4. HŐMÉRSÉKLETMÉRÉS

A gyakorlat célja: Egy nagy tehetetlenségű ellenálláshőmérővel végzett mérés segítségével megvizsgáljuk, hogyan veszi fel a hőmérő a mérni kívánt közeg hőmérsékletét. Emellett megismerkedünk a termoelemmel is, és az elméletben áttekintjük a különböző hőmérő-típusokat.

ELMÉLET

1. Hőmérséklet, hőmérsékletmérés, hőmérők

A hőmérséklet a testek egyik állapothatározója. A *hőmérséklet* a test olyan sajátossága, ami meghatározza, hogy a test *termikus egyensúly*ban van-e más testekkel. Ezen alapszik a hőmérsékletmérés technikai kivitele.

A hőmérséklet méréséhez kiválasztunk egy testet (amit hőmérőnek nevezünk), és kiválasztjuk ennek egy mérhető sajátosságát, aminek értékei kölcsönösen egyértelmű megfeleltethetőek a hőmérséklet értékeinek.

A hőmérséklet mérési utasításának meghatározása három önkényes tényezőt tartalmaz:
- a hőmérőként használt test,
- a hőmérséklet méréséhez felhasznált sajátosság,
- a hőmérsékleti skála.

Ezeket célszerű úgy megválasztani, hogy könnyen reprodukálhatók legyenek.

A hőmérőket a következőképpen csoportosíthatjuk:

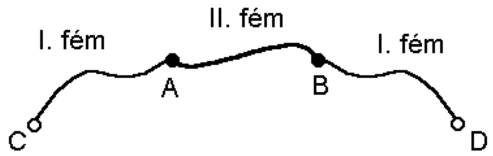
A mérendő testtel közvetlen érintkezésbe nem kerülő hőmérők:
- – *Pirométerek*: a testből emittált hőmérsékleti sugárzás hőmérsékletfüggésén alapuló hőmérők.

A mérendő testtel közvetlen érintkezésbe kerülő hőmérők (kontakthőmérők):
- – 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. Ilyen 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.
  - – *Gázhőmérők:* A tökéletes gáz állapotegyenlete szerint a konstans térfogatú gáz nyomása arányos a termodinamikai hőmérséklettel. A héliumtöltésű gázhőmérők jól megközelítik ezt a viselkedést.

- – Elektromos elven működő kontakthőmérők:
  - – ***Termoelemek.***
  - – ***Ellenálláshőmérők.***

  Ezekkel a hőmérőkkel ismerkedünk meg a mérésen, ezért ezek működését az alábbiakban részletesebben is ismertetjük.

1.1. Termoelemek. Ha két különböző fémet fémesen összeérintkeztetünk, akkor a két fém között elektromos potenciálkülönbség, ún. *kontaktpotenciál* lép fel. Zárt vezetőhurokban e kontaktpotenciálok összege zérus, ha a csatlakozási pontok azonos hőmérsékletűek. Ha viszont a csatlakozási pontok hőmérséklete között különbség van, akkor a körben (általában egy nem zérus) *termoelektromotoros erő* lép fel, melynek hatására zárt körben termoáram lép fel.
Tekintsük az 1. ábrán lévő vázlatos elrendezést a termoelemről:



1. ábra: A termoelem sémája

A két különböző (I. és II.) fém két pontban (**A, B**) csatlakozik egymáshoz. Szokás ezeket a csatlakozási pontokat *hidegpontnak*, ill. *melegpontnak* nevezni.
A **C** és **D** szakadási pontok között mérhető feszültség a *termofeszültség*. A termofeszültség (ε) függ a két fém anyagi minőségétől és függ a csatlakozási pontok hőmérsékletétől:

$$\varepsilon = f\,(T_A\,, T_B\,) \tag{1}$$

Erről a függvényről annyit biztosan tudunk, hogy $T_A = T_B$ esetén $\varepsilon = 0$. Ellenkező esetben a termoelem alkalmas volna egy egyetlen hőtartályos hőerőgép létrehozására, ami azonban a termodinamika II. főtétele szerint lehetetlen, mert „ingyen végeztethetnénk munkát vele”.
Közelítőleg feltehetjük, hogy az ε termofeszültség arányos a hőmérsékletkülönbséggel:

$$\varepsilon = a\,(T_A - T_B) = a\,T_{AB}\,, \tag{2}$$

ahol „a” a termoelem *érzékenysége*, melynek mértékegysége mV/K,
és $T_{AB} = T_A - T_B$ a csatlakozási pontok hőmérsékletének különbsége.

A termoelemek *tehetetlensége* (ld. lejjebb a 2. fejezetet) kicsi.
Megjegyzés: Az 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.

