

ÉGÉSI LEVEGŐT ELŐMELEGÍTŐ HŐCSERÉLŐ FEJLESZTÉSE KANDALLÓHOZ

DEVELOPMENT OF HEAT EXCHANGER FOR DOMESTIC FIREPLACE TO PREHEAT AIR FOR BURNING

Dúl Róbert*, Dr. Palotás Árpád Bence*,
Dr. Jármay Károly**, Dr. Barkóczy Péter***

ABSTRACT

In this paper authors describe the methodology used for finding an optimum solution for a welded steel heat exchanger mounted on a domestic fireplace. The heat exchanger is used to preheat the primary and secondary air necessary for burning wood logs in the fireplace. The optimization process is combined with Computational Fluid Dynamics simulation to calculate values of design variables and the aim function.

1. BEVEZETÉS

A fatüzelésű kandalló manapság reneszánszát éli. Egyrészt azért, mert a földgáz árának folyamatos növekedése - amely tendencia tartósan ígérkezik - készteti az embereket arra, hogy alternatív fűtési módokat keressenek, másrészt a kandalló, a benne égő tűz látványa, a fa ropogása egy olyan érzelmi hatást is kelt a felhasználóban, amely más fűtési eljárásokkal nem utánozható.

A feladatunk az volt, hogy egy 8 kW teljesítményű, fatüzelésű, hegesztett acél szerkezetű kandalló hatásfokát növeljük meg a kandalló kilépő füstcsonkjára helyezhető hőcserélő segítségével.

A kandalló füstgáz csonkjára szerelhető „hőcserélők” már léteznek, amennyiben a Ø150 mm-es füstcsövet több kisebb átmérőjű csőre bontó, majd újra összevezető eszközt hőcserélőnek tekintjük, azonban az általunk fejlesztett berendezés feladata az, hogy a primer és szekunder égési levegőt is előmelegítve növeljük a kandalló hatásfokát. A fejlesztési folyamathoz áramlástanai szimulációt (CFD) használtunk.

* Miskolci Egyetem Tüzeléstan és Hőenergia Intézeti Tanszék

** Miskolci Egyetem Anyagmozgatási és Logisztikai Tanszék

*** Miskolci Egyetem Anyagtudományi Intézet

2. FATÜZELÉSŰ KANDALLÓK HATÁSFOKA

A „Szilárd tüzelőanyag fűtésű háztartási tűzhelyek” méretezésére, gyártására, azok kivételére, a biztonságra és teljesítőképességre (hatásfok és kibocsátás) vonatkozó utasításokat az EN 13240:2005 számú Európai Szabvány határozza meg [1].

A szabvány szerinti hatásfok mérési módszer rövid összefoglalása a következő:

- A kandallót felállítják a mérlegpódiumra, amely nagy pontossággal (± 2 g hibával) méri a leégés után a tűztérben maradt salak és hamu tömegét. A mérleget a mérés megkezdése előtt nullázzák.
- A mérést a szabványban meghatározott mennyiségű és minőségű tüzelőanyaggal akkor kezdik meg, amikor a tűztérben a korábban végrehajtott égetési ciklusok eredményeként már van ún. alapparázs.
- A tüzelőanyag mennyiségét (B_{fi}) a szabványban meghatározott módon, az alábbi képlettel kell kiszámítani:

$$B_{fi} = 360000 \cdot P_n \cdot \frac{t_b}{H_u \eta} \quad (1)$$

ahol:

H_u : a vizsgálati tüzelőanyag fűtőértéke, amely a szabványos (a felhasználás előtt két évvel kivágott, száraz helyen tárolt) 11-12%-os nedvességtartalmú bükkfa esetén 15969 kJ/kg.

η : az EN 13240:2005 szabvány szerint a minimális hatásfok (50%), vagy egy magasabb, a gyártó által megadott érték %-ban, amely a mi esetünkben 80% (korábbi mérések és a kandalló gyártójának tapasztalata alapján 80% ennek a kandalló típus hatásfoka).

