p - p_{zas}}} = \frac{p_{vp} (p - p_{zas})}{p_{zas} (p - p_{vp})} = \varphi \frac{p - p_{zas}}{p - \varphi p_{zas}} \approx \varphi \rightarrow \text{za niže temperature}$$

Specifična entalpija vlažnog (nezasićenog) zraka s obzirom na 0 °C (suhi zrak + vodena para/vlaga):

$$h = h_z + h_{vp} = c_{p,z} t + x (c_{p,vp} t + r_0) = 1,005 t + x (1,93 t + 2500) \quad \text{kJ/kg}_z$$



### Mollierov $h-x$ dijagram za vlažni zrak (pri standardnom tlaku 101,3 kPa)



→ za praćenje promjena stanja vlažnog zraka u karakterističnim tehničkim procesima:

- grijanje/hlađenje vlažnog zraka (pri konstantnom tlaku)
- miješanje zračnih struja različitih stanja
- ubrizgavanje/dodavanje suhozasićene vodene pare ili vode (ovlaživanje)

**Mjerenje vlažnosti** (tj. udjela vodene pare) u nekoj tvari, najčešće plinu (i to zraku), može se vršiti različitim vlagomjerima, tj. higrometrima:

- mehanički → promjenom veličine mjernog osjetnika (najčešće od organske tvari) zbog njegovih higroskopnih svojstava (npr. životinjska dlaka ili ljudska kosa, koje se u vlažnijem zraku izdužuju, a u sušem skraćuju) → npr. Haarov higrometar s kosom
- apsorpcijski → vaganjem apsorbirane vlage promatrane tvari (plina) u higroskopnu tvar u mjernom uređaju (posredno određivanje apsolutne vlažnosti) → gravimetrijski
- kondenzacijski → određivanjem temperature rosišta pri hlađenju plina sve do trenutka pojave kondenzacije vodene pare (rose) → npr. instrument s hlađenim zrcalom
- električni → promjenom električnog otpora ili dielektričnosti tvari → kapacitivni
- elektrolitni → promjenom električne provodljivosti nekog elektrolita (npr. litijev klorid)
- psihrometar → određivanjem razlike temperatura dvaju termometara u struji okolnoga zraka, od kojih je jedan suhi, a drugom je osjetnik nakvašen vodom, pa razlika ovisi o relativnoj vlažnosti zraka (znatne pogreške pri temperaturama nižim od 0 °C)

### Princip određivanja vlažnosti zraka psihrometrom:

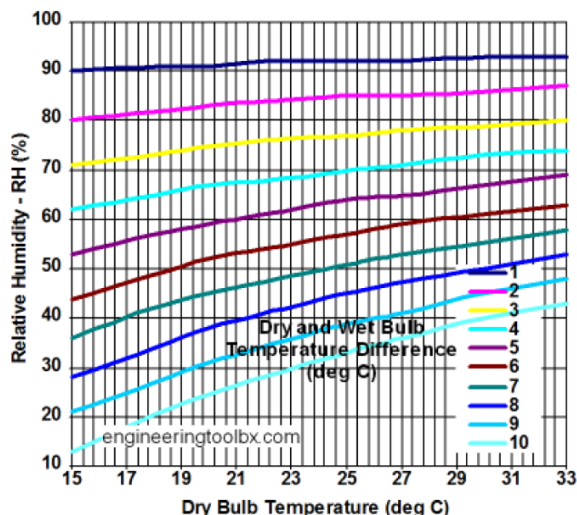
Na osjetniku vlažnog termometra odvija se proces ishlapljivanja vode (iz namotaja) u okolni (nezasićeni) zrak, odnosno istovremeni/simultani prijenos topline i tvari, jer zrak preuzima i dio vlage u sebe i dio topline, pa se zbog toga i temperatura vlažnog termometra, u odnosu na suhi, postupno snižava, i to do uspostave toplinske ravnoteže (nakon nekoliko minuta), odnosno do potpunog zasićenja zraka vodenom parom, a razlika između tada izmjerenih temperatura suhog (stvarna temperatura zraka) i vlažnog termometra (temperatura vlažnog namotaja) mjera je za vlažnost okolnog zraka (osim u slučaju da je zrak već potpuno zasićen vodenom parom, pa su tada temperature na oba termometra jednake).

