4. HŐMÉRSÉKLETMÉRÉS

4.1. Elmélet

4.1.1. Hőmérséklet, hőmérsékletmérés, hőmérők

A hőmérséklet a testek egyik állapothatározója. A hőmérséklet a test olyan sajátossága, ami meghatározza, hogy a test termikus egyensúlyban van-e más testekkel. Ezen alapszik a hőmérsékletmérés technikai kivitele.
Kiválasztunk egy testet, amit hőmérőnek nevezzünk; kiválasztjuk ennek egy mérhető sajátosságát, és kölcsönösen egyértelmű megfeleltetést hozunk létre a sajátosság és a hőmérséklet értékei között.
A hőmérséklet mérési utasításának meghatározása három önkényes tényezőt tartalmaz:
- a hőmérőként használt test,
- a hőmérséklet méréséhez felhasznált sajátosság,
- a hőmérsékleti skála.

Kívánatos, hogy ezeket úgy válasszuk meg, hogy könnyen reprodukálhatók legyenek.

Az egyes hőmérőket a következőképpen csoportosíthatjuk:

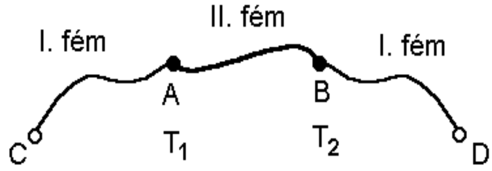
A) a mérendő testtel közvetlen érintkezésbe nem kerülő hőmérők.
Pirométerek: A testből emittált hőmérsékleti sugárzás hőmérsékletfüggésén alapuló hőmérők.

B) a mérendő testtel közvetlen érintkezésbe kerülő hőmérők (kontakthőmérők);

B/1.) Mechanikus elven működő kontakthőmérők
– *Fémrudas hőmérő*. Egy fémrúd lineáris hőtágulását használja fel.
– *Bimetál*. Két összeerősített, különböző hőtágulású fémrétegből áll. A hőmérsékletváltozás hatására a (gyakran spirális alakú) rendszerben hajlítófeszültség keletkezik, ezt a feszültséget használjuk hőmérsékletmérésre.
– *Folyadéktöltésű üveghőmérők.* A folyadékok térfogati hőtágulásán alapulnak. Ilyenek például a belső-skálás hőmérő, a bothőmérő (utóbbinál a skálát kívülről karcolják az üvegre), a hőmérsékletváltozások nagy pontosságú (0,001 K) mérésére használható Beckmann-hőmérő, valamint az elektromos berendezések (laboratóriumi termosztátok) vezérlésére használatos higanyos kontakthőmérő.
– *Folyadéknyomásos rugós hőmérő*. Egy merülőcsőből, összekötő vezetékből, és egy rugalmas fém érzékelőtartályból (Bourdon-cső) áll. Az egész rendszer folyadékkal van töltve. Növekvő hőmérsékletnél nő a folyadék nyomása, s ezt a nyomásváltozást használjuk fel.
– *Gőznyomásos hőmérő*. Hasonló az előző típushoz, de nincs teljesen megtöltve folyadékkal. Itt a folyadék fölötti telített gőz nyomásának hőmérsékletfüggését használjuk fel.
– A tökéletes gáz állapotegyenlete szerint a konstans térfogatú gáz nyomása arányos a termodinamikai hőmérséklettel. A héliumtöltésű *gázhőmérők* jól megközelítik ezt a viselkedést.

B/2.) Elektromos elven működő kontakthőmérők
– ***Termoelemek***. Ha két különböző fémet fémesen összeérintkeztetünk, akkor a két fém között elektromos potenciálkülönbség (*kontaktpotenciál*) lép fel. E kontaktpotenciálok összege zárt vezetőhurokban zérus, ha a csatlakozási pontok azonos hőmérsékletűek. Ha viszont a csatlakozási pontok között hőmérsékletkülönbség van, akkor a körben (általában egy nem zérus) *termoelektromotoros erő* lép fel.

Tekintsük a 4.1. ábrán lévő vázlatos elrendezést a termoelemről:



4.1. ábra. A termoelem sémája

A két különböző (I. és II.) fém két pontban (**A, B**) csatlakozik egymáshoz. A **C** és **D** szakadási pontok között mérhető feszültség a *termofeszültség*. Ha a **C** és **D** között zárjuk a kört, termoáram lép fel. A termofeszültség (ε) függ a két fém anyagi minőségétől és függ a csatlakozási pontok hőmérsékletétől:

$$\varepsilon = f\,(T_A\,,T_B\,) \qquad (1)$$

Ennek a függvénynek olyannak kell lennie, hogy $T_A = T_B$ esetén $\varepsilon = 0$ legyen. Ellenkező esetben a termoelem alkalmas volna egy egyetlen hőtartályos hőerőgép létrehozására, ami azonban a termodinamika II. főtétele szerint lehetetlen.