P_n : a névleges hőteljesítmény kW-ban, amely a mi esetünkben 8 kW.

t_b : minimális leégési időtartam, amely a mi esetünkben 0.75 óra, vagy más, a gyártó által megadott égési időtartam órában. A mérési

ciklus végrehajtása során a szabvány a minimális égési időtartamtól legfeljebb $\pm 15\%$ -os eltérést enged és ilyenkor összehasonlító számítással kell meghatározni a 0.75 órára vonatkozó teljesítményt.

Az így kiszámított érték $B_{fi}=1,68$ kg, amely nem tartalmazza a hamuként visszamaradt, azaz el nem égett tüzelőanyag mennyiségét. Ennek értéke a tapasztalatok, a kandalló gyártója által végzett korábbi mérések alapján a tüzelőanyag mennyiség 13-14% közötti értéke. Ennek értelmében tehát ahhoz, hogy a tüztérből 45 perc alatt 8 kW hőteljesítményt nyerjünk ki, 1,9 kg szabványos bükkfát kell elégetni.

Fontos és szintén a szabvány által előírt vizsgálati peremfeltétel, hogy az égetés során a teljes rendszerben, tehát a tüztérben és minden hozzá kapcsolódó berendezésben együttesen jelen lévő nyomást ± 2 Pa megengedett eltérés mellett 12 Pa értéken kell tartani. E nyomás tartja működésben az égést, e nyomáskülönbség hatására lép a tüztérbe az égési levegő, és a füstgáz ennek következtében távozik a tüztérből a kéményen keresztül.

- A hatásfok meghatározása szintén a fent említett szabvány alapján történik a következő képlet szerint.

$$\eta = 100 - (q_a + q_b + q_c) \quad (2)$$

ahol:

q_a : a füstgázokkal eltávozó hő mennyiségének és a tüzelőanyag H_u alsó fűtőértékének hányadosa %-ban,

q_b : a távozó füstgáz látens hőjének és a tüzelőanyag H_u alsó fűtőértékének hányadosa %-ban,

q_c : a salakhullásban lévő éghető, de el nem égett alkotórészek általi veszteség és a tüzelőanyag H_u alsó fűtőértékének hányadosa %-ban.

A számításhoz a q_a értékét a tüztér szabványos mérési ciklusában mért füstgáz hőmérséklet adatok alapján, a q_b értékét a füstgáz összetételének analizálása alapján határozhatjuk meg, míg fatüzelés esetén a q_c értékét a szabvány által 0,5%-ban rögzítettnek vehetjük.

A (2) alapján tehát látszik, hogy a hatásfok meghatározás a tüztérből távozó veszteségek megmérésére és a 100%-ból történő kivonásra vezethető vissza. A q_a értékben meghatározott veszteség a füstgáz hőmérsékletével, a q_b a füstgáz kémiai összetételével kapcsolatos, a q_c értékét pedig a szabvány eleve egy fix értéként engedi számítani, amelyet a gyártók ennek megfelelően használnak a készülék hatásfokának meghatározásakor.

E munka keretei között a q_a , azaz a füstgáz hőmérsékletével hasznosulatlanul távozó veszteség csökkentése a célunk, amelyet egy olyan hőcserélő

rendszerbe állításával hajtunk végre, amely a tüzteret már elhagyó füstgázban tárolt hőenergiát hasznosítja.

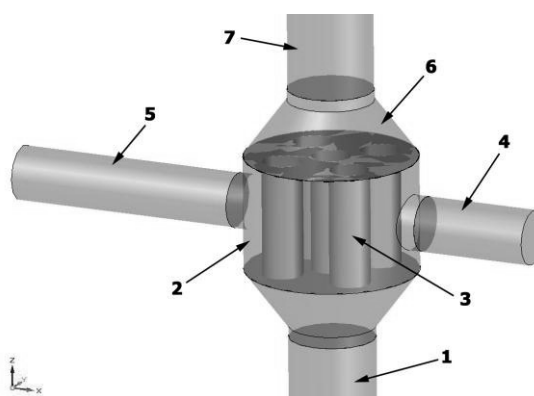
3. HŐCSERÉLŐ ALAPGEOMETRIA KIALAKÍTÁSA

A hőcserélő geometriájának kialakítása során több verziót is készítettünk annak érdekében, hogy eldönthető legyen, e sebesség és hőmérséklet tartományban milyen kialakítás felel meg a legjobban a céljainknak. E cikkben az előzetes vizsgálatok eredményei alapján kiválasztott keresztáramú csöves hőcserélő konstrukciót mutatjuk be.

