

K+F eredmények összefoglalása

GOP-1.1.2-08/1-2008-0002



Kiadja:

UNI-FLEXYS
Egyetemi Innovációs Kutató és Fejlesztő
Közhasznú Nonprofit Kft.
www.uni-flexys.hu

UNI-FLEXYS
INNOVATÍV TUDÁSTRANSZFER

Kiadásért felelős:

Bárkányi Péter
marketing vezető

ISBN 978-963-89509-0-1

Nyomdai munkák:

EXTREMGROUP Kft.

Kandalló hatásfokának javítása füstgáz-levegő hőcserélő alkalmazásával

Dúl Róbert⁹², Palotás Árpád Bence⁹³, Jármái Károly⁹⁴,
Barkóczy Péter⁹⁵

Bevezetés

A fatüzelésű kandalló manapság reneszánszát éli. Egyrészt azért, mert a földgáz árának folyamatos növekedése - amely tendencia tartósnak 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 áramlástan szimulációt (CFD) használtunk.

1. Fatüzelésű kandallók hatásfoka

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

⁹² kutató, Miskolci Egyetem, Tüzeléstan és Hőenergia Intézeti Tanszék

⁹³ egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Energia- és Minőségügyi Intézet

⁹⁴ egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Anyagmozgatási és Logisztikai Tanszék

⁹⁵ egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagtudományi Intézet

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:

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

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 tűztérből 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 tűztérben 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 tüztérrel már elhagyó füstgázban tárolt hőenergiát hasznosítja.

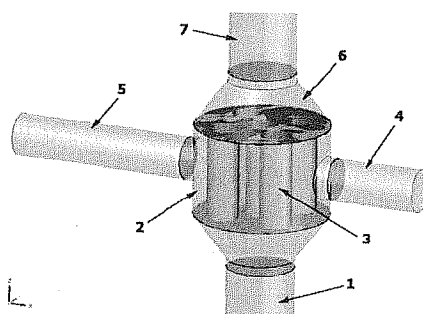
2. Hőcserélő alapeometria kialakítása

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 részelemei 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.

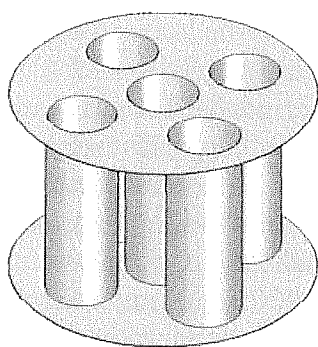


1. ábra
Hőcserélő alaptípus és a geometria részei

3. Keresztáramú csöves hőcserélő

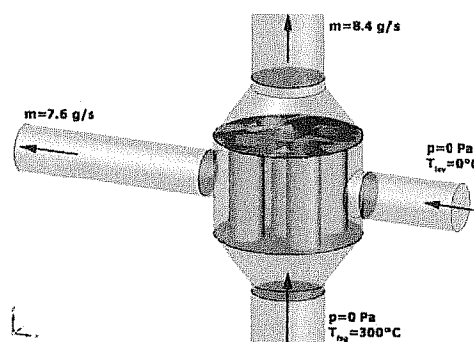
A keresztáramú csöves hőcserélő betét koncepciójának lényege, hogy a függőlegesen felfelé áramló füstgázt több függőleges csőjában legkedvezőbb esetben azonos mennyiségekre osztjuk szét.

Így megnövelve a hőátadó felületet, az égési levegőt e 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



3. ábra

Peremfeltételek a CFD szimulációban

4. A CFD szimuláció peremfeltételeinek meghatározása

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

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 $T_{fsg}=300$ °C hőmérsékletű füstgáz. Az $m_{fsg}=8.4$ 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 talajszínten érvényes relatív nyomás értéket $p=0$ Pa formájában és a rendszerbe lépő levegő hőmérsékletét.

5. 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_{fsg}) minimumának, a levegő kilépő hőmérséklet (T_{lev}) maximumának, illetve a nyomásesések (Δp_{lev} és Δp_{fsg}) minimumának elérése. Az optimáláshoz felhasznált célfüggvény a következő:

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

ahol a, b, c, d a vizsgált

paraméterek fontosságát adó súlyok a következők szerint:

Paraméter	T_{fsg}	Δp_{lev}	Δp_{fsg}	K_{kts}
Súly faktor	0,5	0,3	0,15	0,05

Optimálási eljárásként 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 optimálás elindításához hat kiindulási szimuláció lefuttatására volt szükség. E kiindulási hőcserélő konfigurációkat és eredményeiket a célfüggvény adott konstrukcióra vonatkozó értékével a következő táblázat tartalmazza.

1. táblázat
Hőcserélő betét méretek és kiindulási adatok

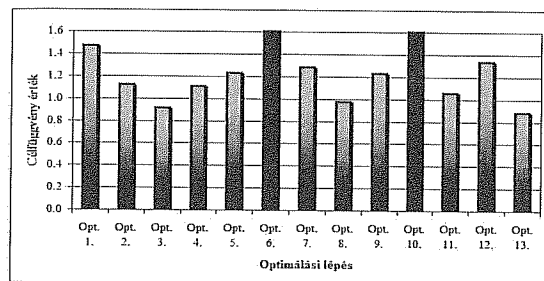
	1	2	3	4	5	6
D [mm]	300	300	300	300	300	300
H [mm]	200	200	200	110	300	200
d [mm]	50	70	40	50	50	50
N [db]	12	5	20	12	12	12
Elrend.	1	1	1	1	1	2
T_{lev} [°C]	63,5	46,3	81	49,9	74,8	61,4
T_{fsg} [°C]	249,5	264,3	235	260	242,5	249
Δp_{lev} [Pa]	0,94	0,44	0,99	1,18	3,1	0,88
Δp_{fsg} [Pa]	3,28	2,7	2,99	2,64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

6. Az optimalás eredménye

A Downhill-Simplex módszer előnye mellett, 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 áramlástan 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 optimalási lépések eredményeit mutatja be a célfüggvény értékek segítségével. Az ábrából látható, hogy ebben az optimalási eljárásban 13 lépést hajtottunk végre. A célfüggvény grafikon értékei hullámzóak, bizonyos lépéseknél csökkennek, majd növekednek. Ennek okai, hogy az optimalást 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.

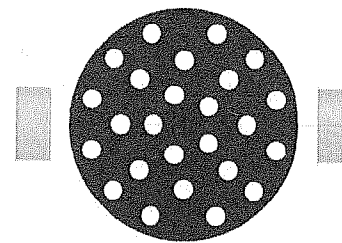
A célfüggvény értékének emelkedései majd csökkenései az „amőba” algoritmus útját jelölik az ötdimenziós térben. Előfordult, hogy egyes változatokban az előzőhöz képest jelentősen megnövelte a hőcserélőben lévő csövek hosszát, amely ugyan alacsonyabb füstgáz kilépő hőmérsékletéhez vezetett, de mind a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

A betétre jobb oldalról érkezik a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletű égési levegő.



4. ábra

Optimalizációs lépések célfüggvény eredményei



5. ábra

A 13. optimalizációs lépésként kiszámított változat cső elrendezése

Irodalomjegyzék

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

Köszönetnyilvánítás: A kutatómunka az Új Széchenyi Terv GOP-1.1.2-08/1-2008-0002 jelű projekt támogatásával valósult meg. Ugyancsak kiemelésre méltó, hogy a tanulmányban bemutatott K+F tevékenység folytatását lehetővé teszi az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt támogatása.