Termoelektromos hűtőelemek vizsgálata

Rudolf Ádám

Mérés időpontja:
2009.11.19.
(Csütörtök délelőtt)

1. A mérés elve

Tapasztalat szerint, ha két különböző fémből készült áramkörön áramot folyatunk át, akkor a csatlakozási pontok egyike lehűl, a másik pedig felmelegszik. Ezt nevezzük Peltier-effektusnak. Ha az áramkörön I áram folyik át, akkor az időegység alatt keletkező hőmennyiség:

$$\frac{dQ}{dt} = P_{ab} I \tag{1}$$

, ahol P_{ab} a *Peltier-együttható*. Ezt az effektust használják ki az ú.n. Peltier elemekben. A mérés során ilyen elemeket vizsgálunk.
A Peltier-effektuson kívül számít sok más elektromos, és termodinamikai jelenség, a legfontosabbak: *Joule-hő*: $\frac{dQ}{dt} = I^2 R$, *Hővezetés, Seebech-effektus, Thomson-effektus*. Ezeket részletesen az odavágó részeknél tárgyaljuk.

2. Mérési összeállítás

(Az ablaktól távolabbi mérőhelyen mértem.)
A valóságben egy Peltier-elem sok kis Peltier-elem sorbakötött elrendezése, így erősítve az effektust. Az eszköz két oldalán két fémlap van: az egyik lehűl, a másik felmelegszik. Esetünkben a melegedő lap egy folyó csapvízzel hűtött fémtömbbel van kapcsolatban: ezt végtelen hőkapacitású hőtartálynak tekintjük. A lehűlő fémlapra egy hőmérő van kapcsolva, és az egész berendezés egy jól hőszigetelő búrába van téve. Az elemen átfolyó áramot egy áramgenerátor szolgáltatja, és a rajta eső feszültséget egy külön digitális műszerrel mérjük (ha áramot folyatunk át az elemen, akkor a feszültséget az áramgenerátorról is leolvashatjuk).

3. A mérés kivitelezése

3.1. Egyensúlyi hőmérséklet meghatározása nulla áram esetén

A mérés elején megmértem, hogy a vízhűtés, és a műszerek bekapcsolása után hosszú idővel (amikor már beállt az egyensúly), mennyi a mért pont $T(I = 0)$ hőmérséklete. A következő adódott:

$$T(I = 0) = (15.5 \pm 0.1)^\circ C$$

A hűtővíz T_0 hőmérsékletét is megmértem a következő módon: az áram bekapcsolásával lehűtöttem az elemet, majd az áram kikapcsolása után a

melegedés közben figyeltem, hogy mi az a hőmérséklet, ahol a Peltier-elemen nem jelenik meg feszültség. A *Seebech-effektus* szerint ez akkor igaz, ha az elem két fele ugyanakkora hőmérsékeltű, vagyis az leolvasott hőmérséklet lesz a réztömb hőmérséklete. Mivel ezt végtelen hőkapacitású hőtartálynak tekintjük, mondhatjuk azt, hogy a kísérlet során végig ez a réztömb hőmérséklete. A valóságban természetesen a hőfejlődés ezt kis mértékben megváltoztathatja. A következő érték adódott a réztömb hőmérsékletére:

$$T_0 = (14.8 \pm 0.1)^\circ C$$

3.2. τ karakterisztikus idő meghatározása

Az nulla áram melletti egyensúly beálltának megvárása után $I = 2.5A$ áramot kapcsoltam, és 5 másodpercenként leolvastam a hőmérsékletet. Ezt addig csináltam, amíg viszonylag lassan nem változott a hőmérséklet. A hőmérséklet időfüggése:

$$T(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} + T_\infty \tag{2}$$

Vonjuk ki az egyenletből T_∞-t, majd logaritmáljuk! Egy egyenes egyenletét kapjuk:

$$\ln(T - T_\infty) = -\frac{t}{\tau} + \ln A \tag{3}$$

Látható, hogy az egyenes meredeksége $-\frac{1}{\tau}$. Az A konstans számunkra nem fontos. Miután lemértem a hőmérsékleteket, kiszámoltam $\ln(T - T_\infty)$ értékeket, ábrázoltam, és egyenest ileltszettem a $\ln(T - T_\infty)(t)$ pontpárokra. A meredekség negatív reciproka τ karakterisztikus idő másodpercben. A mért és számolt adatok az 1. táblázatban találhatók, a következő oldalon. Az adatpontokat, és az illesztett egyenest csatoltam a jegyzőkönyvhöz. Az illesztett egyenes meredeksége:

$$m = (-0.01150 \pm 2.9)\frac{1}{s} = -\frac{1}{\tau}$$

Vagyis:

$$\tau = (87,0 \pm 0.21)s$$

$t(s)$	$T(°C)$	$\ln(T - T_\infty)$	$t(s)$	$T(°C)$	$\ln(T - T_\infty)$
0	15.3	3.15	145	-3.4	1.53
5	15.1	3.14	150	-3.6	1.48
1	14.2	3.1	155	-3.9	1.41
15	13	3.04	160	-4.1	1.36
20	11.9	2.99	165	-4.3	1.31
25	10.7	2.93	170	-4.5	1.25
30	9.6	2.87	175	-4.7	1.19
35	8.6	2.81	180	-4.9	1.13
40	7.7	2.75	185	-5	1.1
45	6.8	2.69	190	-5.2	1.03
50	6	2.64	195	-5.3	0.99
55	5.1	2.57	200	-5.5	0.92
60	4.4	2.52	205	-5.6	0.88
65	3.6	2.45	210	-5.7	0.83
70	3	2.4	215	-5.9	0.74
75	2.3	2.33	220	-6	0.69
80	1.8	2.28	225	-6.1	0.64
85	1.2	2.22	230	-6.2	0.59
90	0.6	2.15	235	-6.3	0.53
95	0.2	2.1	240	-6.4	0.47
100	-0.3	2.04	245	-6.4	0.47
105	-0.7	1.99	259	-6.7	0.26
110	-1.1	1.93	267	-6.8	0.18
115	-1.5	1.87	275	-6.9	$9.53 \cdot 10^{-2}$
120	-1.9	1.81	284	-7	0
125	-2.2	1.76	293	-7.1	-0.11
130	-2.5	1.7	302	-7.2	-0.22
135	-2.8	1.65	315	-7.3	-0.36
140	-3.2	1.57	328	-7.4	-0.51

1. táblázat. Hőmérséklet időfüggése hűtés során

3.3. Egyensúlyi hőmérséklet kimérése az áram függvényében

Ezen mérés során kölönböző áramokat folyattam át a Peltier-elemen. Minden mérésnél vártam kb. 3τ időt ($\approx$ 5 perc) az áram bekapcsolása után, hogy nagyjából beálljon az egyensúly.
A *Peltier-effektus*-nak köszönhetően az áram növelésével lineárisan kell csökkennie a kialakult hőmérsékletnek, ám ebbe más tényezők is beleszólnak. Az elemen, mint ellenálláson fejlődő hő négyzetesen arányos az árammal, így nagyobb áramoknál ez fog dominálni, míg kisebbeknél a *Peltier-effektus*. Beleszól még a dologba a hővezetés, ami jó közelítéssel egyenesen arányos a két test közötti hőmérsékletkülönbséggel, de esetünkben ez nem számottevő, ezért a $T_e(I)$ görbét felfelé nyíló parabolával közelíthetjük. Ez azt jelenti, hogy lesz egy I_{min} gerjesztőáram, amihez egy T_{min} egyensúlyi hőmérséklet tartozik. Ennél a hőmérsékletnél alacsonyabbra nem tudjuk hűteni az elemet.
A mért adatokat a 2. táblázat tartalmazza, grafikonjukat az illesztett parabolával együtt csatoltam a jegyzőkönyvhöz.

