

EGYEDI FEJLESZTÉSŰ KALORIMÉTER HŐTANI JELLEMZŐINEK MEGHATÁROZÁSA

THERMAL CHARACTERISTICS DETERMINATION OF A CUSTOM DEVELOPED CALORIMETER

Domonyi Erzsébet, tanársegéd, Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar,

Dr. Barányi István, adjunktus, Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar,

Prof. Dr. Réger Mihály Antal, egyetemi tanár, Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

ÖSSZEFOGLALÁS

In the engineering practice in a case of laboratory measurement wide variety calorimeter have been used. For the special tasks custom developed calorimeters needed. Before the measurements these calorimeters need to calibrate and determine the heat properties.

In this article the digital thermometer calibration process and the heat loss determination and its compensation to adiabatic environment process have been introduced.

1. BEVEZETÉS

A beton szilárdulási folyamatok a kémiai reakciók miatt hőtermelési folyamatok zajlanak le. Ezek az exoterm folyamatok a kialakított nagyméretű szerkezetben a nem homogén eloszlású hőtágulások repedéseket okozhatnak. Szakirodalom alapján az ilyen károsodási folyamatok már 0,5 méter vastag betonelemeknél is megfigyelhetők.

A repedés keletkezés elkerülése végett a cement hőtermelését kaloriméterekkel vizsgálják. A szakirodalmat tekintve vagy szabványos méréseket végeznek [1] szerint, vagy pedig egyedi fejlesztésű kalorimétereket [2],[3], [4] alkalmaznak.

Radel és Navidi [5] művében kiemeli, hogy az egyedi fejlesztésű „coffe cup” típusú kaloriméter szigetelése megfelelő labormérések elvégzéséhez.

Hill és Petrucci [6] is ezt az állítást fogalmazza meg és leírja, hogy a styrofoam hőszigetelés nagyon kicsi hőveszteséget okoz.

Brandy and Senese [7] művében felhívja a figyelmet arra, hogy a coffe cup kalorimétereknek kicsi a hővesztesége és rövid idő alatt végbemenő reakciók vizsgálatára ajánlja.

A szakirodalom alapján elmondható, hogy a habosított anyaggal szigetelt kaloriméterek alacsony árak miatt egyre széleskörűbben

elterjednek, alkalmazásuk határát a szigetelőképességük és a mérés időtartama szabja meg. Rövid idejű mérések esetében alkalmazásuk hőkompenzációs modellek nélkül is ajánlott.

Jelen cikkükben a szerzők egy cementhabarcs korai szilárdulási exoterm folyamatait hőtanilag jellemző kaloriméter mérőrendszerének a felépítését, mérési elvét és kalibrálását, valamint hőveszteségre történő kompenzálását mutatják be nagy időtartamú mérések esetén.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1. A kaloriméter és az adatgyűjtő felépítése

A megvalósított kaloriméter tervezésekor az előírások mellett irányelvként [8] előírásait vettük figyelembe. A test egy 110 cm belső átmérőjű és 130 mm magas álló hengeres cső, melyet minden oldaláról 10 cm-es EPS szigetelőanyaggal láttunk el. A hengeres test vízzáróságát tömítőanyaggal biztosítottuk. A kaloriméter légkondicionált helyiségben került elhelyezésre a méréskor használt asztalra, így szigetelve el a padló befolyásoló hatásától.

A konstrukcióban a hőelem bevezetése felülről, a minta közepébe történt. A méréshez DS18B20 hőelemet alkalmaztunk. A hőelem jellemzőit az 1. táblázat foglalja össze.