Dakle, što je okolni zrak suši, to je razlika temperatura veća, a iz temperaturnih podataka obaju termometara, te poznate vrijednosti tlaka zraka, određuju se tlakovi zasićenosti vodene pare na tim temperaturama, a odatle i veličine vlažnosti zraka (relativna i apsolutna vlažnost), i to:

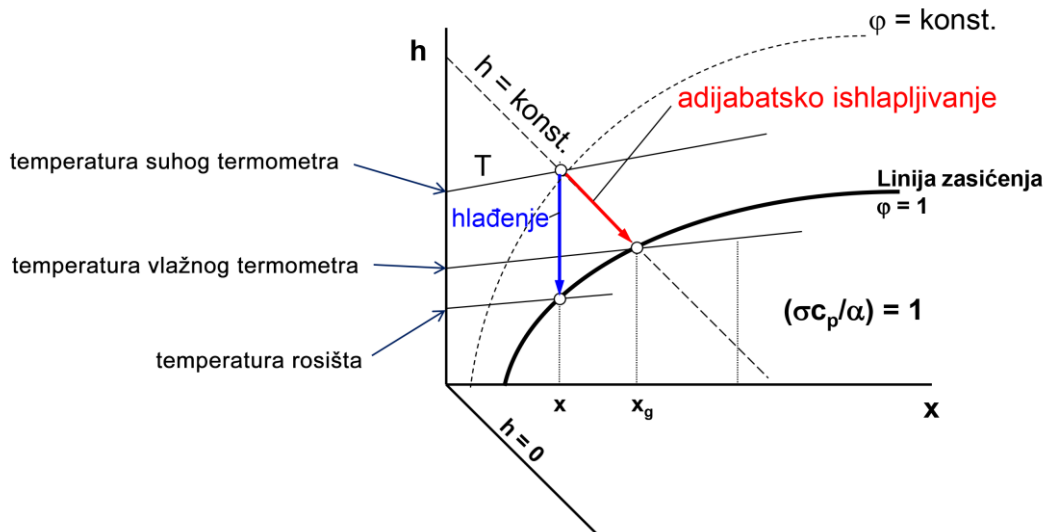
- primjenom prikladnih psihometrijskih tablica (približno):

$t_z$ °C	$\Delta t = t_z - t_{vt}$																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
-4	77	54	32	11																		
-2	79	58	37	20	1																	
0	81	63	45	28	11																	
2	83	67	51	36	20	6																
4	85	70	56	42	27	14																
6	86	72	59	46	35	22	10	0														
8	87	74	62	51	39	28	17	6														
10	88	76	65	54	43	33	24	13	4													
12	88	78	67	57	48	38	28	19	10	2												
14	89	79	69	60	50	41	33	25	16	8	1											
16	90	80	71	62	54	45	37	29	21	14	7	1										
18	91	81	72	64	56	48	40	33	26	19	12	6	0									
20	91	82	74	66	58	51	44	36	30	23	17	11	5									
22	92	83	75	68	60	53	46	40	33	27	21	15	10	4	0							
24	92	84	76	69	62	55	49	42	36	30	25	20	14	9	4	0						
26	92	85	77	70	64	57	51	45	39	34	28	23	18	13	9	5						
28	93	86	78	71	65	59	53	45	42	36	31	26	21	17	12	8	4					
30	93	86	79	72	66	61	55	49	44	39	34	29	25	20	16	12	8	4				
32	93	86	80	73	68	62	56	51	46	41	36	32	27	22	19	14	11	8	4			
34	93	86	81	74	69	63	58	52	48	43	38	34	30	26	22	18	14	11	8	5		
36	94	87	81	75	69	64	59	54	50	44	40	36	32	28	24	21	17	13	10	7	4	
38	94	87	82	76	70	66	60	55	51	46	42	38	34	30	26	23	20	16	13	10	7	5

- primjenom prikladnih psihometrijskih dijagrama (približno):



- primjenom  $h$ - $x$  dijagrama:



