

# 1. Hőmérsékleti sugárzás

(Visontai Dávid, 2017. szeptember)

## Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
2. Az ideális feketetest sugárzási törvénye	1
3. Hőmérsékletmérési módszerek	2
4. Mérési összeállítás	4
5. A mérőberendezés	5
6. Gyakorló kérdések	6
7. Mérési feladatok	7

## 1 Bevezetés

A XIX. század végén úgy hitték, új, nagy horderejű eredmények a fizikában már nem lesznek és csak kevés nyitott probléma van. Az egyik, még lezáratlan kérdés épp a hőmérsékleti sugárzás volt. A kísérleti adatok interpretálását sokan megkísérelték, de a legismertebb formulák, a Rayleigh-Jeans, vagy a Wien-féle sugárzási törvény, csak korlátozott hullámhosszintervallumon adott jó egyezést a kísérleti adatokkal. Végül 1900-ban a német Max Plancknak sikerült végleges megoldást találni a feketetest sugárzás problémájára. A hőmérsékleti sugárzással kapcsolatos felfedezéséért Wien 1911-ben kapott Nobel-díjat és Planck 1918-as Nobel-díjának indoklása: „szolgálatának elismeréseképp, amiatt a hatás miatt, amit kvantumelméletével a fizika fejlődésére gyakorolt”.

## 2 Az ideális feketetest sugárzási törvénye

Bármilyen, az abszolút nulla foktól különböző hőmérsékletű test elektromágneses sugárzást bocsát ki. A sugárzás oka, hogy az anyag töltései a hőmozgás következtében gyorsulnak, és a gyorsuló töltések az elektrodinamika törvényeinek megfelelően elektromágneses sugárzást bocsátanak ki. A testek nemcsak kibocsátanak, hanem nyelnek is el fényt. A fekete test definíció szerint olyan tárgy, amely minden ráeső sugárzást elnyel,

függetlenül annak hullámhosszától. Az ilyen test sugárzása teljesen független az anyagtól, a sugárzás sajátosságait a test hőmérséklete szabja meg. Abszolút fekete test nem létezik, de jól közelíthető egy kormozott belső falú, zárt, üres dobozzal, és a test sugárzását az üreg falán vágott kis nyílásba helyezett szondával vizsgálhatjuk. Bármilyen más anyag termikus sugárzása Kirchhoff sugárzási törvénye alapján visszavezethető a fekete test sugárzására, ha ismerjük az adott test spektrális abszorpcióképességét. A számításokat, amelyek sok tankönyvben megtalálhatók, nem részletezzük, csak az eredményt közöljük. Az egységnyi felület által a felületre merőleges irányban, egységnyi térszögben és hullámhossz-intervallumban kisugárzott teljesítmény:

$$I_{\lambda}d\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} d\lambda, \quad (1)$$

ahol  $c$  a fénysebesség,  $h$  a Planck-állandó,  $k$  a Boltzmann-állandó,  $T$  az abszolút hőmérséklet. Ezt az összefüggést Planck-formulának is nevezik. A Planck-formula integrálásával kapjuk Stefan–Boltzmann-törvényt, ami szerint egy  $T$  abszolút hőmérsékletű fekete test egységnyi felülete által kisugárzott teljesítmény:

$$P = \sigma T^4,$$

ahol

$$\sigma = \frac{4\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} = 5,67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4} \quad (2)$$

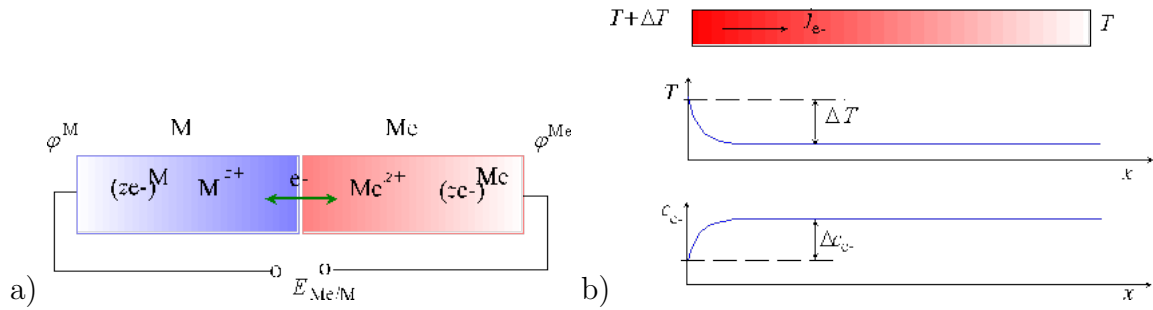
A mérési feladat a Stefan–Boltzmann-törvény igazolása és a  $\sigma$  állandó megmérése.