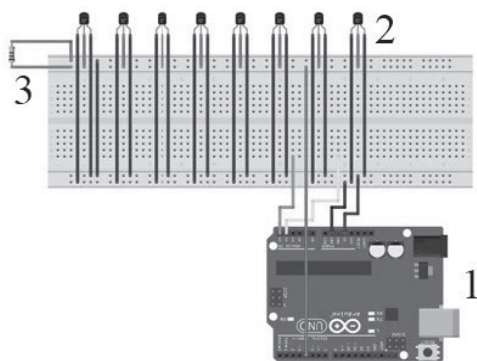
1. táblázat. Hőelemek tulajdonságai

	DS18B20
Üzemi hőmérséklet	-55...125°C
Mérési pontosság	-10°C és +85°C között: ± 0.5°C
Kialakítás	vízálló rozsdamentes acélhüvely
Méret	6 x 50 mm
Feszültség tartomány	3...5.5V
Jeltovábbítás módja	digitális

Az alkalmazott hőelem digitális formában küldi el az adatgyűjtőnek a hőmérséklet értékét, a gyári azonosító számát és a küldött adatok CRC

kódját. Az 1. táblázat alapján pontossága $\pm 0.5^\circ\text{C}$, mely pontosság [1] szerint kalibrálás nélkül nem megfelelő. Digitális jelátvitel miatt a hőelem közvetlenül nem kalibrálható adott hőmérsékletre, illetve hőmérsékletekre, így szoftveres kalibrálásra volt szükség.

Adatgyűjtésre az 1. ábra szerinti Arduino kapcsolást alkalmaztuk.



1. ábra. A mérési adatgyűjtő összeállítási rajza

Az 1 jelű Arduino Uno vezérlő 5-ös bemenete gyűjti össze a 2 jelű hőelemek jelét. A hőelemek úgynevezett egy vezetékes kapcsolásba vannak egymással párhuzamosan kötve. A lekérdezés a hőelem gyártási száma alapján történik. A hőelemek az 5V-os tápellátást a panelről kapják. A 8 darab hőelem adatlábát és a +5V feszültséget egy 4,7 kOhm-os ellenállással kötöttük párhuzamosan, mivel a panel belső ellenállása nem elegendő ennyi szenzorhoz parazita kapcsolási módban.

Az adatgyűjtő feladatainak megvalósítása Matlab Arduino illesztéssel történt. A mikroprocesszoros és a szenzor támogató csomagok segítségével definiáltuk a mérések számát, mérés időtartamát, valamint a hőmérséklet lekérdezéseket és az adatrögzítést. 8 érzékelő esetén 3-3,5 másodperc közötti lekérdezési időre volt szükség.

A hőmérők egymáshoz kalibrálása 5000 darab mérési adat felhasználásával, szobahőmérsékletű levegő segítségével történt 10 másodperces mérések közötti intervallummal.

A kaloriméter veszteségének meghatározásakor 8 dl ionizált vizet használtuk. A mintatartót közel 80°C -os hőmérsékletű ioncserélt vízzel töltöttük fel. A hőmérséklet felfutási szakaszát nem használtuk a kalibrációhoz, így az adatok 55°C alatti értékeit használtuk fel.

A hőmérsékletváltozás állandó szigetelési vastagság esetén az alábbi differenciálegyenlettel írható fel:

$$C_{\text{viz}}m dT = -kA(T_{\text{pill}} - T_{\text{külső}})dt \quad (1)$$

ahol:

C_{viz} = a víz fajhője 4186 [J/(kgK)]

$T_{\text{külső}}$: környezeti hőmérséklet $[\text{K}]$

T_{pill} : pillanatnyi hőmérséklet $[\text{K}]$

T_0 : kiinduló hőmérséklet $[\text{K}]$

k : hőátbocsátási tényező $[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$

A : felület $[\text{m}^2]$

m : víz tömege $[\text{kg}]$

t : idő $[\text{sec}]$

Az egyenlet megoldásakor kezdeti feltételként a $t=0$ sec esetén az egyes hőmérséklet érzékelőknél mérhető hőmérsékletet használtuk fel.

Az egyenlet megoldását (2) formában határoztuk meg:

$$T_{\text{pill}} = (T_0 - T_{\text{külső}})e^{-\frac{kA}{cm}t} + T_{\text{külső}} \quad (2)$$

2.2. A hőmérséklet kompenzálása a kaloriméter veszteségével

A hőmérséklet mérésekor az első mért hőmérséklet nem szorul kompenzálásra. Minden további hőmérséklet érték az előző alfejezetben ismertetett (3) egyenletből meghatározott kA szorzat segítségével kompenzálásra szorul, hogy az adiabatikus környezetben történő hőmérsékletet, illetve hőtermelést tudjuk jellemezni.

