

Odabir mjernog pretvornika za mjerenje temperature u šaržnom reaktoru

Juraković, Matea

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Chemistry and Technology / Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:167:002159>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-05**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of chemistry and technology - University of Split](#)



SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

ODABIR MJERNOG PRETVORNIKA ZA MJERENJE
TEMPERATURE U ŠARŽNOM REAKTORU

ZAVRŠNI RAD

MATEA JURAKOVIĆ

Matični broj: 1244

Split, rujan 2020.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET
PREDDIPLOMSKI STUDIJ KEMIJSKE TEHNOLOGIJE
KEMIJSKO INŽENJERSTVO

ODABIR MJERNOG PRETVORNIKA ZA MJERENJE
TEMPERATURE U ŠARŽNOM REAKTORU

ZAVRŠNI RAD

MATEA JURAKOVIĆ

Matični broj: 1244

Split, rujan 2020.

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY
UNDERGRADUATE STUDY OF CHEMICAL TECHNOLOGY
CHEMICAL ENGINEERING

**SELECTION OF TEMPERATURE TRANSDUCER FOR
MEASUREMENTS IN BATCH REACTOR**

BACHELOR THESIS

MATEA JURAKOVIĆ

Parent number: 1244

Split, September 2020

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

ZAVRŠNI RAD

Sveučilište u Splitu

Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu

Preddiplomski studij Kemijska tehnologija, smjer Kemijsko inženjerstvo

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Kemijsko inženjerstvo

Tema rada je prihvaćena na 28. sjednici Fakultetskog vijeća Kemijsko-tehnološkog fakulteta.

Mentor: dr. sc. Antonija Čelan, znanstvena suradnica

ODABIR MJERNOG PRETVORNIKA ZA MJERENJE TEMPERATURE U ŠARŽNOM REAKTORU

Matea Juraković, 1244

Sažetak: Vođenje odnosno regulacija procesa predstavlja sastavni dio kemijskog inženjerstva, a temelji se na održavanju optimalnih uvjeta u procesu podešavanjem određenih procesnih veličina. Procesi se najčešće vode u reaktorima, destilacijskim kolonama, izmjenjivačima topline itd., pri čemu se najčešće reguliraju temperatura, protok, tlak i razina. Vođenje procesa može se prikazati regulacijskim krugom. Tri radnje se nužno odvijaju u regulacijskom krugu u kojem se proces vodi i to mjerenje, usporedba te podešavanje procesnih veličina. Ovaj rad temelji se na objašnjenju mjerenja koje se vrši pomoću mjernih pretvornika. Jedna od najčešće mjerenih procesnih veličina u industriji i laboratoriju je temperatura. Može se definirati kao mjera zagrijanosti tijela, odnosno preciznije kao mjera srednje kinetičke energije gibanja čestica i predstavlja jednu od osnovnih fizikalnih veličina. Za mjerenje temperature mogu se koristiti promjene tlaka, volumena, električnog otpora i drugih fizikalnih veličina koje su proporcionalne temperaturi. Mjerni pretvornici za mjerenje temperature mogu se općenito podijeliti na dilatacijske termometre, pirometre te električne termometre. Odabir pojedinog mjernog instrumenta ovisi o čimbenicima procesa i karakteristikama mjernih pretvornika. U ovom radu cilj je bio odabrati pogodne mjerne pretvornike za mjerenje temperature stijenke šaržnog reaktora i kapljevine koja se u njemu miješa vodeći se čimbenicima procesa i karakteristikama mjernih pretvornika. Pokazalo se da su za mjerenje temperature u šaržnom reaktoru najpogodniji električni termometri.

Ključne riječi: temperatura, šaržni reaktor, mjerni pretvornik, regulacijski krug.

Rad sadrži: 57 stranica, 46 slika, 4 tablice, 35 literaturnih referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav Povjerenstva za obranu:

1. Izv. prof. dr. sc. Sandra Svilović - predsjednica
2. Doc. dr. sc. Mario Nikola Mužek - član
3. Dr. sc. Antonija Čelan, znanstvena suradnica – član mentor

Datum obrane: 25. rujna 2020.

Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf format) obliku pohranjen u Knjižnici Kemijsko-tehnološkog fakulteta Split, Ruđera Boškovića 35.

BASIC DOCUMENTATION CARD

BACHELOR THESIS

University of Split
Faculty of Chemistry and Technology Split
Undergraduate study of Chemical Technology, Orientation Chemical Engineering

Scientific area: Technical sciences

Scientific field: Chemical Engineering

Thesis subject was approved by Faculty Council of Faculty of Chemistry and Technology, session no. 28

Mentor: Research associate Antonija Čelan, PhD

SELECTION OF TEMPERATURE TRANSDUCER FOR MEASUREMENTS IN BATCH REACTOR

Matea Juraković, 1244

Summary: Process control, represents a fundamental part of chemical engineering and is based on the maintenance of optimal conditions within the process through adjustment of certain process variables. Processes are most often controlled within reactors, distillation columns, heat exchangers etc. Most commonly controlled process variables in those processes are temperature, flow, pressure and level. Within a control loop, the actions of measurement, comparison and adjustment of process variables take place. This bachelor thesis is based on the explanation of measurement, which is carried out by using measuring instruments/devices. One of the most commonly measured process variables in industry and laboratories is temperature. It can be defined as a measure of heat of a certain object, or more precisely, as a measure of average kinetic energy of particle movement, and it represents one of the basic physical quantities. In order to measure temperature, changes in pressure, volume, electrical conductivity and other physical values which are proportional to temperature can be used. Measuring instruments for determining temperature can generally be divided into dilatation thermometers, pyrometers and electric thermometers. The selection of a particular measuring instrument depends on the process factors and the characteristics of the measuring transducer. In this bachelor thesis, the goal was to choose a suitable measuring transducer for the measurement of fluid temperature and wall temperature of a batch reactor, while being guided by the process factors and characteristics of the measuring transducers. It was shown that, for measuring temperature in a batch reactor, electric thermometers are most suitable.

Key words: temperature, batch reactor, measuring transducer, control loop

Thesis contains: 57 pages, 46 figures, 4 tables, 35 references

Original in: Croatian

Defence committee:

1. PhD Sandra Svilović, associate professor– chair person
2. PhD Mario Nikola Mužek, assistant professor– member
3. PhD Antonija Čelan– member supervisor

Defence date: 25th of September 2020

Printed and electronic (pdf version) of thesis is deposited in Library of Faculty of Chemistry and Technology Split, Ruđera Boškovića 35.

Završni rad je izrađen u Zavodu za kemijsko inženjerstvo, Kemijsko tehnološkog fakulteta u Splitu pod mentorstvom dr. sc. Antonije Čelan, znanstvene suradnice u razdoblju od ožujka do rujna 2020. godine.

Zahvaljujem se mentorici dr. sc. Antoniji Čelan na odabiru teme te na brojnim, korisnim savjetima i pomoći prilikom izrade ovog završnog rada. Također zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na podršci tijekom dosadašnjeg školovanja.

Matea Juraković

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

1. Detaljno obraditi pojmove vezane uz regulacijski krug, mjerne pretvornike temperature te šaržne reaktore.
2. Cjelovito sagledati problematiku mjerenja temperature u šaržnim reaktorima iz perspektive vođenja procesa.
3. Navesti zahtjeve koje je općenito potrebno zadovoljiti kod mjerenja temperature u šaržnim reaktorima.
4. Odabrati prikladne mjerne pretvornike za mjerenje temperature u šaržnom reaktoru u kojem je potrebno odrediti količinu topline, Q/t , koja je u zadanom vremenu prešla sa zagrijane stijenke na kapljevину koja se miješa. Potrebno je odabrati dva tipa mjernih pretvornika i to:
 - a. mjerni pretvornik za mjerenje temperature kapljevine te
 - b. mjerni pretvornik za mjerenje temperature stijenke posude (šaržnog reaktora).

SAŽETAK

Vođenje odnosno regulacija procesa predstavlja sastavni dio kemijskog inženjerstva, a temelji se na održavanju optimalnih uvjeta u procesu podešavanjem određenih procesnih veličina. Procesi se najčešće vode u reaktorima, destilacijskim kolonama, izmjenjivačima topline itd., pri čemu se najčešće reguliraju temperatura, protok, tlak i razina. Vođenje procesa može se prikazati regulacijskim krugom. Tri radnje se nužno odvijaju u regulacijskom krugu u kojem se proces vodi i to mjerenje, usporedba te podešavanje procesnih veličina. Ovaj rad temelji se na objašnjenju mjerenja koje se vrši pomoću mjernih pretvornika. Jedna od najčešće mjerenih procesnih veličina u industriji i laboratoriju je temperatura. Može se definirati kao mjera zagrijanosti tijela, odnosno preciznije kao mjera srednje kinetičke energije gibanja čestica i predstavlja jednu od osnovnih fizikalnih veličina. Za mjerenje temperature mogu se koristiti promjene tlaka, volumena, električnog otpora i drugih fizikalnih veličina koje su proporcionalne temperaturi. Mjerni pretvornici za mjerenje temperature mogu se općenito podijeliti na dilatacijske termometre, pirometre te električne termometre. Odabir pojedinog mjernog instrumenta ovisi o čimbenicima procesa i karakteristikama mjernih pretvornika. U ovom radu cilj je bio odabrati pogodne mjerne pretvornike za mjerenje temperature stijenke šaržnog reaktora i kapljevine koja se u njemu miješa vodeći se čimbenicima procesa i karakteristikama mjernih pretvornika. Pokazalo se da su za mjerenje temperature u šaržnom reaktoru najpogodniji električni termometri.

Ključne riječi: temperatura, šaržni reaktor, mjerni pretvornik, regulacijski krug

SUMMARY

Process control, represents a fundamental part of chemical engineering and is based on the maintenance of optimal conditions within the process through adjustment of certain process variables. Processes are most often controlled within reactors, distillation columns, heat exchangers etc. Most commonly controlled process variables in those processes are temperature, flow, pressure and level. Within a control loop, the actions of measurement, comparison and adjustment of process variables take place. This bachelor thesis is based on the explanation of measurement, which is carried out by using measuring instruments/devices. One of the most commonly measured process variables in industry and laboratories is temperature. It can be defined as a measure of heat of a certain object, or more precisely, as a measure of average kinetic energy of particle movement, and it represents one of the basic physical quantities. In order to measure temperature, changes in pressure, volume, electrical conductivity and other physical values which are proportional to temperature can be used. Measuring instruments for determining temperature can generally be divided into dilatation thermometers, pyrometers and electric thermometers. The selection of a particular measuring instrument depends on the process factors and the characteristics of the measuring transducer. In this bachelor thesis, the goal was to choose a suitable measuring transducer for the measurement of fluid temperature and wall temperature of a batch reactor, while being guided by the process factors and characteristics of the measuring transducers. It was shown that, for measuring temperature in a batch reactor, electric thermometers are most suitable.

Keywords: temperature, batch reactor, measuring transducer, control loop

SADRŽAJ

UVOD	1
1. OPĆI DIO	2
1.1. OSNOVNI DIJELOVI REGULACIJSKOG KRUGA.....	2
1.3. KARAKTERISTIKE MJERNIH PRETVORNIKA	7
1.3.1. Ulazne značajke mjernih pretvornika	8
1.3.2. Izlazne značajke mjernih pretvornika.....	8
1.3.3. Prijenosne značajke mjernih pretvornika	9
1.3.4. Sklad s okolinom	15
1.3.5. Izvedbene značajke mjernih pretvornika	16
1.4. POJAM TEMPERATURE.....	18
1.4.1. Termometrijska svojstva i uvjeti za mjerenje temperature.....	19
1.4.2. Temperaturne ljestvice	19
1.5. MJERNI INSTRUMENTI ZA MJERENJE TEMPERATURE.....	21
1.5.1. Dilatacijski termometri.....	21
1.5.1.1. Kapljevinski termometri	22
1.5.1.2. Termometri sa širenjem krutina.....	24
1.5.1.3. Tlačni dilatacijski termometri.....	27
1.5.2. Pirometri.....	28
1.5.3. Električni termometri.....	31
1.5.3.1. Termoparovi	31
1.5.3.2. Otpornički termometri	42
1.6. MJERENJE TEMPERATURE U ŠARŽNIM REAKTORIMA	46
1.6.1. Kotlasti (šaržni) reaktor	46
2. RASPRAVA.....	48
3. ZAKLJUČAK.....	55
LITERATURA.....	56

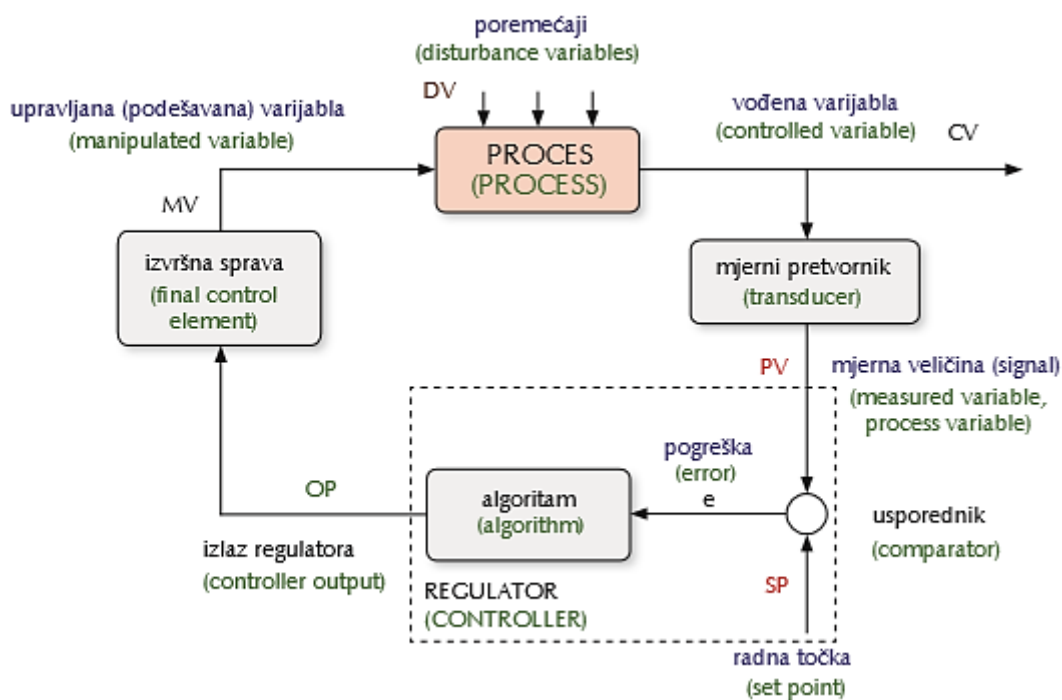
UVOD

Vođenje procesa dio je svakodnevnice, koristi se u različitim inženjerskim područjima poput kemijskog inženjerstva, elektrotehnike, strojarstva, prehrambenog inženjerstva, farmacije i drugih područja. Odvija se u reaktorima, destilacijskim kolonama, izmjenjivačima topline, itd. Temelj vođenja procesa je održavanje optimalnih uvjeta u procesu mijenjajući određene procesne veličine. Procesnim veličinama se mora poznavati vrijednost kako bi se moglo utjecati na proces, jer može se reći kako se o procesu ne zna mnogo, ako se neka veličina ne može kvantitativno iskazati. Vrijednost procesnih veličina se dobiva mjerenjem pomoću mjernih instrumenata tj. uređaja. Najčešće mjerene procesne veličine su temperatura, tlak, protok i razina. U ovom radu biti će opisana temperatura i načini njenog mjerenja. Gotovo sve kemijske reakcije i procesi su ovisni o temperaturi, stoga se smatra jednom od osnovnih fizikalnih veličina. Predstavlja stupanj zagrijanosti tijela, odnosno mjeru srednje kinetičke energije tijela. Za njeno mjerenje mogu se koristiti promjene tlaka, volumena, električnog otpora i drugih fizikalnih veličina koje su proporcionalne temperaturi. Mjerni pretvornici pretvaraju temperaturu u električni signal koji se ispisuje ili prenosi u neki drugi sustav. Postoje različiti mjerni instrumenti za mjerenje temperature, a čiji izbor ovisi o vrsti procesa i karakteristikama mjernih instrumenata. Osnovne vrste mjernih instrumenata za mjerenje temperature su dilatacijski termometri, električni termometri te pirometri zračenja. Mjerni instrumenti nisu savršeni sustavi, stoga je potrebno poznavati njihova načela rada, prednosti i nedostatke kako bi se za određeni proces izabrao najpogodniji mjerni instrument. Za mjerenje temperature u industriji se najviše koriste električni mjerni instrumenti i to termoparovi (termoelementi) i otpornički termometri.

1. OPĆI DIO

1.1. OSNOVNI DIJELOVI REGULACIJSKOG KRUGA

Vođenje, odnosno regulacija procesa može se prikazati pomoću regulacijskog kruga. Svaki se regulacijski krug sastoji od 4 temeljna elementa, a to su: proces, mjerni pretvornik, regulator te izvršna sprava, što je prikazano na slici 1. Unutar regulacijskog kruga uvijek se odvijaju tri radnje i to mjerenje (mjernim pretvornikom), usporedba (pomoću usporednika koji je dio regulatora) te podešavanje (pomoću izvršne sprave, a na temelju izlaznog signala regulatora):¹

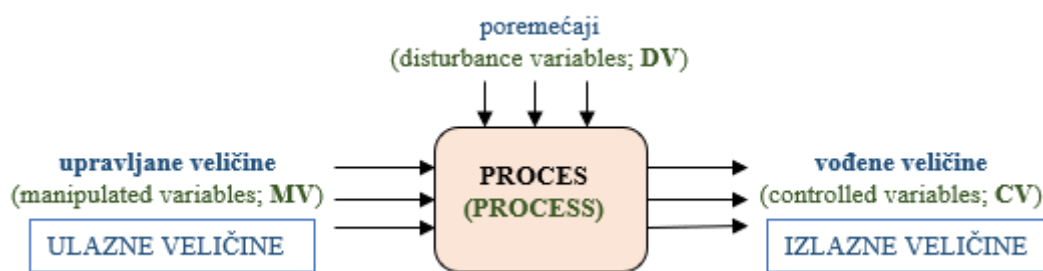


Slika 1. Prikaz regulacijskog kruga ¹

Za razumijevanje vođenja procesa važno je usvojiti tri važna pojma koja su vezana za sve procese. To su **vođene veličine** (engl. *controlled variables*; **CV**), **upravljive veličine** (engl. *manipulated variables*; **MV**) i **poremećaji** (engl. *disturbance variables*; **DV**), kao što je prikazano skicom na slici 2.²

- **Vođene veličine** su one veličine koje je potrebno voditi ili održavati na željenoj vrijednosti, a to su najčešće protok, temperatura, tlak i razina. Zbog toga što one predstavljaju posljedicu promjena u procesu, nazivaju se **izlazne veličine** (engl. *outputs*). Svakoj se vođenoj veličini zadaje željena vrijednost koja se još u praksi naziva referentna vrijednost ili **radna točka** (engl. *set point; SP*).²
- **Poremećaji** djeluju na proces tako što utječu na vrijednost vođene veličine uslijed čega ona odstupa od referentne odnosno željene vrijednosti.²
- **Upravljanje veličine** su one veličine kojima se smisleno mijenja vrijednost kako bi se ciljano utjecalo na vrijednosti vođenih veličina. Upravljanje veličine i poremećaji uzrokuju promjene u procesu i stoga se nazivaju **ulaznim veličinama**.²

Cilj svake regulacije tj. vođenja procesa jest zadržavanje željene vrijednosti vođene veličine promjenom vrijednosti upravljane veličine, usprkos djelovanju poremećaja.⁴



Slika 2. Skica procesa s osnovnim dijelovima²

U fokusu ovog rada je upravo mjerenje jer na njemu počiva uspješno vođenje procesa. Jedna od najčešće mjerenih procesnih veličina u industriji je upravo temperatura te će o mjerenju temperature biti više riječi u nastavku ovog rada.

