

## 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.

A szürkével írt részek nem tartoznak a kötelező anyaghoz.

### ELMÉLET

#### 1. Hőmérséklet, hőmérsékletmérés, hőmérők

A hőmérséklet a testek egyik állapotjelzője. A *hőmérséklet* a test olyan sajátossága, ami meghatározza, hogy a test *termikus egyensúlyban* 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 egyértelműen 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 vezetékkel, 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:

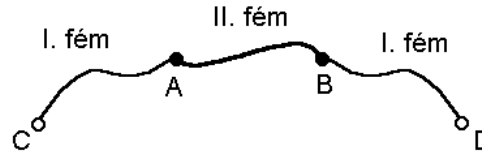
- **Termoelemek.**

- **Ellenálláshőmérők.**

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

**1.1. Termoelemek.** Ha két különböző fémeket fémesen összeérintkeztetünk, akkor a két fém között elektromos potenciálkülönbség, ún. *kontaktspotenciál* lép fel. Zárt vezetőkörben e kontaktspotenciálok 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 *melegpontnak*, ill. *hidegpontnak* nevezni.

A C és D szakadási pontok között mérhető feszültség a *termofeszültség*. A termofeszültség ( $\varepsilon$ ) függ a két fém anyagi minőségétől és függ a csatlakozási pontok hőmérsékletétől:

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

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”.

Közéltőleg feltehetjük, hogy az  $\varepsilon$  termofeszültség arányos a csatlakozási pontok (a „meleg” és „hideg” pontok) közötti hőmérsékletkülönbséggel:

$$\varepsilon = a(T_A - T_B), \quad (2)$$

ahol „a” a termoelem *érzékenysége*, melynek mértékegysége mV/K.

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 az újabb kis vezetődarabnak a csatlakozási pontjai azonos hőmérsékletűek, akkor a járulékos kontaktspotenciálok 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:

$$R(T) = R_0 (1 + \beta (T - T_0)) \quad (3)$$

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;

$\beta$  az ellenállás hőmérsékleti koefficiense, amely anyagi jellemző, mértékegysége 1/K.

A (3) arányosság persze csak közelítés:  $\beta$  valójában függ a hőmérséklettől. Ilyenkor is beszélhetünk viszont egy hőfoktartományon belül érvényes közepes  $\beta$ -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. a 2. pontot) 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; időálló

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:

$$C = \Delta Q / \Delta T; \text{ pontosabban } C = dQ/dT. \quad (4)$$

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

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

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

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

Amikor az eltérő hőmérsékletű hőmérőt behelyezzük egy rendszerbe, azzal a rendszert is megzavarjuk, tulajdonságait megváltoztatjuk. Ahhoz, hogy a rendszer állapota kevésbé 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 időállóval – 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 ( $C$ ) a folyamat közben állandó;
- a test hőmérséklete a folyamat közben időben változik ( $T(t)$ ),  
de homogén, vagyis a test egészére azonos, nem függ a helytől;
- a közeg hőmérséklete ( $T_k$ ) a folyamat közben állandó érték;
- a test és a közeg közötti hőátadási tényező ( $\alpha$ ) 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):

$$I_q = dQ/dt = J_q A = \alpha A (T(t) - T_k), \text{ ahol "A" a test felülete.}$$

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

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

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

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

ahol

$T(t)$  a hőmérő hőmérséklete az idő függvényében;

$T(0)$  a hőmérő kezdeti hőmérséklete;

$T_k$  a közeg hőmérséklete;

$\tau$  az időálló: az az idő, ami alatt a test és környezete közötti hőmérsékletkülönbség a kezdeti hőmérsékletkülönbség „e”-ed részére csökken.

$\tau = C/(\alpha A)$ , tehát az időálló 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  $\tau$  helyett a  $t_{1/2}$  felezési időt is használni (mely alatt a test és környezete közötti hőmérsékletkülönbség az eredeti hőmérsékletkülönbség felére csökken):

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

mellyel a (7) egyenlet

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

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

Vezessük be a  $\Delta T$  jelölést a hőmérsékletkülönbségre:

$\Delta T$  a hőmérő és a környezete közötti aktuális hőmérséklet-különbség a  $t$  időpontban,

$\Delta T_0$  a hőmérő és a környezete közötti kiindulási hőmérséklet-különbség ( $t=0$ -ban).