A hőmérséklet veszteség a féladiabatikus rendszerben:

$$T_{\text{veszteség}}(t=i) = \frac{kA}{c_{\text{ch}}m_{\text{ch}}}\Delta t \cdot (T_0 - T_{\text{mért}}(t=i-1)) \quad (3)$$

ahol:

c_{ch} : cementhabarcs fajhője $[\text{J}/(\text{kgK})]$

m_{ch} : cementhabarcs tömege $[\text{kg}]$

i : mérés száma $[\text{db}]$

T_0 : első mérés hőmérséklete $[\text{K}]$

A hőmérséklet pedig adiabatikus rendszerre vonatkozva:

$$T_{\text{kompenzált}}(t=i) = T_{\text{mért}}(t=i) + \sum_{t=1}^{t=i-1} T_{\text{veszteség}}(t) \quad (4)$$

2.3. A hőtermelés meghatározása

A cementhabarcs hőtermelését a szakirodalom kétféleképpen definiálja. Szabványos mérési eljárás esetén a hagyományosnak mondható $[\text{Joule}/\text{gramm}]$ alak az elterjedt, viszont további munka esetén a végeselemes programok bemeneteként többhelyen megtalálható a $[\text{Watt}/\text{s}]$ mértékegység is. Az alfejezetben ez utóbbi meghatározását mutatjuk be.

A kompenzált hőmérsékletből számított hőváltozás a (5) egyenlettel történik.

$$\Delta q(i) = c_{\text{ch}}m_{\text{ch}}(T_i - T_{i-1}) \quad (5)$$

A teljes folyamatra meghatározott hőtermelés (6) szerint:

$$q(t) = \frac{\sum_{i=1}^t \Delta q_i}{t} \rho_{\text{ch}} \quad (6)$$

ahol:

$q(t)$: hőtermelés [W/m^3]

ρ_{ch} : cementhabarcs sűrűsége [kg/m^3]

t : eltelt idő [sec]

3. EREDMÉNYEK

3.1. A hőérzékelők egymáshoz kalibrálása

A hőmérők kalibrálásakor Az S1 azonosítójú szenzorhoz készítettük el a kalibrációt. A méréskor szobahőmérsékletre végeztük el a számításokat mely a mérés közben $19^\circ C \pm 0,5^\circ C$ volt. A mérésekor a hőmérséklet különbségeket használtuk csak fel, mivel a későbbi mérésekor az alapanyagok 24 órás temperáláson estek át.

Az eredményeket a 2. táblázat foglalja össze. Az eltérések az előjelek a referencia értéktől a kisebb vagy nagyobb hőmérsékleteket jelentik. Az átlagos eltérés az 5000 darab mérési eredmény számtani közepéből származtattuk.

2. táblázat. Hőelemek egymástól való eltérései

Azonosító	Eltérés		
	minimális	maximális	átlagos
S1	0 °C	0 °C	0 °C
S2	-0,125 °C	-0,250 °C	-0,197 °C
S3	0 °C	-0,063 °C	-0,034 °C
S4	-0,063 °C	-0,375 °C	-0,255 °C
S5	-0,188 °C	-0,313 °C	-0,236 °C
S6	-0,125 °C	-0,313 °C	-0,234 °C
S7	-0,313 °C	-0,438 °C	-0,396 °C
S8	0,063 °C	-0,063 °C	-0,023 °C

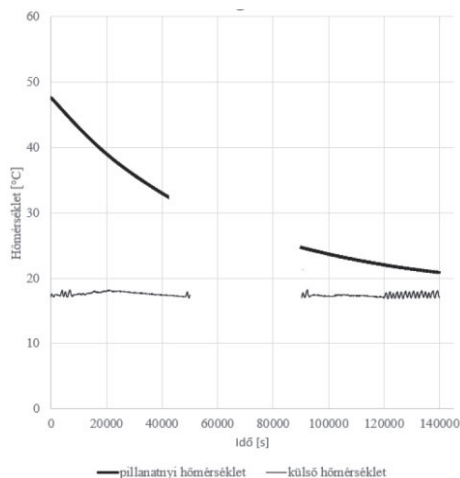
3.2. A kaloriméter hőveszteségének meghatározása.