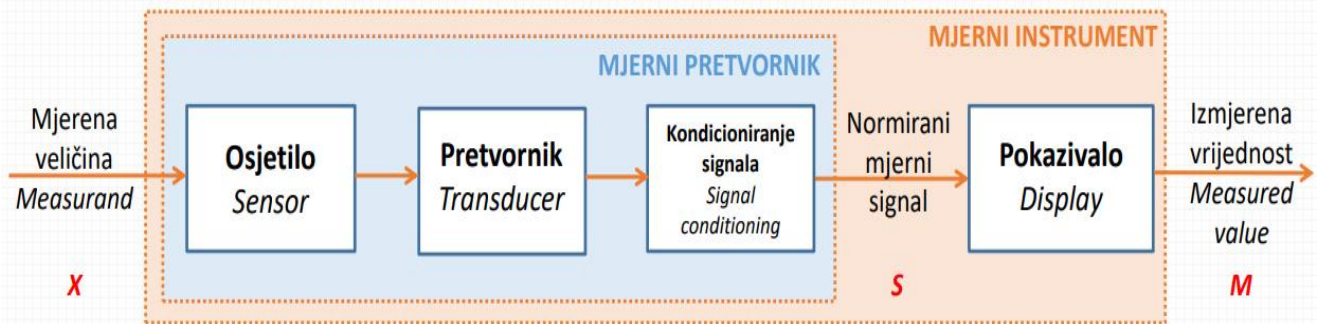
1.2. MJERENJE I MJERNI PRETVORNIK

Mjerenje predstavlja postupak kojim se ostvaruju informacije o fizikalnoj ili kemijskoj prirodi promatranog procesa.³ Može poslužiti u svrhu: promatranja procesa, vođenja procesa te eksperimentalne analize.³ Vođenje procesa temelji se na održavanju željenih uvjeta u procesu podešavanjem određenih procesnih veličina.⁴ Za to podešavanje je potrebno poznavanje vrijednosti procesnih veličina, što se ostvaruje upravo mjerenjem.

Postupak mjerenja vrši se pomoću mjernih instrumenata tj. mjernih uređaja.

Mjerni instrumenti svrstavaju se u osnovne dijelove procesne opreme pri vođenju procesa, jer svako djelovanje na proces ovisi o izmjerenim vrijednostima određenih procesnih veličina. Najčešće procesne (mjerne) veličine u industriji su: protok, razina, tlak i temperatura. Princip rada mjernog instrumenta zasniva se na uočavanju fizikalnih ili drugih promjena u određenom procesu te pretvaranju takvih promjena u pogodan oblik informacije razumljiv korisniku (npr. pomak/otklon kazaljke, digitalni zapis).⁴

Svaki se mjerni instrument sastoji od: **mjernog pretvornika** (mjerno osjetilo, pretvornik, sklop za kondicioniranje signala) i **pokazivala**, što je prikazano općim blok dijagramom na slici 3.⁵

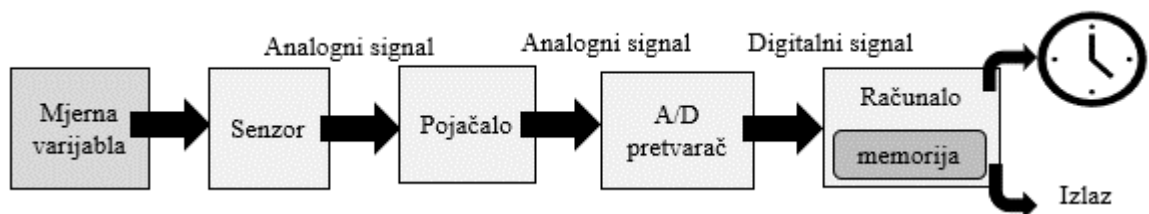


Slika 3. Opći blok dijagram mjernog instrumenta^{4 5}

Mjerni pretvornik

Mjerni pretvornik je uređaj koji fizikalnu mjernu veličinu (npr. temperaturu) pretvara u normirani mjerni signal. Najčešće je strujni ili naponski, jer je najpogodniji za modifikaciju (lako se prenosi, pohranjuje i obrađuje).⁴ Čine ga mjerno osjetilo, pretvornik i sklop za kondicioniranje signala.

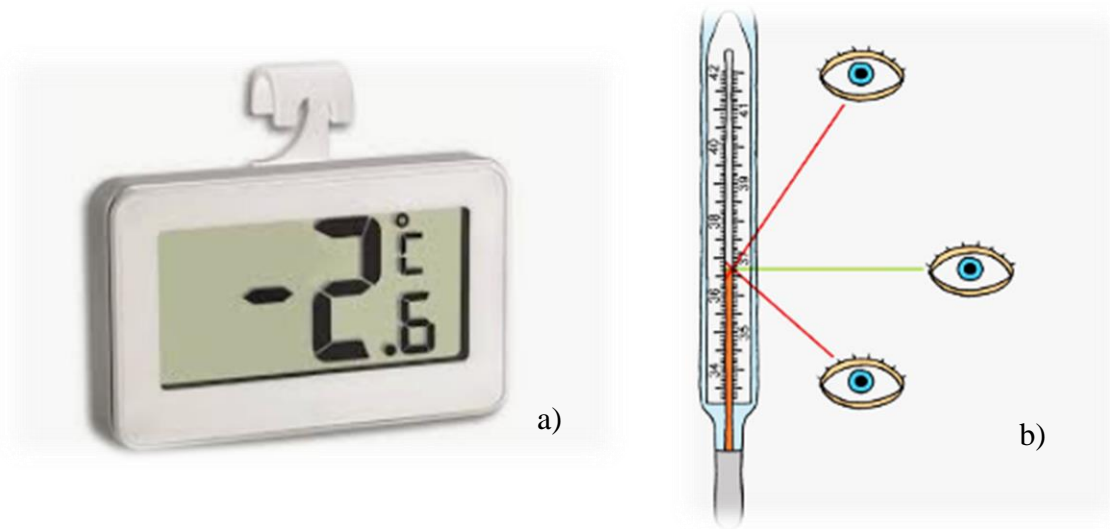
- **Mjerno osjetilo** (engl. *sensor*) je tehnički element koji je u izravnom kontaktu s fizikalnom mjernom veličinom pri čemu osjeća njene promjene u procesu i na svom izlazu daje odziv, analogan ulaznoj fizikalnoj veličini. Za industriju je vrlo važno izabrati osjetila koja mjere veličine brzo uz potrebnu točnost.
- **Pretvornik** (engl. *transducer*) je tehnički element koji izlaznu veličinu osjetila pretvara u analognu fizikalnu veličinu prikladnu za prijenos ili dovod na pokazivalo.⁵
- **Sklop za kondicioniranje signala** (engl. *signal conditioning*) je sklop koji poboljšava kvalitetu izlaznog signala mjernog pretvornika prije pretvorbe u digitalni oblik.⁴ Često se smatra dijelom pretvornika. Izlazni signal je standardiziran (električni ili pneumatski). Glavni elementi sklopa za kondicioniranje signala su **pojačalo** i **mjerni mostovi**. Pojačala služe za podizanje vrijednosti signala na vrijednosti prikladne za daljnju obradu (slika 4.), dok su mjerni mostovi elementi za pretvaranje izlaza iz otporničkih, kapacitivnih i induktivnih osjetila u naponski signal.⁶ Nakon ove pretvorbe analogni signal ide na daljnju obradu i pretvara se u digitalni oblik pomoću analogno-digitalnog pretvarača (A/D pretvarač) kao što je prikazano na slici 4. Zatim se podatci pohranjuju u računalo, koje te podatke još može prikazati ili prenijeti kao izlaz u neki drugi sustav koji će koristiti mjerenje.⁷



Slika 4. Prikaz mjernog instrumenta s elementima pojačala, A/D pretvarača i računalnim izlazom⁷

Pokazivalo

Pokazivalo (engl. *display*) je tehnički element koji prikazuje vrijednost mjerne veličine. Te vrijednosti mogu biti prikazane u digitalnom zapisu na ekranima (slika 5.a) ili ih možemo sami očitavati npr. skala na termometru (slika 5.b), kazaljka na uređajima i slično.



Slika 5. a) Pokazivalo sa digitalnim zapisom izmjerene veličine⁸, b) pokazivalo je skala termometra⁹

1.3. KARAKTERISTIKE MJERNIH PRETVORNIKA

Vođenje tj. regulacija procesa izravno je povezana sa mjerenjem vrijednosti vođene veličine mjernim pretvornikom. Mjerni pretvornik osim što mjeri samu vrijednost vođene veličine, on je pretvara u standardizirani mjerni signal. Mjerni signal se prenosi na regulator, koji ga koristi kako bi izračunao potrebnu vrijednost upravljane veličine čija će se vrijednost podesiti pomoću izvršne sprave. Zato se pri projektiranju i instaliranju sustava za vođenje procesa mora izabrati **pogodan mjerni pretvornik**, odnosno mjerni uređaj ovisno o stanju okoline i sustava.¹⁰ Potrebno je odgovoriti na nekoliko ključnih pitanja pri odabiru pogodnog mjernog pretvornika i to:

- Koje je radno područje mjerne veličine?
- Postoje li ekstremi?
- Kolika je točnost, preciznost i osjetljivost potrebna pri mjerenju?
- Kolika je pouzdanost potrebna?
- Kolika je cijena mjernog pretvornika?
- Kolika je cijena ugradnje i održavanja?
- Postoje li posebni zahtjevi , npr. korozivne tekućine, eksplozivne tvari?
- Koja su ograničenja vezana uz dimenzije i oblik?
- Kako će se prenositi signal u sustavu? ¹⁰

Dakle, kako bi se ispravno odabrao mjerni pretvornik, potrebno je poznavati **karakteristike (značajke) mjernih pretvornika**. One govore o kvaliteti mjernog pretvornika, tj. govore koliko dobro i brzo mjerni pretvornik pretvara mjernu veličinu u standardizirani signal. Mogu se podijeliti na: ulazne karakteristike, izlazne karakteristike, prijenosne karakteristike, izvedbene karakteristike te sklad s okolinom.¹⁰

1.3.1. Ulazne značajke mjernih pretvornika

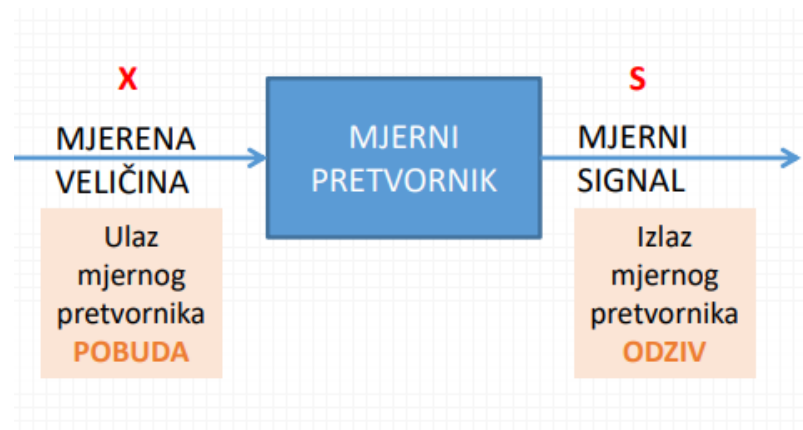
Ulazne značajke mjernih pretvornika vezane su za karakteristike **radnog područja** mjerne veličine mjernog pretvornika, a podrazumijevaju mjernu veličinu, mjerno područje te mjerni opseg.¹⁰

- **Mjerna veličina** (engl. *measured quantity, measurand*) je ulaz mjernog pretvornika, govori o stanju tvari i energije (npr. temperatura). U sustavu za mjerenje prikazanom na slici 6. naziva se još i **pobuda**, označena oznakom **X**.
- **Mjerno područje** (engl. *range*) čini raspon vrijednosti za koje se mjerni pretvornik može koristiti. Izražava se preko maksimalne i minimalne vrijednosti mjerne veličine (npr. mjerenje temperature živinim termometrom je u području od -35 °C do 510 °C).
- **Mjerni opseg** (engl. *span*) predstavlja razliku između maksimalne i minimalne vrijednosti mjerne veličine (npr. mjerni opseg živinog termometra iznosi 545 °C).⁴

1.3.2. Izlazne značajke mjernih pretvornika

Izlazne značajke mjernih pretvornika predstavljaju vrstu mjernog signala, područje mjernog signala, zatim karakteristike za prijenos signala, kao što su ulazni i izlazni otpor te mjerni šum.¹⁰

- **Mjerni signal** je izlaz mjernog pretvornika. Signal je standardiziran, može biti električni (strujni s **područjem signala** 4-20 mA ili naponski s područjem signala 1-5V) te pneumatski ili tlačni (s područjem signala 20-100 kPa). U sustavu za mjerenje prikazanom na slici 6. mjerni signal je **odziv** mjernog pretvornika na promjenu mjerene veličine, a označava se oznakom **S**.¹⁰

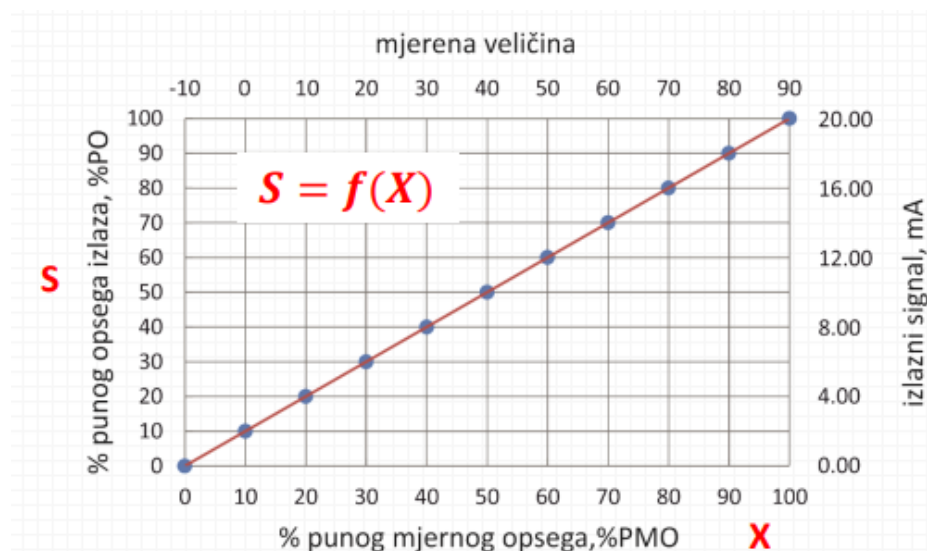


Slika 6. Prikaz ulaza i izlaza mjernog pretvornika u sustavu za mjerenje ⁴

1.3.3. Prijenosne značajke mjernih pretvornika

Prijenosne značajke su najvažnije značajke mjernih pretvornika. Govore o kvaliteti pretvorbe mjerne veličine (X) u mjerni signal (S), odnosno o ponašanju odziva mjernog pretvornika na zadanu pobudu mjerene veličine. To su: baždarna krivulja, linearnost, ponovljivost, obnovljivost, histereza, osjetljivost, točnost, preciznost i prag osjećanja.

- **Baždarna krivulja** (engl. *calibration curve*) još se naziva i statičkom karakteristikom mjernog pretvornika. Pokazuje **funkcijsku ovisnost** izlazne i ulazne veličine mjernog pretvornika. Baždarna krivulja prikazana je na slici 7. Ovisnost se prikazuje preko izraza $S=f(X)$. Postupak eksperimentalnog određivanja baždarne krivulje naziva se **baždarenje** odnosno **kalibriranje** (engl. *calibration*). Određuje se snimanjem izlaza mjernog pretvornika mijenjajući ulaz mjernog pretvornika na zadani način.⁷ Baždarenje je zapravo postupak prilagođavanja parametara mjernog pretvornika, kako bi njegov mjerni signal odgovarao poznatom mjernom signalu referentnog mjernog pretvornika prikladne točnosti.⁴



Slika 7. Statička karakteristika mjernog pretvornika⁴

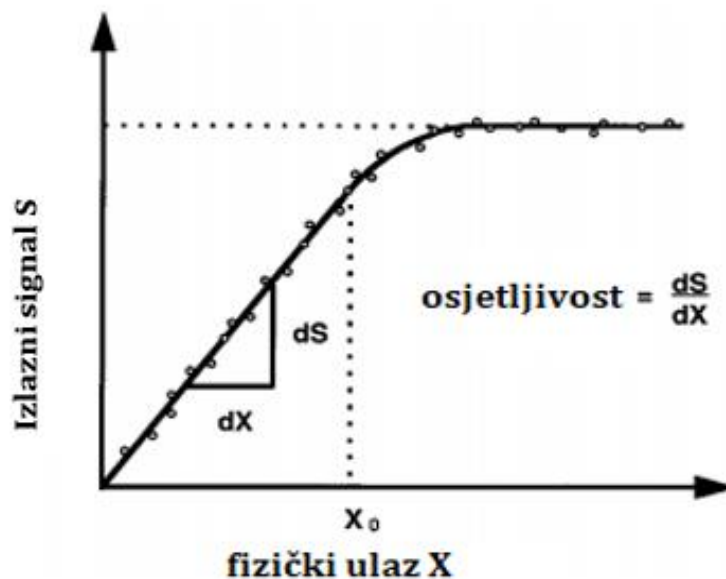
Na slici 7. prikazana je linearna statička karakteristika mjernog pretvornika. Apscisa se izražava preko postotka punog mjernog opsega (%PMO) ulaza, a ordinata preko postotka punog opsega izlaznog signala (%PO), a preračunavaju se korištenjem izraza (1) i (2):¹⁰

$$\%PMO = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \cdot 100 \quad (1)$$

$$\%PO = \frac{Y - Y_{min}}{Y_{max} - Y_{min}} \cdot 100 \quad (2)$$

Točke na pravcu na slici 7. predstavljaju izmjerene vrijednosti izlaznog signala ovisno o promjeni mjerne veličine tijekom postupka umjeravanja.¹⁰

- **Osjetljivost** mjernog pretvornika je definirana kao omjer promjene mjernog signala S pri promjeni mjerne veličine X .⁴ Karakteristika osjetljivosti je prikazana na kalibracijskoj krivulji, slika 8.