### 3 Hőmérsékletmérési módszerek

Az előttünk álló feladatok egyik lényeges része a nagyon pontos hőmérsékletmérés. Hőmérsékletet a hagyományos higanyos, vagy alkoholos folyadékos hőmérőkön kívül, többek között ellenállás-hőmérővel, termoelemmel vagy pirométerrel mérhetünk. Az **ellenállás-hőmérők** anyaga alacsony hőmérséklet detektálására félvezető vagy szén, magasabb hőmérsékletre az egyik legszélesebb körben alkalmazott fémhőmérő a platina hőmérő. A vékony platina szálat hengeres vagy lapos kerámiatokba helyezik el. Mérésekben leggyakrabban  $0^{\circ}\text{C}$ -on  $100\Omega$ -os ellenállás-hőmérőt használunk. Érzékenysége kb.  $0,35\Omega/^{\circ}\text{C}$ , és hőmérséklet-ellenállás függvénye jól közelíthető másodfokú polinommal. Pontos méréseknél az ellenállás-hőmérőket úgynevezett négy pontos elrendezésben használják, így lehet kiküszöbölni az árambevezető huzalok ellenállását. A két árambevezető kontaktus mellett közvetlenül a hőmérő lábán mérjük az ellenálláshőmérőn árammal és az ellenállással arányos feszültségét. Tehát áramgenerátort használva, a hőmérséklet a feszültséggel arányos. Az érzékenységet nem lehet az áram növelésével fokozni, mert a túl nagy áram miatt a hőmérő melegedne.

A **pirométerrel** izzó anyagok hőmérsékletét határozhatjuk meg. Működési elve, hogy egy távcsőhöz hasonló optikai eszközt a céltárgyra irányítjuk és egy távcsőben lévő referencia szálát elektromosan úgy izzítunk fel, hogy azonos legyen a két szín. A műszer skáláján a referenciaszál hőmérséklete leolvasható. Tulajdonképp itt a referenciaszál ellenállását olvassa le a műszer. Nyilvánvaló, hogy ez a mérési mód kissé szubjektív, mert a szem nem tökéletes mérőeszköz.

A **termopár** vagy **termoelem** két különböző anyagú fémdrót (M és Me), amelyek végeit összehegesztik és az egyik szálát közepén elvágják és így a szabad végek között elektromos potenciálkülönbség alakul ki, amit kontaktpotenciálnak nevezünk ( $E_{Me/M}$ ) (1.a) ábra). A kontaktpotenciál értéke hőmérsékletfüggő, ami azzal magyarázható, hogy



1. ábra. A Seebeck -effektus.

a fémekben az elektronok energiája függ a hőmérséklettől, de az egyes fémeknél a hőmérsékletfüggés eltérő. Ha egy fémes vezető két vége között  $\Delta T$  a hőmérséklet-különbség, akkor a vezetőben elektronáram jön létre a nagyobb hőmérsékletű hely felől a kisebb felé mindaddig, amíg a vezető hossza mentén a hőmérséklet-eloszlásnak megfelelő egyensúly nem áll be. Ez a jelenség a Seebeck-effektus. A 1.b) ábra egy vezetőben a hőmérsékletet és az elektronok koncentrációját szemlélteti a vezető hossza mentén. Az M vezető két vége között az ún. abszolút Seebeck-koefficienssel ( $S_M$ ) arányos elektromos potenciálkülönbség ( $\Delta\phi_M$ ) lép fel.

$$\Delta\phi_{Me} - \Delta\phi_M = U_{Me-M} = (S_{Me} - S_M)\Delta T. \quad (3)$$

A termoelemek kis tömegű anyagok hőmérsékletének mérésére különösen alkalmasak, mivel vékony drótból készíthetők, hőkapacitásuk ezért kicsi. Alkalmazásukat viszonylag kis érzékenységük korlátozza, a legérzékenyebb termoelemek  $50 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  nagyságrendűek.

Hangsúlyozandó, hogy az **ellenállás-hőmérő** abszolút hőmérsékletet mér, a **termoelem** pedig hőmérséklet-különbséget. Ezért az egyik végpontját más módszerrel megmért hőmérsékletű hőtartályba helyezik és a valódi hőmérséklet a referencia hőmérséklet és a termoelem hőmérséklet-különbségének összege.

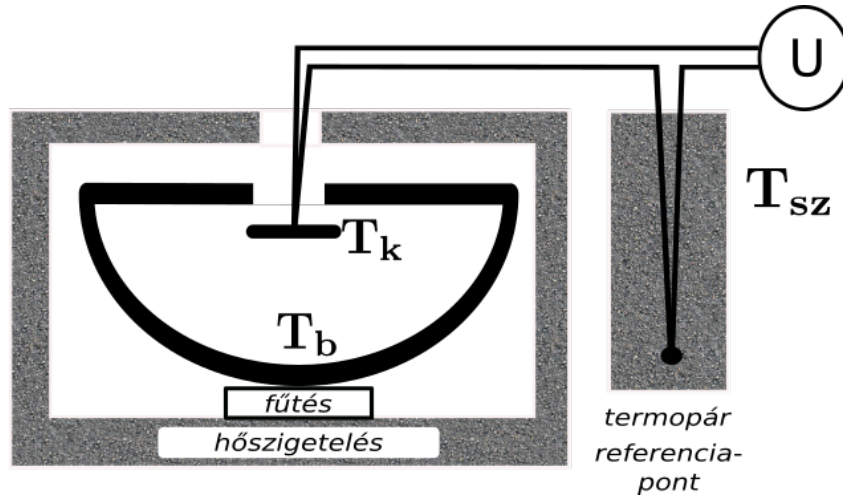
## 4 Mérési összeállítás

A mérés során úgy vizsgáljuk meg Stefan–Boltzmann törvény szerinti hőmérsékleti sugárzást, hogy a 3. ábrán mutatott dobozban levő bográcsot  $T_b$  hőmérsékletre fűtjük fel, majd a felfűtés után az edény belsejébe egy detektort helyezünk. A detektor kisméretű kormozott vékony fémlap, melyre termoelemet hegesztettünk (továbbiakban szonda, 4. ábra). Az elrendezés sematikus rajza a 2. ábrán látható.

A szonda bekormozott felülete a bogrács által kisugárzott hőt elnyeli, de a saját  $T_k$  hőmérsékletének megfelelően kifelé is sugároz. Ugyanakkor a szonda két végpontja között hő áramlik, ezért egyensúlyban a három hatást így írhatjuk fel:

$$\epsilon\sigma A(T_b^4 - T_k^4) = \alpha(T_r - T_k) \quad (4)$$

ahol  $\epsilon$  a kormozott felület abszorpciós/emissziós tényezője, amit most 1-nek veszünk.  $\alpha$  a szonda vezetékének hővezetési együtthatója,  $T_b$  a bogrács hőmérséklete,  $T_k$  a szonda kormozott felületének és  $T_r$  a szonda referenciapontjának hőmérséklete.



2. ábra. Az ábrán látható bográcsot hevítjük  $T_b$  hőmérsékletre. A mérőszonda egyik, kormozott fele a kályhában van és  $T_k$  hőmérsékletű, míg a másik fele  $T_r$  szobahőmérsékleten van.

A szonda vezetékeinek végei között a hőmérséklet-különbség a Seebeck-effektus hatására feszültségkülönbséget eredményez:

$$S(T_r - T_k) = U \quad (5)$$

ahol  $S$  a Seebeck-együttható. Ezt az  $U$  feszültséget olvashatjuk le a mérődoboz kijelzőjéről.

