

# Temperatuur ja soojus. Temperatuuri mõõtmise meetodid.

I. Bichele, 2016

Soojuseks (korrektselt soojushulgaks) nimetame energia hulka, mis on keha poolt juurde saadud või ära antud soojusvahetuse käigus ümbritseva keskkonnaga. **Soojus on kehade molekulide juhusliku liikumise kineetilise energia makroskoopiline väljendus.** Soojusliku kineetilise energia oluline erinevus nn “kasulikust tööst” on liikumise suunaline hajusus. Aurumasinad olid esimesed inimese poolt loodud “struktuurid” või “süsteemid”, mis tule soojuse energia muundasid kasulikuks tööks. Peamine probleem seisneb selles, et kõike molekulide juhuslikku liikumist ei saa kuidagi kindlasuunalikseks pöörata. Teadusharu, mis käsitleb soojusenergiat selle makroskoopilises väljenduses – nagu seda on temperatuur ja rõhk – nimetatakse **termodünaamikaks**. Rõhku avaldavad peamiselt gaasi molekulid, seetõttu ongi termodünaamiliste arutelude peamiseks subjektiks gaasid – lihtne keskkond kus molekulid on hõredalt, nad liiguvad põrkudes elastselt omavahel ja ümbriteva nõu seinte vastu. Ilma ruumala piirava kinnise seinata ei saa gaasid eksisteerida, sest molekulid lenduksid lõpmatusse ruumi.

Võib tekkida küsimus, milleks uurida gaasi käitumist teades, et keemilised ja eluprotsessid toimuvad peamiselt veekeskkonnas? Esimene vastus võiks olla – sellepärast, et esimene Galileo poolt kasutusele võetud temperatuuri mõõtmise vahend oli gaastermomeeter (vt. joonis), teine vastus peitub lahuste olemuses. Biokeemilised protsessid toimuvad lahustes, kus tihedasti paiknevate vee molekulide vahel on hõredalt mitmesuguste lahustunud ainete molekulid. Lahustunud aine molekulide soojusliikumine toimub ikkagi nendesamade reeglite järel nagu gaasideski, va see, et vee molekulid takistavad neil ühekorraga pikki vahemaid läbida. Soojusliikumise kiirus ja energia on vedelikus seesama mis gaasiki oleks. Molekuli vaba tee pikkus, mis näiteks õhus on põrkest põrkeni umbes 100 nm, on vees efektiivselt ca 10 pm, seega umbes 10 tuhat korda lühem ja juba tunduvalt väiksem kui molekuli mõõt. Põrked lahustunud molekuli ja vee vahel toimuvad pidevalt, kuid keemiliste reaktsioonideni see ei vii – vesi on inertne kaskkond. Vesi on 55.6 molaarne. Ühe-molaarses lahuses on seega 1 lahustunud aine molekul ca iga 55 vee molekuli kohta, seega iga 55-s pörge on lahustunud molekulidel omavaheline. Siit võib hinnata, et ühe molaarne võiks olla kõrgeim praktiline piir, milleni lahuseid võiks gaasidena käsitleda.



Joonis 1. Galileo termomeeter.

Gaasi olekuparameetriteks on ruumala (määratud seda mahutava nõu ruumalaga), rõhk ja temperatuur. **Rõhk** on füüsikaline suurus, mida mõõdetakse pinnauhikule mõjuva jõuga. Rõhu ühikuks on  $N/m^2 = \text{Pascal (Pa)}$ . Gaasi rõhk tuleneb sellest, et molekulid põrkuvad nõu seintelt tagasi, mõjutades sellega seinu, vastavalt Newtoni III seadusele. Temperatuur iseloomustab gaasi molekulide liikumise kineetilist energiat. Temperatuur on null kui molekulid on paigal ja see kasvab võrdeliselt molekulide kineetilise energia suurenemisega, s.t. võrdeliselt kiiruse ruuduga ( $E_k = mv^2/2$ ). Praktilisem on siiski mõelda, et molekulide liikumise kiirus kasvab ruutjuurega temperatuurist. Füüsikaliselt mõtestatud temperatuuri ühikuks on Kelvin (absoluutse temperatuuri kraadid, mille nullväärtus vastab energiale null). Kuid nagu mitmete teistegi füüsikasuuruste puhul, nii on ka temperatuuri puhul on ühikute süsteem ebajärjekindel, temperatuur ei võrdu mitte 1 K siis, kui molekulide kineetiline energia on üks J. Temperatuur ja selle ühik võeti tarvitusele ammu enne seda kui mõisteti, et see suurus väljendab molekulide translatoorse liikumise kineetilist energiat. Niisamuti leiti ka seosed gaasi temperatuuri, rõhu ja ruumala vahel kõigepealt empiirilisel ja alles hiljem anti neile molekulaar-kineetiline seletus.

