

HŰTŐGÉPEK HŐTECHNIKAI ANALÍZISE

Illés Tamás – Mészáros Károly Marcell – Pozsa Ákos – Bolló Betti –
Szaszák Norbert – Bencs Péter

Absztrakt: Háztartási hűtőberendezések hozzátartoznak mindennapjainkhoz. Mivel folyamatosan működő berendezésekről van szó, kiemelten fontos, hogy a felhasznált villamos energiát milyen hatásokkal hasznosítják. A felhasznált energia mennyiségét több tényező együttesen határozza meg. Ilyen például a hűtőaggregát hatásfoka, a hőszigetelés hatásossága, a hűtőtérben kialakuló hőmérséklettér egyenletessége stb. A hűtőberendezések igen nagy számban készülnek, s erős a konkurenciaharc. Ezért a gyártók oldaláról felmerül az igény, hogy a lehető legjobb hatásfokon túl az anyagfelhasználás minél kevesebb, a gyártási technológia pedig a lehető legegyszerűbb legyen. Tehát az a cél, hogy a lehető legolcsóbban a lehető legjobb hatásfokú készülékek készüljenek. Ezért a berendezések minden elemét kísérleti és elméleti analízisnek kell alávetni. Jelen cikkben két hűtőberendezés vizsgálatáról számolunk be: az egyik egy fagyasztóláda, a másik viszont egy hűtőszekrény. Mindkét berendezés esetén a hűtő belsejében és a gép többrétegű falában kialakuló hőjelenségeket vizsgáljuk. A vizsgálatok során egy egyedileg fejlesztett mérőrendszert használunk. A mérési eredményeket összevetjük numerikus szimuláció előzetes eredményeivel. A vizsgálatnak nem tárgya a hűtőaggregátok modellezése.

Abstract: Household refrigerators are part of our everyday life. As it is a system of continuous operation, the electrical efficiency is a major thing. The amount of energy used is determined by several factors together. Such as the efficiency of the cooling unit, the efficiency of the thermal insulation, the uniformity of the temperature in the refrigerator compartment, etc. The refrigerators are made in a very large number and the competition among the manufacturers is strong. For this reason, there is a need on the manufacturers' side to use as less material as possible and to make production technology as simple as possible. So, the target is to make the best possible devices at the lowest possible cost. Therefore, all elements of the equipment should be subjected to experimental and theoretical analysis. In this article, we will review two chillers: one is a freezer and the other is a refrigerator. For both devices, the thermal phenomena in the interior of the refrigerator and in the multi-layer wall of the machine are examined. We use an individually developed measuring system. The measurement results are compared with preliminary results of numerical simulation. The modelling of the cooling units is not part of the article.

Kulcsszavak: hűtő, hőtechnika, szimuláció, mérőrendszer

Keywords: refrigerator, heat engineering, simulation, measuring system

1. A vizsgálatok célja és eszközei

Vizsgálataink során tehát a hűtőberendezések belsejében és hőtároló falakban kialakuló áramlás- és hőjelenségeket vizsgáltuk. Mindkét esetben először terheletlen, tehát üres hűtőberendezést vizsgáltunk. Ezután a hűtő fagyasztó terébe elhelyeztünk szabványos, illetve tipikus „élelmiszereket”, s a modellezést így végeztük el. Vizsgálatunk kiterjedt a hűtő-fagyasztó térben kialakuló sebesség- és hőmérsékleteloszlás jellegzetességeinek felderítésére, s ebből az egyes falszakaszokon a hőveszteség meghatározására. A hűtőszekrény esetén külön feladat volt a teljes lehűlési folyamat modellezése.

A numerikus szimulációkat a ANSYS FLUENT szoftvercsomag segítségével végeztük. Az eredmények validálására saját és gyári mérések szolgáltak.

A hűtőberendezések belsejében kialakuló inhomogén, időben változó hőmérséklet- és sebességmezőre felírható a Navier-Stokes mozgásegyenletből (három vetületi egyenlet, 1.1, 1.2, 1.3), a kontinuitási egyenletből (1.4) és az energiaegyenletből (1.5) álló parciális differenciálegyenlet-rendszer.

$$\rho \cdot \frac{\partial v_x}{\partial t} + \rho \cdot \left(v_x \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = \rho \cdot \left[f_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \right] \quad (1.1)$$

$$\rho \cdot \frac{\partial v_y}{\partial t} + \rho \cdot \left(v_x \cdot \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = \rho \cdot \left[f_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \right] \quad (1.2)$$

$$\rho \cdot \frac{\partial v_z}{\partial t} + \rho \cdot \left(v_x \cdot \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \rho \cdot \left[f_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \right] \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left(v_x \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) = \rho \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (1.4)$$

$$\rho \cdot c_p \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \quad (1.5)$$

Az egyenletekben:

x, y, z	a három helykoordináta,
t	az idő,
$T(x, y, z, t)$	a hőmérséklettér,
$v_x = v_x(x, y, z, t)$	a sebességtér x irányú komponense,
$v_y = v_y(x, y, z, t)$	a sebességtér y irányú komponense,
$v_z = v_z(x, y, z, t)$	a sebességtér z irányú komponense,
$\lambda = \lambda(T(x, y, z, t))$	a hővezetési tényező,
$\rho = \rho(x, y, z, t)$	a sűrűségtér,
ν	a kinematikai viszkozitás,
c_p	az állandó nyomáson értelmezett fajhő,
f_x, f_y, f_z	a tömegerőtér x, y és z irányú komponense.

Általános esetben az előző egyenletrendszerben hat ismeretlen függvény van, melyek mindegyike a három helykoordináta és az idő függvénye. Meghatározásukhoz szükség van még egy egyenletre, amely a három állapotjelző (p, T, ρ) közötti kapcsolatot írja le. Ez az egyenlet vagy az általános gáztörvény (1.6.a), vagy a természetes áramlásoknál a sűrűség és a hőmérséklet közötti kapcsolatot leíró összefüggés (1.6.b), ahol β a térfogati hőtágulási együttható és T_{ref} a vonatkoztatási hőmérséklet.

$$\frac{p}{\rho} = R \cdot T \quad (1.6.a)$$

$$\rho(T) = \rho(T_{ref}) \cdot [1 + \beta \cdot (T - T_{ref})] \quad (1.6.b)$$

A differenciálegyenlet-rendszer megoldásához ezen kívül még a kezdeti és peremfeltételi egyenletek is szükségesek.

A hűtőberendezések belsejében kialakuló áramlás modellezésekor az (1.1)-(1.6) egyenletrendszert kell megoldanunk. A szilárd határoló falak mindegyikében a sebességtér zérus, így ott csak az energiaegyenletet kell megoldani. A megoldás első lépéseként az adott geometriai kialakítás esetére, a belső térre és a határoló fal minden rétegére felírjuk a differenciálegyenleteket, leírjuk a kezdő- és peremfeltételeket. Az így kapott parciális differenciálegyenlet rendszer összetettsége miatt csak numerikusan oldható meg. A numerikus megoldás megvalósítására az általánosan használt ANSYS FLUENT szoftvert alkalmaztuk.

A vizsgálatok eszközrendszere mindkét hűtőberendezés esetében azonos volt.

2. Fagyasztóláda analízise

Vizsgálatunk célja egy AEG fagyasztóláda numerikus vizsgálatához szükséges peremfeltételek meghatározása, melyek a későbbi kiértékelések és elemzések validálásául szolgálnak.

Az 1. ábrán látható a fagyasztóláda és a mérésekhez használt műszerek. A fagyasztó oldalain és belsejében elhelyezett hőmérők helyzetét a 3. ábra mutatja.

A hőmérsékletek mérésére egy egyedileg fejlesztett mérőrendszert dolgoztunk ki. A T típusú hőelemek az ún. Thermocouple Phidget-ekhez (TMP1101_0) kapcsolódtak. Egy ilyen eszköz 4 hőelemet képes fogadni, gyári pontossága ± 2 °C, mely pontosság a tendenciavizsgálatokhoz elegendő, később kalibrálással növelhető. A számítógépes összeköttetést VINT Hub Phidget-ek (HUB0000_0) biztosították. A mérés elrendezésének vázlatát a 2. ábra mutatja.

Példaként az alábbi vizsgálatokat emeljük ki az elvégzettek közül:

- Az üres és a terhelt fagyasztóláda áramlás- és hőtani paramétereinek összehasonlítása
- A tetőszigetelés megváltoztatásának hatása

Az üres fagyasztón elvégzett mérések és numerikus szimulációk után szabványos vizsgálócsomagokkal feltöltöttük a ládát és újra elvégeztük a méréseket (4. ábra).

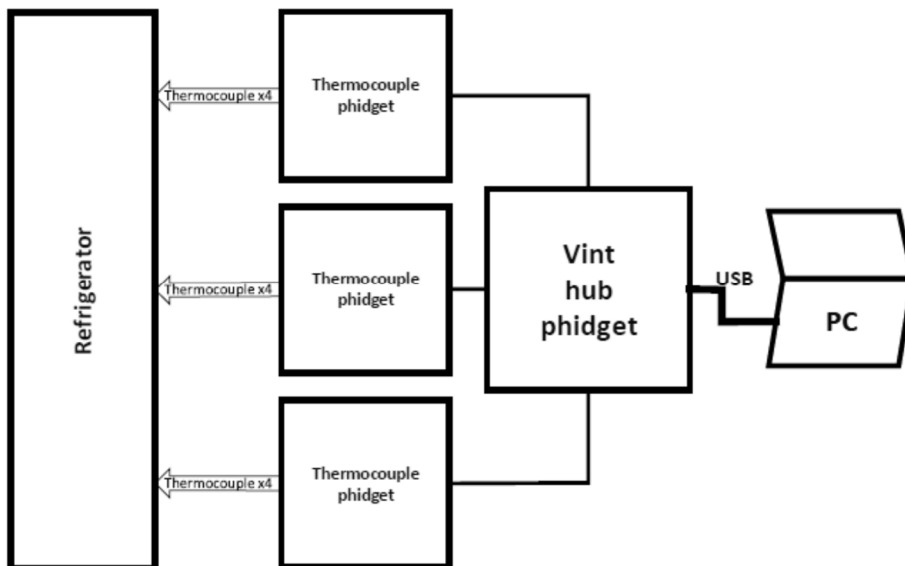
Mindkét esetben kijelenthető, hogy a numerikus szimuláció jól megközelíti a mért (döntően hőmérsékleti) eredményeket.

1. ábra: AEG ARCTIS 83400HLW0 fagyasztóláda



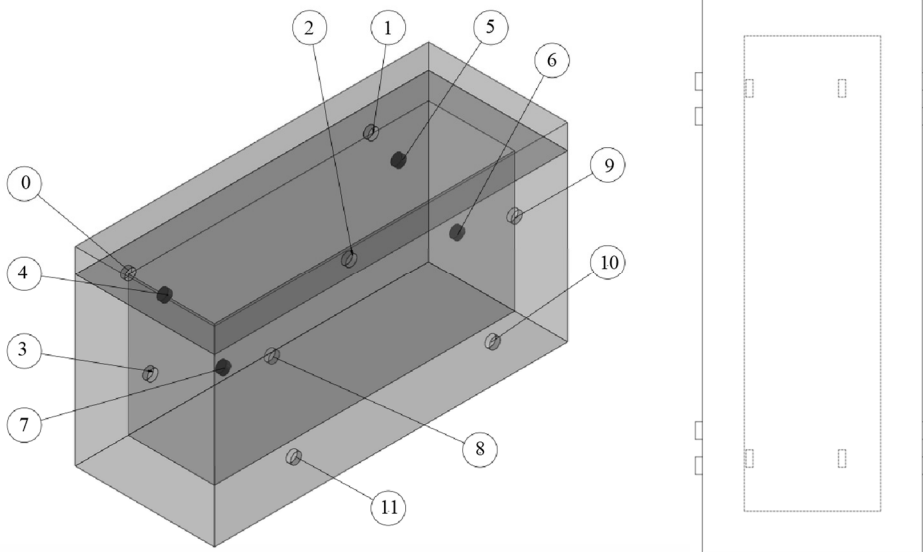
forrás: szerző saját fényképe

2. ábra: Mérés vázlat



forrás: szerző saját szerkesztése

3. ábra: Hőmérők elhelyezése



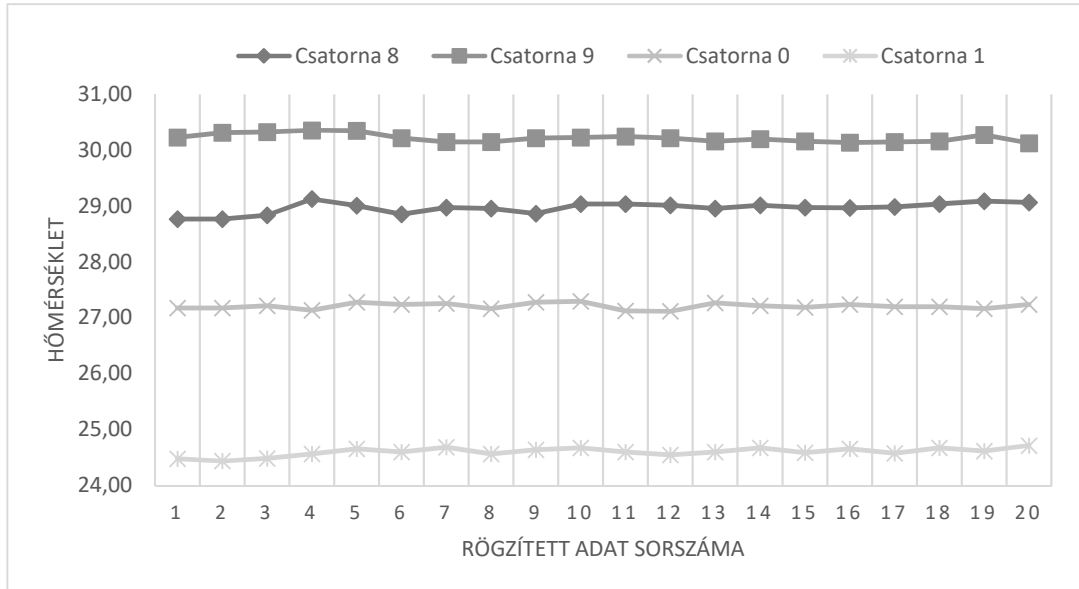
forrás: szerző saját szerkesztése

4. ábra: Vizsgálócsomagokkal feltöltött fagyasztóláda



forrás: szerző saját fényképe

5. ábra: Külső falak hőmérsékletei (°C)



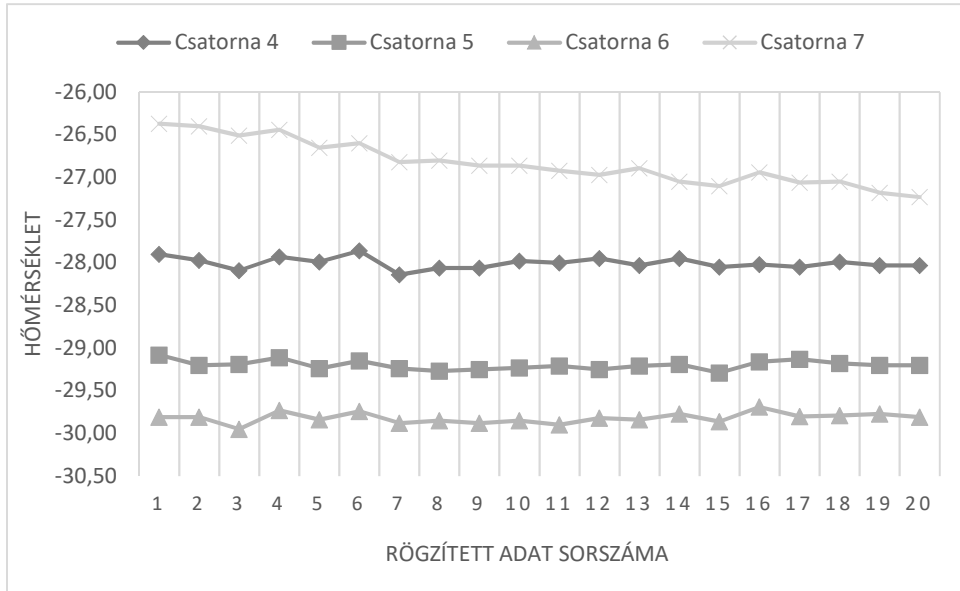
forrás: szerző saját szerkesztése

Az üres hűtőszekrényhez képeset jelentősen leszűkült az áramlási térben terhelés esetén a sebességeloszlás átstrukturálódott. Az a kellemetlen hatás viszont megmaradt, hogy a hűtőtér hűtőaggregát felőli sarkában holtter alakul ki. A hőmérsékletmező kellő idő után mind a hűtőtérben mind a falzatban beáll egy stacionárius állapotra.

Az 5. ábrán látható diagram a fagyasztóláda külső falain mért hőmérsékleteket mutatja. A mérést 10 percig végeztük, a mért adatokat 30 másodperces időközönként rögzítettük. A 8-as és 9-es csatornák hőelemei az elülső fal felső részén, a 0-ás és 1-es csatornáké a hátsó fal felső részén találhatóak. A különbségek a hőleadó felületek elhelyezkedéséből adódnak.

A 6. ábrán a vizsgálócsomagokkal feltöltött fagyasztóláda belsejében mért hőmérsékleteket ábrázoltuk. A mérés előtt a fagyasztót kellő ideig üzemelni hagytuk, így stacionárius hőmérsékleti értékeket vártunk.

6. ábra: Belső hőmérséklet (°C)



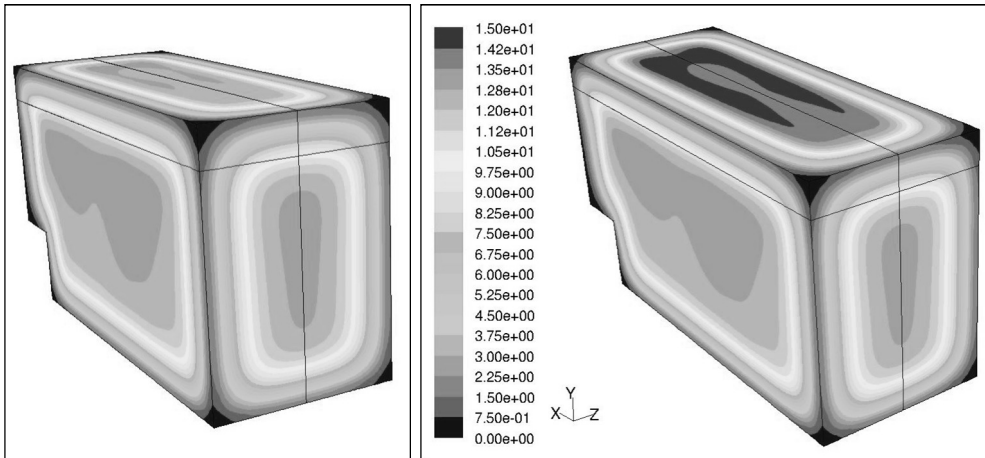
forrás: szerző saját szerkesztése

A következőkben a mérési eredmények és eljárás bemutatása mellett a kutatásunk numerikus vizsgálataink eredményeit mutatjuk be.

A numerikus vizsgálatok eredményeit az előzőekben bemutatott hőmérsékletmérési módszerrel validáltuk. A mérés és numerikus vizsgálat eredményei nagyon jó közelítést mutattak.

Numerikus vizsgálat nagy lehetőséget jelent a különböző geometriai módosítások elemzésére. Elsőként a hűtőláda tetejének hőszigetelését vékonyítottuk meg. A 7. ábrán az így kialakuló hőáramok eloszlása látható. Jól kivehető, hogy a csekélyebb hőszigetelés hatására a megnövekedett a tetőn keresztüli hőfelvétel, azaz nőtt a hűtőgép vesztesége. Numerikus vizsgálatok következő fázisában a hűtő belterében kialakuló áramlást megváltoztató geometriai kialakítások hatását vizsgáljuk majd.

7. ábra: A felvett hő eloszlása, jobbra a vékonyított szigetelés esetén



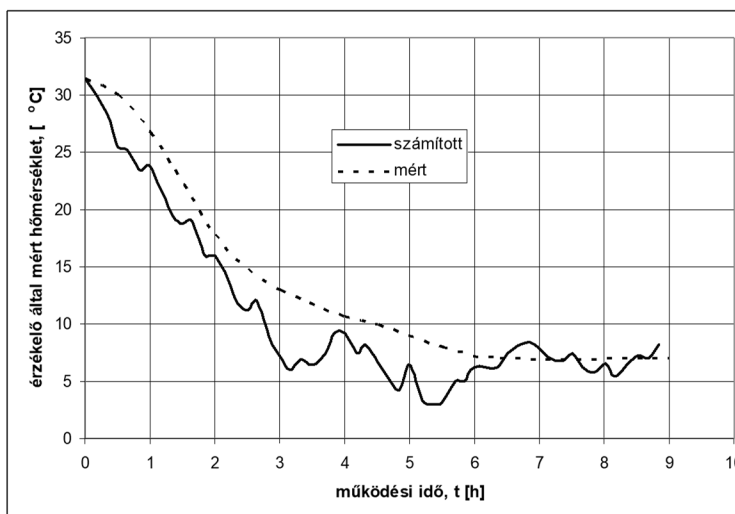
forrás: szerző saját szerkesztése

3. Hűtőszekrény analízise

A hűtőszekrény vizsgálatok a teljes hűlési folyamat vizsgálata, modellezése volt a feladatunk. A hűtő egy jellegzetes pontján elhelyezett hőmérsékletérzékelő jeléből kiindulva egy elektronikus egység kapcsolja ki-be a hűtőaggregátot. A vizsgálat során az aggregát nem került modellezésre, ezért a vezérlésnek megfelelő hőelvonás változást egy, az ANSYS FLUENT programba épített kóddal helyettesítettük. Ez egy hőátadó símba elhelyezett hőelnyelőn keresztül valósítja meg a hűtési folyamatot.

A hűlési folyamat modellezésekor jó közelítéssel sikerült a méréssel kapott értékeket elérni. A 8. ábra a hőmérsékletérzékelő pontban számított és mért értékek időbeli változását mutatja a lehülés során.

8. ábra: Mért és számított hőmérsékletek időbeli változása



forrás: szerző saját szerkesztése

A folyamat végén az egyezés már igen jó. A hűlési folyamat nagyon lassú, ezért tekinthető úgy, hogy egyensúlyi állapotok sorozatán keresztül jut el a hűtő a stacioner állapotba. Az elvont hő jó közelítéssel megegyezik a kívülről a hűtőbe beáramló hővel.

A szimuláció és a mérések eredményei azt mutatták, hogy a hűtőgép közepénél elhelyezett polc alatti térben viszonylag egyenletes a hőmérsékleteloszlás, értéke az előírt 5 – 7 °C között van. Azonban a hűtőlemez környezetében ennél lényegesen alacsonyabb, -2 – -3 °C, míg a hűtőtér tetején viszont a kelletténél magasabb a hőmérséklet.

Összefoglalás

A mérési eljárás kidolgozása a jövőbeli mérések pontosabb és gyorsabb megvalósíthatóságát teszik lehetővé. A mérési eredmények automatizált adatgyűjtésének optimalizálásán jelenleg is dolgozunk, de a kezdeti bemutatott eredmények biztatóak. A mérési eredmények és a numerikus vizsgálatok eredményei jól korrelálnak.

A fent vázolt számítások igazolják, hogy az ANSYS FLUENT szoftver kiválóan alkalmas a hűtőberendezésekben kialakuló természetes és kényszeráramlás szimulációjára. A szoftverrel végzett szimulációkkal:

- meghatározható a hűtőberendezésekben kialakuló áramlás sebesség-, nyomás-, sűrűség- és hőmérséklettere,
- kiszámítható a környezetből beérkező hőáram értéke (a hőterhelés),
- feltárható a hűtőberendezés hőszigetelésének gyenge pontjai,
- elvégezhető a lehűlési folyamat szimulációja is,
- ellenőrizhető, hogy a berendezés tervezése során különböző paraméterek megváltoztatása milyen hatást gyakorol a hűtő belsejében kialakuló áramlás sebesség-, nyomás-, sűrűség- és hőmérsékletterére.

Köszönetnyilvánítás

Az ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-00011 jelű „Fiatallódó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- Dr. Tolvaj Béla, Benke Mátyás: Megnövelt belső felületű hőcserélőcsövekben kialakuló hőmérsékleteloszlások modellezése *OGÉT 2004 XII. Országos Gépész Találkozó, Csíksomlyó, 2004 p. 307-309.*
- Zámborszky Betti, Benke Mátyás, Dr. Tolvaj Béla: CFD simulation of heat exchanger *OGÉT 2005 XIII. Országos Gépész Találkozó, Szatmárnémeti, 2005 p. 354-358.*
- Betti Bolló, Gábor Janiga, Szilárd Szabó: Modelling of units of fan electrically heated furnace, *Micro CAD International Computer Science Conf. kiadványa, 2006, No. E. 1-6.*
- László Gyulai, Szilárd Szabó: Hydrodynamic numerical analysis of a metallurgical exhaust hood, *Micro CAD International Computer Science Conf. kiadványa, 2006, No. E. 27-32.*

- M. Pearse: Modelling methodology for thermo-electric coolers in CFD, 2008 *2nd Electronics System-Integration Technology Conference kiadványa*, 2008 p. 1171-1174.
- M. Benke, Sz. Szabó, J. Franke: Determination of the optimal fuel-air ratio in an industrial pre-heater, *International PhD Conf. on mechanical of Mechanical Engineering, Pilsen, 2006*, 9-10.
- M. Benke, B. Záborszky, A. Klimanek: Numerical investigation of a heat accumulator tank with a spiral tube heat-exchanger inside, *Micro CAD International Computer Science Conf. kiadványa*, 2004, No. D. 97-101.
- Fluent Inc., „Fluent 12.0 User’s Guide”, *Fluent Inc*, 2009.