Az egyenlet átrendezésével egyrészt azt kapjuk, hogy a mért feszültség

$$U = \frac{S\sigma A(T_b^4 - T_k^4)}{\alpha} \quad (6)$$

és ha elhanyagoljuk a kormozott felületről való kisugárzást, akkor

$$U \sim T_b^4. \quad (7)$$

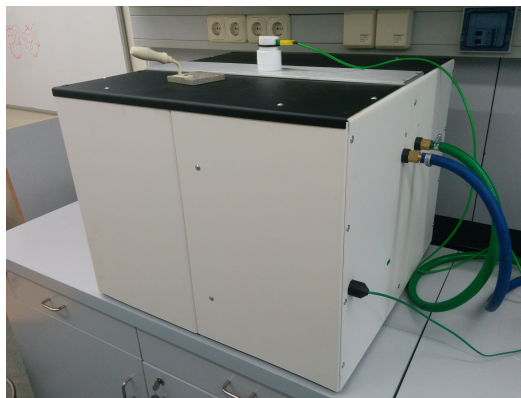
Másrészt, ha megmérnénk  $A$ -t, a kormozott felület nagyságát, ismernénk  $\alpha$ -t és  $S$ -et, akkor ki tudnánk számolni  $\sigma$ -t

$$\sigma = \frac{\alpha U}{SA(T_b^4 - T_k^4)}. \quad (8)$$

## 5 A mérőberendezés

A 3. ábrán látható doboz tartalmaz egy bográcsot, amelyet egy hűtő- és szigetelőréteg vesz körül. A bogrács fűtésének bekapcsolásához a 5. ábrán található mérőkészülék zöld START gombját kell megnyomni. Figyeljünk arra, hogy a beállított hőmérséklet a mérendő értékek közül a legalacsonyabb legyen, mivel a bogrács nagyon lassan hül vissza. A hőmérsékletet a potméterrel lehet szabályozni.

Figyeljünk továbbá arra is, hogy az épület hűtőrendszerével összekapcsolt vízvezeték ki legyen nyitva! Ez azért fontos, hogy a bográcsot körülvevő burkolat ne forrósodjon át, illetve ez adja a szonda referenciapontjának hőmérsékletét is. Magát a hőmérsékletet egy bekalibrált termoelem méri. Ennek értékét az 5. ábrán látható doboz kijelzőjéről olvashatjuk le. A hőmérsékleti sugárzást egy másik termoelemmel (4. ábra) mérjük.



3. ábra. A bográcsot tartalmazó doboz.



4. ábra. A hősugárzás mérésére szolgáló termoelem vagy szonda. A kormozott felület hatékonyabbá teszi az elnyelést, amit egy kis keret védi nehogy lekopjon róla.



5. ábra. A bogrács fűtését szabályozó és a szondán eső feszültség mérését végző készülék.

## 6 Gyakorló kérdések

1. Mit mond a Stefan–Boltzmann törvény?
2. Mi a Seebeck-effektus?
3. Milyen eszközökkel lehet magas ( $> 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) hőmérsékleteket mérni?
4. Mi az előnye és hátránya a platina és a termoelem hőmérőknek?
5. Milyen hőhatások érik a szondát és mennyire elhanyagolhatók ezek a hatások?
6. Hogy méri meg a Stefan–Boltzmann-állandót?
7. Milyen további adatok kellenek a szondáról, hogy ki lehessen mérni a  $\sigma$  együtthatót?

## 7 Mérési feladatok

- Mérje meg a szondán kialakuló feszültségértékeket  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  -  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  között 10 pontban. A szonda behelyezésétől a kivételéig számított idő mindig ugyanannyi legyen, 4-5 perc!
- Két hőmérséklet értéknél mérje meg a feszültség időbeli változását körülbelül 2 másodpercenként mintavételezve. Ha kell, akkor ismételje meg a mérést, a szonda gyorsan lehül.
- Mutassa meg, hogy milyen arányosság van a mért feszültség és a bogrács hőmérséklete között! Érvényes-e a Stefan–Boltzmann törvény?