A kaloriméterek hőveszteségének meghatározásához légkondicionált teret használtunk. A hőveszteség meghatározása számolással a légkondicionált helyiség hőmérséklet változása, valamint a kaloriméter elhelyezéséből adódó egyéb felületek, valamint a nyílászáróknál keletkező sugárzó hő miatt nehézkes.

A méréskor 6 darab kalorimétert használtunk, 2 hőelemmel a külső hőmérsékletet mértünk (ebből az egyik a további méréseknél tartalékként üzemelt, esetleges hőelem meghibásodás esetén a kiértékelhető mérések számát növelte).

A mérés végét az első kaloriméter belsejének $21^\circ C$ alá történő csökkenésének segítségével határoztuk meg. A méréskor 14000 mérési pontot rögzítettünk (közel 39 óra mérés). A függvényközelítéskor a mérés 1-5000, valamint 9001-14000 pontjait használtuk fel. A pontok első intervallumára az exponenciális függvény kezdeti meredekség változásának megfelelő közelítésére,

az utolsó 5000 pontra pedig a függvény végtelenbe vett érintője miatt volt szükség. Az adatsorokból egy kaloriméteren belüli szenzor és egy környezeti hőmérsékletet mérő szenzor jelét a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra. Hőmérséklet- idő diagram feldolgozáshoz használt alakja

A (3) egyenlet által meghatározott összefüggésben a kA szorzat értékét határoztuk meg a felvett hőmérséklet – idő adatokból. A függvényközelítéshez nemlineáris legkisebb négyzetek módszerét alkalmaztuk TRM algoritmussal. A közelítéskor a maximális iterációk száma 400 volt. A regressziószámítás eredményeit a 3. táblázat foglalja össze (S3 és S7 érzékelők a szobahőmérsékletet mérték).

3. táblázat. kA értékei

Azonosító	kA [W/K]	R^2
S1	0,0599	0,9997
S2	0,06105	0,9998
S4	0,06141	0,9997
S5	0,06119	0,9997
S6	0,05977	0,9997
S8	0,06032	0,9997

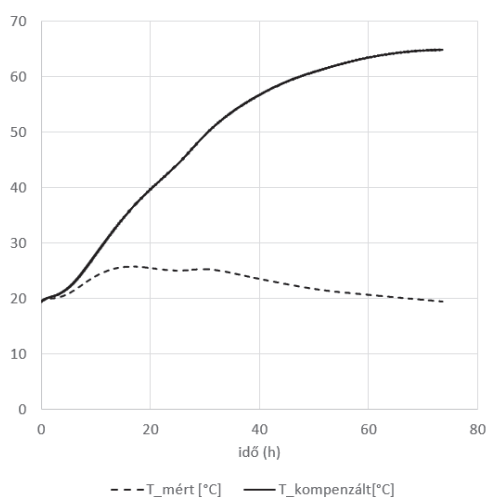
A 3. táblázat értékeiből látható, hogy látható, hogy a függvényközelítés szórásnégyzete nagyobb 0,99-nél. A kA szorzatból a továbbiakban számításokat lehet végezni a hőátbocsátási tényezőre vonatkozóan, viszont a további számításoknál nincs szükség külön erre az értékre, így a számításoknál a 3. táblázatban ismertett szorzatok kerülnek felhasználásra.

3.3 A CEM III típusú cementhabarcs hőmérsékletváltozásának meghatározása

A CEM III típusú habarcs vizsgálatához az előkészületeket az [1] szerint végeztük. A

méréskor az adatokat percenként rögzítettük. A mérés teljes időtartamát a mérés elején csak becsülni lehetett, így követelményként azt a célt fogalmaztuk meg, hogy a mérés végét az 1 órán át nem változó mintahőmérséklet határozza meg. A vizsgálat így 73,5 óra volt.