Első közelítésben ε arányos a hőmérsékletkülönbséggel:

$$\boxed{\varepsilon = a\,(T_A - T_B) = a\,T_{AB}\ , \qquad \text{itt } T_{AB} = T_A - T_B} \qquad (2)$$

A második közelítés T_{AB} -ben kvadratikus tagot is tartalmaz:

$$\varepsilon = a\,T_{AB} + b\,(T_{AB})^2 \qquad (3)$$

A sorfejtés együtthatói természetesen függenek a T_A referenciahőmérséklettől.

Rendszerint már a (2) lineáris alak is elég széles hőmérséklet-tartományban igen jó közelítést ad.

A termoelemek ***érzékenységét*** a

$$W = \left.\frac{\partial\,\varepsilon}{\partial\,T_{AB}}\right|_{T_A} \qquad (4)$$

kifejezéssel definiáljuk.

Az érzékenység az előbb mondottak szerint széles tartományban független a hőmérséklettől.

A (2) lineáris közelítéssel élve $\boxed{\text{a termoelem érzékenysége } W = a}$.

A termoelemek tehetetlensége (ld. 4.1.2.) kicsi.

A 4.1. ábrán lévő elrendezés egy leegyszerűsített, de lényegileg helyes képe a valóságos termoelemeknek. Ezeknél ugyanis rendszerint egy harmadik fém is van az áramkörben (pl. a mérőműszerben). Ha azonban ennek a vezetődarabnak a csatlakozási pontjai azonos hőmérsékletűek, akkor a járulékos kontaktpotenciálok semlegesítik egymást. Ugyanezen okok miatt a termofeszültség változatlan marad, ha a fémes érintkezést hegesztés helyett forrasztással hozzuk létre.

– ***Ellenálláshőmérők***. Az elektromos ellenállás függ a hőmérséklettől. Az ellenállás hőmérsékleti koefficiense, β, arányossági tényező a relatív ellenállásváltozás és a hőmérsékletváltozás között:

$$\frac{\Delta\,R}{R_0} = \beta\,(T - T_0) \qquad (5)$$

Átrendezve, ha T_0 hőmérsékleten R_0 az ellenállás, akkor T hőmérsékleten:

$$\boxed{R = R_0 + \Delta R = R_0\,(\,1 + \beta\,(T - T_0)\,)} \qquad (6)$$

Az (5) arányosság persze csak közelítés: β valójában függ a hőmérséklettől. Ilyenkor is beszélhetünk viszont egy hőfoktartományon belül érvényes közepes β-ról.

A fém ellenálláshőmérők anyaga rendszerint Ni- vagy Pt-huzal. Szabvány szerint az ellenállásuk 0 °C-on 100 Ω (vagy 1000 Ω).
Az ellenálláshőmérők tehetetlensége (ld. 4.1.2.) viszonylag nagy.

Félvezetőből készített ellenálláshőmérő (*termisztor*) esetén az ellenállás nemlineáris függvénye a hőmérsékletnek, azaz a (6) összefüggés ekkor jóval szűkebb tartományban érvényes, mint a fémeknél. Egy adott hőmérsékleten ekkor is definiálhatjuk az ellenálláshőmérő érzékenységét differenciálisan: $\beta = \frac{1}{R}\frac{dR}{dT}$ (5a)

A termisztorok érzékenysége sokkal nagyobb, tehetetlenségük sokkal kisebb, mint a fém ellenálláshőmérőké.

4.1.2. A hőmérők tehetetlensége

<u>A hőmérők mindig a saját hőmérsékletüket mérik.</u> Amikor hőmérőt helyezünk egy rendszerbe, a rendszert megzavarjuk, tulajdonságait megváltoztatjuk azzal, hogy belehelyezzük a hőmérőt, ami más hőmérsékletű, mint a rendszer. Ahhoz, hogy a hőmérő felvegye a rendszer hőmérsékletét, szükséges bizonyos hőmennyiség, mert a hőmérőnek is van hőkapacitása.

A test hőkapacitásának az egységnyi hőmérsékletváltozáshoz szükséges hőmennyiséget nevezzük:

$C = \Delta Q / \Delta T$ (7)

[Mivel a hőcsere mértéke a folyamattól függ, ezért különböző folyamatokra a hőkapacitás értéke különböző lehet: gázoknál például ezért beszélünk izochor, izobár vagy egyéb kitüntetett folyamattípusokra vonatkozó hőkapacitásról.]

Homogén test hőkapacitása arányos a test tömegével, m-mel:

$C = c\, m$, (8)

ahol c az anyag fajhője. A fajhő függ a hőmérséklettől.

A hőmérő hőkapacitásának kicsinek kell lennie a rendszer hőkapacitásához képest ahhoz, hogy a rendszer állapota kevéssé változzon. A hőmérő kis hőkapacitása azért is kívánatos, mert ez teszi lehetővé, hogy a hőmérő hőmérséklete <u>minél hamarabb</u> a kívánt mértékben megközelítse a környezet hőmérsékletét. Ezt röviden úgy is kifejezhetjük, hogy az a kívánatos, minél kisebb legyen a hőmérő <u>tehetetlensége</u>.
A hőmérő tehetetlenségét az *időállandóval* ill. *felezési idővel* jellemezhetjük.

<u>Határozzuk meg, hogyan változik a test hőmérséklete az idővel, ha eltérő hőmérsékletű közegbe kerül!</u>

Tegyünk néhány egyszerűsítő feltételt:
- A test hőkapacitása (C) legyen a folyamat közben állandó.
- A test hőmérséklete a folyamat közben *időben* változik (T(t)), de a test egészére legyen azonos, *ne függjön a helytől*.
- A közeg hőmérséklete (T_k) legyen a folyamat közben állandó érték.
- A test és a közeg közötti hőátadási tényező (α) legyen a folyamat közben állandó.

[A hőátadási tényező arányossági tényező a J_q hőáramsűrűség és az a hőáramot létrehozó ΔT hőmérsékletkülönbség között: $J_q = \alpha\, \Delta T$.]

Ilyen feltételek mellett a (testből kifelé áramló) hőáram:

$I_q = J_q A = \alpha A (T - T_k)$,   ahol "A" a test felülete,

másrészt $I_q = \frac{dQ}{dt} = -C\frac{dT}{dt}$.

A fentiekből az alábbi differenciálegyenletet kapjuk:

$C \cdot \frac{dT}{dt} = -\alpha A (T - T_k)$, (10)

melynek általános megoldása:

$$\mathbf{T(t) - T_k = (T(0) - T_k) \cdot e^{-t/\tau}}$$ **Newton-féle hőátadási törvény** (11)

ahol

– T(t) a hőmérő hőmérséklete az idő függvényében;
– T(0) a hőmérő kezdeti hőmérséklete;
– T_k a közeg hőmérséklete;
– τ az <u>időállandó</u>: az az idő, ami alatt a test és környezete közötti kezdeti hőmérsékletkülönbség „e”-ed részére csökken.
$\tau = C/\alpha A$, tehát az időállandó (vagy karakterisztikus idő) annál nagyobb, minél nagyobb a test hőkapacitása (a tömeg és a fajhő szorzata), minél kisebb a hőcserénél számba jöhető felület és a hőátadási tényező.

Szokásos τ helyett a $t_{1/2}$ *felezési időt* is használni (mely alatt a test és környezete közötti hőmérséklet-különbség az eredeti felére csökken): $t_{1/2} = \tau \ln(2)$, (12)
mellyel a (11) egyenlet

$$T - T_k = (T(0) - T_k)\, 2^{-t/t_{1/2}} \qquad (13)$$

alakba írható. Hasonlóképpen definiálható harmadolási, stb. idő is.

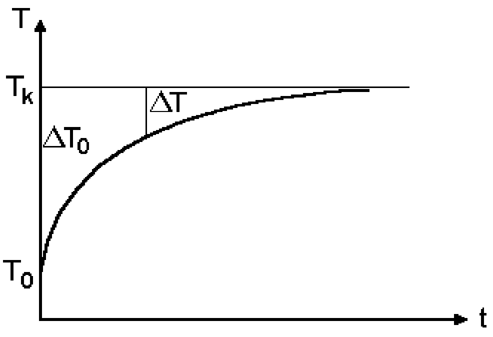
A $\Delta T = T(t) - T_k$ és $\Delta T_0 = T(0) - T_k$ jelölésekkel a Newton-féle hőátadási törvényt

$$\Delta T = \Delta T_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

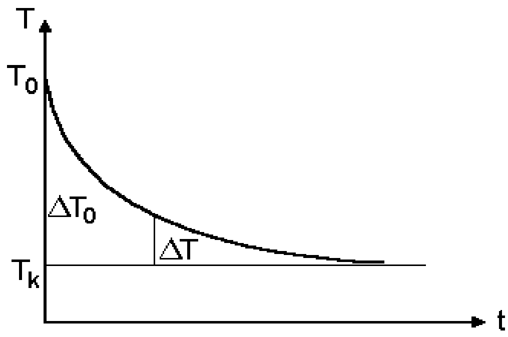
alakba írhatjuk.

Látható, hogy a ΔT hőmérsékletkülönbség exponenciálisan csökken, a $t \to \infty$ határesetben eltűnik:

$$\lim T(t) = T_k \qquad \text{ha} \quad t \to \infty$$



Felmelegedési görbe



Lehűlési görbe

4.2. Mérési feladatok

Eszközök
Pt ellenálláshőmérő, termosztált hőmérsékletű kerámiacső hőmérséklet-szabályozóval, univerzális műszer ellenállás- és feszültségmérésre, edény jeges vízzel, stopperóra, vas-konstantán termoelem,.
A méréshez használt termosztát egy 24 V-os egyenirányított tápfeszültségről működtetett, házilag összeállított berendezés, ami egy szűk cső belsejében termosztálja a hőmérsékletet. A termosztált hőmérséklet értéke egy potenciométerrel szabályozható.

4.2.1. Ellenálláshőmérő tehetetlenségének mérése
A mérés kezdetén a termosztátok hőmérsékletét (T_2) az oktató már beállította, és a csőbe helyezett ellenálláshőmérők is felvették a termosztát hőmérsékletét.
Először mérjük meg az ellenálláshőmérő ellenállását a termosztátban az univerzális műszerrel.

Ezután vegyük fel az ellenálláshőmérő lehűlési görbéjét a következőképpen: tegyük át a jeges vizes edénybe, és ugyanebben a pillanatban indítsuk el a stoppert. A kiosztott táblázat szerint kezdetben 5 s-os, 10 s-os, majd egyre hosszabb időközönként mérjük meg az ellenállást (R(t)), mindaddig, míg az ellenállás értéke már gyakorlatilag nem változik.
A T_1 viszonyítási hőmérsékletnek (a jeges víz hőmérsékletének) állandónak kell lennie a lehűlési görbe felvétele során. Ügyeljünk arra, hogy elég jég legyen az edényben, és időnként keverjük meg.
A lehűlési görbe felvétele után tegyük vissza az ellenálláshőmérőt a fűtött kerámiacsőbe (előtte a hőmérőt töröljük szárazra), és mérjük most meg a felmelegedési görbét.

A jegyzőkönyvben beadandó:
* Számoljuk ki a hőmérsékletet az ellenállás-értékekből a (6) képlet alapján:

$R(t) = R_0 (1 + \beta (T(t) - T_0))$, ahol $\beta = 0{,}00386$ 1/°C,
$T_0 = 0$ °C, és
R_0 a jeges vízben mért ellenállás.

Ebből a hőmérséklet $T(t) = \dfrac{R(t) - R_0}{\beta R_0}$.

* Grafikonon ábrázoljuk a mért felmelegedési és lehűlési görbét (azaz az idő függvényében az ellenálláshőmérő hőmérsékletét)!

A hőmérő **tehetetlenségét** a (11) képlet átalakításával határozzuk meg:

$$\ln |\Delta T| = \ln |\Delta T_0| - t/\tau.$$

Az itt szereplő ΔT, ΔT_0 hőfokkülönbséget a hőmérő környezetéhez viszonyítjuk, azaz

a lehűlési görbénél $\Delta T = T(t) - T_1$, a felmelegedési görbénél $\Delta T = T_2 - T(t)$.

* Ábrázoljuk |ln ΔT|-t az idő függvényében:
A számítás lerövidítése céljából ehhez a grafikonhoz csak 5 -célszerűen kiválasztott- mérési pontot használjunk fel. Először készítsünk új táblázatot erre az 5 pontra, ami tartalmazza t, ΔT, és ln ΔT értékét, majd ábrázoljuk.
* A grafikon pontjaihoz illesszünk egyenest *(szorgalmi feladat: a legkisebb négyzetek módszerével)*, és ebből számítsuk ki a hőmérő időállandóját, felmelegedésre és lehűlésre is!
[Megjegyzés: mivel az ellenálláshőmérő hőmérséklete és ellenállása lineárisan függenek egymástól, az időállandó számítható közvetlenül a mért ellenállásokból is.]

4.2.2. Mérés termoelemmel
A termoelem (porcelángyűrűkkel ellátott) melegpontját tegyük a termosztátba, a hidegpontot a jeges vízbe. Négy különböző hőmérsékleten (a négy termosztátban) mérjük meg a termofeszültséget (ε) az univerzális műszerrel.

A jegyzőkönyvben beadandó:
* Készítsünk táblázatot az összetartozó ε, $\Delta T = T - T_h$ értékekkel!
itt T_h a hidegpont hőmérséklete, jelen esetben $T_h = 0$ °C;
T az egyes termosztátok hőmérséklete, mely értékek kiszámolhatók az előző feladatban az ellenálláshőmérővel mért értékekből.
* Ábrázoljuk ε-t ΔT függvényében (kalibrációs görbe)!
* Becsüljük meg a mérési hibákat és jelöljük be a grafikonba is!
* Illesszünk egyenest a négy mérési ponthoz és határozzuk meg a termoelem érzékenységét a (2) lineáris közelítést alkalmazva!