1.2. Ellenálláshőmérők. Az elektromos ellenállás függ a hőmérséklettől. Fémek ellenállása a hőmérséklet növelésével nő. Elég széles hőmérséklet-intervallumban jó közelítés a lineáris összefüggés:

$$R(T) = R_0\,(\,1 + \beta\,(T - T_0)\,) \tag{3}$$

ahol

- T tetszőleges hőmérséklet;
- T_0 egy referencia-hőmérséklet (pl. 0 °C);
- R az ellenállás a T hőmérsékleten;
- R_0 az ellenállás a T_0 referencia-hőmérsékleten;
- β az ellenállás hőmérsékleti koefficiense, amely anyagi jellemző, mértékegysége 1/K.

A (3) 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 $T_0 = 0$ °C-on $R_0 = 100\ \Omega$ (vagy $1000\ \Omega$).
Az ellenálláshőmérők tehetetlensége (ld. 2.) viszonylag nagy.
Megjegyzés: Félvezetőből is készíthető ellenálláshőmérő (*termisztor*), ez esetben az ellenállás nemlineáris függvénye a hőmérsékletnek, azaz a (3) összefüggés ekkor jóval szűkebb tartományban érvényes, mint a fémeknél. A termisztorok érzékenysége sokkal nagyobb, tehetetlensége sokkal kisebb, mint a fém ellenálláshőmérőké.

2. A hőmérők tehetetlensége; időállandó

A hőmérők mindig a saját hőmérsékletüket mérik. Amikor hőmérőt helyezünk egy eltérő hőmérsékletű rendszerbe, a hőmérőnek fel kell vennie a rendszer hőmérsékletét. Ehhez szükséges bizonyos hőmennyiség, mert a hőmérőnek is van hőkapacitása.

A test hőkapacitásának az egységnyi hőmérsékletváltozáshoz szükséges hőmennyiséget nevezzük:

$C = \Delta Q / \Delta T$, pontosabban $C = dQ/dT$. (4)

[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:

$C = c\, m$, (5)

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

Amikor az eltérő hőmérsékletű hőmérőt belehelyezzük egy rendszerbe, azzal a rendszert is megzavarjuk, tulajdonságait megváltoztatjuk. Ahhoz, hogy a rendszer állapota kevéssé változzon, a hőmérő hőkapacitásának kicsinek kell lennie a rendszer hőkapacitásához képest. A hőmérő kis hőkapacitása azért is kívánatos, mert ez teszi lehetővé, hogy a hőmérő hőmérséklete minél hamarabb a kívánt mértékben megközelítse a környezet hőmérsékletét. Ezt röviden úgy is kifejezhetjük, hogy az a kívánatos, minél kisebb legyen a hőmérő tehetetlensége.

A hőmérő tehetetlenségét az *időállandóval* – ill. *felezési idővel* – jellemezhetjük.

Hogyan változik a (hőmérőként használt) test hőmérséklete az időben, ha eltérő hőmérsékletű közegbe kerül?

A test hőmérséklete a lenti (7)-es képlet szerint közelít a közeg hőmérsékletéhez.

Hogy megértsük, honnan jön ez a képlet, először tegyünk néhány egyszerűsítő feltételt:

- a test hőkapacitása (C) legyen a folyamat közben állandó;
- a test hőmérséklete a folyamat közben *időben* változik (T(t)),
  de legyen *homogén*, vagyis legyen a test egészére 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.

Utóbbi szerint a J_q hőáramsűrűség (a test egységnyi felületén időegység alatt átáramló Q hőmennyiség) egyenesen arányos a hőáramot létrehozó $\Delta T = T(t) - T_k$ hőmérsékletkülönbséggel: $J_Q = \alpha \cdot \Delta T$,

így a testből kifelé áramló I_Q hőáram (a test teljes felületén időegység alatt átáramló Q hőmennyiség):

$I_Q = dQ/dt = J_Q A = \alpha A (T(t) - T_k)$, ahol "A" a test felülete.

(4) alapján $dQ = C\, dT$, ezzel végülis az alábbi differenciálegyenletet kapjuk:

$C\, dT/dt = - \alpha A (T - T_k)$, (6)

melynek általános megoldása az ún. **Newton-féle hőátadási törvény**:

$$T(t) - T_k = (T(0) - T_k)\, e^{-t/\tau} \quad , \qquad (7)$$

ahol

- T(t) a hőmérő hőmérséklete az idő függvényében;
- T(0) a hőmérő kezdeti hőmérséklete;
- T_k a közeg hőmérséklete;
- τ az *időállandó*: az az idő, ami alatt a test és környezete közötti hőmérsékletkülönbség a kezdeti hőmérsékletkülönbség „e”-ed részére csökken.