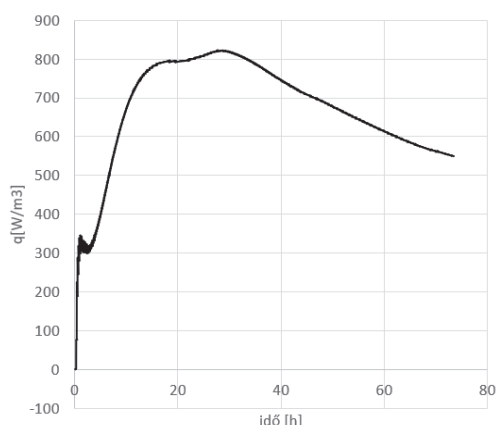
A féladiabatikus rendszerben a hőmérsékletváltozást a 3. ábra szaggatott vonala jelzi. A diagramm folyamatos vonalával a hőmérséklet kompenzációs modell alkalmazásának eredményét láthatjuk.



3. ábra. Hőmérséklet- idő diagram CEM III esetén

3.4. A hőtermelés meghatározása

A (5) és (6) szerinti hőtermelést a 4. ábra szemlélteti. A mérés alapján megfigyelhetők az egymásra épülő kémiai folyamatok, valamint az, hogy a szakirodalom által alátámasztott 25-35 órák között van a CEM III típusú cement maximális hőtermelése.



4. ábra. Hőtermelés- idő diagram CEM III esetén

4. KÖVETKEZTETÉSEK

A beton hőtermeléséhez készített kaloriméterhez végrehajtottunk egy digitális hőmérő

kompenzálást, majd differenciálegyenlet segítségével megvizsgáltuk a hőszigetelt habarcastartó hőtani tulajdonságait forróvízes mérés segítségével. A felállított modell megfelelőségét statisztikai módszerekkel ellenőriztük.

A vizsgálat eredményeképpen kA szorzat segítségével sikerült összekapcsolnunk a féladiabatikus modellt az elméleti, hővesztés nélküli esettel, így a betonhabarcs hőmérsékletét sikerült megkapnunk monoton változó függvényként. A függvény segítségével a habarcs fizikai jellemzőivel meghatároztuk a CEM III minta 1 m^3 vonatkozó hőtermelését az idő függvényében.

Jelen eredmények segítségével a továbbiakban nem állandó intenzitású hőforrás végeselemes modelljével repedésvizsgálatot, illetve szilárduláskori keletkező húzófeszültségek vizsgálata vált lehetővé.

5. IRODALOM

- [1] MSZ EN 196-1:2010 Magyar Szabványügyi Testület: Cementvizsgálási módszerek-Hidratációs hő. Féladiabatikus módszer. 2010 október.
- [2] Yunus Ballim: A numerical model and associated calorimeter for predicting temperature profiles in mass concrete, *Cement and Concrete Composites* 26(6),2004, pp. 695-703
- [3] G. Gibbon, Y. Ballim, and G. Grieve, "A Low-Cost, Computer-Controlled Adiabatic Calorimeter for Determining the Heat of Hydration of Concrete," *Journal of Testing and Evaluation* 25(2), 1997, pp. 261-266. <https://doi.org/10.1520/JTE11488J>
- [4] R. Springenschmid: *Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages*, CRC Press, 1998, pp. 364
- [5] Radel, S.R., Navidi, M. H.: *Chemistry*, 2nd edn., West: St. Paul, MN, 1994
- [6] Hill, J.W., Petrucci, R. H.: *General Chemistry: An Integrated Approach*, 2nd edn., Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, 1999
- [7] Moore, J.W., Stanitski, C. L., Jurs, P. C.: *Principles of Chemistry: The Molecular Science*, Brooks/Cole: Belmont, CA, 2010
- [8] Gyula Szabó: Usability of machinery, *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, 2017, pp.161-168

AZ INNOVÁCIÓS ÉS TECHNOLÓGIAI MINISZTERIUM ÚNKP-20-3 KÓDSZÁMÚ ÚJ NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT.