



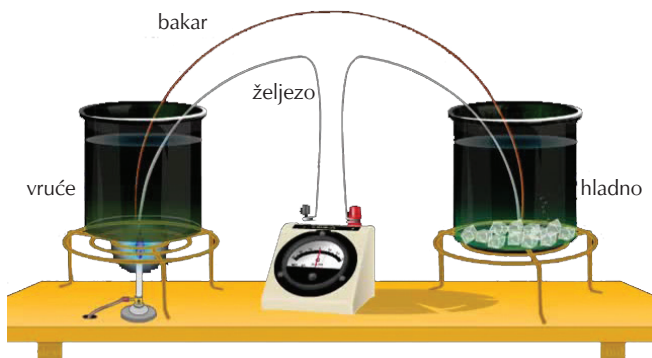
N. Bolf*

Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
Sveučilišta u Zagrebu
Zavod za mjerenja i automatsko vođenje procesa
Savska cesta 16/5a, 10 000 Zagreb

Mjerenje temperature primjenom termoparova

Temperatura je veličina koja se u industriji najčešće mjeri. Izbor osjetila uglavnom je ograničen na termoparove (termoelemente) ili otpornička osjetila. Ali s obzirom na velik izbor, pitanje je kako odabrati najbolje osjetilo za pojedinu primjenu. U ovom prilogu prikazat ćemo i analizirati mjerenje primjenom termoparova.

Za mjerenje temperature primjenjuje se velik broj osjetila različitih oblika i izvedbi. Ipak, pet je osnovnih vrsta osjetila: termoparovi (engl. *thermocouple* – T/C), otpornička osjetila temperature (engl. *resistance temperature detector* – RTD), termistori, infracrveni (IC) senzori (engl. *infrared* – IR) i, poluvodički, odnosno integrirani krugovi (engl. *integrated circuit* – IC). U industriji se za prijenos signala na veće udaljenosti uglavnom primjenjuju termoparovi i otpornička osjetila temperature. Temperaturni signal obično se prenosi s mjernog mjesta na veću udaljenost. Pri tome se mjerni pretvornici (transmiteri) primjenjuju za pojačavanje, izoliranje i pretvaranje signala osjetila koji je obično niske razine u signal više razine pogodan za obradu i prikaz ili daljnju manipulaciju.

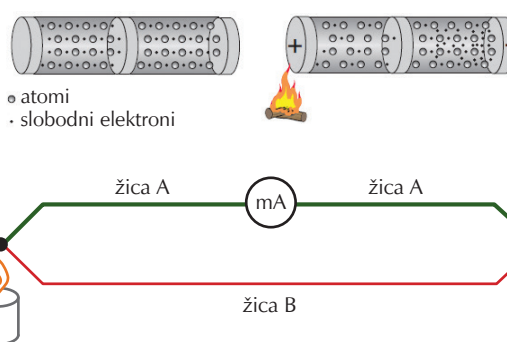


Slika 1 – Seebeckova pojava na primjeru zatvorenog strujnog kruga dvaju različitih metala sa spojištima na različitim temperaturama

Osnove mjerenja temperature s termoparovima

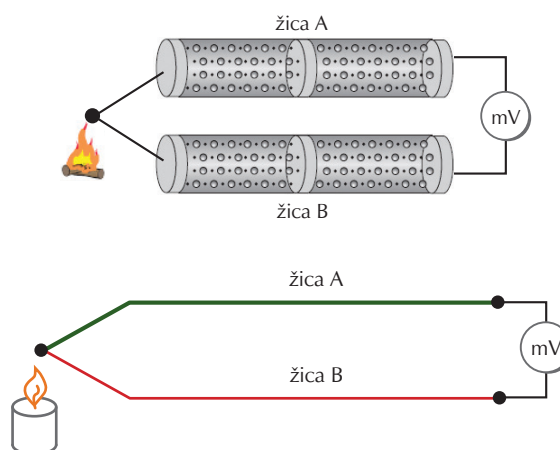
Fizičar Thomas Johann Seebeck 1822. spojio je dva metalna vodiča u zatvoreni krug, pri čemu su temperature na dvama spojištima bile različite. U blizini vodiča nalazio se kompas na kojem se, na njegovo iznenađenje, pomakla igla. Najprije je pomislio da je uzrok zakretanje igle promjena magnetskog polja uzrokovana promjenom temperature, ali je kasnije shvatio da je u krugu potekla struja koja je stvorila magnetsko polje.

Seebeckova pojava nam kazuje da se u zatvorenom krugu koji čine dvije žice različitih metala spojenih na oba kraja, pri čemu su dva spojišta na različitim temperaturama javlja električna struja,



Slika 2 – Seebeckova pojava ili termelektrični efekt

slika 2. Ako se taj krug prekine, napon otvorenog kruga (Seebeckov napon) funkcija je razlike temperature između toplijeg i hladnijeg spojišta, ali i sastava metala, slika 3. Prema tome, razlika temperatura između dvaju krajeva stvara malu elektromotornu silu koja se naziva termoelektromotorna sila (TEMS). Radi se zapravo o potencijalu koji se javlja kao posljedica separacije naboja u vodiču.

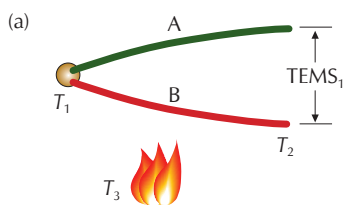


Slika 3 – Mjerenje termoelektromotorne sile u otvorenom krugu (TEMS-a)

Najčešći način mjerenja temperature pomoću termopara zasniva se upravo na ovoj pojavi. Kad se jedno spojište grije ili hladi, javlja se promjena napona koja je funkcija razlike temperatura.

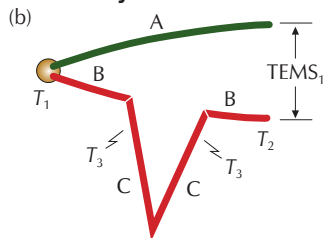
* Prof. dr. sc. Nenad Bolf
e-pošta: bolf@fkit.hr

Pravilo homogenih materijala



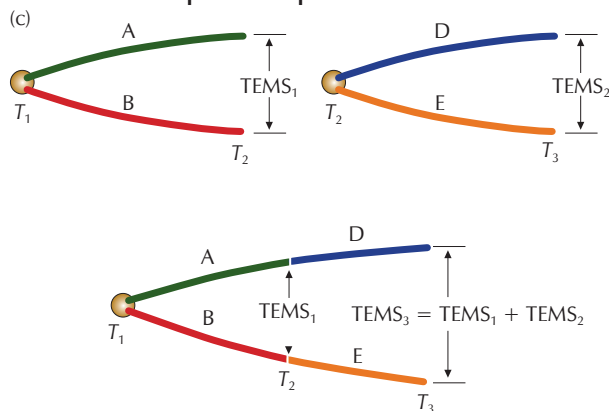
Na TEMS što je daje termopar sa spojištima na temperaturama T_1 i T_2 ne utječe toplina primijenjena bilo gdje u krugu ili promjena presjeka žice ako je materijal od kojih je izrađena žica termopara homogen.

Pravilo međumaterijala



Umetanjem trećeg homogenog materijala neće se promijeniti TEMS sve dok su krajevi umetnutog materijala na istoj temperaturi. To je razlog da se termoparovi mogu povezivati s drugim električnim komponentama i lemiti kako bi se spojili.