$I(A)$	$T_e(°C)$	$U(V)$
1	2.3	1.40
2.5	-8.3	
2.8	-10.5	2.3
3.8	-13.5	3.51
4.5	-14.5	4.05
4.8	-14.8	4.77
5.2	-14.4	
5.5	-14.3	3.90
6	-13.5	4.46

2. táblázat. Egyensúlyi hőmérsékletek

Az illesztett parabola egyenlete:

$$T_e(I) = 1.15I^2 - 11.14I + 12.20$$

Ezt deriválva megkaphatjuk I_{min} értékét:

$$T_e'(I_{min}) = 0 = 2.3I_{min} - 11.14$$

Vagyis:

$$I_{min} = \frac{11.14}{2.3}A = (4.8 \pm 0.30)A$$

A hozzá tartozó T_{min} érték:

$$T_{min} = 1.15 \cdot 4.84^2 - 11.14 \cdot 4.84 + 12.20 = (-14,7 \pm 0.24)^\circ C$$

U_{min}-t a következőképpen határoztam meg: mértem a feszültségeket a különböző egyensúlyi esetekben. Az $U(I)$ függvény kis I értékekre nemlineáris, ezért ezeket a pontokat kihagytam az illesztésből, majd a kapott egyenest betoltam az origóba. Az így kapott egyenesten számoltam ki az I_{min}-hez tartozó U_{min} értéket. Ez technikailag úgy néz ki, hogy az egyenes tengelymetszetét 0-nak vettem. Az egyenes meredeksége: $U = (0.578 \pm 0.0064)I$. Ez alapján:

$$U_{min} = 0.578\frac{V}{A} \cdot 4.8435A = (2.8 \pm 0.21)V$$

Ezen adatok ismeretében a minimumhőmérsékleten (ha az abszolút 0 fokot $-273,15K$-nek vesszük):

- Seebeck-együttható:

$$S_{ab} = \frac{U_{min}}{T_0} = (0,0097 \pm 0,00073)\frac{V}{K}$$

- Peltier-együtthető:

$$P_{ab} = U_{min} = (2.8 \pm 0.21)V$$

- A Peltier-elem jósági tényezője:

$$z = \frac{2(T(0) - T_{min})}{T_{min}^2} = (9,04 \pm 0,013) \cdot 10^{-4}\frac{1}{K}$$

3.4. Seebeck-együttható közvetlen mérése

A Peltier-elemet lehűtöttem kb. $-5°C$-ra, majd kikapcsoltam az áramot. A felmelegedés során mértem a különböző hőmérsékletértékekhez tartozó feszültségérékeket. Az adatokat a 3. táblázat tartalmazza. Az adatpontokat ábrázoltam, és egyenest illesztettem rájuk. Az adatpontok, és az illesztett egyenes grafikonját csatoltam a jegyzőkönyvhöz.
Ekkor az illesztett egyenes meredeksége közvetlenül megadja az elem Peltier-együtthatóját. A következőt kaptam:

$$S_{ab} = (1.073 \pm 0.0053) \cdot 10^{-2} \frac{V}{K}$$

$T(°C)$	$U(V)$	$T(°C)$	$U(V)$
-5	0.21	5.5	0.1
-4	0.2	6	0.1
-3	0.19	6.5	0.09
-2	0.18	7	0.08
-1	0.17	7.5	0.08
0	0.16	8	0.07
1	0.15	8.5	0.07
2	0.14	9	0.06
2.5	0.13	9.5	0.06
3	0.13	10	0.05
3.5	0.12	10.5	0.05
4	0.12	11	0.04
4.5	0.11	11.5	0.03
5	0.11		

3. táblázat. Az elemen mért feszültség a hőmérséklet függvényében

3.5. Ellenállás és hőátadás

Az eddig kiszámolt adatok ismeretében meg tudjuk határozni az elem R_{ab} ellenállását, és h_{ab} hőátadási tényezőjét is. (S_{ab} értékét a közvetlen mérésből vettem.)

$$R_{ab} = \frac{T_{min} S_{ab}}{I_{min}} = (0,58 \pm 0,039)\Omega$$

$$h_{ab} = \frac{S_{ab}^2}{z R_{ab}} = (0,22 \pm 0,017)\frac{W}{K}$$

3.6. További ellenőrzések

Tekintsük a 3.3-as pontban mért adatokat (egyensúlyi hőmérséklet az áram függvényében). Elméleti megfontolásokból adódik a következő összefüggés:

$$\frac{T}{I} = \frac{R_{ab}}{2S_{ab}} + \frac{h_{ab}}{S_{ab}} \frac{T(0) - T}{I^2}$$

Ha $x = \frac{T(0)-T}{I^2}$ függvényében ábrázoljuk az $y = \frac{T}{I}$ adatokat, akkor egy $\frac{h_{ab}}{S_{ab}}$ meredekségű, $\frac{R_{ab}}{2S_{ab}}$ tengelymetszetű egyenest kapunk. A megfelelő x és y értékeket kiszámoltam, és a megfelelő értékekre egyenest illesztettem. A mért és számolt adatokat a 4. táblázat tartalmazza, a grafikont az illesztett egyenessel csatoltam a jegyzőkönyvhöz. (A mért adatok $°C$ mértékegységűek, de a transzformált adatok már Kelvinnel lettek számolva.)

$I(A)$	$T(°C)$	$x = \frac{T(0)-T}{I^2}\left(\frac{K}{A^2}\right)$	$y = \frac{T}{I}\left(\frac{K}{A}\right)$
1	2.3	275.45	13.2
2.5	-8.3	105.94	3.81
2.8	-10.5	93.8	3.32
3.8	-13.5	68.33	2.01
4.5	-14.5	57.48	1.48
4.8	-14.8	53.82	1.32
5.2	-14.4	49.76	1.11
5.5	-14.3	47.06	0.99
6	-13.5	43.28	0.81

4. táblázat. Egyensúlyi hőmérsékletek, áramok, és transzformált adatok

Az adatok jól láthatóan illeszkednek egy egyenesre, ezzel alátámasztva az eméletet. Az illesztett $y = ax+b$ egyenletű egyenes paraméterei (mértékegység nélkül):

$$a = (0.0534 \pm 0.00057)A$$

$$b = (-1.60 \pm 0.064)\frac{K}{A}$$

3.7. Teljesítményegyenlet meghatározása

A hidegpont hőleadása a következőképpen néz ki:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ_P}{dt} - \frac{1}{2}\frac{dQ_J}{dt} - \frac{dQ_V}{dt} - \frac{dq}{dt} = P_{ab}I - \frac{1}{2}R_{ab}I^2 - h_{ab}(T_0 - T) - \frac{dq}{dt} = 0$$

A tagok a legnagyobb hűtés állapotában kiszámolva:

- Peltier-effektus:
$$P_{ab}I_{min} = 13.44W$$
- Joule-hő:
$$\frac{1}{2}R_{ab}I_{min}^2 = 6.68W$$
- Hővezetés:
$$h_{ab}(T_0 - T_{min}) = 6,49W$$
- A környezetből beáramló hő:
$$\frac{dq}{dt} = \frac{dQ_P}{dt} - \frac{1}{2}\frac{dQ_J}{dt} - \frac{dQ_V}{dt} = 0,27W$$

A rendszer egyensúlyban van, a be- és kiáramló hő kiegyenlíti egymást. A képződő Joule-hő durván a fele a Peltier-effetusból származó hűtésnek. A számolások alapján a rendszer nagyon jól el van szigetelve a környezetétől.

4. Eredmények összefoglalása

- Az egyensúlyi hőmérséklet:

$$T(I=0) = (15.5 \pm 0.1)^\circ C$$

- A hűtött réztömb hőmérséklete:

$$T_0 = (14.8 \pm 0.1)^\circ C$$

- A hűtés karakterisztikus ideje:

$$\tau = (87,0 \pm 0.21)s$$

- Legnagyobb hűtés árama:

$$I_{min} = (4.8 \pm 0.30)A$$

- Lenagyobb hűtés hőmérséklete:

$$T_{min} = (-14,7 \pm 0.24)^\circ C$$

- Legnagyobb hűtés feszültsége:

$$U_{min} = (2.8 \pm 0.21)V$$

- Seebeck-együttható a nem közv. módszerrel:

$$S_{ab} = (0,0097 \pm 0,00073)\frac{V}{K}$$

- Seebeck-együttható a közv. módszerrel:

$$S_{ab} = (0.01073 \pm 0.000053)\frac{V}{K}$$

- Peltier-együttható:

$$P_{ab} = (2.8 \pm 0.21)V$$

- Jósági tényező:

$$z = (9,04 \pm 0,013) \cdot 10^{-4}\frac{1}{K}$$

- Ellenállás:

$$R_{ab} = (0,58 \pm 0,039)\Omega$$

- Hőátadási tényező:

$$h_{ab} = (0,22 \pm 0,017)\frac{W}{K}$$