$\tau = C/(\alpha A)$, tehát az időállandó annál nagyobb, minél nagyobb a test hőkapacitása (a tömeg és a fajhő szorzata), és 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 hőmérsékletkülönbség felére csökken):

$t_{1/2} = \tau \ln (2)$, (8)

mellyel a (7) egyenlet

$$T(t) - T_k = (T(0) - T_k)\, 2^{-t/t_{1/2}} \qquad (9)$$

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

Vezessük be a ΔT jelölést a hőmérsékletkülönbségre:

ΔT a hőmérő és a környezete közötti aktuális hőmérséklet-különbség a t időpontban,

ΔT_0 a hőmérő és a környezete közötti kiindulási hőmérséklet-különbség (t=0-ban).

Ezekkel a jelölésekkel a Newton-féle hőátadási törvényt

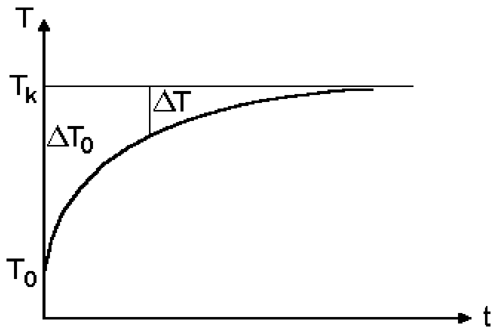
$\Delta T = \Delta T_0 \cdot e^{-t/\tau}$ alakba írhatjuk. (10)

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

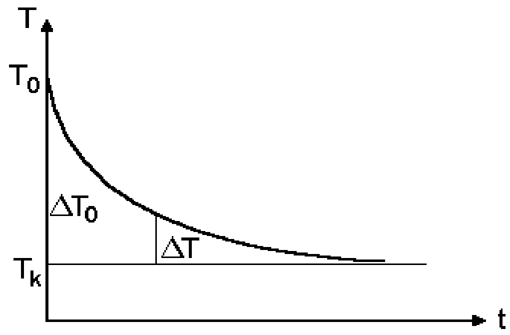
$\lim \Delta T = 0$ ha $t \to \infty$,

vagyis

$\lim T(t) = T_k$ ha $t \to \infty$.



2. ábra: Felmelegedési görbe



3. ábra: Lehűlési görbe

Az ábrákon T_k a közeg hőmérséklete, és $T_0 = T(0)$ a hőmérő kezdeti hőmérséklete.

$\Delta T_0 = T_k - T(0)$ $\qquad$ $\Delta T_0 = T(0) - T_k$

$\Delta T = T_k - T(t)$ $\qquad$ $\Delta T = T(t) - T_k$

MÉRÉSI FELADATOK

3.1. Ellenálláshőmérő tehetetlenségének mérése

Eszközök

- Pt ellenálláshőmérő,
- univerzális műszer ellenállásmérésre,
- termosztált hőmérsékletű kerámiacső hőmérséklet-szabályozóval,
- edény jeges vízzel,
- stopperóra.

A mérés kezdetén a termosztátok hőmérsékletét (T_k) az oktató már beállította, és a csőbe helyezett ellenálláshőmérők is felvették a termosztát hőmérsékletét.

Mérési feladatok:

- Először mérjük meg az ellenálláshőmérő ellenállását a termosztátban az univerzális műszerrel ($R_{le}(0)$).
- Ezután vegyük fel az ellenálláshőmérő lehűlési görbéjét a következőképpen: tegyük át az ellenálláshőmérőt a jeges vizes edénybe, és ugyanebben a pillanatban indítsuk el a stoppert. Mérjük meg az ellenállást ($R_{le}(t)$) a kiosztott táblázat szerinti időpontokban: kezdetben 1 percen keresztül 5 s-os, utána 2 percen keresztül 10 s-os, majd 30 s-os időközönként, mindaddig, míg az ellenállás értéke már gyakorlatilag nem változik.
  A közeg T_k hőmérsékletének, azaz 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 vegyük fel az ellenálláshőmérő felmelegedési görbéjét a következőképpen: vegyük ki a termosztátból a hőmérőt, nagyon gyorsan töröljük le róla a vizet és tegyük vissza az ellenálláshőmérőt a fűtött kerámiacsőbe, és ugyanebben a pillanatban indítsuk el a stoppert. Olvassuk le az ellenállásértékeket a táblázat szerint megjelölt időkben ($R_{fel}(t)$).

Kiértékelés:

- Számoljuk ki az ellenállás-értékekből a hőmérsékleteket a (3) 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,

$$\rightarrow \quad T(t) = \frac{R(t) - R_0}{\beta R_0} . \tag{11}$$

- Ábrázoljuk grafikonon a mért $T(t) - t$ felmelegedési és lehűlési görbéket (azaz az idő függvényében az ellenálláshőmérő hőmérsékletét)!

Határozzuk meg a hőmérő **tehetetlenségét** a következőképpen:
A számoláshoz átalakítjuk a (7) képletet:

$$\ln |\Delta T| = \ln |\Delta T_0| - (1/\tau) \cdot t . \tag{12}$$

A (12) összefüggés egy olyan $y = ax + b$ egyenes egyenlete, ahol
$x := t$, $y := \ln |\Delta T|$, $a = -1/\tau$, $b = \ln |\Delta T_0|$,

tehát $\ln|\Delta T|$-t az idő függvényében ábrázolva egy olyan egyenest kapunk, aminek a meredeksége $-1/\tau$, így abból meghatározható az időállandó:

$$a = -1/\tau \quad \rightarrow \quad \tau = -1/a . \tag{13}$$

A számítás lerövidítése céljából csak 5-5 célszerűen kiválasztott mérési pontot használunk fel.

- Töltsük ki az adatlap hátoldalán levő táblázatot (azaz $T(t)$, ΔT, és $\ln|\Delta T|$ értékét)!

A (12) képletben szereplő ΔT, ΔT_0 hőmérsékletkülönbség azt jelenti, hogy mennyire tér el a hőmérő hőmérséklete a környezete hőmérsékletétől, azaz

a lehűlési görbénél $\Delta T = T(t) - T_0$, ahol T_0 a jeges víz hőmérséklete, azaz 0 °C;
a felmelegedési görbénél $\Delta T = T_{term} - T(t)$, ahol T_{term} a termosztát hőmérséklete.

- Ábrázoljuk $\ln|\Delta T|$-t az idő függvényében!

- A grafikonok pontjaihoz illesszünk egy-egy egyenest, és olvassuk le a meredekségüket! Ne feledkezzünk el a mértékegységéről!

- Számítsuk ki a hőmérő időállandóját a felmelegedésre és a lehűlésre is!

[Megjegyzés: mivel az ellenálláshőmérő hőmérséklete és ellenállása között lineáris összefüggés van, az időállandó számítható lenne közvetlenül a mért ellenállásokból is.]

Szorgalmi feladat: végezzük el az egyenes illesztését a legkisebb négyzetek módszerével.

Beadandó:
– a $T(t) - t$ grafikonok a lehűlésre és a felmelegedésre;
– az $\ln |\Delta T| - t$ grafikonok a lehűlésre és a felmelegedésre;
– az egyenesek meredeksége;
– a lehűlési és a felmelegedési folyamat időállandója.

3.2. Mérés termoelemmel

Eszközök:

- vas-konstantán termoelem,
- univerzális műszer feszültségmérésre,
- termosztált hőmérsékletű kerámiacső hőmérséklet-szabályozóval,
- edény jeges vízzel.

Mérési feladat:

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 leolvasás előtt mindig várjuk meg, amíg a mért érték állandó lesz).

Kiértékelés:

A termofeszültség a meleg- és hidegpont hőmérsékletének különbségétől függ, és feltesszük, hogy a (2) képlet alkalmazható, vagyis az összefüggés lineáris.

- Készítsünk táblázatot az összetartozó ε, $\Delta T = T - T_h$ értékekkel! (A (2) képletben ΔT-t T_{AB} jelöli.)
  Itt T_h a hidegpont hőmérséklete, jelen esetben $T_h = 0$ °C;
  T az egyes termosztátok hőmérséklete, mely értékek kiszámolhatók a 2.1. feladatban az ellenálláshőmérővel mért értékekből.

- Ábrázoljuk a termoelem kalibrációs görbéjét, azaz ε-t ΔT függvényében!

A (2) összefüggés szerint $\varepsilon = a\,\Delta T$, ez egy olyan $y = ax$ egyenes egyenlete, ahol

$x := \Delta T$, $y := \varepsilon$,

ennek a meredeksége a termoelem érzékenysége, tehát

$$a = \varepsilon / \Delta T \,. \qquad (14)$$

- Illesszünk origón átmenő egyenest a négy mérési pontra, és határozzuk meg meredekségét! Adjuk meg a termoelem érzékenységét a mértékegységével együtt!

Szorgalmi feladat: Becsüljük meg a mérési hibákat és jelöljük be a grafikonba is!

Beadandó:

– a termoelem kalibrációs görbéje,
– a termoelem érzékenysége.