A hőcserélő konstrukció mindegyik esetben egy külső lemez dobból és egy cserélhető hőcserélő betétből áll. A modell tartalmazta továbbá a hőcserélőre és onnan elvezető füstgáz és levegő csöveket is az 1. ábra szerint. A geometria részletei a következők:

- 1: kandallóhoz csatlakozó füstgáz vezeték
- 2: hőcserélő dob
- 3: hőcserélő betét
- 4: hőcserélőbe az égési levegőt vezető cső
- 5: hőcserélőből az égési levegőt elvezető cső
- 6: kúpos csatlakozó elem
- 7: kéményhez csatlakozó füstgáz vezeték

A kandallóhoz csatlakozó csővezeték belső átmérője 150 mm, amely megegyezik a 8 kW hőteljesítményű kandalló füstgáz csonkjának méretével. A hőcserélő dob átmérője 300 mm. A dobhoz csatlakozó égési levegő vezeték belső átmérője 95 mm, ami megegyezik a 8 kW hőteljesítményű kandalló égési levegő csatlakozójának méretével. A kúpos csatlakozó elem nagyobbik átmérője 300 mm, míg a kisebbik 150 mm, a magassága pedig 100 mm. A dobot és a hozzá kapcsolódó csöveket az alábbi ábrán – a könnyebb értelmezhetőség érdekében – áttetsző kék megjelenítéssel mutatjuk be.



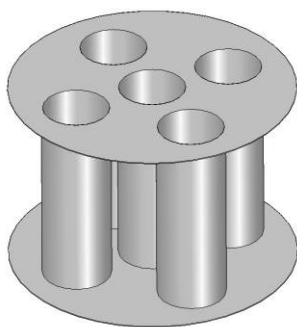
1. ábra Hőcserélő alaptípus és a geometria részeli

4. KERESZTÁRAMÚ CSÖVES HŐCSERÉLŐ

A keresztáramú csöves hőcserélő betét koncepciójának lényege, hogy a függőlegesen felfelé áramló füstgázt több függőleges csőjében legkedvezőbb esetben azonos mennyiségekre osztjuk szét. Így megnövelve a hőátadó felületet, az égési levegőt a csövek körül – legkedvezőbb esetben egyenletesen elosztva – vezetjük a kilépő keresztmetszet irányába.

E hőcserélő konstrukció előnye, hogy a hőátadó felületet jelentős mértékben meg tudjuk növelni a csövek számának növelésével.

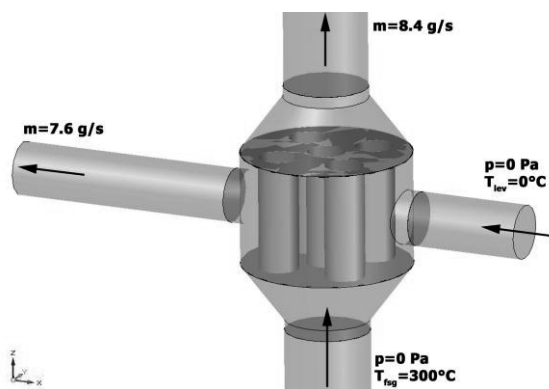
A hátránya ugyanakkor, hogy a csövek számának és hosszának növelésével, illetve a csövek belső átmérőjének csökkentésével nő a füstgáz áramlással szembeni ellenállása. Egy ilyen hőcserélő betétet a 2. ábra mutat be.



2. ábra $N=5$ darab 70 mm átmérőjű csövet tartalmazó betét

5. A CFD SZIMULÁCIÓ PEREMFELTÉTELEINEK MEGHATÁROZÁSA

A CFD szimuláció peremfeltételeinek értékeit egyrészt az EN 13240:2005 szabványban előírt képletek és égésméleti számítások alapján, illetve mérési adatokból állítottuk elő. A 3. ábra a peremfeltételek értékeit és megadásuk helyét mutatja be.



3. ábra Peremfeltételek a CFD szimulációban

A füstgáz oldali peremfeltételek esetén a beömlő keresztmetszeten $p=0$ Pa relatív nyomást adtunk meg, azaz azt feltételeztük, hogy a talajszinten, ahol a kandalló és a hőcserélő elhelyezkedik, atmoszférikus nyomás uralkodik. A beömlő keresztmetszeten lép be a kandallóból érkező $T_{fg}=300$ °C hőmérsékletű füstgáz.

Az $m_{fg}=8.4$ g/s tömegáram használata a szimulációban egymaga fejezi ki több, a kandalló működésével kapcsolatos paraméter meglétét. Ez a tömegáram kifejezi a szabványos mérési ciklusban folyamatosan meglévő $p=-12$ Pa nyomás által a szabványos tömegű tüzelőanyagból felszabaduló és a rendszert a kéményen keresztül elhagyó gázok mennyiségét. Továbbá a tömegáramnak ez az értéke felel meg a szabvány által előírt mérési időtartamna.

A levegő oldali peremfeltételeket hasonló rendszer alapján adtuk meg a modellen. A beömlő keresztmetszeten a talajszinten érvényes relatív nyomás értéket $p=0$ Pa formájában és a rendszerbe lépő levegő hőmérsékletét.

6. AZ OPTIMÁLÁSI FELADAT MEGFOGALMAZÁSA

Az előzetes vizsgálataink eredményeiből felismerhető volt, hogy a keresztáramú csöves hőcserélő esetén a vizsgált paraméterekkel – kilépő füstgáz és levegő hőmérséklet, levegő és füstgáz oldali nyomásesés – szemben támasztott követelmények egymással ellentétesek. Tehát lehetőségünk volt arra, hogy e kritériumok alapján megkeressünk egy olyan optimális megoldást, ahol a célunk a füstgáz kilépő hőmérséklet (T_{fg}) minimumának, a levegő kilépő hőmérséklet (T_{lev}) maximumának, illetve a nyomásesések (Δp_{lev} és Δp_{fg}) minimumának elérése.

Az optimáláshoz felhasznált célfüggvény a következő:

$$F(D, H, d, N, \Gamma) = a \frac{K_{kts}}{T_{lev}} + b \frac{\Delta p_{lev}}{T_{lev}} + c \frac{T_{fg}}{T_{lev}} + d \frac{\Delta p_{fg}}{T_{lev}}$$

ahol a, b, c, d a vizsgált paraméterek fontosságát adó súlyok a következők szerint:

Paraméter	T_{fg}	Δp_{lev}	Δp_{fg}	K_{kts}
Súly faktor	0,5	0,3	0,15	0.05

Optimálási eljárásaként a Downhill Simplex (vagy más néven amőba) módszert (Nelder és Mead publikálták 1965-ben) használtuk, amely egy olyan egy-célfüggvényes, minimumkereső optimálási eljárás, amely valós vektorok n-dimenziós (n a célfüggvény változóinak száma) terét vizsgálja [2].

Az eljárás az n-dimenziós tér vizsgálatához n+1 kiindulási pontot igényel, ennek következtében a

hőcserélő esetében az öt keresett, a hőcserélő működését leíró változó (dimenzió) miatt (levegő kilépő hőmérséklet: T_{lev} , füstgáz kilépő hőmérséklet: T_{fsg} , levegő oldali nyomásesés: Δp_{lev} , füstgáz oldali nyomásesés: Δp_{fsg} , a hőcserélő anyagköltsége, amely a tömeggel jellemezhető: K_{kts}) az optimalítás elindításához hat kiindulási szimuláció lefuttatására volt szükség. E kiindulási hőcserélő konfigurációkat és eredményeiket a célfüggvény adott konstrukcióra vonatkozó értékével a következő táblázat tartalmazza.

	1	2	3	4	5	6
D [mm]	300	300	300	300	300	300
H [mm]	200	200	200	110	300	200
d [mm]	50	70	40	50	50	50
N [db]	12	5	20	12	12	12
Elrend.	1	1	1	1	1	2
T_{lev} [°C]	63,5	46,3	81	49,9	74,8	61,4
T_{fsg} [°C]	249,5	264,3	235	260	242,5	249
Δp_{lev} [Pa]	0,94	0,44	0,99	1,18	3,1	0,88
Δp_{fsg} [Pa]	3,28	2,7	2,99	2,64	4	2,91
K_{kts} [kg]	3,7	2,5	4,72	2,37	5,24	3,73
Célfügv	1,979	2,868	1,46	2,62	1,644	2,04

1. Táblázat Hőcserélő betét méretek és kiindulási adatok

7. AZ OPTIMÁLÁS EREDMÉNYE

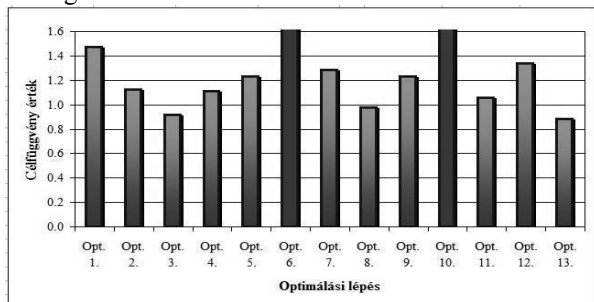
A Downhill-Simplex módszer előnye amellyel, hogy kevés számú alapadatot igényel kiindulásként az, hogy meglehetősen határozottan tör az optimum felé. Ebből az következik, hogy a feladat megoldása során kevés iterációs lépés végrehajtására volt szükség. Ez a tulajdonság kiemelt fontosságú, hiszen minden egyes iteráció az optimáló eljárással egy numerikus áramlástani szimuláció végrehajtását (peremfeltételek megadása, háló építés és több száz iterációs lépés lefuttatása a CFD szoftverben a konvergencia megoldásig) jelentette. A 4. ábra az egymást követő optimalítási lépések eredményeit mutatja be a célfüggvény értékek segítségével.

Az ábrából látható, hogy ebben az optimalítási eljárásban 13 lépést hajtottunk végre. A célfüggvény grafikon értékei hullámzóak, bizonyos lépéseknél csökkennek, majd növekednek.

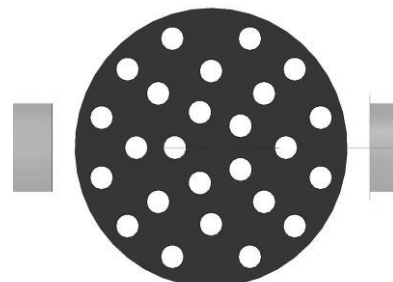
Ennek okai, hogy az optimalítást megvalósító algoritmus nagyon szigorú konvergencia kritériumokkal rendelkezett, tehát alapvetően mi, mint a szoftver felhasználói döntöttük el, hogy melyik lépésnél fejezzük be az eljárást. A 13 lépés alatt a célfüggvény értéke összesen három alkalommal közelítette meg a 13. lépés

végén elért minimumot, amelynek célfüggvény értéke 0.886.

A célfüggvény értékének emelkedései majd csökkenései az „amőba” algoritmus útját jelölik az ötdimenziós térben. Előfordult, hogy egyes változatokban az előzőhöz képest jelentősen megnövelte a hőcserélőben lévő csövek hosszát, amely ugyan alacsonyabb füstgáz kilépő hőmérséklethez vezetett, de mind a füstgáz, mind a levegő oldali nyomásvesztéség annyira megnőtt, hogy végül a célfüggvény értéke nagyobb lett, mint az azt megelőző lépésben. Az 5. ábra a legalacsonyabb célfüggvény értékű hőcserélő betét (13. optimalítási lépés) cső elrendezését mutatja be, amely elrendezéshez $H=492$ mm-es csőhossz tartozik. A betétre jobb oldalról érkezik a 0 °C hőmérsékletű égési levegő.



4. ábra Optimalítási lépések célfüggvény eredményei



5. ábra A 13. optimalítási lépésként kiszámított változat cső elrendezése

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás kezdetben az OTKA 75689 program támogatásával készült, majd a TÁMOP-4.2.1.B-10/2KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap finanszírozásával folytatódott.

9. IRODALOM

- [1] EN 13240:2005 Szilárd tüzelőanyag fűtési háztartási tűzhelyek; Európai Szabvány
- [2] Thomas Weise: Global Optimization Algorithms – Theory and Application; 95., 283. oldal, 2009.06.26