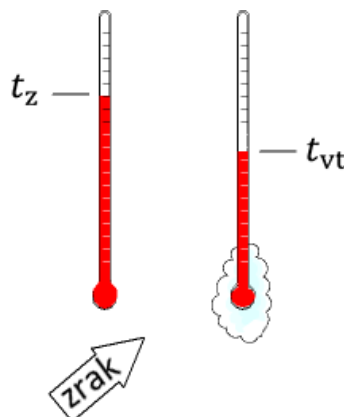
- matematičkim izračunom vlažnosti → uz pretpostavku turbulentnog strujanja okolnog zraka, odnosno  $Le = \sigma c_p / \alpha \approx 1$ , entalpija vlažnog zraka na temperaturi suhog termometra jednaka je entalpiji zasićenog zraka na temperaturi vlažnog termometra:

$$h_z = h_{zas}(t_{vt})$$

Inače, karakterističan primjer psihrometra je tzv. Assmannov aspiracijski higrometar, kojem su oba termometra u metalnom kućištu radi zaštite od toplinskog zračenja okoliša, uz osiguravanje turbulentnog strujanja zraka pomoću ugrađenog ventilatora (aspiratora), te se često upotrebljava za terenska mjerenja jer je lako prenosiv.

Zadatak za samostalno rješavanje (uz popunjavanje lab. izvještaja 4):

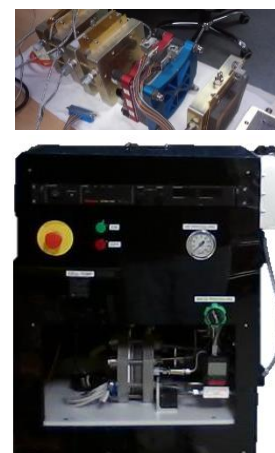
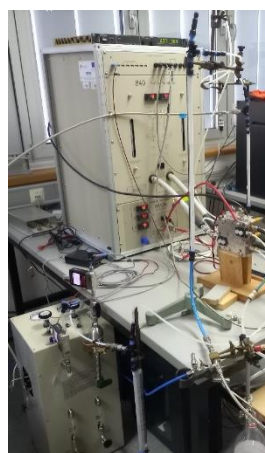
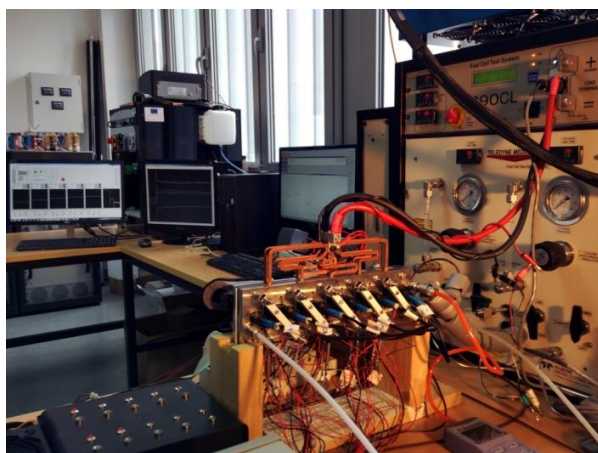
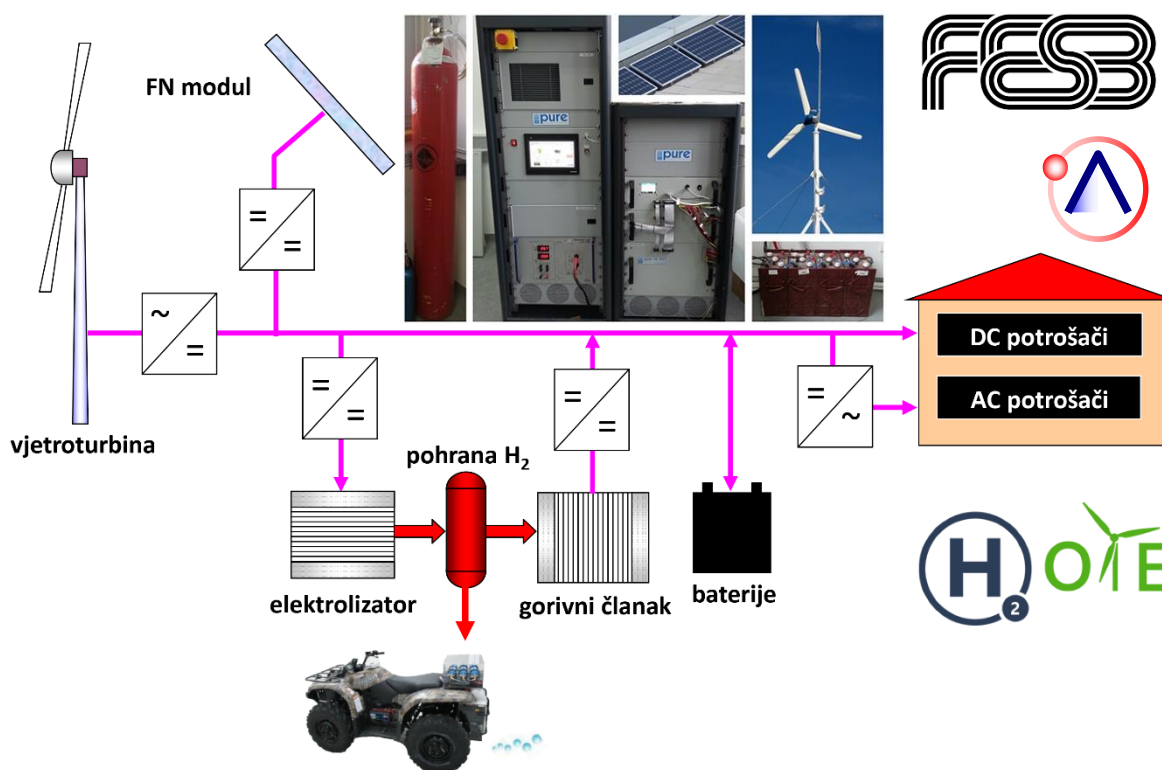
Upotrebom raspoloživog termoelementa, gdje mu je osjetnik prvo slobodan i u struji okolnog zraka (suhi termometar), a potom obavijen mokrom/nakvašenom pamučnom vatom (mokri/vlažni termometar), odrediti vlažnost zraka u prostoriji u kojoj se nalazite, i to korištenjem priloženog  $h$ - $x$  dijagrama i tablica za vodu i vodenu paru pri zasićenju, uz kontrolu dobivenih rezultata primjenom priloženih psihometrijskih tablica, te usporedbom s izravno izmjenom relativnom vlažnosti zraka pomoću digitalnog (kapacitivnog) mjerča vlažnosti.



## 5. MJERENJA TERMODINAMIČKIH VELIČINA UNUTAR TERMOENERGETSKOG SUSTAVA

Smisao/cilj vježbe: rekapitulacija obrađenog gradiva uz upoznavanje s osnovnim dijelovima i principom rada samostalnog vodikovog energetskog sustava s obnovljivim izvorima energije i s ugrađenom laboratorijskom opremom za mjerenje različitih termodinamičkih veličina:

- **termoelementi tipa T i K** spojeni na višekanalni sakupljač podataka s ugrađenom elektroničkom kompenzacijom referentne temperature i izravnim očitanjem temperature
- mehanički i električni **manometri** ugrađeni u sustavu s **regulatorima tlaka**
- termodinamički/termalni/toplinski **mjerači masenog protoka** različitih plinova
- digitalni (kapacitivni) **mjerači vlažnosti**
- mjerač električne vodljivosti ( $\mu\text{S}$ )
- ...



Laboratorij za nove energetske tehnologije, FESB Split

## **LITERATURA**

- Barbir, F.: "Mjerenja u tehnici - II dio", online predavanja, FESB
- Beckwith, T.G., Marangoni, R.D., Lienhard, V J.H.: "Mechanical Measurements", 6th Ed., Pearson Learning Solutions, 2011.
- Bošnjaković, F.: "Nauka o toplini II dio", IV izdanje, Tehnička knjiga, 1976.
- Figliola, R.S., Beasley, D.E.: "Theory and Design for Mechanical Measurements", 6th Ed., John Wiley & Sons, 2015.
- Holman, J.P.: "Experimental Methods for Engineers", 8th Ed., McGraw-Hill, 2011.
- Kostelić, A.: "Tablice – Nauka o toplini sa zadacima", XIII izdanje, Školska knjiga, Zagreb, 2007.
- Kraut, B.: "Strojarski priručnik", IX izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb, 1988.
- Venkateshan, S.P.: "Mechanical Measurements", 2nd Ed., John Wiley & Sons, 2015.

# ***PRILOG***

**PREDLOŠCI IZVJEŠTAJA S LABORATORIJSKIH VJEŽBI ZA SAMOSTALNO  
RJEŠAVANJE I UTVRĐIVANJE GRADIVA**



Naziv vježbe: **Korekcija temperature pri mjerenju staklenim termometrom**

Smisao/cilj vježbe: uočavanje i uklanjanje sustavnih pogreški pri mjerenju

U laboratorijskom izvještaju student ukratko prikazuje svoj osvrt na prethodno izvedenu vježbu na jednom listu A4 papira gdje svojim riječima navodi:

➤ Kratki opis vježbe:

➤ Izlaganje problema uz skicu:

➤ Podaci dobiveni mjerenjem:

➤ Prikaz izračuna i dobivenog rezultata:



**Naziv vježbe: Mjerenje temperature i umjeravanje termoelementa tipa K**

Smisao/cilj vježbe: upoznavanje s načinom mjerenja temperature termoelementom, te njegovim umjeravanjem/kalibracijom/baždarenjem korištenjem priloženih normiranih tablica

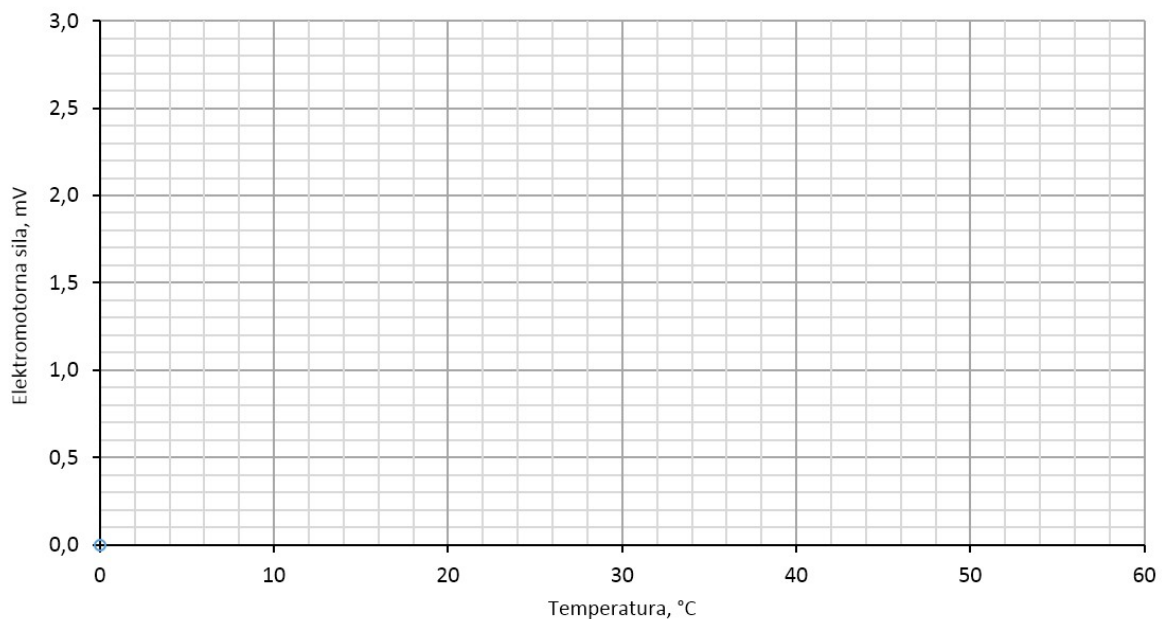
- Tablični prikaz podataka dobivenih mjerenjem:

$t_{set}$	$\Delta U_{23-t_{mj}}$ , mV	$t_{mj\_izr}$ , °C	$t_{kada}$ , °C
23			
30			
40			
50			
60			

- Tablična usporedba dobivenih vrijednosti temperatura, uz izračun mjernih pogreški:

$t_{set}$	$\Delta U_{0-t_{mj}}$ , mV	$t_{mj\_kalib}$ , °C	pogreška, %	$t_{mj\_izr}$ , °C	pogreška, %
23					
30					
40					
50					
60					