## Temperatuuri seos molekulide kineetilise energiaga

Iga molekuli tagasipõrkumisel risti seinaga avaldab seinale jõudu ja tema liikumise hulk (impulss) muutub suuruselt  $mv$  suuruselt  $-mv$ , seega  $2mv$  võrra.  $\Delta(mv) = 2mv$

Rakendades Newtoni teist seadust ( $f\Delta t = \Delta mv$ ) ja arvestades, et 1/3 molekulidest liigub iga seinu suunas risti, saab näidata, et seinale avaldatav rõhk on:

$$p = \frac{2}{3} n_0 \frac{mv^2}{2}$$

kus  $n_0$  on on molekulide arv ruumalaühikus ja  $v^2$  on molekulide kiiruste ruutude keskvärtus  
Gaasi rõhk on võrdeline molekulide tihedusega ruumalaühikus ja ühe molekuli keskmise kineetilise energiaga.

Kui võtame molekulide arvuks ühe mooli ehk  $n = N_a$ , siis on nõu ruumala võrdne mooli ruumalaga  $V_0$  ja selle rõhk on seotud temperatuuriga olekuvõrrandi kaudu:

$$pV_0 = \frac{2}{3} N_a \frac{mv^2}{2} = RT$$

Valemi keskmises liikmes on ühe mooli kõigi molekulide kineetiliste energiatega summa,  $E_k$

$$E_k = N_a \frac{mv^2}{2}$$

Seega võib kirjutada

$$E_k = \frac{3}{2} RT$$

Oleme leidnud väga tähtsa suuruse, **ühe mooli gaasi molekulide keskmise kineetilise energia sõltuvalt temperatuurist.** Tuletatud seos on õige kerakujuliste molekulide jaoks, mis liiguvad ainult translatoorselt, kuid ei sisalda võnke- ega pöörlemisenergiat. Tegur 3/2 tuleneb sellest, et **iga teljesuunaline liikumise komponent kannab energiat RT/2.** Kaheaatomsetes molekulides võivad aatomid (lisaks molekuli translatoorsele liikumisele) veel omavahel võnkuda ja tiirelda. Need kas viimast liikumisvõimalust kannavad ka kumbki sellesama hulga energiat,  $RT/2$ , ja kaheaatomse molekuli gaasi mooli koguenergia on seega  $5/2RT$ . Niisugust liikumisvõimaluste arvu nimetatakse molekulide vabadusastmete arvuks ja see määrab, kui palju energiat tuleb kokku kulutada gaasi temperatuuri tõstmiseks ühe kraadi võrra või kui palju seda vabaneb gaasi jahtumisel. Peame meeles suuruse  $RT$  väärtuse toatemperatuuril:

$$RT = 8.315 \cdot 293 = 2436 \text{ J/mol} = 2.436 \text{ kJ/mol} \quad ()$$

Selle suurusega tuleb võrrelda keemilistes reaktsioonides mooli kohta vabanevat või nõutavat energiat, et mõista nende kulgemise võimalikkust. **Kui nõutav energia on võrreldav RT-ga, siis saab selle suure tõenäosusega molekulide soojusliikumise arvel keemiliseks energiaks muundada.**  $RT$  väärtus voltides on  $RT(V) = 2436/96480 = 0.0253V = 25.3 \text{ mV}$ . (Kus  $1.602 \cdot 10^{-19} \cdot 6.023 \cdot 10^{23} = 96480 \text{ J mol}^{-1}V^{-1}$ ). Bioloogiliselt tähtsad potentsiaalide vahed raku- ja mitokondrite membraanidel on 50-150 mV, seega 2 kuni 6RT

Võrdleme  $RT$  veel valguse kvandi energiaga. Punase kvandi energia oli 1.8 eV, seega kukkuks elektron punast kvanti kiirates 1.8V võrra. Punase valguse lainepikkus on 680 nm.  $RT$  (=25.3 mV) moodustab ainult 1.4% punase kvandi energiast.  $RT$  võrra erinev energia väljenduks lainepikkuse muutusena 1.4% võrra ehk 9.6 nm võrra. Kuna keskmiselt nii suur energia on toatemperatuuril pidevalt olemas ja kandub orbitaalidele üle molekulide põrgetes, siis ei saagi aatomid (molekulid) kiirata enam kindlat lainepikkust vaid ribade laiuks kujuneb keskmiselt ca 10 nm.

Kuigi tuletasime temperatuuri ja molekulide liikumise kineetilise energia vahelise seose gaaside jaoks, on **temperatuuride tasakaalu korral energiad vabadusastme kohta võrdsed ka vedelikes ja tahketes kehaes**. Molekulide vabadusastmete arv gaasides, vedelikes ja tahkestes on aga erinev.