Pravilo uzastopnih temperatura



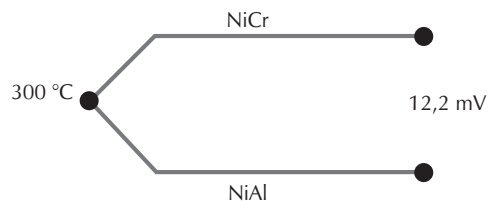
Ako termopar kojemu su spojišta na temperaturama T_1 i T_2 , daje $TEMS_1$, a $TEMS_2$ kada su mu spojišta na temperaturama T_2 i T_3 , tada će taj isti termopar davati pri temperaturama spojišta T_1 i T_3 $TEMS_3$ jednaku zbroju $TEMS_1$ i $TEMS_2$.

Ovo pravilo dopušta da se termopar umjeren na jednoj referentnoj temperaturi može primijeniti na drugoj referentnoj temperaturi. Također, omogućuje ubacivanje dodatnih žica u krug bez utjecaja na ukupni TEMS.

Izvedba termopara

Iako se za izradu termopara mogu uzeti bilo koje dvije metalne žice, postoje standardni parovi za koje su poznati izlazni naponi. Različiti parovi vodiča daju različite napone za istu razliku temperature, stoga se najčešće odabiru oni koji na određenom temperaturnom području daju najveći napon (imaju veću osjetljivost).

Slika 3 prikazuje primjer ovisnosti TEMS-a o mjerenoj temperaturi. Termopar tipa K pri temperaturi od $300\text{ }^\circ\text{C}$ daje napon od $12,2\text{ mV}$. Njegova osjetljivost je $41\text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.



Slika 4 – Termopar K tipa

Spoj termopara može se izvesti lemljenjem dvaju metala jer legura za lemljenje neće utjecati na mjerenje. U praksi se, ipak, spojevi termoparova izvode varenjem dvaju metala (obično u inertnoj atmosferi, bez prisutnosti kisika) jer se tako uklanja problem niskog tališta legura za lemljenje.

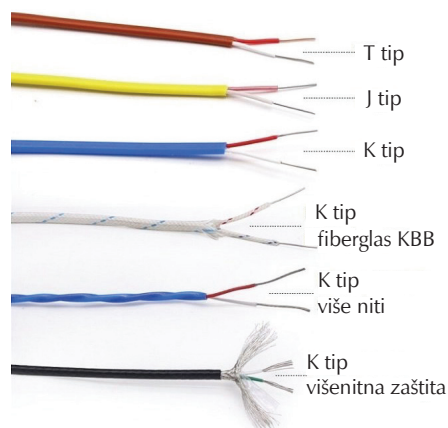
Za mjerenje nije dovoljno samo spojiti (mili)voltmetar jer bi tim spajanjem nastalo još jedno, neželjeno spojište termopara (vidi Pravilo međumaterijala). Stoga je potrebno provesti kompenzaciju hladnog spojišta, što će biti objašnjeno pri kraju priloga.

Vrste termoparova

Termopar se može načiniti od različitih kombinacija metala. Razlikuje ih radno (mjerno) područje, a maksimalna moguća temperatura ovisi o promjeru žice. Shodno tome, pomoću termopara s vrlo tankom žicom ne mogu se mjeriti visoke temperature. U tablici 1 dani su uobičajeni termoparovi, a na slici 4 standardne oznake boja za legure termoparova.

Tablica 1 – Standardni tipovi termoparova s temperaturnim područjem

Tip	Termopar	Temperaturno područje
J	željezo – konstantan	$-200\text{ }^\circ\text{C} - 1200\text{ }^\circ\text{C}$
K	chromel – alumel	$270\text{ }^\circ\text{C} - 1372\text{ }^\circ\text{C}$
T	bakar – konstantan	$270\text{ }^\circ\text{C} - 400\text{ }^\circ\text{C}$
E	chromel – konstantan	$270\text{ }^\circ\text{C} - 1000\text{ }^\circ\text{C}$
R	platina 13 % rodij – platina	$50\text{ }^\circ\text{C} - 1768\text{ }^\circ\text{C}$
S	platina 10 % rodij – platina	$50\text{ }^\circ\text{C} - 1768\text{ }^\circ\text{C}$



Slika 5 – Uobičajeni tipovi termoparova s odgovarajućim bojama

Obično se rabe tipovi J, K, T i E. Primjenjuju se i visokotemperaturni kao što su R, S, B i C. Kao standardni tipovi mogu se izdvojiti:

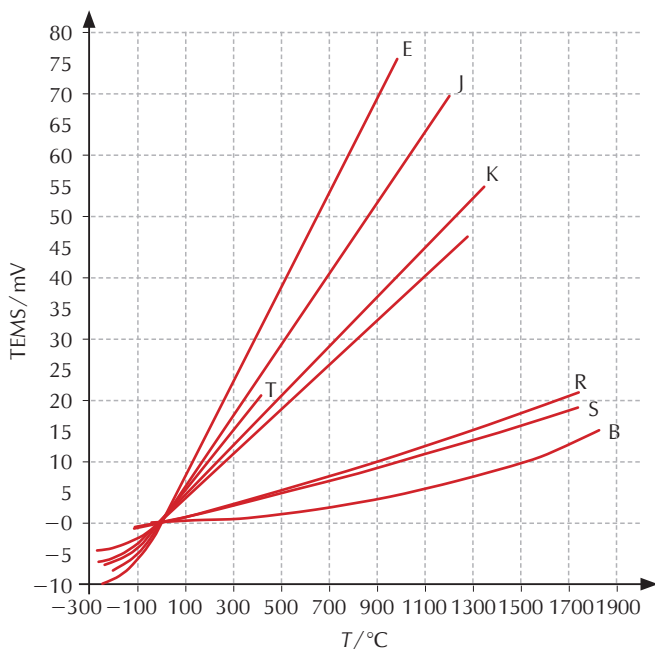
- legure nikla: E, J, K, M, N, T tip,
- legure platine/rodija: B, R, S tip,
- legure volframa/renija: C, D, G tip.

Kako odabrati odgovarajući termopar?

Termoparovi se najčešće biraju zbog niske cijene, robusni su i imaju široko temperaturno područje. Glavni nedostatak im je ponešto manja točnost. Odabir termopara ovisi o:

- temperaturnom području i osjetljivosti termopara,
- otpornosti termopara i stijenke na kemikalije,
- otpornosti na abraziju i vibracije,
- kompatibilnosti s postojećom opremom.

Također se uzimaju u obzir kemijska inertnost i magnetska materijala žica. Stanoviti tipovi termoparova pogodni su za posebne primjene.



Slika 6 – Temperaturno područje i naponski signal standardnih termoparova

Vrste termoparova prema izvedbi

Termoparovi se izvode u žičnom ili u obliku sonde. Žični imaju brzi odziv, odnosno malu vremensku konstantu. Također, postoji velik broj sondi prilagođenih za različite primjene (laboratorij, procesna industrija, prehrambena, medicinska itd.). Pri izboru potrebno je odabrati odgovarajući tip konektora. Postoje dva tipa konektora, "standardni" s okruglim nožicama (pinovima) i "minijaturni" s plosnatim nožicama, koji su češće u primjeni. Treba obratiti pažnju i na izolaciju i izvedbu jer sve to utječe na točnost i pouzdanost mjerenja.

Zavareni žični spoj

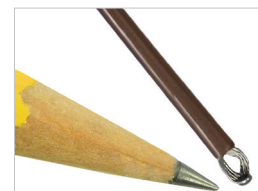
To je najjednostavnija vrsta termopara. Čine ga dvije žice koje su zavarene na spojištu. Budući da su varovi izloženi mediju, ne

ANSI colour code

K yellow NiCr NiSi	J black Fe CuNi	E violet NiCr CuNi	T blue Cu CuNi	N orange NiCrSi NiSi

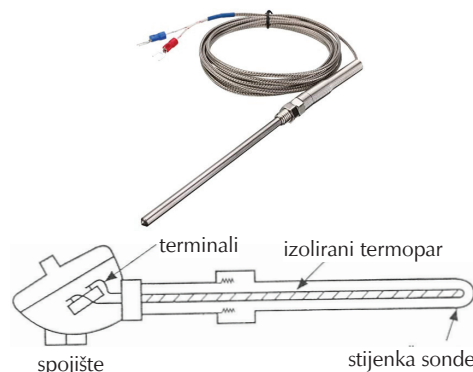
Slika 7 – Vrste i boje konektora

mogu se upotrebljavati s medijima koji uzrokuju koroziju i oksidaciju legure od koje je termopar izrađen. Ako je pričvršćen na uzemljene metalne površine (posebno kod cjevovoda), indirektna veza s električnom mrežom može utjecati na točnost mjerenja i pojavu smetnji pri mjerenju. Ova vrsta termopara dobra je za mjerenje temperature plinova. Budući da su malih dimenzija, imaju brzi odziv.



Sonda

Kod ove izvedbe dvije žice nalaze se unutar metalnog tuljca. Materijal od koje je izrađena stijenka tuljca najčešće je nehrđajući čelik ili Inconel (legura na bazi Ni s Cr i Fe, koja se upotrebljava i za izradu lopatica plinskih turbina). Inconel je bolji za primjenu na višim temperaturama, dok je nehrđajući čelik češće u uporabi zbog veće kemijske kompatibilnosti. Pri vrlo visokim temperatura stijenke mogu biti i od drugih materijala.



Slika 8 – Izvedba termopara u obliku sonde

Termopar u obliku sonde izvodi se u tri verzije: uzemljena, neuzemljena i izložena, slika 9. Na vrhu uzemljenog spoja žice termopara su fizički spojene na unutarnju stranu stijenke sonde. Stoga imaju dobar prijenos topline kroz stijenku sonde do spoja termopara, ali podliježe problemu električnih smetnji. Kod neuzemljene sonde spoj termopara je odvojen od stijenke slojem izolacije. Odziv je sporiji, no električki je izoliran. Izloženi oblik termopara viri iz stijenke u okolinu. Ta verzija ima najbrži odziv, ali se može primijeniti samo za suhe i nekorozivne plinove, a tlak ne bi smio biti previsok.



Slika 9 – Uzemljeni (grounded), neuzemljeni (ungrounded) i izloženi (exposed) spoj

Površinska sonda

Mjerenje temperature čvrstih površina problematično je za većinu osjetila temperature. Da bi se osigurala dobro mjerenje, cijelo mjerno osjetilo mora biti u kontaktu s površinom mjenog tijela, što je kod čvrstih osjetila i čvrstih površina mjenog tijela teško ostvarivo. S obzirom na to da se termoparovi izrađuju od savitljivih materijala, spojevi se mogu oblikovati tako da budu ravni i tanki, kako bi se ostvario maksimalan kontakt s neravnom površinom mjenog tijela. Takvi termoparovi odličan su odabir za mjerenje temperature površine. Moguća je i izvedba s mehanizmom koji rotira, što ih čini prikladnim za mjerenje temperature na površinama u gibanju.

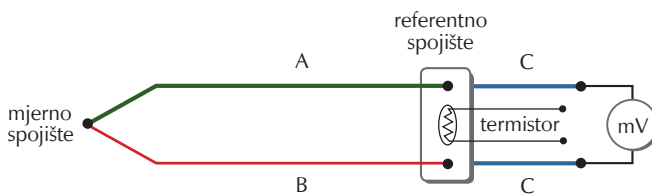


Slika 10 – Sonda za mjerenje temperature površina

Kompensacija referentnog (hladnog) spojišta

U tablicama u kojima je dan TEMS pojedinih termoparova pretpostavlja se da je hladno spojište na temperaturi od 0 °C. Ta se temperatura treba održavati u pažljivo izrađenoj kupki u kojoj se nalazi smjesa leda i vode (otuda pojam kompencija "hladnog" spojišta). Ipak, održavanje hladne smjese nije praktično pa se umjesto toga mjeri temperatura referentnog (hladnog) spojišta.

Obično se temperatura referentnog spojišta mjeri preciznim termistorom koji je u dobrom toplinskom kontaktu sa spojevima mjernog instrumenta na izotermalnom bloku, slika 11. Povezivanjem signala iz termistora i signala iz termopara kompenzira se promjena temperature referentnog spojišta. Kompensacija referentnog spojišta termopara uobičajeno se proračunava programski u softveru (eng. *cold-junction compensation*).



Slika 11 – Kompensacija promjene temperature referentnog (hladnog) spojišta

Mjerni pretvornici za termoparove

Spajanje termoparova na dvožične pretvornike temperature koji daju standardni izlazni signal dobiva se izlaz izravno proporcionalan ulazu termopara u milivoltima koji se može prenositi na veće udaljenosti.

Prijenos strujnog izlaza može se izvesti pomoću jeftine bakrene žice. Ovakvi pretvornici standardno se napajaju nereguliranim izvorom napajanja. Signal koji se prenosi počinje od 4 mA na donjoj granici mjernog područja, a završava kod 20 mA što je gornja granica mjernog područja.

Problemi pri mjerenju termoparom

Problemi pri spajanju. Većina mjernih pogrešaka uzrokovana je nehotičnim stvaranjem spojišta termopara. Svako spojište dvaju metala predstavlja i spojište termopara. Ako je potreban produžni vodič treba odabrati odgovarajući tip produžnih žica (npr. tip K za K tip termopara) jer će drugi tip rezultirati novim spojištem termopara. Svaki konektor mora biti izrađen od odgovarajućeg materijala, a treba paziti i na polaritet.

Otpor vodiča. Da bi se smanjilo odvođenje topline i skratilo vrijeme odziva, termoparovi se izrađuju od tankih žica. S manjim promjerom raste otpor termopara što ga čini osjetljivim na smetnje, a može uzrokovati pogreške zbog ulazne impedancije mjernog instrumenta. Uobičajeni spoj termopara sa žicom promjera 0,25 mm ima otpor od oko 15 Ω m⁻¹. Ako se radi o termoparovima s tankim žicama, one trebaju biti što je moguće kraće ili za povezivanje termopara i mjernog instrumenta treba upotrebljavati produžne žice (koje su deblje pa imaju manji otpor). Prije upotrebe dobro je izmjeriti otpor termopara.

Dekalibracija je izazvana promjenom sastava žica termopara. Najčešći uzrok je difuzija atmosferskih čestica u metal pri ekstremnim radnim temperaturama. Drugi uzrok su nečistoće i kemikalije koje difundiraju iz izolacije u žicu termopara. Ako se radi na visokim temperaturama potrebno je provjeriti izolaciju sonde.

Smetnje (šumovi). Termoparovi daju signal niske razine pa su podložni električnim smetnjama. Većina mjernih instrumenata uklanja signal smetnji, koji je isti na obje žice, prepletanjem kabla kako bi se osiguralo da obje žice podliježu istom mjernom šumu. Pri radu u okolini s puno smetnji (npr. u blizini većih motora) treba razmisliti o upotrebi produžnog kabla sa zaštitnim omotačem. Ako postoje smetnje najprije treba isključiti opremu koja je mogući izvor smetnji i provjeriti ima li promjena pri očitavanju signala.

Literatura

- Termoelement, URL: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=60971> (26. 7. 2020.).
- Seebeckov efekt, URL: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=55155> (26. 7. 2020.).
- URL: <https://www.capgo.com/Resources/Temperature/Thermocouple/Thermocouple.html> (26. 7. 2020.).
- Seminar AVP-4, *Procesna mjerenja*, Fakultet kemijskog inženjstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, Laboratorij za automatiku i mjerenja, 2017.