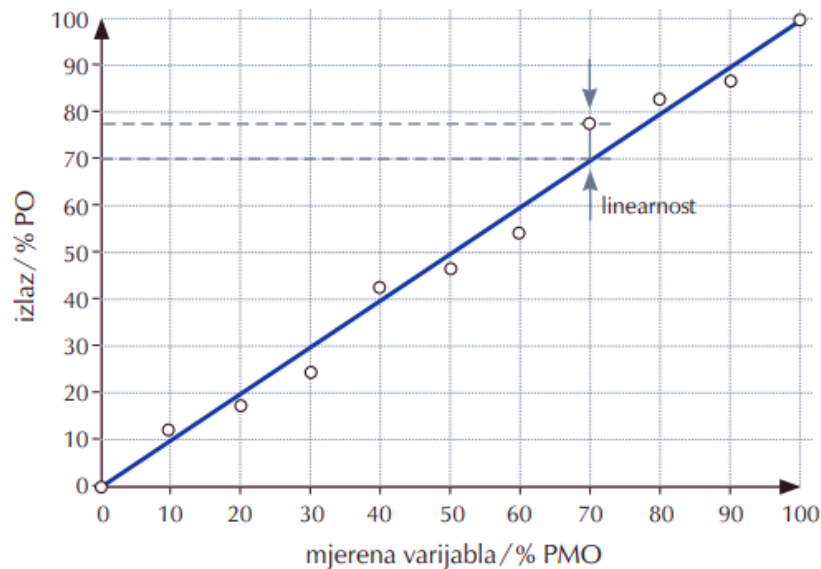


Slika 8. Kalibracijska krivulja s prikazanom karakteristikom osjetljivosti⁷

Osjetljivost uređaja je određena nagibom baždarne krivulje. Mjerna jedinica osjetljivosti je definirana mjernom jedinicom izlaznog signala podijeljenog s mjernom jedinicom mjerne veličine, npr. ukoliko se živa u termometru pri promjeni temperature za 1 °C pokrene za 1 cm, osjetljivost termometra je 1 cm °C⁻¹.² Mjerni instrumenti koji mjere vrlo male promjene mjerne veličine moraju biti visoke osjetljivosti.⁶ Ako se

promatra kalibracijska krivulja na slici 8., za vrijednosti fizičkog ulaza X većeg od X_0 , kalibracijska krivulja postaje sve manje osjetljiva, dok ne postigne graničnu vrijednost izlaznog signala. Tada se postiže **zasićenost uređaja** te se on više ne može upotrebljavati iznad tog područja.¹¹ Osjetljivost mjernog pretvornika može se mijenjati, zbog starenja materijala, koje može biti uzrokovano utjecajem kemikalija ili drugih okolišnih uvjeta kojima je mjerni pretvornik izložen. Postoji još jedna vrsta osjetljivosti koja je također važna za mjerne sustave. Definira se kao najmanja promjena mjerne veličine koja će uzrokovati mjerljivu promjenu izlaznog signala, a naziva se **prag osjećanja** (engl. *threshold*).¹⁰

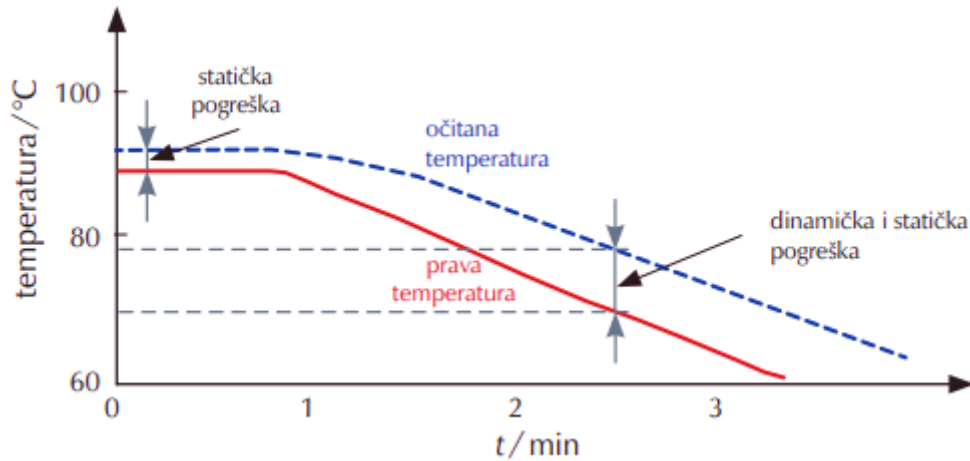
- **Linearnost** (engl. *linearity*) je maksimalno odstupanje pojedinih mjerenja od pravca koji se naziva statičkom karakteristikom mjernog pretvornika.¹⁰ Određuje se tijekom umjeravanja mjernog pretvornika. Obično se izražava u postocima punog opsega (%PO). Značajka linearnosti prikazana je na slici 9.



Slika 9. Određivanje linearnosti u postocima punog opsega (%PO)¹⁰

- **Točnost** (engl. *accuracy*) se definira kao bliskost stvarne vrijednosti mjerne veličine s izmjerenom veličinom. Kao faktori točnosti razlikuju se: statička točnost (engl. *static, steady-state accuracy*), dinamička točnost (engl. *dynamic accuracy*), ponovljivost (engl. *repeatability*), vrijeme odziva, mrtvo vrijeme i mrtva zona.⁶ **Statička točnost** predstavlja blizinu primicanja izmjerene vrijednosti u slučaju konstantne stvarne vrijednosti. **Dinamička točnost** predstavlja blizinu primicanja kad se stvarna vrijednost

s vremenom mijenja, još se naziva pogreškom mjerenja.¹⁰ Objašnjenje statičke i dinamičke točnosti je prikazano na slici 10.



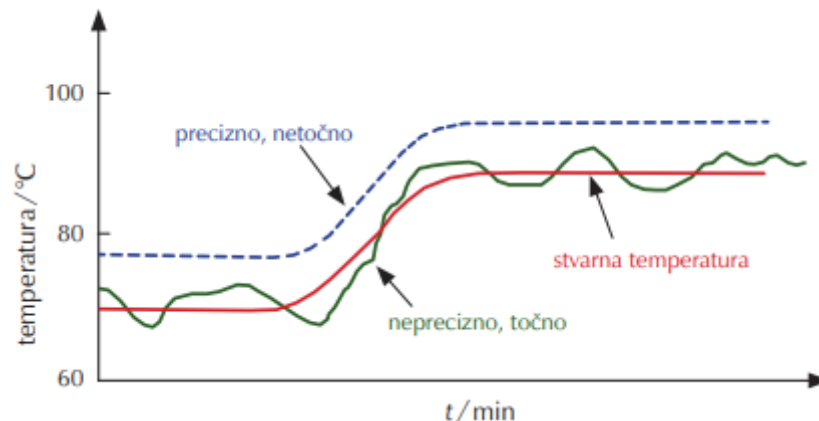
Slika 10. Statička i dinamička pogreška¹⁰

Vrijeme odziva se može definirati kao vrijeme potrebno mjernom pretvorniku da promijeni vrijednost iz prethodnog stanja u konačnu ustaljenu vrijednost odziva. Idealni mjerni pretvornik trenutno registrira svaku promjenu mjerne veličine. To u praksi nije izvedivo radi dinamičke pogreške, mrtvog vremena te mrtve zone.⁶

Mrtvo vrijeme (engl. *dead time*) jest vrijeme koje je potrebno mjernom pretvorniku za pojavu promjene izlazne veličine nakon promjene ulazne veličine.

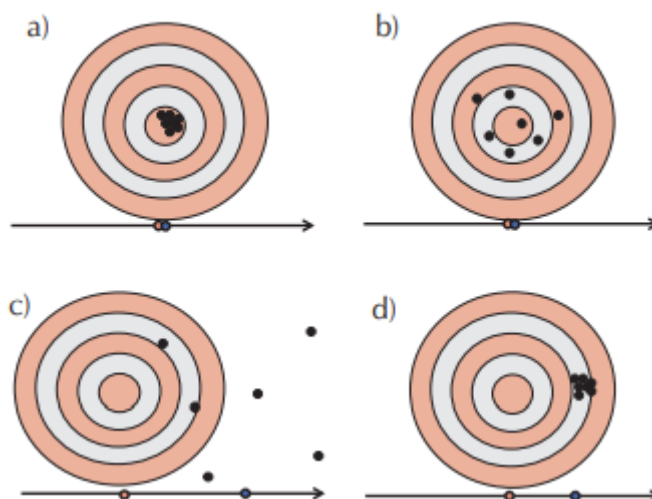
Mrtva zona je najveća promjena mjerne veličine pri kojoj neće doći do promjene izlaza mjernog pretvornika.⁶

- **Preciznost** (engl. *precision*) se odnosi na mjeru veličine slučajne pogreške (engl. *random error*) koja će pri svakom mjerenju dodavati rezultatu svoju nepoznatu komponentu. Uz preciznost se često veže pojam **ponovljivosti** (engl. *repeatability*). U većini slučajeva za vođenje procesa važnije su karakteristike preciznosti i ponovljivosti od točnosti, jer je važnije izmjeriti veličine s visokom preciznošću nego s apsolutnom točnošću. Razlike između preciznosti i točnosti na primjeru mjerenja temperature u vremenu prikazane su na slici 11.¹⁰



Slika 11. Preciznost i točnost mjernog instrumenta na primjeru mjerenja temperature ¹⁰

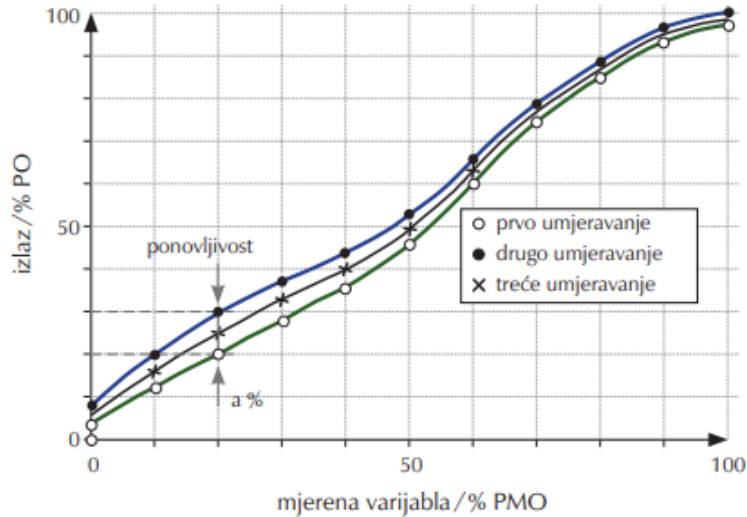
Razlike između točnosti i preciznosti također se mogu grafički ilustrirati na primjeru prikazivanja rezultata gađanja u metu, slika 12.



Slika 12. a) Velika točnost i preciznost, b) mala preciznost i prihvatljiva točnost, c) mala točnost i preciznost, d) visoka preciznost i mala točnost ¹⁰

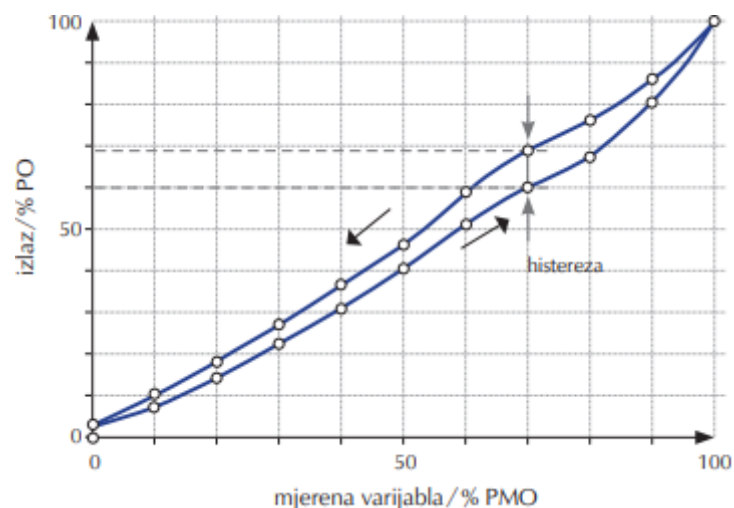
- **Ponovljivost** (engl. *repeatability*) je karakteristika mjernog pretvornika koja pri stalnim radnim uvjetima daje jednake vrijednosti izlazne veličine za uzastopno ponovljena mjerenja iste vrijednosti mjerne veličine.⁴ Uvjeti za ponovljivost prema "Guidelines for Evaluating for Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results" su: isti mjerni postupak, isti mjerni instrument pod istim uvjetima, ista lokacija mjerenja, isti motritelj

i ponavljanje u kratkom razdoblju. Može se izraziti kao maksimalno uočena razlika u postotcima punog opsega signala (%PO) ili u postotcima punog mjernog opsega (%PMO) što je prikazano na slici 13. pri provedbi više umjeravanja.¹⁰



Slika 13. Ponovljivost pri provedbi više umjeravanja ¹⁰

- **Obnovljivost** (engl. *reproducibility*) predstavlja slaganje izlaznih veličina mjernog pretvornika pri ponovljenim mjerenjima iste ulazne veličine za neki dulji vremenski period u različitim uvjetima okoline i/ili različitim uređajima.⁴
- **Histereza** (engl. *hysteresis*) je razlika u vrijednostima izlazne veličine za istu vrijednost mjerene veličine na način, da njena vrijednost najprije raste, a onda se smanjuje, slika 14. Može se izraziti preko postotaka punog opsega (npr. $\pm 0,5$ %PO) ili najvećom ustanovljenom razlikom izlazne veličine. Najčešći uzroci su: elastične deformacije materijala koje su posljedice opterećenja, trenje, feromagnetske pojave (npr. u navojima eklektičnih žica), mrtvi pojas i dr.¹⁰



Slika 14. Prikaz histereze¹⁰

1.3.4. Sklad s okolinom

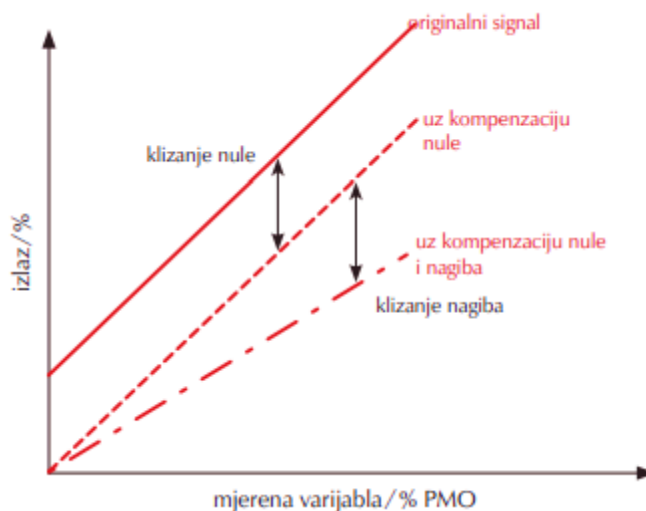
Uvjeti rada u praksi se često razlikuju od okolišnih uvjeta pri kojima se vrši umjeravanje mjernih pretvornika. Okolišni uvjeti mogu znatno odstupati od normalnih uvjeta i stoga uzrokovati pogrešku pri mjerenju, oštećenje i/ili promjenu statičke karakteristike. Sklad s okolinom se može opisati pomoću karakteristika klizanja mjernih pretvornika, pouzdanosti, opterećenosti i trajnosti.⁴

- **Kliranje** (engl. *drifting*) predstavlja sporu dugotrajnu promjenu karakteristika mjernih pretvornika.⁴ Razlikuje se kliranje nule i kliranje nagiba.

Kliranje nule (engl. *offset error*) jest odstupanje s obzirom na pravu (referentnu) vrijednost izmjerene veličine.⁴ Kliranje nule može jako utjecati na ukupnu točnost mjerenja.¹⁰

Kliranje nagiba ili pogreška pojačanja (engl. *gain error*) jest razlika u nagibu stvarne karakteristike i izmjerene vrijednosti mjerene veličine.⁴

Zbog toga što kliranje utječe na ukupnu mjernu točnost jer uzrokuje odstupanje izmjerenih veličina od stvarnih vrijednosti, većina uređaja ima "autozero" funkciju koja kontinuirano prati odstupanja i kompenzira ih. Ukoliko mjerni instrument nema tu funkciju, potrebno je redovito provoditi umjeravanja i dokumentirati utjecaj pogreške klizanja na ukupnu točnost mjerenja.¹⁰ Prikaz kompenzacije klizanja nule i klizanja nagiba dan je na slici 15.



Slika 15 Kompenzacija klizanja nule i klizanja nagiba ¹⁰

- **Opterećenost** predstavlja skup utjecaja kojima mjerni pretvornik može biti izložen u određenom trenutku do **dopustivog opterećenja**. Dopustivo opterećenje označava maksimalnu vrijednost mjerne veličine kojoj pretvornik može biti izložen, a koja neće uzrokovati trajnu promjenu njegove statičke karakteristike.⁴
- **Pouzdanost** (engl. *reliability*) jest sposobnost rada mjernog pretvornika pod deklariranim uvjetima u određenom vremenskom periodu.⁴
- **Trajnost** (engl. *durability*) ili **vijek upotrebe** (engl. *lifetime*) mjernog pretvornika je najmanje vremensko razdoblje u kojem se on može upotrebljavati pri radnim uvjetima ili skladištiti do upotrebe, a da ne dođe do promjena u njegovim svojstvima.

1.3.5. Izvedbene značajke mjernih pretvornika

Izvedbene značajke su vrlo bitne kod ugradnje i primjene mjernih pretvornika, jer sadrže podatke o dimenziji, masi, materijalu od kojeg je izrađen mjerni pretvornik, položaju priključnica za električne spojeve, izvedbi spojeva, zaštiti od korozije i ostalih štetnih utjecaja.⁴ Podatci o nazivu mjernog pretvornika, najvažnijim karakteristikama (mjernom području, serijskom broju, točnosti, proizvođaču itd.) se nalaze na natpisnoj pločici. Primjer takve natpisne pločice za stakleni kapljevinski termometar prikazan je na slici 16.



Liquid in glass thermometers.

To Order							
Model No.	Type	Range	Divisions	Length	Immersion	Accuracy (Scale Divisions)	Traceable to DAkkS
Partial Immersion Thermometers							
GT-30591	Yellow Back	-10/110°C	1	200 mm (7.9")	50 mm (2")	0.5, 1 below 0 and above 70°C	Yes
GT-30593	Yellow Back	-10/150°C	1	200 mm (7.9")	50 mm (2")	0.5, 1 below 0 and above 70, 1.5 above 110°C	Yes
GT-30597	Yellow Back	20/230°F	2	200 mm (7.9")	50 mm (2")	0.5, 1 below 32 and above 158°F	Yes
GT-30599	Yellow Back	20/300°F	2	200 mm (7.9")	50 mm (2")	0.5, 1 below 32 and above 158, +/-1 1.5 above 230°F	Yes
GT-30507	Yellow Back	-10/70°C	0.5	300 mm (12")	76 mm (3")	0.5, 1 below 0°C	Yes
GT-30509	Yellow Back	-35/50°C	0.5	300 mm (12")	76 mm (3")	1	Yes
GT-30505	Yellow Back	-20/110°C	1	300 mm (12")	76 mm (3")	0.5, 1 below 0 and above 70°C	Yes
GT-30515	Yellow Back	-20/150°C	1	300 mm (12")	76 mm (3")	0.5, 1 below 0 and above 70, 1.5 above 110°C	Yes
GT-30531	Yellow Back	-30/120°F	1	300 mm (12")	76 mm (3")	1	Yes
GT-30535	Yellow Back	0/230°F	2	300 mm (12")	76 mm (3")	0.5, 1 above 158°F	Yes
GT-30545	Yellow Back	0/300°F	2	300 mm (12")	76 mm (3")	0.5, 1 below 32 and above 158, 1.5 above 230°F	Yes
GT-30525	Yellow Back	-10/260°C	1	350 mm (14")	76 mm (3")	1, 1.5 above 110, 2 above 200°C	Yes
GT-30555	Yellow Back	20/500°F	2	350 mm (14")	76 mm (3")	1, 1.5 above 230, 2 above 392°F	Yes

Slika 16. Primjer natpisnih pločica staklenog kapljevinskog termometra ¹²

1.4. POJAM TEMPERATURE

Temperatura je jedna od osnovnih fizikalnih veličina te jedna od najčešće mjerenih veličina u laboratoriju i industriji. Označava se najčešće s oznakama: t , T ili θ , a osnovna mjerna jedinica prema Međunarodnom sustavu jedinica (skraćeno SI) je Kelvin (K).

Temperatura se često definira kao mjera zagrijanosti ili ohlađenosti tijela (sustava). Često se za tijelo više temperature kaže kako je toplije u odnosu na drugo, ono hladnije tijelo. Međutim takva tvrdnja ne daje u potpunosti točnu definiciju temperature, jer su riječi „topao“ i „hladan“ više subjektivne veličine, tj. veličine ovisne o osobnim osjetilima. Kako bi temperatura dobila fizikalno značenje mora se povezati sa gibanjem čestica koje određuju sustav.

„U svim se tijelima čestice neprekidno gibaju, a to se gibanje čestica naziva **toplinskim gibanjem**, zbog kojeg čestice posjeduju toplinsku energiju“.¹³ **Temperatura** je dakle, proporcionalna prosječnoj brzini gibanja čestica i povećava se s njenim porastom.¹⁴

Dovedu li se dva tijela, hladnije i toplije u međusobni kontakt, čestice s većom kinetičkom energijom u sudarima predaju energiju onima s manjom energijom. Na taj način, energija u obliku **topline** prelazi s jednog tijela na drugo. **Prijenos topline će se vršiti sve do postizanja termičke ravnoteže u kojem je srednja kinetička energija istovrsnog gibanja čestica oba tijela jednaka.**¹³ Za dva tijela koja se nalaze u termičkoj ravnoteži se kaže kako imaju jednaku temperaturu, jer im je jednaka srednja kinetička energija gibanja čestica.¹⁵

Često se pojam temperature i pojam topline znaju koristiti kao istoznačnice. Međutim **toplina** se odnosi na energiju koja se prenese sa jednog tijela na drugo uslijed temperaturne razlike, dok temperatura predstavlja mjeru zagrijanosti ili ohlađenosti tijela točnije mjeru srednje kinetičke energije gibanja čestica.

1.4.1. Termometrijska svojstva i uvjeti za mjerenje temperature

Mnoge fizikalne veličine su funkcija temperature te se mjerenjem tih veličina (termometrijskih svojstava) može mjeriti temperatura. **Termometrijska svojstva** na osnovu kojih se izrađuju uređaji za mjerenje temperature su:

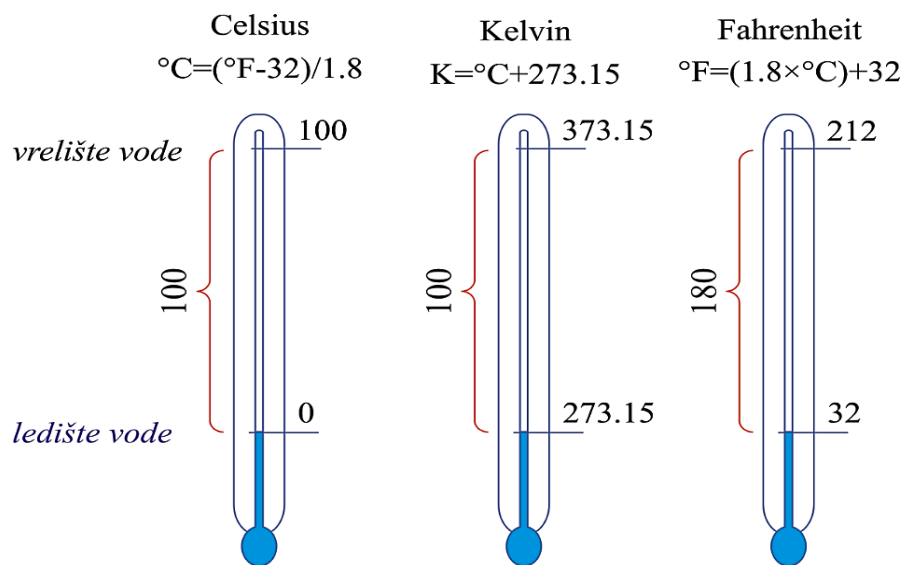
- dimenzije čvrstih tijela,
- volumen tekućina,
- električni otpor metala,
- tlak plina pri stalnom volumenu,
- elektromotorna sila članka,
- ovisnost zračenja o temperaturi.¹⁶

Ova svojstva se koriste kao osnova za osjećanje i pretvorbu temperature u mjerni signal.³ Za mjerenje temperature potrebno je ispuniti određene uvjete. **Prvi uvjet** jest izabrati određeno termometrijsko svojstvo čija ovisnost o temperaturi je poznata i na taj način mjerenje svesti na mjerenje tog termometrijskog svojstva. **Drugi uvjet** jest definiranje temperaturne ljestvice i jedinice temperature.¹⁶

1.4.2. Temperaturne ljestvice

Temperaturne ljestvice definiraju se na osnovu fizikalnih pojava koje se odvijaju pri konstantnim temperaturama u danim uvjetima, a koje se nazivaju **fiksni točkama**. Obično se kao jedna fiksna točka uzima temperatura smjese destilirane vode i leda u termičkoj ravnoteži (ledište vode), pri normalnom atmosferskom tlaku (101 325 Pa). Za drugu fiksnu točku uzima se temperatura vrelišta destilirane vode pri normalnom tlaku. Općenito uzimanjem dviju ili više točaka kao referentnih te ravnomjernom raspodjelom temperaturnog razmaka između njih dobivaju se temperaturne ljestvice.¹⁶

Temperaturne ljestvice koje se najčešće koriste su: **Celsiusova, Kelvinova i Fahrenheitova**, iako postoje i brojne druge temperaturne ljestvice. Usporedba temperaturnih ljestvica prikazana je na slici 17.



Slika 17. Usporedba temperaturnih ljestvica sa prikazanim fiksnim točkama i formulama preračunavanja Celsiusove, Kelvinove i Fahrenheitove temperaturne ljestvice ¹⁷

1.5. MJERNI INSTRUMENTI ZA MJERENJE TEMPERATURE

S obzirom na metodu mjerenja, razlikuje se nekoliko tipova mjernih instrumenata za mjerenje temperature i to:

- dilatacijski termometri (kapljevinski, termometri sa širenjem krutina i tlačni),
- pirometri,
- električni termometri (otpornički, termoparovi).

1.5.1. Dilatacijski termometri

Termometrijska svojstva koja služe kao osnova za osjećanje i pretvorbu signala u mjerni signal kod dilatacijskih termometara su promjena u dimenzijama čvrstih tijela (širenje metala) i promjena u volumenu (širenje kapljevina i plinova). Materijali u pravilu povećavaju svoj volumen, V , i dužinu, l , porastom temperature, a ovisnost volumena, V , i dužine, l , o prirastu temperature, ΔT , određuje se eksperimentalno, za svaku tvar posebno. Ovisnost se prikazuje jednadžbama (3) i (4).³

$$V = V_0 [1 + \alpha\Delta T + \beta\Delta T + \gamma\Delta T + \dots] \quad (3)$$

gdje je:

V – volumen kapljevine pri mjerenoj temperaturi T [cm^3],

V_0 – volumen kapljevine pri temperaturi T_0 (T_0 referentna temperatura $0\text{ }^\circ\text{C}$ ili $25\text{ }^\circ\text{C}$), [cm^3],

α, β, γ - temperaturni koeficijenti promjene volumena (pri promjeni temperature za $1\text{ }^\circ\text{C}$) [$^\circ\text{C}^{-1}$]

Za štap ili žicu koja se koristi kao osjetilo ta se ovisnost često piše za dužinu i pritom zanemaruje poprečno širenje:

$$l = l_0 [1 + \alpha\Delta T + \beta\Delta T + \gamma\Delta T + \dots] \quad (4)$$

gdje je:

l - dužina štapa ili žice na temperaturi T [cm],

l_0 – dužina štapa ili žice na temperaturi T_0 [cm],

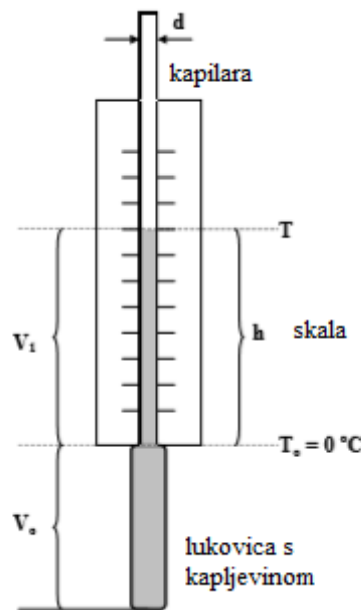
α, β, γ - temperaturni koeficijenti promjene duljine [var.].³

Dilatacijski termometri se dijele na kapljevinske, termometre sa širenjem krutine i tlačne termometre.

1.5.1.1. Kapljevinski termometri

Kapljevinski termometri su termometri s kapljevinskom u staklu pa se još nazivaju **stakleni termometri** (engl. *liquid-in-glass thermometer*) i jedni su od najranije izvedenih termometra. Iako je staklo lako lomljivo što je ujedno i nedostatak ovih termometara, zbog kemijske inertnosti stakla i dalje su vrlo popularni i korišteni. Osnovni dijelovi su lukovica s kapljevinskom (uloga osjetila i pretvornika), kapilara i skala (uloga pokazivala). Takav stakleni kapljevinski termometar je prikazan na slici 18.

Glavna karakteristika ovih termometara jest ta da se mjerenje temperature vrši posredno preko promjene volumena kapljevinske u lukovici u koju je uronjena kapilara, uslijed djelovanja toplote. Promjena volumena kapljevinske se očituje promjenom visine stupca kapljevinske u kapilari.³



Slika 18. Stakleni kapljevinski termometar³

Lukovica ispunjena određenom kapljevinskom u koju je uronjena kapilara pri temperaturi $T_0=0^{\circ}\text{C}$ ima volumen V_0 , a zatim se zagrijava. S obzirom na to da je staklena kapilara hermetički zatvorena, kapljevina unutar nje je u vakuumu. Zagrijavanjem lukovice dolazi do prirasta

volumena kapljevine, ΔV , koja potom ulazi u kapilaru i doseže visinu, h . Ta visina, h , se očitava na skali termometra, slika 18.

Odabrane kapljevine bi trebale biti što većeg koeficijenta temperaturnog rastezanja, u linearnoj vezi s temperaturom, širokog područja između točki vrelišta i ledišta te bi trebale biti vidljive u kapilari.

Najčešće korištene kapljevine su živa (Hg) i legura živa-talij (Hg-Tl). Talij se dodaje u živu radi snižavanja točke skrućivanja legure. Točka skrućivanja žive je na $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri atmosferskom tlaku, dok se korištenjem legure termometri mogu koristiti i do temperature $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Upotrebljavaju se i organske kapljevine poput etanola, toluena, pentana.¹⁸ Organskim kapljinama se zbog prozirnosti u svrhu bolje vidljivosti dodaje boja. Temperaturno područje djelovanja kapljevine kao i toplinski koeficijenti su prikazani u tablici 1.

Tablica 1. Prikaz korištenih kapljevine kapljevinskih termometara sa toplinskim koeficijentom rastezanja i temperaturnim područjem djelovanja⁷

Kapljevina	Toplinski koeficijent rastezanja ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Temperaturno područje djelovanja ($^{\circ}\text{C}$)
Živa	0,00016	-35 do 510
Etanol	0,00104	-80 do 60
Pentan	0,00145	-200 do 30
Toluen	0,00103	-80 do 100

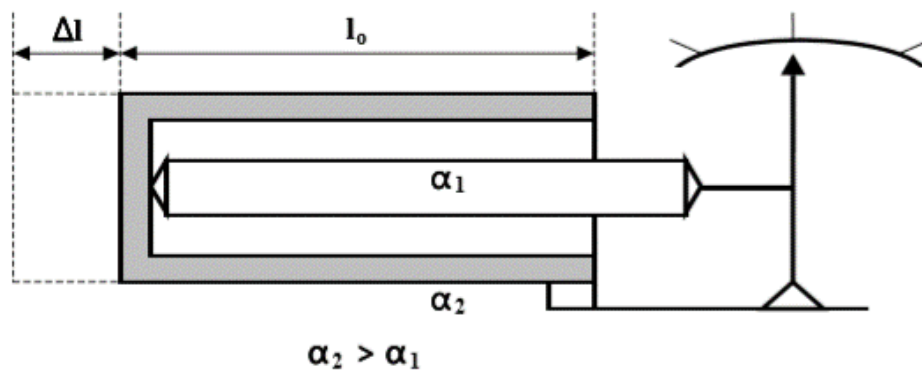
Kapljevinski termometri prema **upotrebi** se mogu podijeliti u 3 kategorije i to za industrijske, laboratorijske i kliničke svrhe. Industrijski stakleni termometri su montirani u posebne zaštitne tuljce te su fiksno instalirani u cjevovodima i raznim posudama i postrojenjima. Laboratorijski termometri su bez zaštitnog tuljca i to su uglavnom živini termometri. Koriste se za povremenu kontrolu temperature u tehnološkim operacijama tj. za kontrolu temperature u raznim postrojenjima. Klinički termometri se još nazivaju toplomjeri, a općenito se koriste za usko radno područje.