## Temperatuuri mõõtmine.

Temperatuuri mõõtmiseks on vaja mõõtevahendit, mille abil saaks arvuliselt väljendada temperatuuri väärtust mingites kokkulepitud mõõtühikutes. **Temperatuuri mõõtmine on alati kaudne mõõtmine.** Kuna pole võimalik mõõta aine osakeste liikumise kiirust, tuleb temperatuuri mõõtmiseks mõõta teisi aine omadusi, mis sõltuvad temperatuurist ja mida on

võimalik mõõta, nagu näiteks maht, rõhk, takistus, lineaarmõõt, elektromotoorjõud jne. See füüsikaline omadus peab olema mõõdetav korduvalt erinevates tingimustes ja reprodutseeritav samades tingimustes. Lisaks on vaja kokku leppida temperatuuri etalonis ja skaala reeperpunktides.

Tuntud on gaaside, vedelike ja tahkete kehade omadus paisuda sõltuvalt temperatuurist: mida suurem on temperatuur, seda suurem on ruumala (vesi on erand!).

Esimeses Galileo Galilei poolt 1595.a. lejutatud ja kasutuselevõetud termoskoobis paisus klaaskeras olnud gaas (vt. Joonis 1. juhendi alguses). Soojenedes gaas paisus ja lükkas alla kapillaaris rippuva veesamba, jahtudes gaas tõmbas kokku ja veesammas liikus ülespoole.

1694 a. – Itaallane K. Renaldini gradueerib termoskoobi jää sulamise (0°) ja vee keemise (100°) järgi.

1742 a. – Rootslase A.Celsiuse skaalal jää sulamisele vastas 100°, vee keemisele 0°(!) Sellel ajal olid käigus ikka veel Galileo gaastermomeetrid, kuid kapillaar on keeratud spiraali, ja neid nimetatakse Firenze termomeetriteks (Joonis 2.)

1750 a. - Rootsi astronoom M. Štrömer muutis Celsiuse skaala tänapäevaseks: jää sulas 0° juures ja vesi kees 100° juures.

1714 a. – Sakslane G.D. Fahrenheit valmistas vedelikuga, elavhõbedaga, täidetud termomeetri (300 aastane originaal joonisel) skaalaga 0°F = - 17.9°C, 96°F = keha temperatuur.

1730. a. – R. Reamur kasutas Fahrenheiti-tüüpi termomeetrites piiritust. Tema termomeetritel 0°R = 0°C jää sulamine, 80°R = 100°C vee keemine.

1848. a. – W.Thomson ehk lord Kelvin tõi sisse termodünaamilise temperatuuri (T) mõiste ja skaala, kus 0 K (ei kasutata kraadi märki) nimetatakse absoluutseks nulliks ja temperatuur on alati positiivne.

**Vedeliktermomeetrites** kasutatakse vedeliku soojuspaisumist. Reservuaaris oleva vedeliku ruumala muutus tehakse hästi nähtavaks peenes kapillaris. Sõltuvalt vedeliku omadustest on termomeetrite tööpiirkonnad erinevad:

Elavhobetermomeeter	-30°C	kuni	+550°C
Etanooltermomeeter	-65°C	kuni	+65°
Toluooltermomeeter	0°C	kuni	-90°C
Pentaantermomeeter	+20°C	kuni	-180°C.

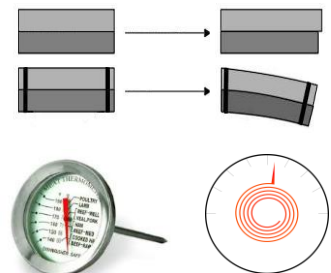


Joonis 2. Firenze termomeetrid.

**Bimetalltermomeetrite** töö põhineb tahkete kehade soojuspaisumisel. Nad on suhteliselt lihtsad, odavad ja töökindlad.

Kaks võimalikult erineva soojuspaisumise teguriga metalli ühendatakse (sulatakse) kokku üheks (sageli spiraali keeratud) plaadiks. Soojenedes üks metall paisub vähe, teine aga muudab oma pikkust märgatavalt ja sellega painutab plaadi kõveraks ning liigutab osutit (Joonis 3.).

Paindudes bimetallplaat saab sisse/välja lülitada elektrilisi kontakte. Seda kasutatakse kaitsmetes, termostaatides, triikraudades, praeahjudes, elektrikannudes, elektriradiaatorites jne.



Joonis 3. Bimetall termomeetrid.

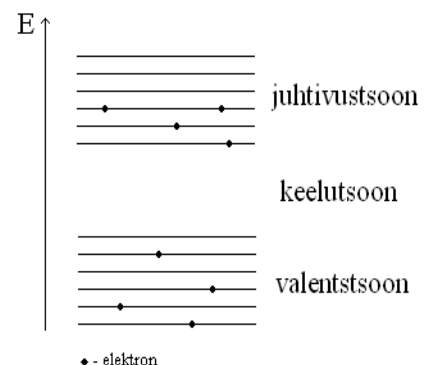
### Elektriliste omaduste sõltuvus temperatuurist.

Temperatuurist sõltub metallide ja pooljuhtide elektrijuhtivus, metallide ühenduskohtade kontaktpinge. Tuletame meelde miks erinevad omavahel metallide, pooljuhude ja dielektrikute elektrilised omadused.

### Energiatsoonid (Joonis 4.)

[http://fysika.onepagefree.com/files/Energiatasemed\\_tahkistes%5B1%5D.pdf](http://fysika.onepagefree.com/files/Energiatasemed_tahkistes%5B1%5D.pdf)

Kristallides on aatomid või ioonid paigutatud korrapärase ruumvõrena. Naaberaatomite välised elektronkatted mõjutavad üksteist. Selle tulemuseks on, et aatomite väliskihi elektronide ehk valentselektronide energiatasemed muunduvad mitme elektronvoldi laiusteks energiatsoonideks (1eV = 1,6 10<sup>-19</sup>J). Tahkistes tekivad ühistatud elektronid, mis kuuluvad kogu kristallile. Ka tsoonid on ühised kogu kristallile. Energiatsoonis on alatasemete energiatega vahesuurusjärgus 10<sup>-22</sup> eV, st üliväike ning elektronide siirdumine ühelt alatasemelt teisele on lihtne kogu



Joonis 4. Energiatsoonid

energiatsoonid ulatuses. Eristatakse lubatud energiatsone ja keelutsoone. Lubatud tsoonid saavad elektronid olla, aga keelutsoonis mitte. Lubatud tsoonid on lahutatud omavahel keelutsoonidega. Probleem on selles, kas elektronil on piisavalt energiat, et keelutsoonist üle hüppata ühest lubatud tsoonist teise. Selle põhjal eristatakse metalle, pooljuhte ja dielektrikuid.

**Metallides** on valentsielektronide energiatsioon vaid osaliselt elektronide poolt hõivatud. Valents- ja juhtivustsoon võivad osaliselt kattuda, keelutsoon puudub. Vabade tasemete olemasolu tõttu saavad elektronid tõusta tsooni hõivamata ossa, võttes elektrivoolu põhjustavalt elektriväljalt lisaenergiat. Elektronid saavad liikuda ja seetõttu ongi metallid head elektrijuhid.

**Dielektrikutes** ehk isolatorites on valentsielektronide energiatsioon elektronidega täielikult hõivatud. Elektronidel puudub liikumisvabadus, sest pole vabu naabertasemeid. Järgmine lubatud energiatsioon paikneb lootusetult laia (kuni 10 eV) keelutsooni taga. Elektrivoolu ei saa tekkida.

**Pooljuhtides** on valentsitsoon küll elektronidega täielikult hõivatud, kuid keelutsoon on palju kitsam (1-2 eV) kui dielektrikutes. Elektronid suudavad minna valentsitsoonist järgmisel lubatud tsooni ehk juhtivustsooni, jättes valentsitsooni maha täitmata elektronseisundeid ehk auke, mis käituvad nagu positiivse laenguga osakesed, st võtavad ka osa elektrijuhtivusest. Paar elektron-auk võib pooljuhtis tekkida näiteks pealelangeva valguse footoni arvel. Sellest ka nimetus pooljuht, sest tema elektrijuhtivus on muudetav mingi välisteguri (valgus, temperatuur) mõjul.

Ainete elektrijuhtivust iseloomustatakse erijuhtivusega, mille määravad vabade laengukandjate kontsentratsioon ja nende liikuvus:

$$\sigma = e \cdot n \cdot b \quad (1)$$

kus  $e$  on laengu suurus,  $n$  – laengukandjate kontsentratsioon,  $b$  – liikuvus. Laengukandjate liikuvuseks nimetatakse kiirust, mille nad omandavad ühikulise tugevusega elektrivälja mõjul.

**Takistustermomeetrid** on andurid, mille elektriline takistus sõltub temperatuurist. Elektrijuhtidena kasutatakse **puhtaid metalle**, peamiselt **platinat (Pt)**, **vaske (Cu)** ja **nikklit (Ni)**. Mõõtmisteks vajaliku takistuse saab, mähkides väga peenest traadist (traadi läbimõõt tavaliselt 0,03...0,04 mm, võrdluseks – inimese juuksekarva läbimõõt on 0,06...0,1 mm) takistuskeha isolatsioonimaterjalist karkassile või alusele. Puhtast metallist valmistatud takistustermomeetrite takistus suureneb temperatuuri tõustes. **Temperatuuriga laengukandjate kontsentratsioon metallis ei muutu**, seetõttu määrab erijuhtivuse muutuse liikuvuse muutus. Temperatuuri tõustes kasvab aatomite võnkeamplituud ja kristallvõre ioonide kiirenenud soojusliikumine takistab elektronide suunatud liikumist. Takistuse sõltuvus temperatuurist ei ole päris lineaarne nikklit anduritel kuid Pt ja Cu andureid loetakse lineaarseteks laiemas temperatuuride vahemikus. Näiteks, vasest valmistatud traadi takistust temperatuuril  $t$  arvutatakse kui  $R_t = R_0(1 + a \cdot t)$ , kus  $R_0$  on takistus 0°C juures ja  $a = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ 1}^\circ\text{C}$ .

*Eriti huvilistele. Elektroniga metallis liigub soojusliku ergastuse tõttu kiirusega  $\sim 10^6$  m/s. Kuid see liikumine on täiesti kaootiline (vaba tee pikkus  $\sim 1$  nm). Kui traat ühendada pingesallikaga, siis mõjub elektronile pingesallika positiivse pooluse poole mõjuv jõud, mis on võrdne elektrivälja potentsiaali muutuse kiirusega juhtme pikkusühiku kohta (elektrivälja tugevusega), ja tekib elektronide ühesuunaline liikumise komponent.*

*Saab näidata, et elektronid liiguvad toatemperatuuril juhtmes edasi kiirusega kõigest  $\sim 0.05$  mm/s. See on eelkõige elektroni väga lühikese vaba tee pikkuse tulemus. Elektrisignaal aga levib läbi metalljuhtme peaaegu valguse kiirusega ( $\sim 10^8$  m/s).*

**Termistoriteks** nimetatakse **metallioksiididest** või **pooljuhtmaterjalidest** takistus-termomeetreid. Neil on suurem takistuse temperatuuritegur (2 ...10 %/K) kui metalltakisteil ning seega ka suurem tundlikkus, ent väiksem mõõtetäpsus ja stabiilsus. Pooljuhttermistorite takistus soojenemisel väheneb. Väga madalatel temperatuuridel pooljuhid nagu dielektrikud praktiliselt ei juhi elektrit. Elektronide arv, mis ergastatakse termiliselt juhtivustsooni, on määratud keelutsooni laiuse  $\Delta W$  ja temperatuuriga  $T$ . Mida laiem on keelutsoon, seda väiksem on antud temperatuuril tõenäosus, et valentsielektronid ergastatakse termiliselt mingile energiaolekule juhtivustsoonis. Tulemuseks on väike arv juhtivuselektrone ja madal

elektrijuhtivus. Erinevus pooljuhtide ja isolatorite vahel seisnebki vaid keelutsooni laiuses, pooljuhtidel on see kitsas ja isolatoritel suhteliselt lai. Kuid mida kõrgemaks tõuseb pooljuhi temperatuur, seda rohkem elektrone satub juhtivustsooni, rohkem auke jääb valentssooni ning elektrijuhtivus kasvab eksponentsiaalselt. Vabade elektronide ja aukude kontsentratsioon on arvatav Boltzmanni jaotuseadusest tuleneva valemiga:

$$n = p = N \cdot e^{\frac{-\Delta W}{2kT}} \quad (2)$$

kus  $p$  on aukude kontsentratsioon,  $n$  – elektronide kontsentratsioon,  $N$  – aatomite kontsentratsioon,  $T$  – absoluutne temperatuur,  $k$  – Boltzmanni konstant ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K) ja  $\Delta W/2$  – ühe laengukandja vabastamiseks vajalik energia, sest  $\Delta W$  kulutamisel tekib kaks laengukandjat: elektron ja auk.

Kasutades valemit (1) avaldame pooljuhi erijuhtivust:

$$\sigma = e \cdot n \cdot (b_+ + b_-) = e \cdot (b_+ + b_-) \cdot e^{\frac{-\Delta W}{2kT}} = \sigma_\infty \cdot e^{\frac{-\Delta W}{2kT}} \quad (3)$$

kus  $b_+$  ja  $b_-$  on vastavalt augu ja elektroni liikuvus,  $e$  – elementaarlaeng,  $\sigma_\infty$  – erijuhtivus temperatuuril, mille juures loetakse kõik valentssooni elektronid juhtivustsoonis olevateks. Kuna  $\sigma \sim 1/R$ , siis takistuse temperatuurisõltuvus avaldub valemiga:

$$R = R_\infty \cdot e^{\frac{\Delta W}{2kT}} \quad (4)$$

Kus  $R_\infty$  on võrdetegur. Logaritmidest seost (4) saame:

$$\ln R = \ln R_\infty + \frac{\Delta W}{2kT} \quad (5)$$

Valem (5) kujutab sirge võrrandi (võrdle:  $y = b + ax$ ), kus funktsioon  $y = \ln R$ , argument  $x = 1/T$ , sirge tõus  $a = \Delta W/2k$  ja vaba liige  $b = \ln R_\infty$ . Järelikult teljestikus, kus ordinaatteljel on  $\ln R$  väärtused ja abstsissiteljel  $1/T$  väärtused, on pooljuhi takistuse temperatuurisõltuvuse graafikuks sirge tõusuga  $\Delta W/2k$ . Teades tõusu suurust, on **võimalik arvutada pooljuhi keelutsooni laiust  $\Delta W$** . Pooljuhtide keelutsooni laiused (elektronvoltides) on näiteks: 1.1 (Si ja B), 1.2 (As), 1.5 (P), 1.7 (Se), 0.36 (Te), 0.72 (Ge). Lisandjuhtivusega pooljuhtide keelutsoonid on palju kitsamad: 0.054 (Si+As) ja 0.08 (Si+B).