Ezekkel a jelölésekkel a Newton-féle hőtadási törvényt

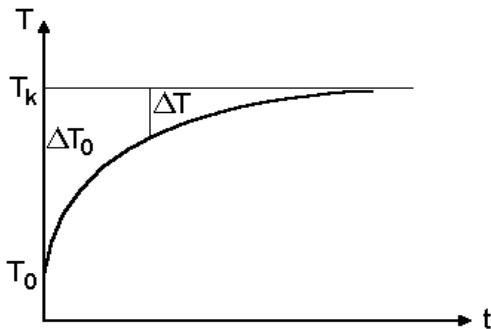
$$\Delta T = \Delta T_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad \text{alakba írhatjuk.} \quad (10)$$

Látható, hogy a  $\Delta T$  hőmérsékletkülönbség exponenciálisan csökken, és  $t \rightarrow \infty$  határesetben eltűnik:

$$\lim \Delta T = 0 \quad \text{ha } t \rightarrow \infty,$$

vagyis

$$\lim T(t) = T_k \quad \text{ha } t \rightarrow \infty.$$

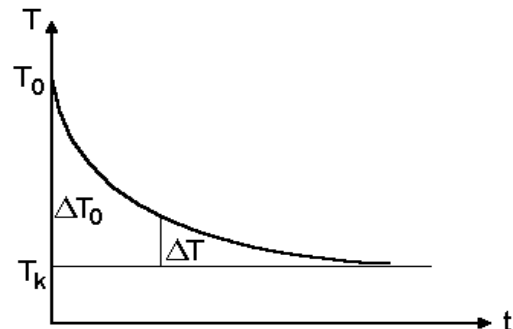


**2. ábra:** Felmelegedési görbe

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

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

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



**3. ábra:** Lehülési görbe

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

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

## MÉRÉSI FELADATOK

### 4.1. 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 ( $R_{le}(0)$ ).
- Készítsünk jeges vizet az oktató útmutatásai szerint.
- Ezután vegyük fel az ellenálláshőmérő lehülési görbáját 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 lehülési görbe felvétele során, ezért időnként keverjük meg a jeges vizet.
- A lehülési görbe felvétele után vegyük fel az ellenálláshőmérő felmelegedési görbáját 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 időkből ( $R_{fel}(t)$ ).

Kiértékelés:

- Számoljuk ki az ellenállás-értékekből a hőmérsékleteket a (3) képlet alapján:

$$R(t) = R_0 ( 1 + \beta ( T(t) - T_0 ) ), \text{ ahol}$$

$$\beta = 0,00386 \text{ 1/}^\circ\text{C},$$

$$T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ és}$$

$R_0$  a jeges vízben mért ellenállás,

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

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

Határozzuk meg a hőmérő **tehetetlenségét** a következőképpen:

A számoláshoz átalakítjuk a (7) képletet:

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

A (12) összefüggés egy olyan  $y = ax + b$  egyenes egyenlete, ahol

$$x := t, \quad y := \ln |\Delta T|, \quad a = -\frac{1}{\tau}, \quad b = \ln |\Delta T_0|,$$

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

$$a = -\frac{1}{\tau} \rightarrow \tau = -\frac{1}{a}. \quad (13)$$

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

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

A (12) képletben szereplő  $\Delta T$ ,  $\Delta T_0$  hőmérsékletkülönbség azt jelenti, hogy mennyire tér el a hőmérő hőmérséklete a környezete hőmérsékletétől, azaz

**a lehülési görbénél  $\Delta T = T(t) - T_0$ , ahol  $T_0$  a jeges víz hőmérséklete, azaz  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ;**

**a felmelegedési görbénél  $\Delta T = T_{\text{term}} - T(t)$ , ahol  $T_{\text{term}}$  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 lehülésre 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 lehülésre és a felmelegedésre;
- az  $\ln |\Delta T| - t$  grafikonok a lehülésre és a felmelegedésre;
- az egyenesek meredeksége;
- a lehülési és a felmelegedési folyamat időállandója.

## 4.2. 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 ( $\varepsilon$ ) 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  $\varepsilon$ ,  $T_A - T_B$  értékekkel!  
Itt  $T_B$  a hidegpont hőmérséklete, jelen esetben  $T_B = 0\text{ °C}$ ;  
 $T_A$  az egyes termosztátok hőmérséklete, mely értékek kiszámolhatók a **4.1.** feladatban az ellenálláshőmérővel mért értékekből.

- Ábrázoljuk a termoelem kalibrációs görbáját, azaz  $\varepsilon$ -t  $T_A - T_B$  függvényében!

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

$$x := T_A - T_B, \quad y := \varepsilon,$$

ennek a meredeksége a termoelem érzékenysége, tehát

$$a = \varepsilon / (T_A - T_B). \quad (14)$$

- 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.