Nedostatci kapljevinskih staklenih termometara su laka lomljivost i toksičnost pri upotrebi talija i žive kao radne kapljevine. Glavni nedostatak im je što ne daju digitalni izlazni signal poput električnih termometara (termoparova i otporničkih termometara), stoga se ne koriste u regulacijskim krugovima, već služe za dodatnu provjeru sustava.¹⁹

1.5.1.2. Termometri sa širenjem krutina

Mjerenje temperature kod ove vrste termometara se zasniva na širenju krutine djelovanjem topline. Krutine se u odnosu na kapljevine i plinove djelovanjem topline šire u manjoj mjeri. Ove termometre karakterizira niska cijena zbog čega su našli široko područje primjene. Često se upotrebljavaju u regulaciji procesa. Nedostatak im je mala preciznost. Dije se na štapne i bimetalne termometre.³

Štapni dilatacijski termometri:



Slika 19. Štapni dilatacijski termometar³

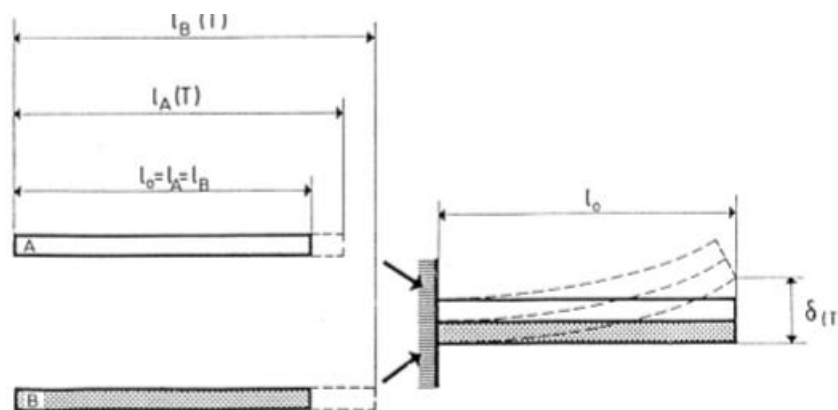
Štapni termometar, prikazan na slici 19. načinjen je od cijevi visokog temperaturnog koeficijenta rastezanja (α_2) u kojoj se nalazi letva/štap (uložak) materijala malog temperaturnog koeficijenta rastezanja (α_1). Štap je na lijevoj strani učvršćen za dno cijevi, a na desnoj strani na mehanizam za pomicanje kazaljke na termometru. Dovođenjem topline dolazi do rastezanja cijevi u lijevu stranu (pomak Δl), a time i povlačenja štapa vezanog za cijev. Zbog malog koeficijenta toplinskog rastezanja (α_1), štap se neće produljiti nego će povući kazaljku termometra. Prema tome pomak kazaljke termometra predstavlja mjeru zagrijanosti tijela odnosno mjeru temperature.³

Materijali od kojih je izrađena cijev su uglavnom mjed (legura Cu-Ni), bakar, aluminij, a za uložak se koriste invar čelik (legura 64% Fe i 36% Ni), kvarc, porculan i dr.²⁰

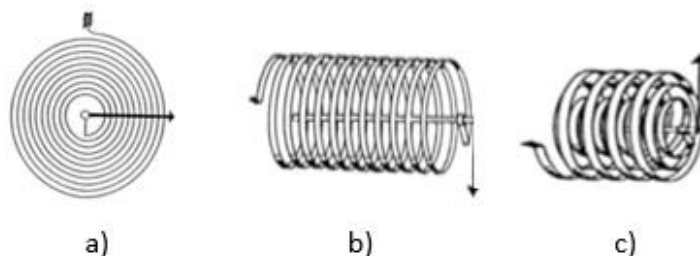
Ove termometre karakterizira jednostavnost izvedbe i rada te jeftina cijena. Koriste se kao osjetila u regulacijskim krugovima kod vođenja procesa kod kojih se ne zahtijeva visoka preciznost, kao npr. kod termičkih kućanskih aparata.³

Bimetalni termometri

Bimetalni termometri sadrže osjetilo načinjeno od različitih metalnih traka (najčešće mesing i invar čelik) različitog koeficijenta temperaturnog rastezanja. Jedna traka je načinjena od metala visokog dok je druga od metala niskog koeficijenta temperaturnog rastezanja. Ukoliko se takvo osjetilo izloži višoj temperaturi metalne trake će se uvijati jedna u drugu, i to u smjeru prema traci s nižim temperaturnim koeficijentom rastezanja.²¹ Postoje različite izvedbe bimetalnih osjetila, kao što su konzolna (slika 20.), spiralna, helikoidalna i bihelikoidalna izvedba (slika 21.).³

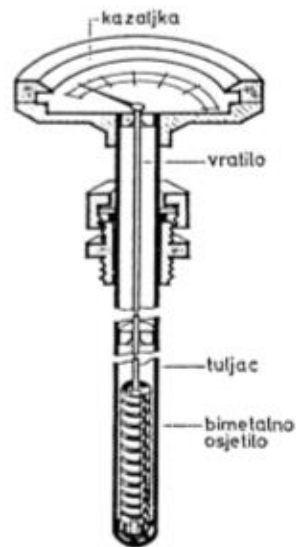


Slika 20. Konzolna izvedba bimetalnog osjetila³



Slika 21. Ostale izvedbe bimetalnih osjetila: a) spiralna, b) helikoidalna, c) bihelikoidalna³

Usljed savijanja bimetalnih traka dolazi do otklona tj. dilatacije koja se mehaničkim sustavom poluga i zupčanika prenosi na kazaljku mjernog instrumenta, pomoću koje se na pokazivalu očitava temperatura. To znači da je **pomak kazaljke uslijed otklona bimetalnog osjetila mjera temperature.**³ Na slici 22. prikazan je bimetalni termometar sa helikoidalnim osjetilom.



*Slika 22. Bimetalni termometar sa prikazanim dijelovima*³

Radno područje bimetalnih termometara je od $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $371\text{ }^{\circ}\text{C}$, ovisno o korištenim metalima. Koriste se kao termički prekidači pomoću kojih se može kontrolirati temperatura ili toplina u određenom proizvodnom procesu ili sustavu (sklopke, glačala, sušila za kosu, pećnice i dr.).¹¹

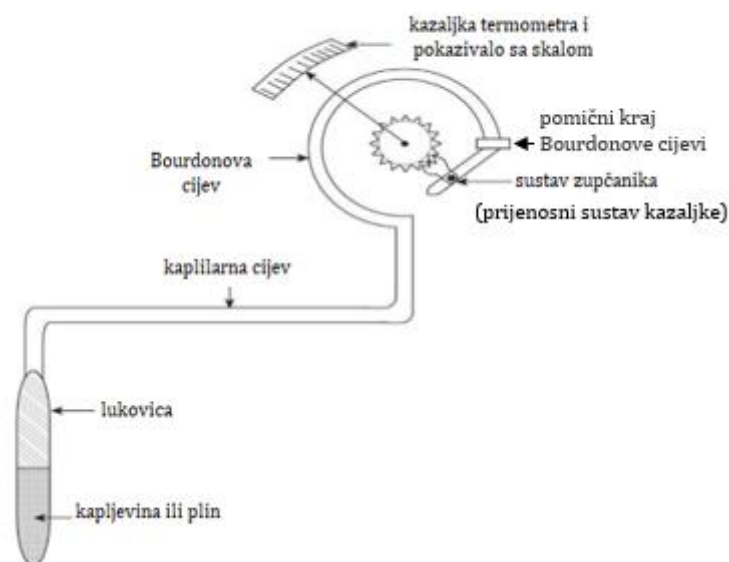
Prednosti korištenja bimetalnih termometara su niska cijena, stabilnost pri radu u dužem vremenskom periodu te niski troškovi održavanja.

Nedostatak im je manja preciznost u odnosu na električne termometre.³

1.5.1.3. Tlačni dilatacijski termometri

Osnovni dijelovi tlačnih termometara su: metalno osjetilo u obliku šupljeg valjka (koje sadrži kapljevina, paru ili plin), metalna kapilarna cijev te deformacijski manometar. Kao deformacijski manometar najviše se koristi Bourdonova cijev (slika 23.).

Mjerenje temperature zasniva se na mjerenju promjene tlaka koji nastaje djelovanjem temperature u zatvorenom volumenu termometra. Osjetilo tlaka „osjeća“ promjenu tlaka i pretvara je u pomak kazaljke termometra na pokazivalu pomoću mehaničkog sustava zupčanika. Imaju široko područje primjene posebice za industrijska mjerenja temperature.



Slika 23. Tlačni termometar²²

Osjetilo tlačnih termometara može sadržavati različite radne kapljevine, paru kapljevina ili plin, stoga se razlikuju **kapljevinski** (s organskim kapljevinama npr. toluen, ksilen, i dr.), **plinski** (sa zasićenom parom radne kapljevina) i **parni** tlačni termometri (sa inertnim dušikom ili helijem). Mjere temperaturu u širokom radnom području. Kapljevinski tlačni termometri mjere temperature od -35 °C do 600 °C, plinski od -130 °C do 550 °C, a parni od -40 °C do 400 °C.³

Prednosti korištenja ovih termometara su: jednostavnost izvedbe, relativno niska cijena, jednostavno očitavanje temperature, mogućnost mjerenja i na udaljenostima do 100 m od mjernog osjetila, lako održavanje.³

Nedostatci tlačnih termometara su manja maksimalna temperatura mjerenja u odnosu na češće korištene električne termometre te sklonost pogreškama. Temperaturna pogreška javlja se zbog djelovanja okolne temperature na sustav što dovodi do stvaranja dodatnog tlaka u sustavu (pogreška se kompenzira dodatkom bimetala u prijenosni sustav kazaljke). Promjena atmosferskog tlaka dovodi do pogreške deformacijskog manometra, stoga se kapljevina u sustavu često stavlja pod nadtlak, kako bi promjene atmosferskog tlaka bile zanemarive. Razina manometra i osjetila mora biti jednaka pri postavljanju u pogonu, inače dolazi do hidrostatske pogreške karakteristične za kapljevinske tlačne termometre.³

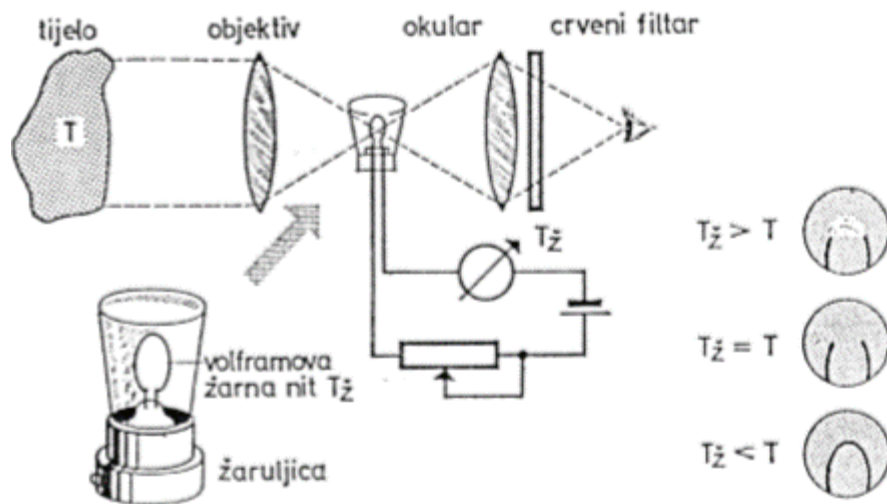
1.5.2. Pirometri

Pirometri su beskontaktni mjerni uređaji za mjerenje vrlo visokih temperatura. Radno područje je od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $3500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mjerenje temperature zasniva se na mjerenju količine zračenja nekog predmeta što je u izravnoj povezanosti s njegovom temperaturom. Prednosti upotrebe pirometara su: velika brzina mjerenja (10 ms do 100 ms), nemaju utjecaja na mjerni objekt, mogu se koristiti i za mjerenja kod agresivnih materijala i kod vrlo visokih napona.²³

Pirometri se dijele prema načinu mjerenja zračenja i to na:

- optičke pirometre (monokromatski pirometri na valnoj duljini od $0,65\text{ }\mu\text{m}$ - crveni dio vidljivog spektra te dvobojni pirometri s valnim duljinama crvene i plave boje),
- radijacijske pirometre,
- pirometre boje.²⁶

Rad i konstrukcija **optičkih pirometara** temelji se na činjenici da je intenzitet zračenja na određenoj valnoj duljini mjera temperature. Ukoliko su intenziteti zračenja dvaju užarenih tijela promatranih kroz crveni filter jednaki, tada su im i temperature jednake. Načelo rada optičkih termometara na primjeru monokromatskog optičkog pirometra sa crvenim filtrom može se objasniti prikazom na slici 24. ³ Promatra se zagrijanost tijela u optičkom sustavu i uspoređuje svjetlina siluete niti žarulje optičkog sustava T_z sa svjetlinom zagrijanog tijela T . Moguća su 3 slučaja (slika 24.).



Slika 24. Načelo rada optičkih pirometara ³

Ukoliko je temperatura niti žarulje viša od temperature tijela ($T_z > T$), tada se silueta niti ocrta kao svjetlija crta na tamnoj pozadini. U slučaju jednakih temperatura niti žarulje i temperature tijela ($T_z = T$), silueta se stapa s pozadinom i nit se ne primjećuje. Za slučaj da je temperatura niti žarulje niža od temperature tijela ($T_z < T$), silueta niti se ocrta na slici kao tamnija crta na tamnoj pozadini.³

Mjerenje je subjektivno, stoga točnost mjerenja ovisi o vještini mjeritelja. Temperatura niti žarulje se može izračunati i na osnovu struje koju nit žari, jer struja niti predstavlja mjeru temperature niti, a temperatura niti predstavlja mjeru temperature tijela (kada je $T_z = T$). Struja se mjeri ampermetrom sa skalom označenom u jedinicama temperature.³

Radno područje optičkih termometara je od 500 °C do 2500 °C. Zbog mogućnosti mjerenja intenziteta zračenja za dvije valne duljine (crvenu i plavu), često se umjesto monokromatskog optičkog pirometra koristi dvobojni optički pirometar. On je standardni pirometar za mjerenje temperatura iznad 1064 °C.

Radijacijski pirometri mjere ukupni intenzitet zračenja na svim valnim duljinama pa nemaju nikakve selektivne filtre. Temperatura tijela se očitava na mjernom uređaju sa izbaždarenom skalom u jedinicama temperature, na temelju privučene količine izračene energije tijela, preko optičkog sustava u fokus pirometra. Spadaju u grupu beskontaktnih termometara te mogu mjeriti temperaturu na velikim udaljenostima. Područje primjene je od -80 °C do 5000°C. Koriste se u metalurgiji i u posebnim izvedbama za mjerenje temperatura nebeskih tijela.³ Za

industrijske potrebe, radijacijski pirometri se izvode sa standardnim električnim izlazom koji odgovaraju pojedinim tipovima termoparova.²⁶

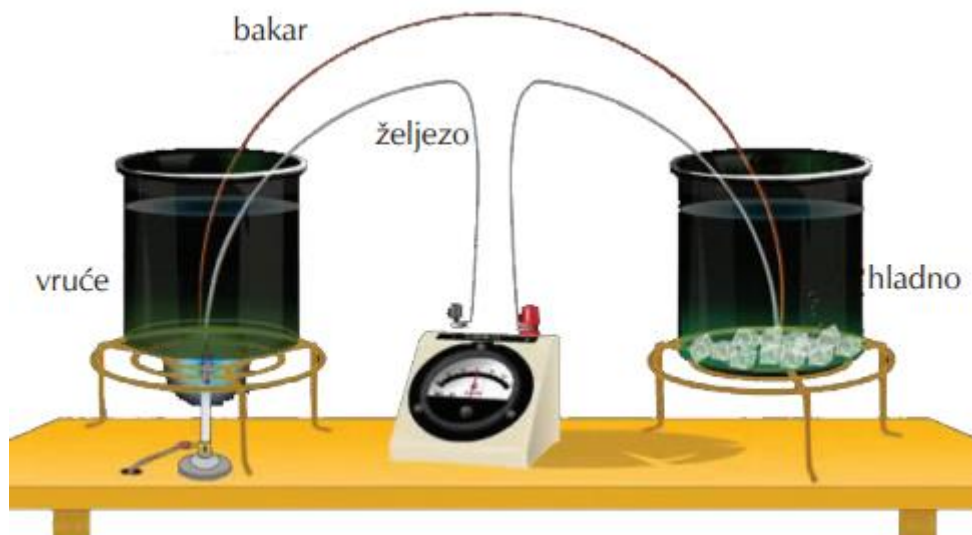
Pirometri boje mjere temperaturu definiranu odnosom intenziteta zračenja na dvije različite valne duljine. Karakteristike ovih pirometara su visoka točnost, neovisnost o dimenzijama tijela i svojstvima tvari.

1.5.3. Električni termometri

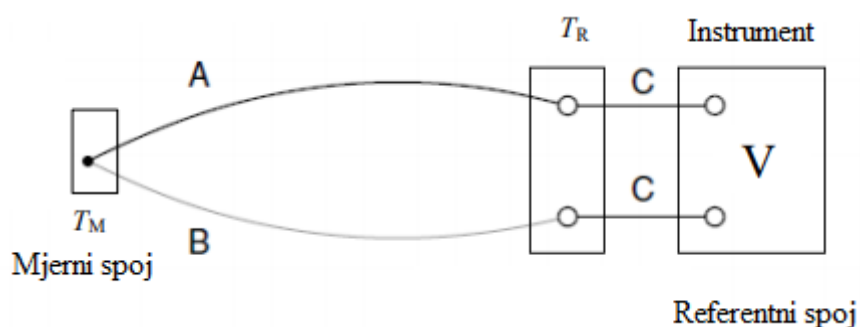
Električni termometri mjere temperaturu na temelju mjerenja promjene otpora ili termoelektromotorne sile koja se razvija na spoju dva metala pri promjeni temperature. S obzirom na jednostavnost izvedbe, visoku osjetljivost, precizno mjerenje i lako očitavanje temperature električni termometri najčešće su korišteni termometri. U industriji se koriste zbog toga što temperaturne signale mogu slati na veće udaljenosti. Dije se na termoparove i otporničke termometre.

1.5.3.1. Termoparovi

Termopar sadrži osjetilo načinjeno od žica dvaju različitih metala (homogenih metala ili legura) povezanih na krajevima u čvorišta. Jedan kraj je izložen višoj temperaturi i naziva se vrući kraj. Drugi kraj, često nazivan slobodni kraj, povezan je na mjerni instrument kojim se zatvara strujni krug i predstavlja hladni tj. referentni kraj termopara.²¹ Zbog različitih temperatura unutar zatvorenog kruga termopara dolazi do induciranja termoelektrične struje, I , koja se mjeri ampermetrom, odnosno pojave termoelektromotorne sile (napona), $TEMS$, koji se mjeri voltmetrom. Mjerenjem vrijednosti nastale termoelektrične struje tj. napona i daljnjim korištenjem referentnih tablica, izračunava se mjerena temperatura. Ovo otkriće pripisuje se njemačkom fizičaru **T. J Seebecku** koji je pojavu termoelektrične struje uočio u krugovima s bizmutom i bakrom te bizmutom i antimonom 1821. godine.³ On je spojio dva vodiča u zatvoreni krug, pri čemu su temperature čvorišta bile različite. U blizini vodiča nalazio se kompas na kojem je uočio zakretanje igle. Na početku je mislio da je uzrok zakretanja igle kompasu promjena magnetskog polja, zbog promjene temperature. No, kasnije je ustanovio da je u krugu došlo do induciranja električne struje koja je i stvorila magnetsko polje unutar kruga.²⁴ Seebeckova pojava na primjeru dvaju različitih vodiča spojena na različitim temperaturama prikazana je na slici 25. Nastala termoelektromotorna struja odnosno termoelektromotorna sila ovisna je o razlici temperatura između vrućeg i hladnog kraja termopara i Seebeckovim koeficijentima žica dvaju različitih metala.²¹



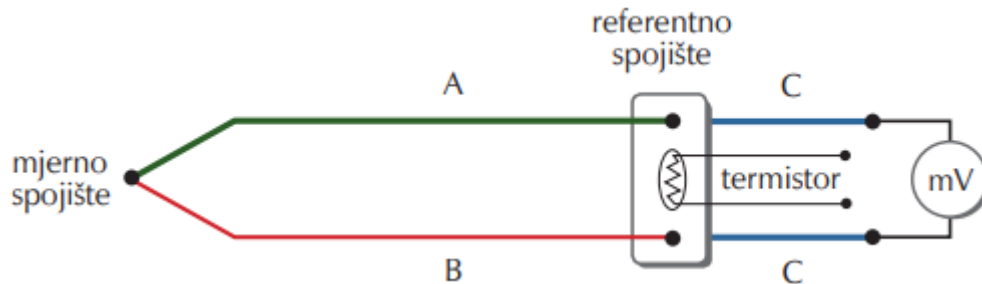
Slika 25. Seebeckova pojava na primjeru zatvorenog kruga s dva vodiča od različitih metala spojena na različitim temperaturama²⁴



Slika 26. Skica termopara²⁵

Na slici 26. prikazana je skica termopara, gdje su A i B žice različitih metala ili metalnih legura, a voltmetar mjeri generirani napon, koji se očitava ili zapisuje, preko dviju žica materijala C (materijal najčešće bakar). Temperatura referentnog spoja T_R je najčešće temperatura okoliša ili $0\text{ }^\circ\text{C}$.²⁵ Temperatura T_R se jednostavno kompenzira te izmjerena vrijednost temperature predstavlja temperaturu mjernog spoja T_M .³ S obzirom na to da se za temperaturu referentnog spoja uzima najčešće temperatura $0\text{ }^\circ\text{C}$, ona se treba održavati u kupci sa smjesom leda i vode. Održavanje smjese leda i vode nije praktično, stoga se ipak mjeri temperatura referentnog spoja. Temperatura referentnog spoja se obično mjeri preciznim termistorom (električni termootpornik temeljen na poluvodičkom materijalu) koji je u dobrom toplinskom kontaktu sa

spojevima mjernog instrumenta. Termistor šalje signal koji se povezuje sa signalom termopara i tako dolazi do kompenzacije promjene referentne temperature referentnog spojišta (slika 27).²⁴



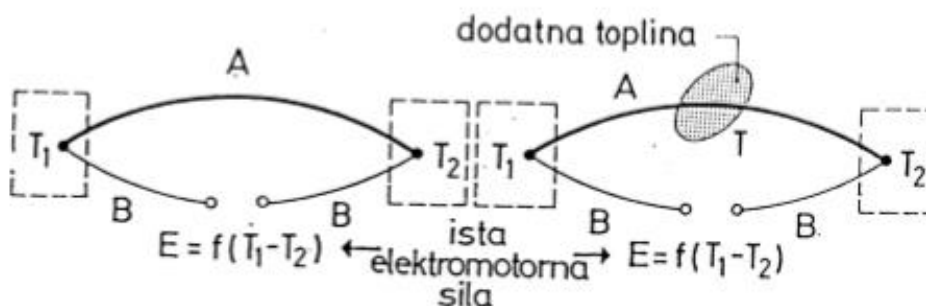
Slika 27. Kompensacija referentnog spojišta²⁴

Nepoznata temperatura mjernog spoja T_M može se izračunati i pomoću izraza (5).²¹

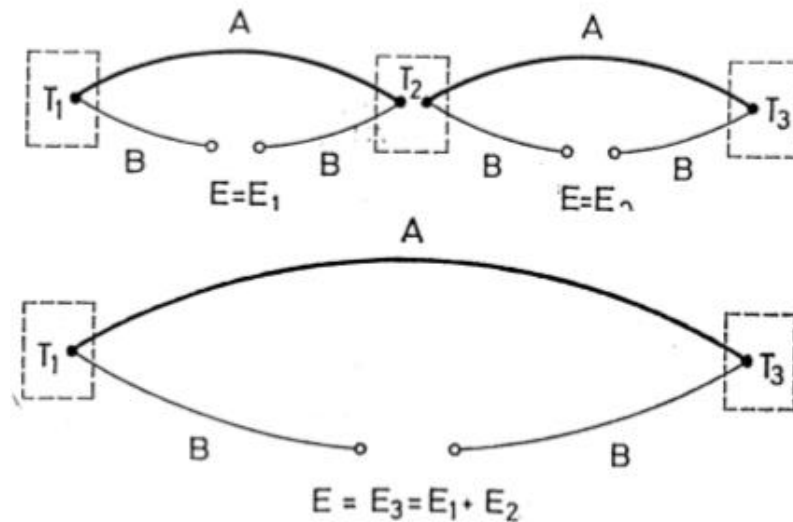
$$T_M = \left(\frac{TEMS}{\text{Seebeckov koeficijent}} \right) + T_R \quad (5)$$

Za razumijevanje rada termoparova važni su termoelektrični efekti i to Seebeckov, Peltierov te Thomsonov termoelektrični efekt koji se skupa opisuju trima **zakona termoelektriciteta**:

- I **Zakon homogenih materijala**- na termoelektromotornu silu termopara sa spojevima na temperaturama T_1 i T_2 ne može utjecati toplina, primijenjena bilo gdje u krugu, ukoliko je materijal homogen (slika 28.).³



Slika 28. Objašnjenje zakona homogenih materijala³



Slika 30. Objašnjenje zakona uzastopnih vrijednosti temperature³

Postoje različiti tipovi termoparova ovisno o kombinacijama materijala od kojih su načinjeni. Odabir određenog tipa termopara za primjenu ovisi o osjetljivosti (promjena napona po stupnju promjene temperature), stabilnosti metala, otpornosti na koroziju, linearnosti izlaznog napona, cijeni te radnom području. Iako se za izradu termopara mogu koristiti bilo koje dvije metalne žice, ipak postoje standardni parovi za koje su poznati izlazni naponi. Svaki takav tip termopara se označava slovnom oznakom koju koriste svi proizvođači. Također se međusobno razlikuju prema standardnoj boji vanjske izolacije kabela.²⁶ Maksimalna temperatura pojedinih termoparova ovisi i o promjeru metalne žice, stoga termoparovi s malim promjerom žica ne mogu mjeriti visoke temperature. Tipovi termoparova sa radnim područjem, osjetljivosti te boji kabela prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Tipovi termoparova ²⁷

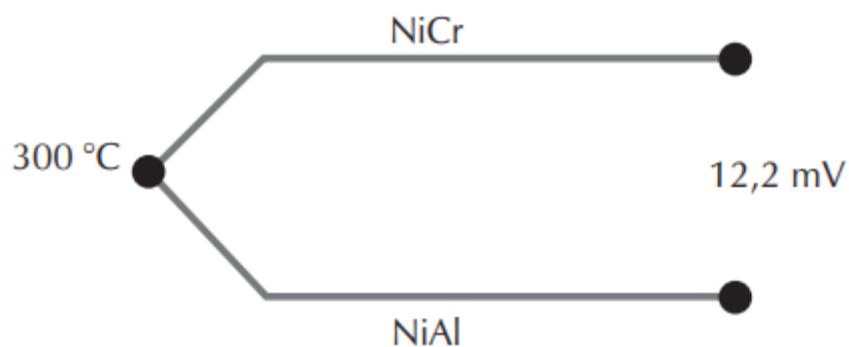
Tip	Materijali	Boja kabela	Radno područje (°C)	Približna osjetljivost (mV °C ⁻¹)
T	Bakar/*konstantan	Plava	-250 do 400	0,052
E	*Kromel/konstantan	Ljubičasta	-270 do 1000	0,076
J	Željezo/konstantan	Crna	-210 do 760	0,050
K	Krom/*alumel	Žuta	-270 do 1372	0,039
R	Platina/platina-13% rodij	Zelena	-50 do 1768	0,011
S	Platina/platina-10% rodij	Zelena	-50 do 1768	0,012
C	Volfram, 5% renij/volfram, 26% renij	Bijela	0 do 2320	0,020

* **Konstantan**-legura nikla i bakra, **kromel**-legura nikla i kroma, **alumel**-legura nikla i aluminijska

Termoparovi su općenito najekonomičniji mjerni pretvornici za mjerenje **visokih temperatura**. Koriste se u industriji čelika i željeza u pećima za nadgledanje temperature čelika, u plinskim kotlovima, sustavima za grijanje vode i sl. Tipove termoparova R i S karakterizira visoka cijena, slaba osjetljivost, otpornost prema određenim korozivnim tvarima te zadovoljavajuća upotreba na temperaturama do 1768 °C. Termoparovi tipa C se koriste za mjerenje visokih temperatura, no, zbog visoke cijene i slabe otpornosti na oksidirajuću atmosferu nisu toliko u upotrebi. Termoparovi tipa C su relativno jeftini, no također nisu toliko u upotrebi zbog korozije pri temperaturama većim od 400 °C. Najčešće korišteni termoparovi su termoparovi tipa K. Njegove karakteristike za upotrebu su prihvatljiva cijena, relativno dobra korozijska otpornost, mogućnost mjerenja visokih temperatura (do 1372 °C), relativno linearan izlazni napon.²⁶ Na slici 31. je prikazan tip K termopara koji na temperaturi od 300 °C daje izlazni napon od 12,2 mV i osjetljivost 41 μV °C⁻¹. Svojstva određenih tipova termoparova ovisno o okolini u kojoj se koriste nalaze se u tablici 3.

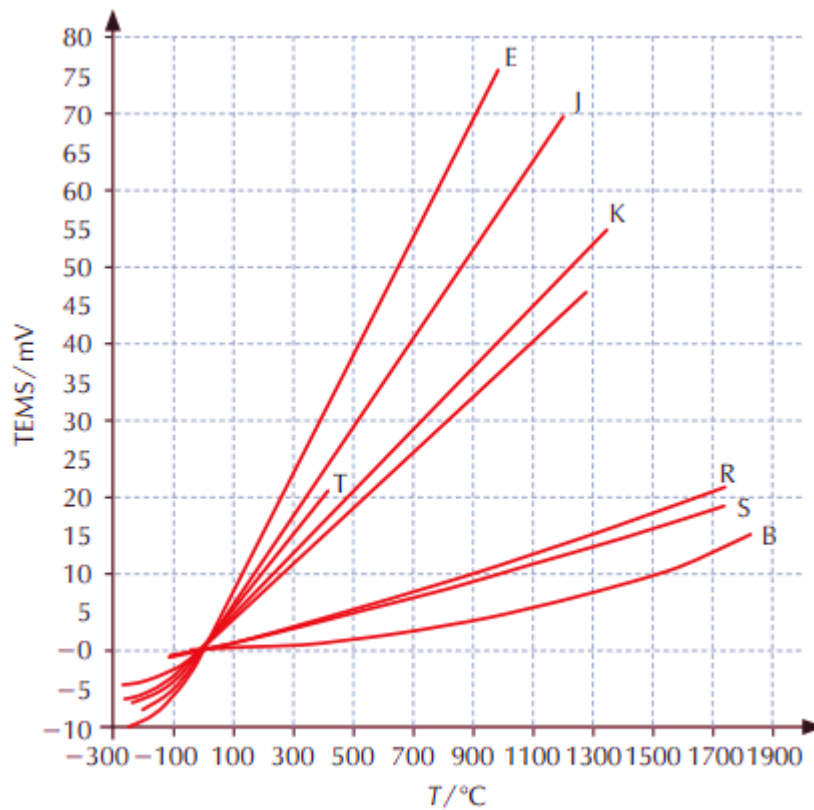
Tablica 3 Svojstva pojedinih tipova termoparova ²⁵

Tip termopara	Tip okoline u kojoj mogu mjeriti	Napomena
E	Oksidirajuća, inertna i vakuum	Pogodan za niže temperature, daje najviši izlazni napon od svih termoparova
J	Oksidirajuća, inertna	Željezo korodira i oksidira brzo
K	Oksidirajuća, inertna	Stvara se zeleni oksid na površini pri nekim atmosferama
N	Oksidirajuća, inertna	Karakteristika kao K, ali stabilniji pri višim temperaturama
T	Oksidirajuća, inertna, i vakuum	Pogodan za niske temperature, otporan na utjecaj vlage
R i S	Oksidirajuća, inertna	Izbjegavati kontakt s metalima

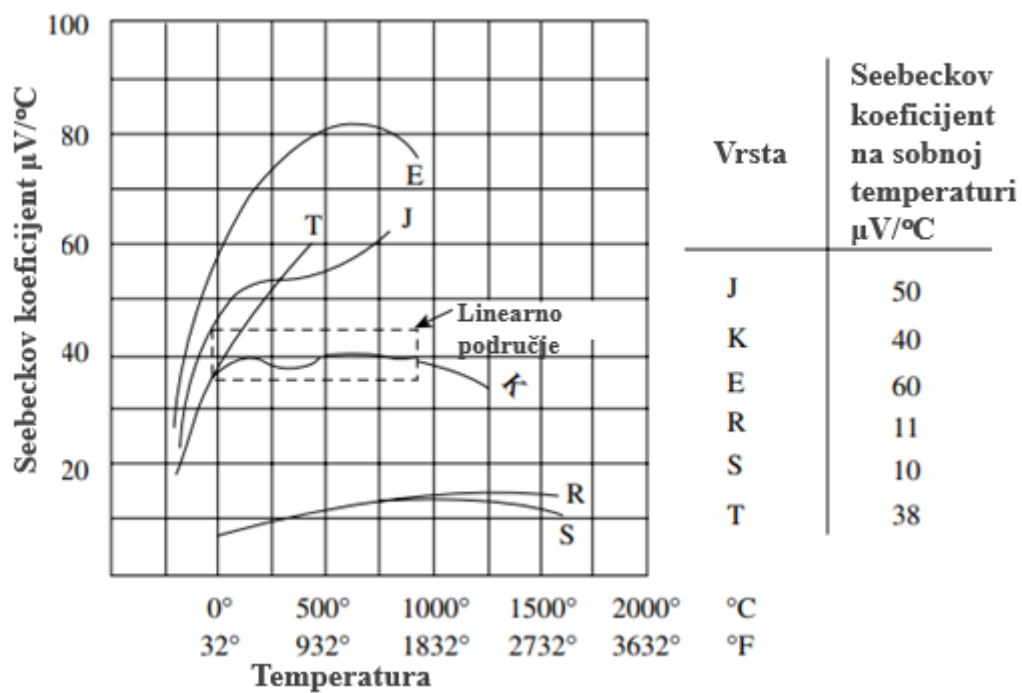


Slika 31. Tip K termopara s izlaznim naponom na temperaturi od 300 °C ²⁴

Za očitavanje temperature na osnovu izlaznog napona koriste se grafovi napon-temperatura. Međutim veza napon-temperatura nije linearna (slika 32.) stoga i Seebeckov koeficijent nije konstantan za sve temperature (slika 33.) ²¹

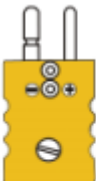



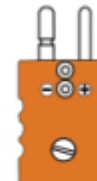


Slika 32. Graf ovisnosti TEMS o temperaturi za pojedine tipove termoparova²⁴



Slika 33. Veza Seebeckova koeficijenta i temperature za pojedine tipove termoparova²¹

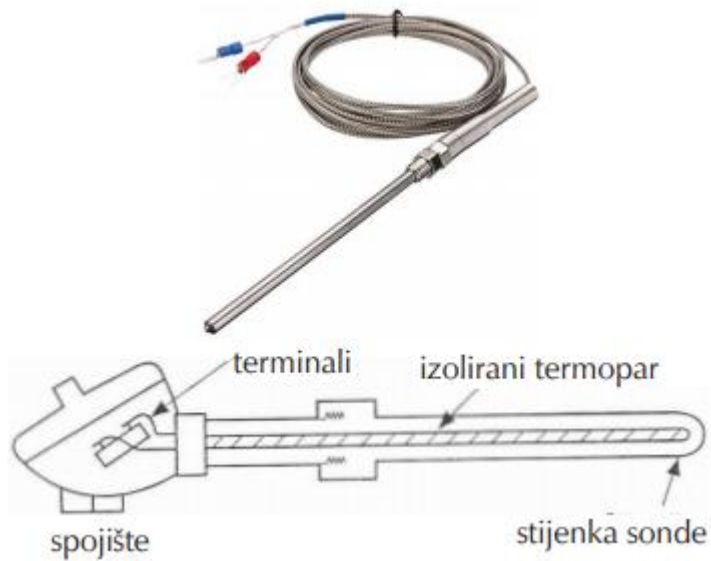
Termoparovi se izrađuju u zavarenom žičnom obliku i obliku sonde. Za korištenje termoparova potrebno je odabrati i odgovarajući tip konektora. Razlikuju se dvije vrste konektora: “standardni” s okruglim nožicama i “minijaturni” s plosnatim nožicama koji su više u upotrebi.²⁴ Prikazi vrsta konektora termoparova nalaze se na slici 34.

				
K	J	E	T	N
ŽUTA NiCr NiSi	CRNA Fe CuNi	LJUBIČASTA NiCr CuNi	PLAVA Cu CuNi	NARANČASTA NiCrSi NiSi

Slika 34. Vrste i boje konektora termoparova²⁴

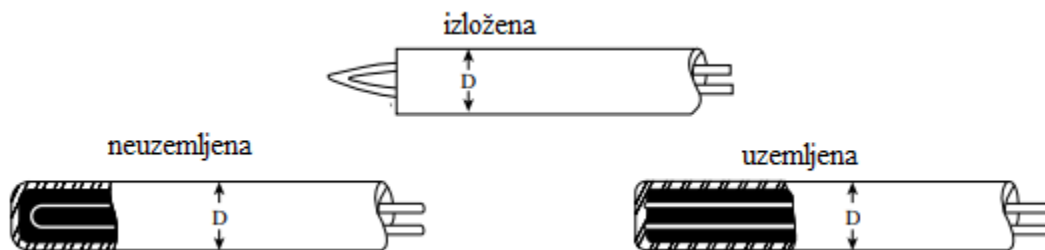
Žični termoparovi predstavljaju najjednostavniju vrstu termoparova izrađenih od dviju žica različitih metala zavarenih na jednom spojištu (čvorištu). Zavareno spojište je izloženo medijima, stoga se žični termoparovi ne mogu se koristiti u medijima koji uzrokuju korozije i oksidaciju legure od koje je termopar izrađen. Također, u slučaju da su pričvršćeni na uzemljene metalne površine (kao što je karakteristično za cjevovode) indirektna veza s električnom mrežom može dovesti do pojava smetnji pri mjerenju kao i utjecaja na točnost mjerenja. Zbog manjih dimenzija u odnosu na temperaturne sonde imaju brži odziv. Uglavnom se koriste za mjerenje temperature plinova.²⁴

Kod izvedbe **temperaturne sonde** (slika 35.) dvije metalne žice nalaze se unutar metalnog tuljca. Stijenka tuljca je najčešće izrađena od nehrđajućeg čelika ili Inconela (legura Ni s Cr i Fe, koristi se za izradu plinskih turbina). Nehrđajući čelik je više u upotrebi zbog veće kemijske kompatibilnosti, iako je Inconel pogodniji za primjenu na višim temperaturama. Postoji različiti broj sondi i uglavnom se primjenjuju u laboratorijima, medicini, procesnoj i prehrambenoj industriji i drugim sličnim područjima.²⁴



Slika 35. Primjer izvedbe temperaturne sonde ²⁴

Izvedbe oblika sonde termoparova dolaze u tri verzije: uzemljena (engl. *grounded*), neuzemljena (engl. *undergrounded*) i izložena (engl. *exposed*), slika 36. Kod uzemljene sonde, spoj žica termopara je fizički spojen na unutarnju stijenkicu sonde termopara. Takav oblik sonde omogućuje dobar prijenos topline kroz stijenkicu sonde do spoja termopara, ali podliježe problemu električnih smetnji. Za neuzemljenu sondu je karakteristično da je spoj termopara odvojen od stijenske slojem izolacije. Na taj način termopar je električki izoliran što znači da ne podliježe problemu električkih smetnji, ali je odziv sporiji. Izložena verzija oblika sonde viri iz stijenske u okolinu. Odziv kod takvog oblika sonde je najbrži, no ipak se smije koristiti samo za suhe i nekorozivne plinove pri čemu tlak ne bi smio biti previsok.²⁴



Slika 36. Neuzemljena, izložena i uzemljena verzija oblika sonde ²¹

Za većinu mjernih instrumenata, mjerenje temperatura kod čvrstih površina predstavlja problem. Za dobro mjerenje temperature važno je osigurati potpuni kontakt osjetila sa čvrstom površinom mjerenog tijela (koja je često neravna), a to je teško ostvarivo kod čvrstih osjetila i čvrstih površina. Kako se termoparovi izrađuju od savitljivih materijala, spojevi se mogu oblikovati tako da budu ravni i tanki i time je omogućen maksimalni kontakt osjetila termopara sa čvrstom površinom. **Takav oblik termopara se naziva površinskom sondom** (slika 36.). Površinska sonda je stoga odličan izbor za mjerenje temperature čvrstih površina, a moguća je izvedba i s mehanizmom za rotiranje, što je čini prikladnom za mjerenje temperature čvrstih površina u gibanju.²⁴



*Slika 37. Površinska sonda*²⁴

Prednosti upotrebe termoparova su relativno niska cijena, široko mjerno područje, mogućnost izrade u različitim veličinama i oblicima, visoka stabilnost. Termoparovi su također mali, praktični i prilagodljivi (mogu se lako navariti na cijevi). Mjere brzo te s visokom točnošću i preciznošću.²¹

Nedostaci su im slabi izlazni signal, koji je nelinearan, stoga se uvijek koriste pojačala signala. Baždarna krivulja (tj. njen nagib) termopara se može promijeniti zbog onečišćenja ili promjene sastava materijala radi unutrašnje oksidacije, hladnog rada ili temperaturnih gradijenata.²¹ Pri mjerenju temperature termoparovima, može doći do različitih pogrešaka zbog nehomogenosti materijala, pogreški referentne temperature, interferencija s okolinom, pogreški zbog otpora žice itd. Pogreške zbog nehomogenosti materijala se nastoje izbjeći što kvalitetnijim

postupcima proizvodnje (npr. hladnim oblikovanjem, kemijskom zaštitom na atmosferu i medije mjerenja). Izoliranjem mjernog instrumenta od vanjskih izvora moguće je izbjeći pogreške referentne temperature.²¹ Pogreške zbog otpora se mogu javiti kad se primjenjuju tanke metalne žice, koje su pogodne jer skraćuju vrijeme odziva i smanjuju odvođenje topline. No, s manjim poprečnim presjekom metalnih žica povećava se otpor termopara, a time termopar postaje osjetljiviji na smetnje. Stoga, ukoliko se temperatura mjeri-termoparovima s tankim žicama, one trebaju biti što je moguće kraće jer je time manji otpor termopara.

1.5.3.2. Otpornički termometri

Otpornički termometri (engl. *resistance temperature detectors*) kao osjetilo imaju metalni (najčešće platina, nikal i bakar) ili poluvodički (germanij, silicij, ugljik) otpornik. Temelj mjerenja temperature otporničkim termometrima jest da se promjena otpora osjetila smatra mjerom temperature kojoj je termometar izložen. Kao pokazivalo služi ohm-metar izbaždaren u °C.³ Ovisnost otpora otporničkog osjetila o prirastu temperature se određuje eksperimentalno, a može se prikazati pomoću izraza (6).³

$$R = [1 + \alpha\Delta T + \beta(\Delta T)^2 + \gamma(\Delta T)^3 + \dots] \quad (6)$$

Za većinu metala, ovisnost otpora o prirastu temperature se može prikazati izrazom (7):

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (7)$$

gdje je :

R_0 - otpor pri referentnoj temperaturi T_0 [Ω],

ΔT - $T-T_0$ [$^{\circ}\text{C}$],

T -mjerena temperatura [$^{\circ}\text{C}$],

α, β, γ - temperaturni koeficijenti električnog otpora [var.].³

Otpornički termometri se najviše izrađuju od platine, bakra i nikla. Najbolju osjetljivost imaju osjetila s niklom, no radno područje, preciznost i linearnost promjene otpora pri promjeni temperature platinskih termoparova je znatno veće, stoga su oni najkorišteniji otpornički termometri. Najpoznatiji primjeri platinskih otporničkih termometara su Pt100RTD (sa

otporom od 100Ω pri $0 \text{ }^\circ\text{C}$) i Pt1000RTD (sa otporom od 1000Ω pri $0 \text{ }^\circ\text{C}$). Pt1000 je dosta precizniji i točniji u odnosu na Pt100.

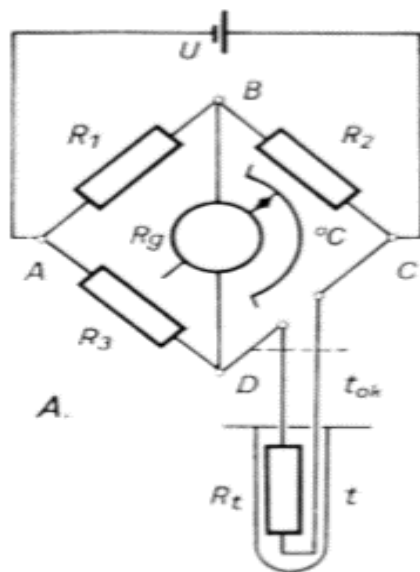
Metode mjerenja temperature preko mjerenja otpora se mogu prikazati pomoću Wheastonovog mosta i to preko sloga uravnoteženog mosta i neuravnoteženog mosta. Napon u strujnom krugu uvijek jednak, no struja se mijenja kako se mijenja otpor osjetila.

Slog neuravnoteženog Wheastonovog mosta

Slog neuravnoteženog mosta koji je prikazan na slici 38 sastoji se od 3 temperaturno neovisna otpornika (R_1 , R_2 i R_3) te jednog temperaturno ovisnog otpornika, R_t . U desnoj grani strujnog kruga, temperaturno ovisni otpornik (osjetilo), R_t , koji se nalazi na mjernom mjestu je putem dvožičnog voda spojen na točke C i D mosta.³ Promjenom otpora uslijed promjene temperature u strujnom krugu sa konstantnim izvorom napona, U , mijenja se struja, I . U stanju ravnoteže struja desne i lijeve grane unutar Wheastonovog mosta je jednaka, što se očitava na instrumentu u srednjoj grani koji pokazuje nulu. Stanje ravnoteže se može prikazati izrazom (8).

$$R_1 : R_2 = R_3 : R_t \quad (8)$$

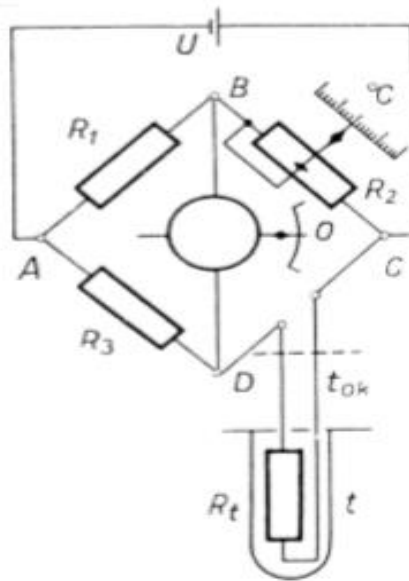
Kada se instrument izloži nekoj nepoznatoj temperaturi, povećava se otpor, mijenja se omjer prikazan izrazom (8), a to se uočava pomakom kazaljke. Na osnovu pomaka kazaljke očitava se otpor, a onda preko baždarnog dijagrama R - T očitava se temperatura.³



Slika 38. Slog neuravnoteženog Wheastonovog mosta³

Slog uravnoteženog Wheastonovog mosta

Slog uravnoteženog mosta prikazan je na slici 39 i češće je korišten pri metodi mjerenja otporničkim termometrima zbog visoke točnosti. Slog se sastoji od 3 temperaturno neovisna (R_1, R_2, R_3) te jednog temperaturno ovisnog otpornika (R_t). Razlika sloga uravnoteženog mosta u odnosu na neuravnoteženi most je u otporniku R_2 koji je promjenjivi otpornik, što znači da mu se pomoću klizača može mijenjati otpor. Mjera temperature je pomak, l , otpornika R_2 u svrhu uravnoteženja mosta. Most je uravnotežen kada je $T = T_0 = 0^\circ\text{C}$, pri čemu je $R_2 = R_t$. Kazaljka instrumenta u srednjoj grani tada pokazuje nulu. Izlaganjem osjetila nepoznatoj temperaturi Wheatstonov most se izbacila iz ravnoteže, a to se očituje pomicanjem kazaljke instrumenta u srednjoj grani. Mijenja se iznos R_t , zato se za iste iznose mijenja i R_2 , micanjem klizača, ručno ili automatski do postizanja nove ravnoteže (nove nule). Kako je $R_t = f(T)$, a $R_t = R_2$ za slučaj ravnoteže, onda je $l = f(R_2)$ iz čega slijedi da je $l = f(T)$.³



Slika 39. Slog uravnoteženog Wheastonovog mosta³

Na izvore pogreške tijekom mjerenja otpora može utjecati temperatura okoline. Temperatura okoline mijenja vodljiva svojstva žica čime se mijenjaju otpori žica (desne grane), a samim tim i otpori strujnog kruga. Kompenzacija pogreške se može ostvariti prebacivanjem dijela žica iz desne grane u lijevu, čime se pogreška poništava. Za tu svrhu se koriste spojni vodovi sa 3 ili 4 žice koji podjednako raspodjele otpore dovoda u suprotne grane mosta.³

Prednosti otporničkih termometra u usporedbi sa termoparovima su točnost do $\pm 0,001$ °C kod nekih laboratorijskih ispitivanja, iako je točnost smanjena pri stvarnim inženjerskim mjerenjima. Imaju linearniji izlazni odziv i mogu se koristiti za direktno mjerenje temperature. Također smatraju se izrazito stabilnim mjernim pretvornicima kojima se karakteristike ne mijenjaju značajno tijekom vremena zbog kemijskih i drugih utjecaja. Zbog spojnih žica koje moraju biti izrađene od materijala zanemarivog otpora, a izoliraju se pomoću silikonske gume, Mogu se koristiti za mjerenja na dosta velikim udaljenostima.

Nedostatci su im visoka cijena, u odnosu na termoparove su većih dimenzija, zagrijavaju se tijekom rada što može smanjiti preciznost samog mjerenja.

Otpornički termometri se najčešće upotrebljavaju u uređajima poput pećnica, termostata, hladnjaka, klima uređaja i dr.

1.6. MJERENJE TEMPERATURE U ŠARŽNIM REAKTORIMA

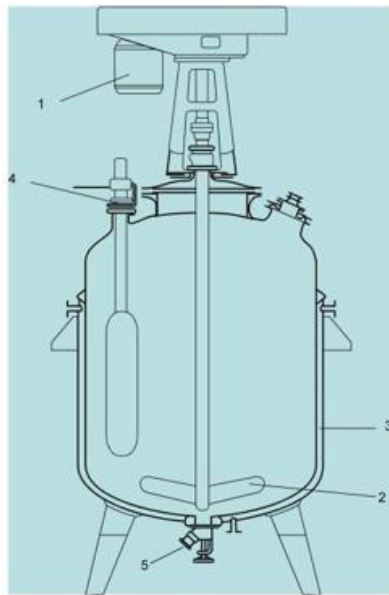
U kemijsko-tehnološkim procesima dolazi do kemijskih promjena zbog djelovanja kemijskih reakcija. Kemijske reakcije se odvijaju u uređajima koji se nazivaju **kemijski reaktori**.²⁸ Sa stajališta kemijskog inženjerstva kao tehničke znanosti, kemijski reaktor predstavlja procesni uređaj u kojem se svrhovito vodi kemijska reakcija u cilju dobivanja korisnog produkta.²⁹ Kemijski reaktor predstavlja jedan od brojnih procesnih uređaja kemijske procesne industrije. Razlika između kemijskih reaktora u odnosu na ostale procesne uređaje je u tome, što se u kemijskim reaktorima odvija kemijska reakcija, uz istovremeno odvijanje fizičkih prijenosa tvari, ali i energije.²⁸ Kemijski reaktor prema tome čini osnovu za projektiranje i dimenzioniranje kemijskih procesa i predstavlja temelj svakog tehnološkog procesa.²⁹ Razlikuju se tri osnovna tipa reaktora i to kotlasti (šaržni) reaktor, protočno-kotlasti reaktor te cijevni reaktor.

1.6.1. Kotlasti (šaržni) reaktor

Šaržni reaktor (engl. *batch reactor*) je zatvoreni sustav (nema izmjene reakcijske mase s okolinom) sa približno idealnim miješanjem čime je osigurana usredotočenost parametara procesa u bilo kojoj točki reaktorskog prostora. Zbog zatvorenog sustava i prirode kemijske reakcije šaržni reaktor je uvijek u nestacionarnom stanju.²⁹

Zbog jednostavnosti izvedbe i prilagodljivosti upotrebljavaju se u brojnim područjima kemijske industrije.³⁰ Upotrebljavaju se često u laboratoriju, uglavnom za reakcije u kapljevitoj fazi, za proizvodnju manjih količina proizvoda (lijekova, organskih bojila i dr.) pri umjerenom tlaku i temperaturi.

Uglavnom je konstruktivno izveden u obliku zaobljenog kotla sa miješalom i plaštom za grijanje ili hlađenje. Takva izvedba prikazana je na slici 40.



Shematski prikaz kotlastog reaktora s bitnim značajkama

- 1 – motor,
- 2 – miješalo,
- 3 – plašt,
- 4 – ulaz,
- 5 – izlaz

valjkaste posude sa zaobljenim dnom i odgovarajućim uređajima za prijenos topline i miješanje

*Slika 40. Shematski prikaz šaržnog reaktora sa osnovnim dijelovima*³⁰

Za **odvijanje kemijskih procesa** unutar reaktora, reaktor mora biti projektiran tako da se osiguraju svi potrebni uvjeti i to zadržavanje reaktanata, intenzivnost miješanja te dostizanje i održavanje željene temperature.³¹

Kako je već rečeno, temperatura je jedna od najčešće mjerenih procesnih veličina u laboratoriju i industriji i postoje brojni mjerni pretvornici odnosno uređaji za njeno mjerenje koji su već opisani. U nastavku rada razmatrat će se odabir prikladnog mjernog uređaja za mjerenje temperature u posudi s miješanjem u kojoj se odvija proces zagrijavanja kapljevine.

2. RASPRAVA

Za odvijanje gotovo svih procesa kako u industriji tako i u laboratoriju, neophodna je regulacija temperature. Temperatura je osnovna fizikalna veličina koja se definira kao mjera zagrijanosti tijela, odnosno mjera srednje kinetičke energije gibanja čestica tijela. Usko je povezana sa pojmom topline, koji se često koristi kao istoznačnica temperature, no toplina predstavlja energiju koja se prenese između dva tijela uslijed njihovih različitih temperatura. Za održavanje temperature u procesu potrebno je poznavati njene vrijednosti koje se ostvaruju mjerenjem pomoću mjernih pretvornika tj. mjernih uređaja. Za mjerenje temperature koristi se velik broj mjernih pretvornika različitih izvedbi i oblika. Općenito se mogu podijeliti na dilatacijske termometre, pirometre zračenja i električne termometre. Kako bi se odabrao prikladan mjerni pretvornik za određeni proces, potrebno je prije svega sustavno sagledati karakteristike procesa u kojem će se on koristiti te uzeti u obzir zahtjeve koje mora zadovoljiti kako bi se proces uspješno vodio.

Zadatak ovoga rada je odabrati prikladan mjerni pretvornik, odnosno mjerni uređaj za mjerenje temperature u šaržnom reaktoru. Izmjereni podatci o temperaturi bi se koristili za proračun tražene količine topline koja je u zadanom vremenu prošla s unutarnje stijenke reaktora na kapljevину koja se miješa. U tom slučaju bi toplina, sa stijenke reaktora na kapljevину koja se miješa prelazila mehanizmom prisilne konvekcije. Konvekcija predstavlja jedan od mehanizama prijenosa topline uz kondukciju i radijaciju. To je vrtložni način prijenosa topline uz miješavanje, kojim se toplina prenosi s jedne grupe molekula na drugu uslijed njihovih različitih temperatura.³² Razlikuju se dva tipa konvekcije i to prirodna i prisilna konvekcija. Prirodna konvekcija predstavlja mehanizam prijenosa topline u kojem je miješavanje uzrokovano lokalnom razlikom u gustoći, dok je miješavanje kod mehanizma prijenosa topline **prisilnom konvekcijom** uzrokovano primjenom miješala, pumpi, ventilatora i sličnih uređaja. Pritom **prijelaz topline** kod prisilne konvekcije označava prijenos topline sa površine čvrste stijenke na kapljevину ili obratno.³²

Za određivanje količine topline u vremenu (Q/t) koja je prošla sa površine stijenke na kapljevину koja se miješa koristi se izraz (9):

$$\frac{Q}{t} = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \quad (9)$$

gdje je:

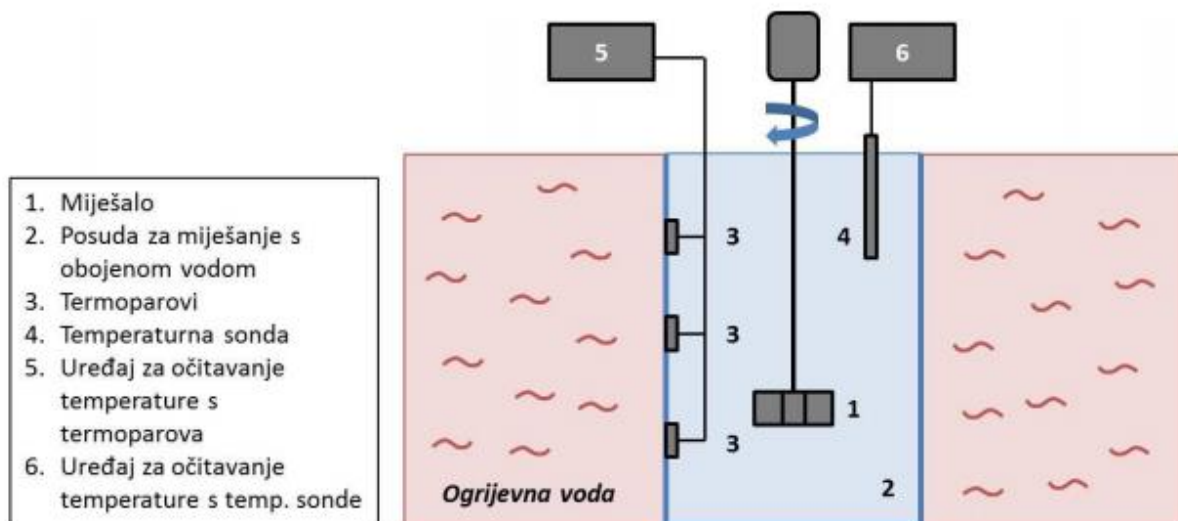
α - koeficijent prijelaza topline [$\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$],

A - površina stijenke koja je u kontaktu s fluidom [m^2],

ΔT - razlika temperatura između čvrste površine i fluida [$^\circ\text{C}$].³²

Koeficijent prijelaza topline, α , i površina, A , u izrazu (9) se određuju na osnovu dimenzija, oblika čvrstog tijela kao i brzine strujanja fluida i njegovih fizikalnih karakteristika. Član ΔT je srednja temperatura kapljevine, računa se na osnovu temperatura kapljevine i stijenke koje je potrebno izmjeriti odabranim mjernim pretvornicima.

Potrebna ispitivanja će se provoditi na aparaturi prikazanoj na slici 41. U kupelj s ogrjevnom vodom uronjena je posuda s miješanjem sa kapljevnom obojenom kalijevim permanganatom. Za određivanje količine topline koja će u zadanom vremenu preći sa stijenke reaktora na kapljevinu koja se miješa, potrebno je u određenim vremenskim intervalima mjeriti i temperaturu stijenke i kapljevine.



Slika 41. Potrebna aparatura³²

Očito, za točnost podataka i rezultata izračuna ključno je izabrati odgovarajuće mjerne pretvornike temperatura ovisno o stanju okoline i sustava reaktora. U ovom radu je bilo

potrebno odabrati dva mjerna pretvornika, jedan za mjerenje T kapljevine koja se miješa i jedan za mjerenje temperature stijenke, pri čemu bi se T stijenke pratila na 3 različite visine, a što je prikazano na slici 41.

Kako je detaljno objašnjeno u poglavlju 1.3. ovoga rada, postoji nekoliko čimbenika koji se uzimaju u obzir pri odabiru mjernih pretvornika za određene procese. Potrebno je sagledati: radno područje mjerene veličine, mogućnost postojanja ekstrema, važnost točnosti, osjetljivosti i preciznosti pri mjerenju, cijenu, troškove ugradnje i održavanja mjernih pretvornika, način prenošenja mjernog signala u sustavu, dimenzije i oblik te postoje li posebni zahtjevi u sustavu (poput korozivnih tekućina, eksplozivnih tvari).

U navedenom sustavu prikazanom na slici 41 bi se mjerila temperatura u rasponu od 0-100 °C, ne očekuju se ekstremi, potrebna je visoka točnost, preciznost te visoka osjetljivost jer se očekuju male promjene temperature. Posebnih zahtjeva nema jer će se miješati vodovodna voda obojena kalijevim permanganatom kako bi se povećala vidljivost. S obzirom da su dimenzije unutarnje posude: promjer 14 cm, visina stupca kapljevine do 30 cm, debljina stijenke 5 mm, uronjena u termostatiranu kupelj s miješalom, odabrani mjerni pretvornici trebaju biti manjih dimenzija kako ne bi došlo do kontakta mjernih pretvornika i osovine miješala. Osim toga, bit će uronjeni u vodu stoga moraju biti vodootporni. Odabrani mjerni pretvornici se kabelima spajaju na prikladni mjerač (te oni skupa čine mjerni instrument) koji se potom spaja na računalo koje će kontinuirano (svakih 1 do 5 sekundi maksimalno) bilježiti vrijednosti temperatura. Cijena mjernog instrumenta kao i troškovi ugradnje u sustav bi trebali biti relativno niski.

Na osnovu traženih njihovih osnovnih karakteristika ovom bi opisu traženih mjernih pretvornika, odgovarale karakteristike **električnih termometara**.

Za mjerenje **temperature stijenke** najbolji mjerni pretvornik bio bi **termopar**. Termoparovi su otporni na visoke temperature. Visoke su osjetljivosti što znači da će brzo slati izlazni signal, a osim toga točnost mjerenja im je visoka i otporni su na utjecaj okoline (jer mjere i u oksidirajućim, inertnim i vakuum okolinama). Cijena termoparova, troškovi ugradnje i održavanja su relativno niski, a budući da se radi o procesu u manjoj posudi s miješanjem, predstavljaju pogodne mjerne pretvornike. Mogu se izrađivati u manjim dimenzijama, različitim oblicima (žični oblici te oblici temperaturene i površinske sonde), prilagodljivi su i lako se ugrađuju. Otpornički termometri sličnih su karakteristika, a u odnosu na termoparove još točniji, precizniji, ali ipak se češće koriste termoparovi bržeg mjerenja temperature i bolje

osjetljivosti. Osjetljivost je važna jer je potrebno bilježiti male promjene temperature u kratkom vremenskom periodu. Čvrsta stijenka posude je zaobljena stoga je najpogodniji oblik termopara, površinska sonda.

Primjer izgleda površinskih sonde za mjerenje temperature stijenke prikazan je slici 42.



*Slika 42. Primjer površinskih sonde za mjerenje temperature stijenke šaržnog reaktora*³³

Model mjernog pretvornika koji se može koristiti za mjerenje temperature stijenke reaktora dan je na slici 43.

MINCO		ODABIR MJERNIH INSTRUMENATA ZA ZAHTIJEVANE UPOTREBE			
MODEL	DIMENZIJE	IZOLACIJA	MJERNO PODRUČJE	ODZIV	ZNAČAJKE
TS667	0.20 x 0.60 x 0.118" (5.0 x 15.2 x 3.0 mm)	S Podlogom od folije, prekriven silikonskom gumom	-50-125 °C	1,3 s	Vodootporan, prikladan za kontinuirana uranjanja

*Slika 43. Model mjernog pretvornika za mjerenje temperature stijenke šaržnog reaktora*³⁴

Iako je navedeno da je za mjerenje temperature stijenke prikladniji termopar, moguće je upotrijebiti i RTD element, model S667, platinski RTD element, karakteristika prikazanih na slici 43.

Karakteristike zbog kojeg je izabran su:

- Radno područje: -50 do 125 °C
- Dimenzije: 5,0 × 15,2 × 3 mm (prikladne za jednostavnu montažu)
- Vrijeme odziva: 1,3 s
- Vodootpornost: da
- Osjetljivost: 0,39 Ω °C⁻¹

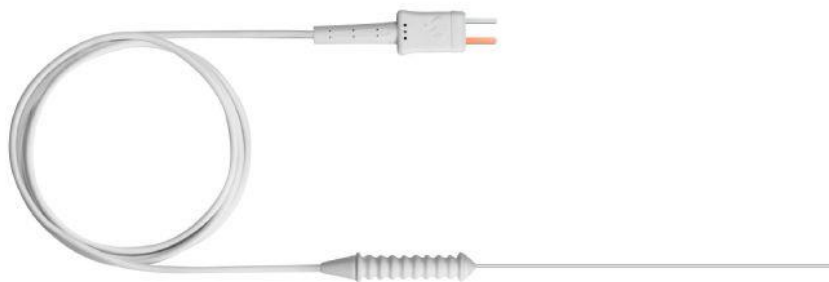
Mjerni pretvornik se dalje može spojiti na mjerač temperature, prikazan na slici 44.



Slika 44. Mjerač temperature za S667 RTD ³⁴

Temperatura kapljevine će se mjeriti temperaturnom sondom. Pogodan oblik sonde je uzemljeni oblik, jer je njegov odziv dosta brz i omogućuje brži prijenos topline.

Primjer takvog termopara prikazan je na slici 45 čije su karakteristike navedene u tablici 4.



Slika 45. Primjer temperaturne sonde za mjerenje temperature kapljevine ³⁵

Tablica 4. Karakteristike temperaturne sonde za mjerenje temperature kapljevine u šaržnom reaktoru ³⁵

Tip	T, (Cu-CuNi)
Radno područje	-50 do 250 °C
Vrijeme odziva	2 s
Točnost	±0,2 °C, razred 1
Dimenzije	1380 mm
Duljina sonde	150 mm
Duljina kabla	1,2 m
Boja kabla	bijela
Težina	32 g
Vodootpornost	da

Temperaturna sonda se može povezati na mjerač temperature prikazan na slici 46.



Slika 46. Primjer mjerača temperature za temperaturnu sondu ³⁵

3. ZAKLJUČAK

Svrha ovog rada bilo je definiranje osnovnih značajki o vođenju odnosno regulaciji procesa koja se jednostavno prikazuje regulacijskim krugom. Poseban naglasak u ovom radu stavljen je na mjerenje kao jednu od radnji koja se odvija unutar regulacijskog kruga, jer o njoj ovisi uspješnost vođenja procesa. Mjerenjem se ostvaruje informacija o vrijednosti procesnih veličina putem mjernih instrumenata. Najčešće procesne mjerene veličine su temperatura, protok, tlak i razina. Kroz ovaj rad se opisala temperatura kao procesna veličina te načini njenog mjerenja. Detaljnije su opisane izvedbe i karakteristike različitih mjernih pretvornika za mjerenje temperature, kao i čimbenici kojima se vodi pri odabiru prikladnog mjernog pretvornika za određenu namjenu.

Glavni zadatak rada bio je odabrati prikladne mjerne pretvornike, odnosno mjerne uređaje za mjerenje temperature u šaržnom reaktoru, u kojem se zagrijavala kapljevina. Bilo je potrebno odabrati mjerne pretvornike i to za mjerenje temperature kapljevine koja se miješa i za mjerenje temperature stijenke reaktora, s tim da je temperaturu stijenke potrebno pratiti na 3 različite visine. Dobiveni podatci o temperaturi bi se koristili za izračun količine topline koja u zadanom vremenu pređe s unutarnje strane stijenke reaktora na kapljevinu koja se miješa.

Odabir mjernih pretvornika izvršen je sagledavanjem čimbenika za odabir mjernih pretvornika kao i karakteristika sustava u kojem se vršilo mjerenje. Budući da se radi o procesu s radnim područjem od 0 do 100 °C, u kojem se zahtijeva visoka točnost, preciznost i osjetljivost mjernih pretvornika, koji trebaju biti manjih dimenzija, relativno niske cijene te otporni na utjecaj kapljevine. Zaključeno je, kako navedenom opisu najviše odgovaraju karakteristike električnih termometara, i to termoparova.

Za mjerenje temperature stijenke odabran je RTD platinski element. Za mjerenje temperature kapljevine koja se miješa odabrana je temperaturna sonda uzemljenog oblika jer ima najbrži odziv. Odabrane mjerne pretvornike moguće je spojiti na mjerače, a potom i na računalo na kojem se podatci mogu pohranjivati, analizirati i očitavati.

LITERATURA

1. *N. Bolf*, Automatika, vođenje, upravljanje i regulacija procesa, Kem. Ind. Vol. 63. (7-8) (2014) 278-280, doi: <https://hrcak.srce.hr/file/182872>
2. *N. Bolf*, Automatsko vođenje procesa, Nastavni materijal iz predmeta „Mjerenje i vođenje procesa“, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2016.
3. *R. Žanetić, R. Stipišić*, Mjerni pretvornici u procesnoj industriji, Skripta za internu upotrebu, Split, 2005.
4. *A. Čelan*, Nerecenzirani nastavni materijal iz predmeta „Mjerenje i vođenje procesa“, Kemijsko-tehnološki fakultet, Split 2019./2020.
5. *J. Božičević*, Temelji automatike 2- Mjerni pretvornici i mjerenje, Školska knjiga, Zagreb, 1984., str.1-219.
- 6.URL:https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/Skripta_2013/Skripta%202013/Eksperimentalna%20hidraulika%20%285-www%29_Prikupljanje%20i%20obrada.pdf (20. 4. 2020.)
7. *J. G. Webster*, The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook, CRC Press, Boca Raton, 1990, str. 1-2588.
- 8.URL:https://agrologistika.hr/media/34/2017/05/12/b7587273866ae8bb62a1ccb9a1dbe6b9_6d0057044fd0b6ce0114b31ff58f4900_crop.jpg (15 .4. 2020.)
9. URL:https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/592185da-b4f4-4348-b0a2-7ee4d26a743f/html/7168_Mjerenje_temperature.html (15. 4. 2020.)
10. *N. Bolf*, Automatika, vođenje, upravljanje i regulacija procesa, Kem. Ind. Vol. 67 (7-8) (2018) 370-373, doi: <https://hrcak.srce.hr/file/182872>
11. *D. Čulo*, Mjerni pretvornici osobine, primjena i obrada signala, Završni rad, FERIT, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2019.
- 12.URL:<https://assets.omega.com/pdf/test-and-measurement-equipment/temperature/thermometers/GT-Gen-Purpose-Therm.pdf> (17. 7. 2020.)
13. *S. Marić*, Fizika za studente tehničkih fakulteta, Svjetlost, Sarajevo, 2002, str. 142.
14. *A. Galović*, Termodinamika I, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007, str. 1-142.
15. *P. Kulišić*: Mehanika i toplina, Školska knjiga, Zagreb, 1995, str. 1-262.
16. URL:https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/predavanja13-2014.pdf (19. 3. 2020.)

-
17. URL:<https://glossary.periodni.com/rjecnik.php?hr=Celsiusova+temperaturna+skala> (19.3.2020.)
18. *J.V. Nicholas, D.R.White*, Traceable temperature: An Introduction to Temperature Measurements and Calibration, John Wiley & Sons Ltd, New York, 2001, str. 1-441.
19. *F. Jurić*, Mjerna nesigurnost u kontaktnoj termometriji, Završni rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu , Zagreb, 2015.
20. URL: <https://www.yumpu.com/xx/document/view/16043334/predavanje-7-pbf> (18. 4. 2020.)
21. *B. G. Liptak*, Temperature Measurement u: Instrument Engineers Handbook, Process measurement and analysis, Volumen 1, CRC Press, Boca Raton, 2003, str. 565-708.
22. URL: <https://www.slideshare.net/deepakumar1778/pressure-thermometer> (18. 4 .2020.)
23. URL: <https://proleksis.lzmk.hr/41787/> (25. 7. 2020.)
24. *N. Bolf*, Mjerna i regulacijska tehnika, Kem. Ind Vol. 69 (7-8) (2020) 451-454, doi: <http://silverstripe.fkit.hr/kui/assets/Uploads/Mjerna-i-regulacijska-tehnika-451-454.pdf>
- 25 *R. S. Figliola, D. Beasley*, Theory and Design for Mechanical Measurements, John Wiley & Sons Ltd, New York, 1991, str. 1-585.
26. URL: <http://www.am.unze.ba/ip/seminarski2016/6601-13.docx> (20. 7. 2020.)
27. *A. J. Wheeler, A. R. Ganji*, Introduction to Engineering Experimentation (3rd Edition), Pearson Education, 2010
28. *V. Tomašić*, Katalitičko reakcijsko inženjerstvo, Interna skripta, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2011./2012.
29. *V. Kosar*, Reaktori i bioreaktori (1. dio reaktori), Nastavni tekstovi, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2017.
30. URL: <https://www.slideserve.com/kaveri/kotlasti-reaktori> (28. 7. 2020.)
31. URL: https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/procesna_aparatura.pdf (28. 7 .2020.)
32. *N. Kuzmanić, A.Čelan*, Prijenos tvari i energije, Priručnik za laboratorijske vježbe, Kemijsko-tehnološki fakultet Split, Split, 2018.
- 33.URL:https://www.mod-tronic.com/Rewind_Sensors/Minco_Thermal-Ribbon_Flexible_Sensors.html (17. 9. 2020.)
- 34.URL:https://www.minco.com/~media/files/minco/instructions/sensors/minco_ssg01d_pdf_web_20151012.ashx (17. 9. 2020.)
- 35 .URL: <https://www.testo.com/hr-HR/waterproof-superfast-needle-probe-tc-type-t/p/0628-0027> (15. 9. 2020.)