*Eriti huvilistele. Keemilised reaktsioonid on tavaliselt väga temperatuuritundlikud. See tundlikkus tuleneb kahest faktorist. Esiteks keskmise kineetilise energia kaudu, mis suurendab kiirete molekulide suhtarvu ja teiselt poolt põrgete sageduse kaudu. Siiski, see viimane annab suhteliselt väikese efekti ja peamine on eksponenttegur. Seetõttu esitatakse keemiliste reaktsioonide temperatuurisõltuvuste uurimisel need tavaliselt teljestikus logaritmi reaktsiooni kiirusest (y-telg) vs  $1/RT(x\text{-telg})$ , millises esituses sõltuvus kujuneb lähedaseks sirgele tõusuga  $-E_a$ , mis on keemilise reaktsiooni aktivatsioonienergia. Selline esitus on tuntud kui **Arrheniuse esitus või graafik**. Muide, Arrhenius esitas oma kiiruskonstandi teooria doktoritöös, mis vaevu läbis kaitsmisprotseduuri. Hiljem omistati talle sama töö eest Nobeli preemia.*

Termistorite mõõtmised saavad olla päris väikesed (<1mm), nende takistus on suur (kΩ kuni MΩ) võrreldes ühendusjuhtmetega. Tänu oma tundlikusele ja mõõtmetele on termistorid leidnud väga laia kasutust tööstuses ja ka koduses majapidamises.

Termistore kasutatamist automaatikas võib liigitada termistori soojenemispõhjuse järgi:

- Termistor soojeneb ainult ümbritseva keskkonna toimel (sest seda läbiv vool on väga väike) ja mõõdab keskkonna temperatuuri.

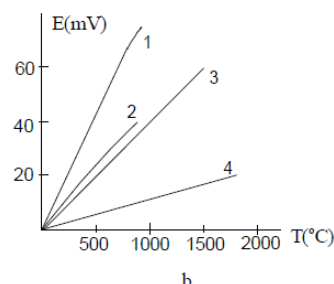
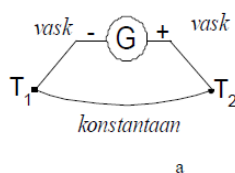
- Termistor soojeneb teda läbiva voolu toimetel. Külvalt on termistori takistus suur, kuid koormusvoolu mõjul väheneb takistus kiiresti mitmekümnekordselt. Nii saab termistorit kasutada elektritarviti sisselülitumisvoolu piiramiseks:
- Kasutatakse termistori soojuslikku tasakaalu, kus ta soojeneb nii keskkonna kui ka läbiva voolu toimetel. See režiim leiab kasutust tuletõrjeautomaatikas.

**Termopaaride** töö põhineb 1821. a eesti-saksa teadlase Thomas Johann Seebecki avastatud termoelektrilisel efektil, mis seisneb selles, et erinevatest juhtivatest materjalidest elektriahelas tekib elektromotoorjõud, kui materjalide ühenduskohad hoitakse eri temperatuuridel.

Termopaari töö põhimõtteskeem on toodud joonisel a). Kui kaks ühenduskohta on asetatud erineva temperatuuriga keskkondadesse, tekitatakse genereeritakse ahelas vool. Elektromotoorjõud sõltub temperatuuride vahest. Mingis fikseeritud piirkonnas võib seda sõltuvust lugeda ligikaudu lineaarseks – see ongi antud termopaari tööpiirkonnaks. Joonisel b) on toodud erinevatele termopaaridele iseloomulikud elektromotoorjõu temperatuuri sõltuvused.

Joonis 5. Termopaari ehitus. Termopaaride genereeritud elektromotoorjõu sõltuvused temperatuurist:

- 1 kromell-konstantaan,
- 2 raud-konstantaan,
- 3 kromell-alumell,
- 4 plaatina-plaatina+10% roodiumi.

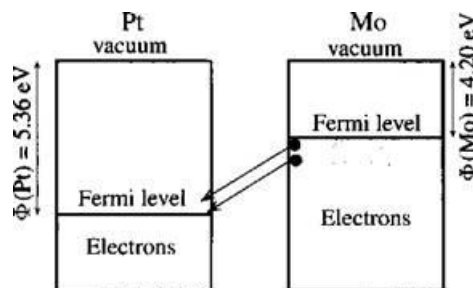


Termopaarides kasutatavad metallid on raud, plaatina, roodium, reenum, volfram, vask, metallisulamid on näiteks:

- kromell – enamus Ni, 8-10% Cr, lisanditena Co, Fe jm;
- alumell – enamus Ni, 1,8-2,5% Al, 1,8-2,2% Mn, 0,85-2,0% Si;
- konstantaan – 39-41% Ni, 1-2% Mn, 0,5% Fe, 0,1% Cr, ülejäänud on Cu.
- kopell - vase ja nikli sulam (56%Cu + 44%Ni);

Et seletada termopinge tekkimist pöördume jälle teadmiste poole energiatsoonidest. Metallide kõige ülemist elektronidega täidetud energianivood temperatuuril  $T=0$  K nimetatakse **Fermi nivooks**. Fermi nivoo energia positiivsel temperatuuril defineeritakse kui seisundi energia, mille asustamise tõenäosus on  $\frac{1}{2}$ . Asi on selles, et just Fermi nivoo lähedased elektronid ergastuvad soojuslikult kõige kergemini. Energeetiliselt on vastava kihi paksus kuni  $4kT=0.1$  eV, mis on kitsas võrreldes Fermi energiaga 2-3 eV. Need termiliselt ergastatud elektronid osalevadki elektrijuhtivuses.

Fermi nivoo on elektronide keemiline potentsiaal. See tähendab, et kui kaks erinevat (erineva Fermi nivooaga) metalli kokku panna, siis kõrgema potentsiaaliga elektronid liiguvad madalama poole ja metallide vahel tekib nn. kontaktpotentsiaal, mis on võrdne Fermi nivooode energiatega vahega.



Joonis 6. Metallide vahel tekiv kontaktpotentsiaal on võrdne Fermi nivooode energiatega vahega.

$$U = \frac{F_1 - F_2}{e} \quad (6)$$

kus  $F$  on Fermi energiad ja  $e$  – elektroni laeng. Metallide Fermi nivooode väärtused on näiteks 5.5 eV (Ag), 7.1 eV (Cu), 3.2 eV (Na). Seega õhukeses kontakti kihis tekib lokaalne elektriväli. Kui termopaar koosneb ainult kahest traadist ja nende mõlemad otsad on omavahel ühendatud, siis samasuunaline elektriväli tekib mõlemas ühenduskohas ja elektrivoolu ei teki.

Kui aga eri metallide ühenduskohtasid hoida erinevatel temperatuuridel, siis tekib kõrgema temperatuuriga kohas suurem kontaktpinge kui madalama temperatuuriga kohas (kuna Fermi energia sõltub temperatuurist) ja ahelas tekib kuni 10 mV elektrimootorjõud. Siit järeldub, et



**termopaariga saab mõõta ainult temperatuuride vahet** ja termopaari korral räägime kahest jootekohast. Neid valmistatakse kokku keevitades, jootes või lihtsalt pressides. Üks nendest, **tööjootekoht** (nimetatakse ka **kuumjootekohaks**) paigutatakse keskkonda, mille temperatuuri mõõdetakse, teine jootekoht aga - **võrdlusjootekoht** (nimetatakse ka **külmjootekohaks**), on vaja hoida stabiilse temperatuuriga keskkonnas - kõige sagedamini on selleks temperatuuriks mõõteriista ümbritseva õhu või sulava lume temperatuur 0°C.

### **Praktiline töö 1. Põleva elektripirni hõõgniidi takistuse arvutamine.**

- Mõõtke testriga elektripirni volframist hõõgniidi takistus toatemperatuuril.  
 - Leidke ja pange kirja elektripirnile klaaskestale märgitud pirni võimsus P.  
 - Põleva pirni hõõgniidi temperatuur on 2500-2700°C. Pinge all oleva elektripirni takistust me niiviisi testriga mõõta ei saa. Kuid seda on võimalik arvutada. Teame, et hõõgniiti läbivat voolu saab arvutada Ohmi seadusest:  $I = U/R$  ja põlemisel tarbib lamp elektrivõimsust  $P = U \cdot I$ . Teades võrgupinge (230V) ja lambi võimsuse väärtusi arvutage hõõgniidi takistus lambi põlemise temperatuuril.

#### **Küsimused kirjalikuks vastamiseks**

1. Kas soe metall juhib elektrit paremini või halvemini kui külm? Miks, põhjendage vastus.
2. Miks hõõgniidiga elektripirnis sageli põlevad läbi just sisselülitamise momendil?

### **Praktiline töö 2. Elektriliste termomeetrite – termopaari ja termistori kalibreerimine.**

Kalibreerimine on seoste leidmine etaloni abil realiseeritud suuruse ja mõõtevahendi esitatud väärtuse vahel. Kuid ka kalibreeritud mõõduristaga saab mõõta valesti. Pidage meeles, et **Iga termomeeter näitab vaid iseenda temperatuuri. Seega katse tegija peab kindlustama termomeetri ja uuritava keskkonna soojusliku tasakaalu.**

Termopaari saab valmistada ise või kasutada olemasolevaid. Termopaari valmistamiseks kasutage 2 traati (~20-25 cm) vasest ja 1 traat konstantaanist. Puhastage traatide otsad lakist ja jootke kokku vastavalt joonisele 5a. Vabad vasktraatide otsad peavad olema ka lakist puhastatud!