Kalibracijski dijagram termoelementa tipa K



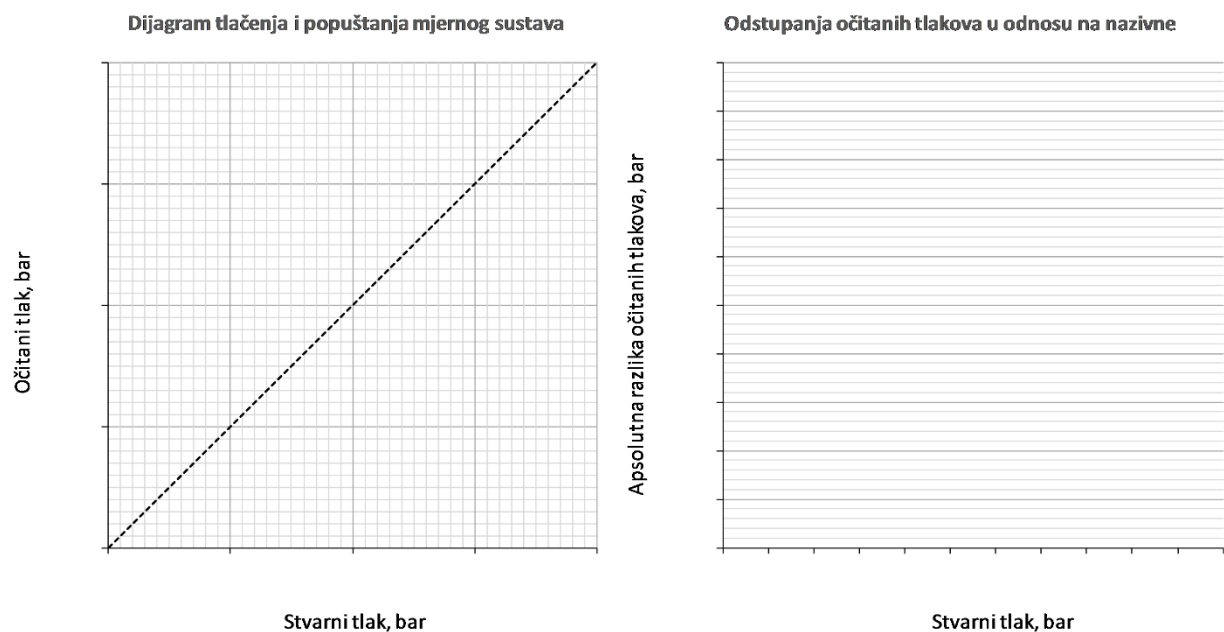
Naziv vježbe: **Mjerenje tlaka i umjeravanje manometra**

Smisao/cilj vježbe: definiranje klase točnosti manometra instrumentom s utegom

- Tablični prikaz i usporedba očitanih podataka i izračunatih, uz prikaz mjernih pogreški:

opterećenje sustava kg	sila opterećenja N	$p_{st}$ bar	$p_{mj\_opt}$ bar	$p_{mj\_rast}$ bar	$ \Delta p_{gr} $ bar	G %

- Dijagram tlačenja i popuštanja mjernog sustava, te razlike/odstupanja očitanih tlakova u odnosu na nazivne vrijednosti tlakova, uz označavanje maksimalne vrijednosti odstupanja:

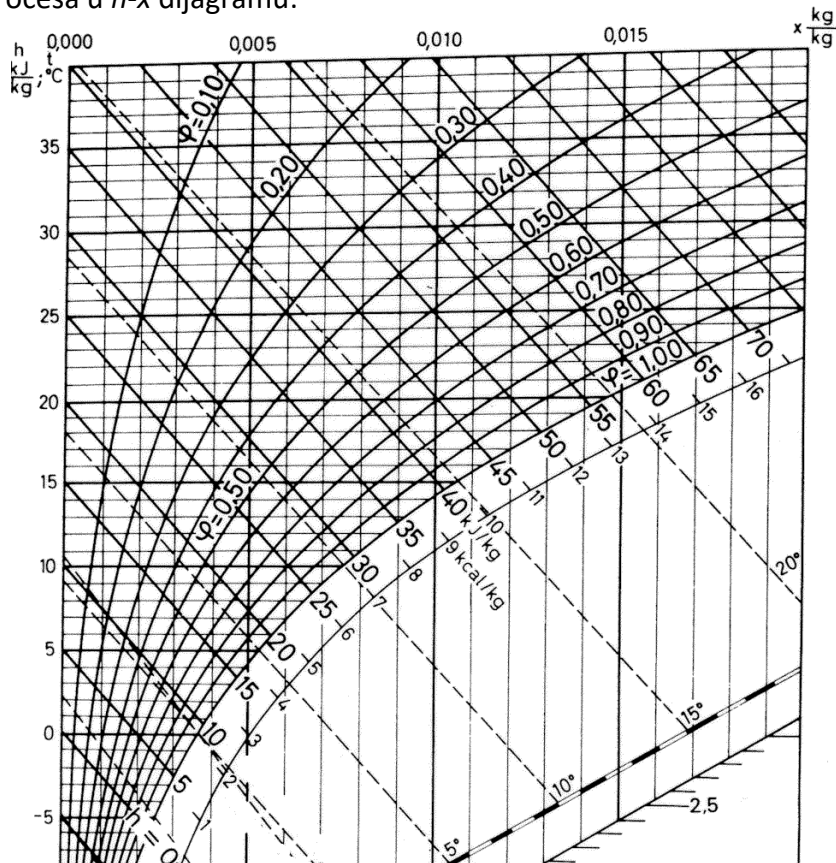


- Razred (klasa) točnosti korištenog manometra za mjerenje tlaka:

**Naziv vježbe: Mjerenje vlažnosti zraka psihrometrom**

Smisao/cilj vježbe: odrediti relativnu vlažnost zraka u prostoriji u kojoj se nalazite

- Podaci dobiveni mjerenjem:
- Prikaz procesa u  $h$ - $x$  dijagramu:



- Prikaz izračuna i dobivenog rezultata:

➤ Kontrola dobivenih rezultata primjenom priloženih psihrometrijskih tablica:

$t_z$ °C	$\Delta t = t_z - t_{vt}$																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
-4	77	54	32	11																		
-2	79	58	37	20	1																	
0	81	63	45	28	11																	
2	83	67	51	36	20	6																
4	85	70	56	42	27	14																
6	86	72	59	46	35	22	10	0														
8	87	74	62	51	39	28	17	6														
10	88	76	65	54	43	33	24	13	4													
12	88	78	67	57	48	38	28	19	10	2												
14	89	79	69	60	50	41	33	25	16	8	1											
16	90	80	71	62	54	45	37	29	21	14	7	1										
18	91	81	72	64	56	48	40	33	26	19	12	6	0									
20	91	82	74	66	58	51	44	36	30	23	17	11	5									
22	92	83	75	68	60	53	46	40	33	27	21	15	10	4	0							
24	92	84	76	69	62	55	49	42	36	30	25	20	14	9	4	0						
26	92	85	77	70	64	57	51	45	39	34	28	23	18	13	9	5						
28	93	86	78	71	65	59	53	45	42	36	31	26	21	17	12	8	4					
30	93	86	79	72	66	61	55	49	44	39	34	29	25	20	16	12	8	4				
32	93	86	80	73	68	62	56	51	46	41	36	32	27	22	19	14	11	8	4			
34	93	86	81	74	69	63	58	52	48	43	38	34	30	26	22	18	14	11	8	5		
36	94	87	81	75	69	64	59	54	50	44	40	36	32	28	24	21	17	13	10	7	4	
38	94	87	82	76	70	66	60	55	51	46	42	38	34	30	26	23	20	16	13	10	7	5

Relativna vlažnost (%)

PRILOG – Tablice za vodu i vodenu paru pri zasićenju:

Tempera- tura $t$ °C	Tlak $p$ bar	Specifični volumen		Gustoća		Specifična entalpija		Toplina isparivanja $r$ kJ/kg	Specifična entropija	
		Kapljevine $v'$ m³/kg	Pare $v''$ m³/kg	Kapljevine $\rho'$ kg/m³	Pare $\rho''$ kg/m³	Kapljevine $h'$ kJ/kg	Pare $h''$ kJ/kg		Kapljevine $s'$ kJ/(kg K)	Pare $s''$ kJ/(kg K)
0,01	0,006108	0,0010002	206,3	999,80	0,004847	0,00	2501	2501	0,0000	9,1544
1	0,006566	0,0010001	192,6	999,90	0,005192	4,22	2502	2498	0,0154	9,1281
2	0,007054	0,0010001	179,9	999,90	0,005559	8,42	2504	2496	0,0306	9,1018
3	0,007575	0,0010001	168,2	999,90	0,005945	12,63	2506	2493	0,0458	9,0757
4	0,008129	0,0010001	157,3	999,90	0,006357	16,84	2508	2491	0,0610	9,0498
5	0,008719	0,0010001	147,2	999,90	0,006793	21,05	2510	2489	0,0762	9,0241
6	0,009347	0,0010001	137,8	999,90	0,007257	25,25	2512	2489	0,0913	8,9978
7	0,010013	0,0010001	129,1	999,90	0,007746	29,45	2514	2485	0,1063	8,9736
8	0,010721	0,0010002	121,0	999,80	0,008264	33,55	2516	2482	0,1212	8,9485
9	0,011473	0,0010003	113,4	999,70	0,008818	37,85	2517	2479	0,1361	8,9238
10	0,012277	0,0010004	106,42	999,60	0,009398	42,04	2519	2477	0,1510	8,8994
11	0,013118	0,0010005	99,91	999,50	0,010001	46,22	2521	2475	0,1658	8,8752
12	0,014016	0,0010006	93,84	999,40	0,010666	50,41	2523	2473	0,1805	8,8513
13	0,014967	0,0010007	88,18	999,30	0,01134	54,60	2525	2470	0,1952	8,8276
14	0,015974	0,0010008	82,90	999,20	0,01206	58,78	2527	2468	0,2098	8,8040
15	0,017041	0,0010010	77,97	999,00	0,01282	62,97	2528	2465	0,2244	8,7806
16	0,018170	0,0010011	73,39	998,90	0,01363	67,16	2530	2463	0,2389	8,7574
17	0,019364	0,0010013	69,10	998,70	0,01447	71,34	2532	2461	0,2534	8,7344
18	0,02062	0,0010015	65,09	998,50	0,01536	75,53	2534	2458	0,2678	8,7116
19	0,02196	0,0010016	61,34	998,40	0,01630	79,72	2536	2456	0,2821	8,6890
20	0,02337	0,0010018	57,84	998,20	0,01729	83,90	2537	2454	0,2964	8,6665
21	0,02486	0,0010021	54,56	997,90	0,01833	88,09	2539	2451	0,3107	8,6442
22	0,02643	0,0010023	51,50	997,71	0,01942	92,27	2541	2449	0,3249	8,6220
23	0,02808	0,0010025	48,62	997,51	0,02057	96,46	2543	2447	0,3391	8,6001
24	0,02982	0,0010028	45,93	997,21	0,02177	100,63	2545	2444	0,3532	8,5785
25	0,03166	0,0010030	43,40	997,01	0,02304	104,81	2547	2442	0,3672	8,5570
26	0,03360	0,0010033	41,04	996,71	0,02437	108,99	2548	2440	0,3812	8,5358
27	0,03564	0,0010036	38,82	996,41	0,02576	113,17	2550	2437	0,3951	8,5147
28	0,03779	0,0010038	36,73	996,21	0,02723	117,35	2552	2435	0,4090	8,4938
29	0,04004	0,0010041	34,77	995,92	0,02876	121,53	2554	2432	0,4228	8,4730
30	0,04241	0,0010044	32,93	995,62	0,03037	125,71	2556	2430	0,4366	8,4523
31	0,04491	0,0010047	31,20	995,32	0,03205	129,89	2558	2428	0,4503	8,4319
32	0,04753	0,0010051	29,57	994,93	0,03382	134,07	2559	2425	0,4640	8,4117
33	0,05029	0,0010054	28,04	994,63	0,03566	138,25	2561	2423	0,4777	8,3916
34	0,05318	0,0010057	26,60	994,33	0,03759	142,42	2563	2421	0,4913	8,3716