1. Ühendage termopaari vabad otsad multimeetriga (kontaktid COM ja V). **Valige alalisvoolu pinge mõõtmise mõõtepiirkond V (20 mV).**
2. Termopaari **võrdlusjootekoht** kinnitage kummirõngaga klaastermomeetri elavhõbedareservuaari külge ja asetage jää/veevanni. **Tööjootekoht** kinnitage termomeetri külge ja asetage elektripliidil olevasse anumasse. Termomeetrite alumine osa koos jootekohtadega peab olema üleni vees ning anuma põhjast ja seintest eemal.
3. Ühendage termistori juhtmed teise multimeetriga (kontaktid COM ja  $\Omega$ ) ja valige takistuse mõõtmise piirkond (200 k $\Omega$  vastavalt oma termistori takistusele).
4. Kinnitage klaaskestas termistor termomeetri külge koos termopaari tööjootekohaga. (klaaskest olgu vees osaliselt, juhtmed jäägu kuivaks!). Ettevaatust - termistori klaaskest ja väljuvad vaskjuhtmed murduvad kergesti!
5. Lülitage pliiit sisse ja protokollige termomeetrite ja multimeetrite samaaegsed lugemid (näiteks, 5°C tagant kuni 90°C). Kandke andmed tabelisse.

„võrdlus“ t°C	„töö“ t°C	$\Delta t$ °C	$ U $ , mV	Termistori R, $\Omega$	$1/(273 + \text{töö } t)$ , 1/K	Ln R

6. Jää/lume olemasolul mõõtki termistori takistus ka madalatel/negatiivsetel temperatuuridel.
7. Kasutage kalibreeritud termomeetreid oma sõrmede/peopesa temperatuuride mõõtmiseks. Termopaaril jätke üks jootekoht jäävanni ja teist kasutage andurina. Vastavalt mõõdetud pingele või takistusele saate temperatuuri väärtuse tabelist või graafikust. Märkige protokollis mis oli objektiks ja mis oli objekti temperatuur.

## Graafikud ja arvutused

Esitage tulemused järgmiste graafikutena (vt. Näidisaruanne):

1. **Termopinge** ( $|U|$ ,  $mV$ ) **sõltuvus temperatuuride vahel termopaari jootekohtade vahel** ( $\Delta t^{\circ}C$ ). x-teljel – jootekohtade temperatuuride erinevus  $|\Delta t^{\circ}C|$ , y-teljel – termopinge **absoluutväärtus**  $|U|$ ,  $mV$  (sest pinge märk, ehk voolusuund muutub otste vahetamisega). Lähendage tulemused sirgega.
2. **Termistori (pooljuhi) takistuse** ( $R$ ,  $\Omega$ ) **sõltuvus temperatuurist** ( $t^{\circ}C$ ). (x-teljel – ”töö” temperatuur ja y-teljel – takistus). Lähendage tulemused exp - funktsiooniga.
3. **Termistori (pooljuhi) takistuse sõltuvus temperatuurist Arrheniuse koordinaatides** (x-teljel –  $1/T$ , kus  $T$  on ”töö” temperatuur **KELVINITES** ja y-teljel –  $\ln R$ ). Lähendage tulemused sirgega.
4. Kirjutage välja sirge võrrand. Sirge tõus ( $a$  väärtus võrrandis  $y=ax+b$ ) võrdub  $\Delta W/2k$ , kus  $\Delta W$  on keelutsooni laius ja  $k$ – Boltzmanni konstant ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K) vt. valem (5). Arvutage keelutsooni laius  $\Delta W$ , teisendage tulemus elektronvoltidesse ja võrrelge tulemus teadaolevate andmetega  $\Delta W$  (eV) kohta: 1.1 (Si ja B), 1.2 (As), 1.5 (P), 1.7 (Se), 0.36 (Te), 0.72 (Ge). Missugusest metallist võiks olla Teie kasutatud termistor? (väärtused ei pea täpselt kokku langema).  
**Meeldetuletus  $1\text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19}\text{ J}$ .**

Kasutatud allikad:

1. A. Laisk. Loengute konspekt Bioenergeetika.
2. TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL, FÜÜSIKAINSTITUUT
3. TAKISTUSE TEMPERAATUURISÕLTUVUS.  
[http://www.ttu.ee/public/m/Marek\\_Vilipuu/FI\\_doks/FII/JUHENDID/6. TAKISTUSE TEMPERAATUURISOLTUVUS.pdf](http://www.ttu.ee/public/m/Marek_Vilipuu/FI_doks/FII/JUHENDID/6._TAKISTUSE_TEMPERAATUURISOLTUVUS.pdf)
4. Metallide ja pooljuhtide takistuse temperatuurisõltuvus (rus)  
[http://portal.main.tpu.ru:7777/departments/kafedra/tief/method\\_work/method\\_work2/lab2/LabsElect/e05.pdf](http://portal.main.tpu.ru:7777/departments/kafedra/tief/method_work/method_work2/lab2/LabsElect/e05.pdf)