

Perdületes égő üzemének modellezése 45°-os és 60°-os perdítőelemek esetén

Füzesi Dániel

energetikai mérnök; fuzesi@energia.bme.hu

Józsa Viktor

okl. gépészmérnök; jozsa@energia.bme.hu

Napjaink energetikája nagy hangsúlyt fektet a megújuló energiaforrások alkalmazására. A modern, stacionárius égők konstrukciójának egyik legfontosabb eleme a perdítőelem, mely elősegíti a homogén keverékképzést, így az alacsony károsanyag-kibocsátást míg az üzemi tartomány széles marad. Korábbi vizsgálataink során beláttuk, hogy a perdületes égő modellezése tranziens megközelítést igényel a jelenség kvázistacionárius volta miatt. A jelen cikkben részletezett vizsgálat célja egy valós perdítőelem geometria égésre gyakorolt hatásának elemzése két különböző lapátszögállására. A modellezés során a perdítőelem környezete körüli áramlást tetra cellákkal bontottuk fel, mely kimeneti értékeit az égés bemenő paramétereként adtuk meg a tüzelőtérben. Az eredményeket a kapcsolódó, megépült berendezés lángképeivel validáltuk földgáztüzelés esetén. Továbbá két biogáz tüzelését is modelleztük.

*

Nowadays, the energy industry favors the utilization of renewable energy sources. The key element of the modern, steady-operating burner is the swirler that facilitates the formation of the homogeneous fuel-air mixture while it ensures a wide operating range. It was concluded in previous works that the modeling of a swirl burner requires transient modeling approach since the phenomenon is quasi-steady. The aim of this paper was the analysis of the effect of an existing swirler at two vane angles on the combustion characteristics. The nearfield of the swirler was discretized by tetra cells which outlet provided the inlet conditions to the combustion chamber. The results were validated by flame images, utilizing natural gas, of the respective combustion chamber that was recently built. Also, two biogas mixtures were modeled.

A mai modern stacionárius üzemű égőterekben, nem sugárzó lángokhoz jellemzően előkevert égést alkalmaznak, tehát a levegő-tüzelőanyag keverék már a lángfront előtt kialakul. Az ilyen égők dinamikus problémáit átfogóan Huang és Yang tárgyalják [1]. A perdítőelemek és perdületes égők tervezését és áramlástechnikai-tüzeléstechnikai jellemzőit Beér János és Chigier [2] foglalták össze. Mivel a perdítőelemes rendszerű égők nagy népszerűsége tettek szert az elmúlt időszakban, elsősorban a kedvező károsanyag kibocsátásuk és a széles üzemi tartományuk miatt, Khandelwal és munkatársai a közelmúltban összefoglalták a főbb tervezési irányelveket, melyek az évek során születtek, illetve a numerikus kódok valamint a jelentősen megnövekedett számítási kapacitás lehetővé tett [3].

A perdületes áramlást jellemző leíró dimenziótlan mennyiség a perdületszám, S , mely perdületes áramlás perdület tengelyirányú áramából (G_a), a tolóerőből (G_z), valamint a keverőcső sugarából (R) számítható (1) alapján [2]:

$$S = \frac{G_a}{G_z R} \quad (1)$$

Agy nélküli axiális perdítőelem esetén egyenletes sebességeloszlást feltételezve és a surlódást elhanyagolva jutunk (2)-re, mely a perdületszám becslésére használható [2]:

$$S = \frac{2}{3} \left(\frac{1 - \left(\frac{R_a}{R}\right)^3}{1 - \left(\frac{R_a}{R}\right)^2} \right) \tan \alpha, \quad (2)$$

ahol α a perdítőlapátok irányszöge a forgástengelytől mérve, $R_a = 20$ mm az agy sugara. Az irodalom megkülönböztet erősen $S > 0,6$ és gyengén $S < 0,6$ perdületes áramlást [2]. Jelen munkában erősen perdületes áramlást vizsgáltunk, mely V alakú lángot eredményez.

A stabil égést a perdületes áramlás biztosítja, melynek következtében az égőtérben – a perdületes áramlási struktúra instabilitása révén – egy belső és egy külső recirkulációs zóna alakul ki az erőegyensúly miatt [1]. A belső recirkulációs zóna biztosítja a hőtranszport jelentős részét a még elégtelen komponensek felé, míg a külső recirkulációs zóna ebben a folyamatban jóval enyhébben vesz részt. A hirtelen keresztmetszet-változás miatt a keverőcső és az égőtér találkozásánál nyíróréteg jön létre, a külső recirkulációs zóna pedig virtuális diffúzorként szolgál [1]. A perdítőelem lapátozása lehet axiális és radiális, valamint több perdítőelem alkalmazása esetén előfordulnak vegyes megoldások, továbbá azonos és ellentétesen perdítő kialakítások is. A lapátkialakítások egyenesek vagy ívelték lehetnek, a kísérleti berendezésben az előbbi található, így számításaink során ezt vizsgáltuk.

A tüzelőberendezések prediktív elemzése az igen összetett fizikai-kémiai folyamatok miatt a mai mérnöki eszköztárból legkönnyebben numerikus áramlástan modellezés segítségével valósítható meg. Mivel a hőfelszabadulás megfelelő közelítése megköveteli legalább néhány tíz anyag figyelembe vételét a kémiai reakciókhoz kötődően, ezért az azonos cellaszámhoz tartozó légáramlás modellezéséhez képest több nagyságrenddel nagyobb számítási kapacitás szükséges. Az égést részlegesen előkevertként modelleztük, a kémiai reakciókat pedig termokémiai valószínűségi sűrűségi függvény segítségével közelítettük [4], melyet a szakirodalomban is elterjedten használnak [5].

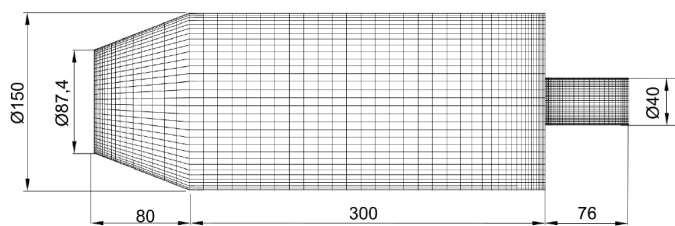
Jelen munkában referencia tüzelőanyagként földgázt használtunk, mivel ennek égési jellemzői jól ismertek a szakirodalomban. Így elsődlegesen a földgáz esetén vizsgáltuk a perdítőelemek hatását, illetve validáltuk a modellt szintén földgázt tüzelve. Kitekin-tésként biogáz tüzelést vizsgáltunk a továbbiakban, melyet szerves anyagok anaerob bomlásával állítanak elő. Fő komponensei a CH_4 , CO_2 , N_2 , H_2 , valamint kisebb arányban egyéb összetevők [6]. A komponensek közül a CO_2 és a N_2 növeli a gyulladási időt, csökkenti az adiabatikus láng hőmérsékletet, melyeket a H_2 tartalom

ellensúlyoz. Ennek okán egy H_2 nélküli, és egy azt tartalmazó keveréket szimuláltunk és értékeltünk a tiszta földgázüzeléssel kapott eredmények tükrében.

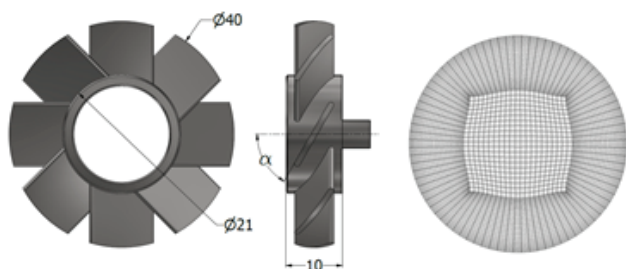
A modell bemutatása

A legegyszerűbb megközelítés, melyet korábban mi is alkalmaztunk [7], a sebességkomponensek perdítő irányszögének megfelelő megadása. Cikkünkben viszont a teljes perdítőelem geometriát figyelembe vesszük. Az égés a turbulencia miatt nem egyszerűsíthető 2D-s vizsgálati térre, hiába a geometria és a peremfeltételek szimmetriája. Így 3D-s modellt szükséges alkalmazni. A perdületes áramlás kvázistacionárius jellege miatt tranziens számítás szükséges [8], ami jelentős számítási erőforrásigénnyel bír. Ennek következtében a modellt szétbontottuk egy perdítőelem-keverőcső, valamint egy keverőcső-égőtér geometriára. Az előbbi részegység esetén a perdítőelem körüli áramlás megfelelő felbontásához szükséges kis cellaméretet alkalmaztunk, azonban az égőtérben jóval nagyobb cellákat használtunk, ennek eredményeképp az időlépés az utóbbi esetben jóval nagyobb lehetett, amire szükség is volt az égőtérben lelassuló áramlás miatt. A perdítőelem után egy keverőcső átmérőnyi (40 mm) szakaszt vettünk fel, ahol a perdület hatását vizsgáltuk. A keveréket Species Transport modell segítségével kezeltük [4], mely az egyes komponensek követésére szolgál, azonban itt kémiai reakciókat még nem vettünk figyelembe. A perdítőelem egyszerűsített geometriája a 2. ábrán látható a térbeli diskretizációval együtt. A perdítőelemet és az ezt körülvevő térrészt tetra hálóval írtuk le a geometria bonyolultsága miatt, melyhez strukturált hexa hálót kapcsoltunk a háló minőségének növelése és cellaszám csökkentésének érdekében.

A megépült kísérleti tüzelőberendezés égőtere ugyan négyzet keresztmetszetű a szenzorok fogadása és a sík betekintőüveg miatt, azonban a modellezés egyszerűsítése érdekében egy hengeres geometriát építettünk meg a felületeknek megfelelő hossz, illetve átmérő mérettel. A geometria és az égőtér strukturált hexahálója az 1. ábrán látható. Annak érdekében, hogy elkerüljük a visszakeverést a kilépésnél, egy konfúzoros szakaszt illesztettünk az égőtér végére, ahol a kilépő felületet a kontinuitás alapján az átlagos sebességértékhez viszonyítva határoztuk meg, figyelembe véve a hőfelszabadulást és a veszteségeket.



1. ábra. A tüzelőtér geometriájának és hálójának oldalnézete

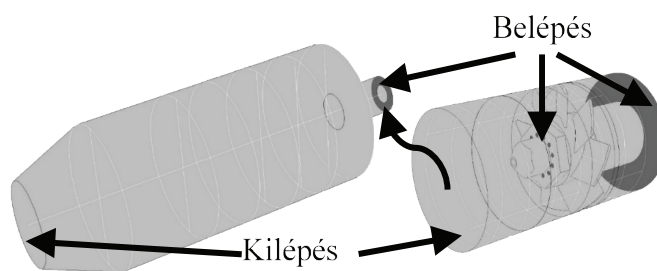


2. ábra. A perdítőelem modellje és a kapcsolt tetra-hexa háló

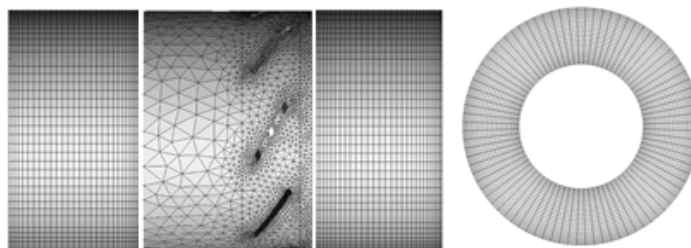
Számításainkat Ansys Fluent szoftverkörnyezetben végeztük el. A tranziens számítások kezdeti feltételét egy megelőző stacionárius számítás eredményéből vettük fel a gyorsabb konvergencia érdekében. A peremfeltételek a két vizsgálati térfogat esetén a 3. ábrán láthatóak. A falakra harmadfajú termikus peremfeltételt adtunk meg kívülről, a természetes áramláshoz tartozó hőátadási tényezőt [9] alapján határoztuk meg. A hőszugárzás a P-1 sugárzási modell segítségével vettük figyelembe, mely a háromatomos gázokat veszi figyelembe [4]. A perdítőelem, valamint a fűvókák falain adiabaticus termikus feltételt használtunk. A perdítőelem modell kilépő felületén Outflow peremfeltételt, az égőtér tartalmazó ellenőrző térfogat esetén pedig Pressure Outlet feltételt alkalmaztunk. A belépő peremfeltételeknél tömegáram belépést adtunk meg, melyek értékeit sztöchiometriai számítások alapján határoztuk meg az 1. táblázatban részletezett tüzelőanyag-összetétel alapján. Az égéshez szükséges légmennyiséget 1,15-ös légfelesleg tényező mellett határoztuk meg, mely a perdítőelem előtti körgyűrűn lép be, míg a gáz 12 apró fűvókán. A tüzelőteljesítmény minden esetben 18 kW volt. A belépő közeghőmérséklet minden esetben 20 °C volt. Az egyes komponensek hőmérsékletfüggő anyagjellemzőit [10]-ből vettük 1 bar környezeti nyomás esetén, és illesztettünk görbét a pontokra.

1. táblázat. A számítás során használt tüzelőanyagok térfogati összetétele [11,12]

Komponensek	Földgáz	BG40	BG32H20
CH_4	0,96	0,4	0,32
C_2H_6	0,02	0	0
C_3H_8	0,006	0	0
C_4H_{10}	0,003	0	0
N_2	0,011	0	0
H_2	0	0	0,2
CO_2	0	0,6	0,48



3. ábra. Tüzelőtér modell (balra) és égőtérmodell (jobbra) a peremfeltételekkel, valamint a hálófüggetlenségi vizsgálat során használt értékelési tartománnyal



A hálófüggetlenségi vizsgálatok alapján a perdítőelem modellnél egy 705500 cellaszámú hálót 18,6-es maximális y^+ értékkel, az égőtér modellnél egy 355600 cellaszámú hálót választottunk 8-as maximális y^+ értékkel, melyek [13] alapján megfelelőnek mondhatók. A tranziens számítások esetén az 1 alatti Courant-szám biztosította a független megoldást. Ezek alapján az időlépést 10^{-7} és 10^{-5} másodperces értékre vettük fel a két térfogat esetében.

Az eredmények bemutatása és értékelése

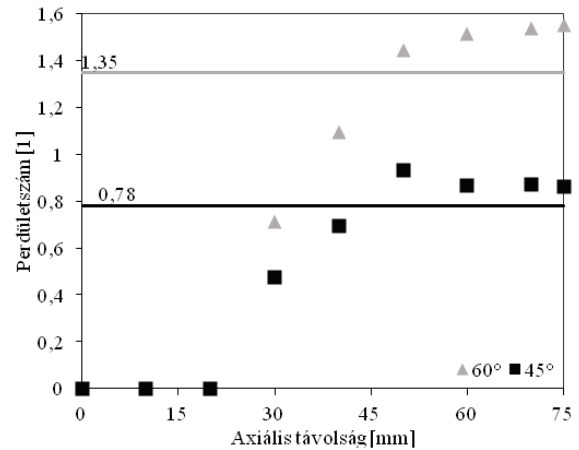
Először a perdítőelem áramképét értékeljük – még égés nélkül – kitérve a közelítésből adódó és a numerikus modellből számított perdületszámra. Ezt a jellemzőt az égőtér esetén is értékeljük, amit a következő alfejezetben tárgyalunk. Két biogázt, melyek esetén az egyik CH_4 és CO_2 elegye, valamint egy H_2 -t is tartalmazó keveréket ezt követően mutatunk be. A szimulációs eredmények lángkép alapú validációját pedig az utolsó alfejezetben mutatjuk be.

A perdítőelem elemzése

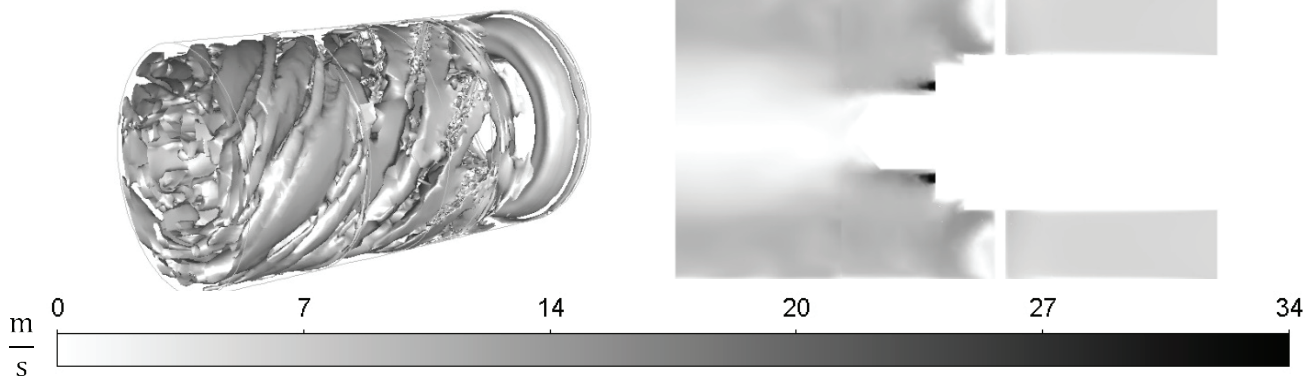
A 4. és 5. ábrák a kialakult sebességamplitúdókat és örvénystruktúrákat szemléltetik λ_2 kritérium alapján a középsíkon ábrázolva a 45°-os és 60°-os perdítőelem esetén. A 60°-os perdítőelem jóval nagyobb sebességeket okoz azonos belépő tömegáram mellett. A középsíkon történt tömegáram szerinti átlagolás alapján akár 5 m/s-al nagyobb a maximális érték a 45°-os esethez képest, valamint az eloszlás egyenletesebb. Az erősebb perdület a földgázban dús keveréket jobban a belsőbb régió felé tolja, így nagyobb az esélye a visszaégésnek is, mivel a keverék jobban be tud dúsulni a forgástengelyhez közel. A bal oldali képeken az örvények alakja, a

függőlegessel bezárt szöge a perdítőelemek lapátszögállását követi le. Ez alapján is megfigyelhető, hogy a 60°-os perdítőelem egy jóval nagyobb perdületű áramlást hoz létre.

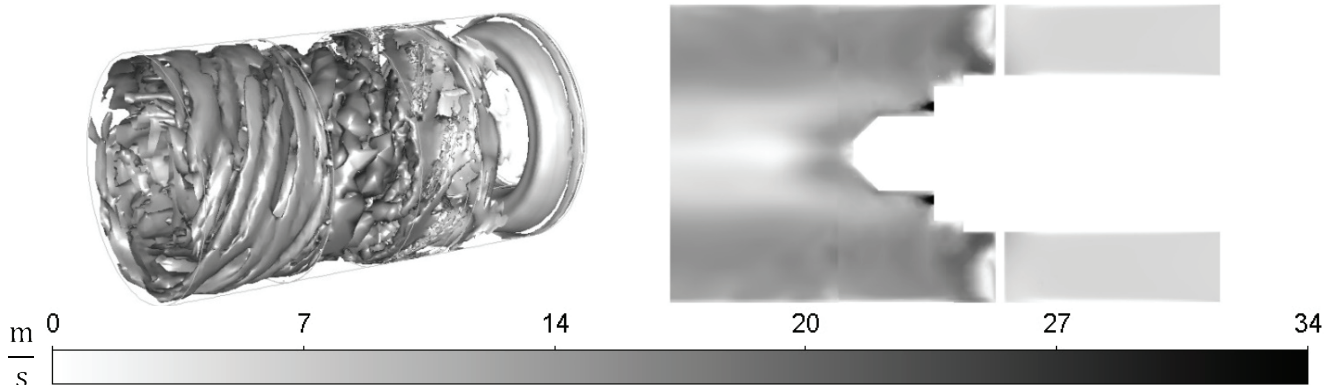
S-t bár (2) szerint tudjuk közelíteni ismert peremfeltételek és geometria mentén, azonban értéke (1) szerint pontosan számolható bármely keresztmetszetben a numerikus számítás esetén. Az eredményeket a 6. ábra szemlélteti, ahol a vízszintes vonalak a geometria becsült perdületszám értékét jelölik (2) alapján. A perdítőelem előtt, tehát a 25 mm-es szakaszon a tengelyirányú áramlás miatt a perdületszám zérus. Távolodva a perdítőelemtől, a tengelyirányú áramlás változásával, S beáll egy konstans értékre, amely 45° esetén 0,87 és 60° esetén 1,55. Tehát a szimuláció



6. ábra. Perdületszám változása a hossz tengely mentén



4. ábra. Örvénystruktúra λ_2 kritérium által meghatározott 1000 1/s^2 értékű ekvipotenciális felületeken a sebességamplitúdó szerint színezve (balra) és sebesség eloszlás a középsíkon (jobbra) $\alpha=45^\circ$ -os esetben

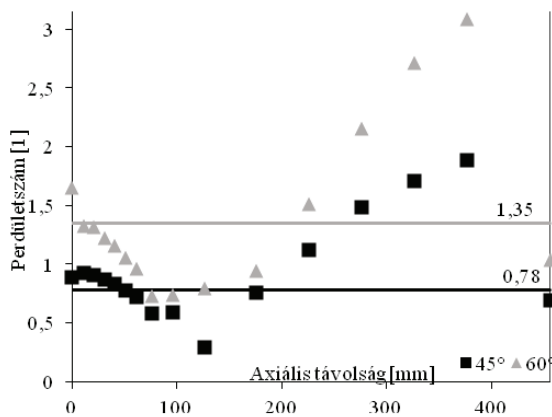


5. ábra. Örvénystruktúra λ_2 kritérium által meghatározott 1000 1/s^2 értékű ekvipotenciális felületeken a sebességamplitúdó szerint színezve (balra) és sebesség eloszlás a középsíkon (jobbra) $\alpha=60^\circ$ -os esetben

során nyert perdületszámok jelentősen meghaladják az irodalomban a perdítőelemszögekhez tartozó értékeket, melyek alapján a perdület jóval erősebb. (2) és a hasonló, geometriai perdületszám becslésére szolgáló képletek helyességét egyébként az irodalomban is kritizálták már mások [14,15], azonban hasonlóan univerzális és egyszerűen alkalmazható eljárást viszont még senki nem mutatott be. Így S helyességének értékelése is validációt igényel, melyet lézeres mérés technikával lehet leginkább megvalósítani [16].

A tüztér elemzése

A perdítőelem utáni keverőcső kilépő felületen kialakult időátlagolt sebességeloszlás, gáztömegtörteloszlás, túlnyomás-eloszlás, valamint a hőmérséklet-eloszlás a tüzelőtér-modell belépő felületén volt megadva. Mivel a háló sűrítése és felépítése a két felületen azonos volt, nem okozott problémát az eredmények illesztése. A tüztérben a perdületszám alakulását a hossz tengely mentén a 7. ábra mutatja. A perdületszámok a geometriai értékek felett vannak továbbra is kezdetben, melynek oka a valós geometria és beömlés modellezése.



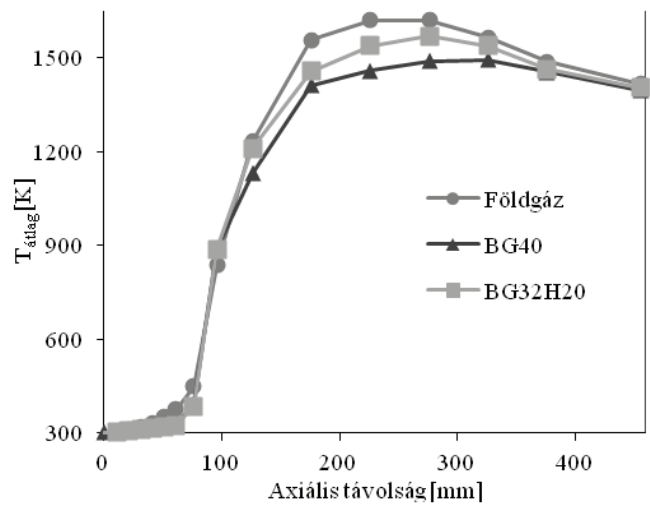
7. ábra. Perdületszám a hossz mentén $\alpha=45^\circ$ -os és $\alpha=60^\circ$ -os perdítőelemnél a keverőcsőben és az égőtérben

Az égés megindulásával a perdületszám értéke csökken, mivel az axiális erő megnő a gáz tágulásával együtt. A közeg belassulása mentén a keresztmetszetugrás után az axiális erőkomponens a kontinuitás következtében lecsökken, így a perdületszám ismét növekedésnek indul.

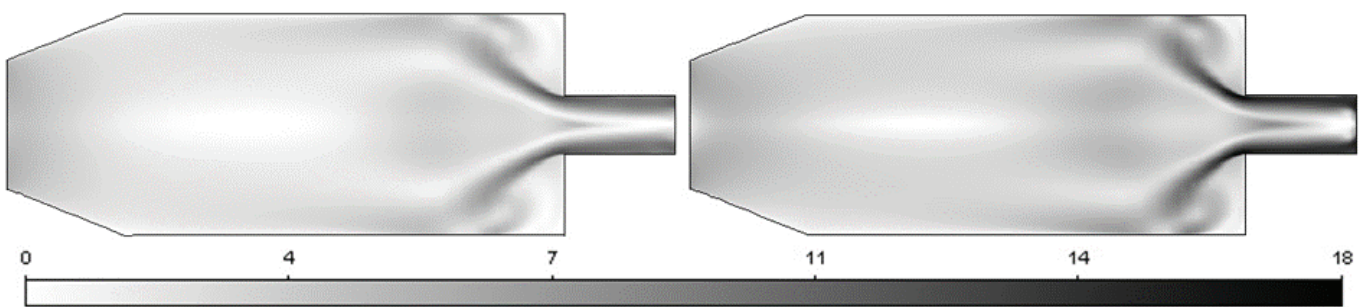
A 8. ábrán a sebességamplitúdó, míg a 9. ábrán a hőmérséklet-eloszlás kontúrja látható. Itt is megfigyelhető nagyobb perdület esetén a nagyobb sebességmaximum. Továbbá jól elkülöníthetőek a stabil égést biztosító recirkulációs zónák. A nagy hőmérséklet-gradiens utal a hőfelszabadulásra.

Biogáz tüzelés

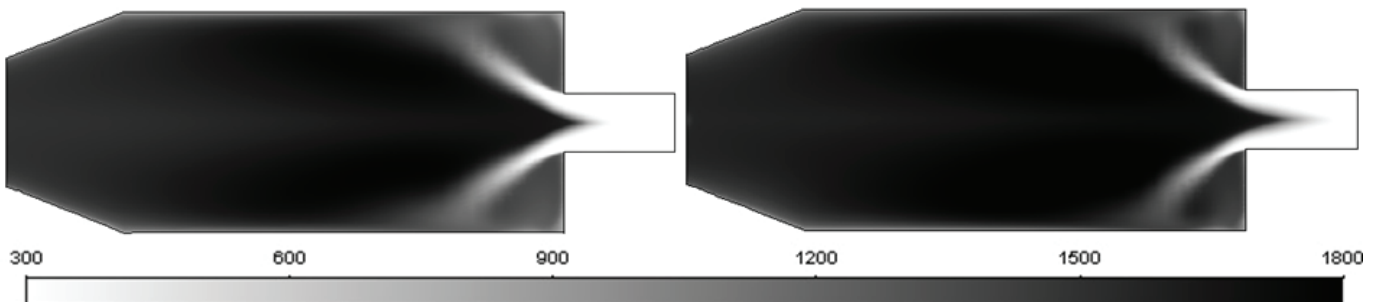
A 10-11. ábra az 1. táblázatban már ismertetett gázok hossz menti felületeken tömeg szerint átlagolt hőmérséklete és sebessége látható. A biogázok vizsgálatát kizárólag a 60°-os perdítőelemeken végeztük el. Esetünkben az égés épp a keverőcső végénél kezdődik,



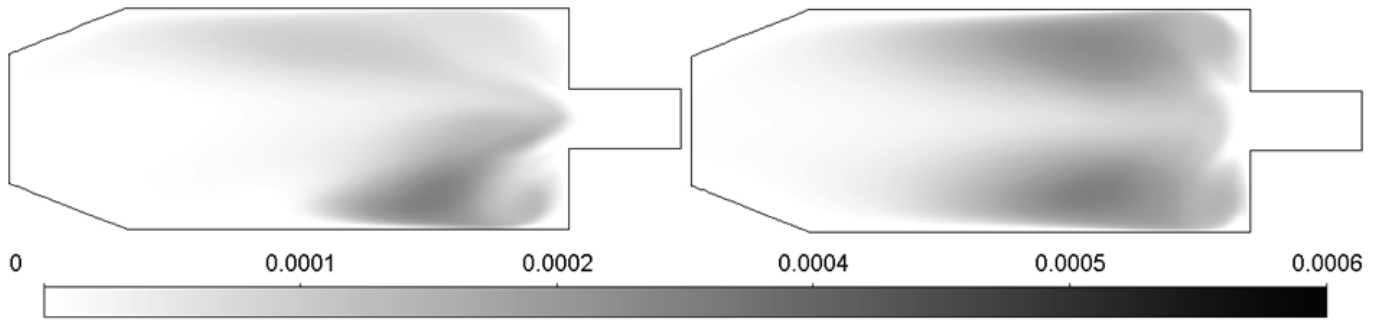
10. ábra. Átlaghőmérséklet a hossz mentén $\alpha=60^\circ$ -os perdítőelem esetén a vizsgált tüzelőanyagokra



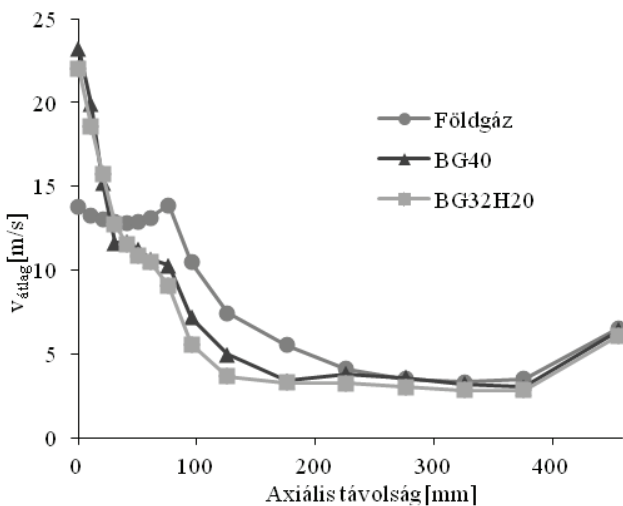
8. ábra. Sebesség-eloszlás [m/s] a középsíkon $\alpha=45^\circ$ -os és $\alpha=60^\circ$ -os perdítőelemnél a keverőcsőben és az égőtérben



9. ábra. Hőmérséklet-eloszlás [K] a középsíkon $\alpha=45^\circ$ -os és $\alpha=60^\circ$ -os perdítőelemnél a keverőcsőben és az égőtérben



12. ábra. OH* tömegkört-eloszlás a középsíkon BG40 (balra) és BG32H20 esetén (jobbra)



11. ábra. Átlagsebesség-amplitúdó a hossz mentén $\alpha=60^\circ$ -os perdítőelem esetén a vizsgált tüzelőanyagokra

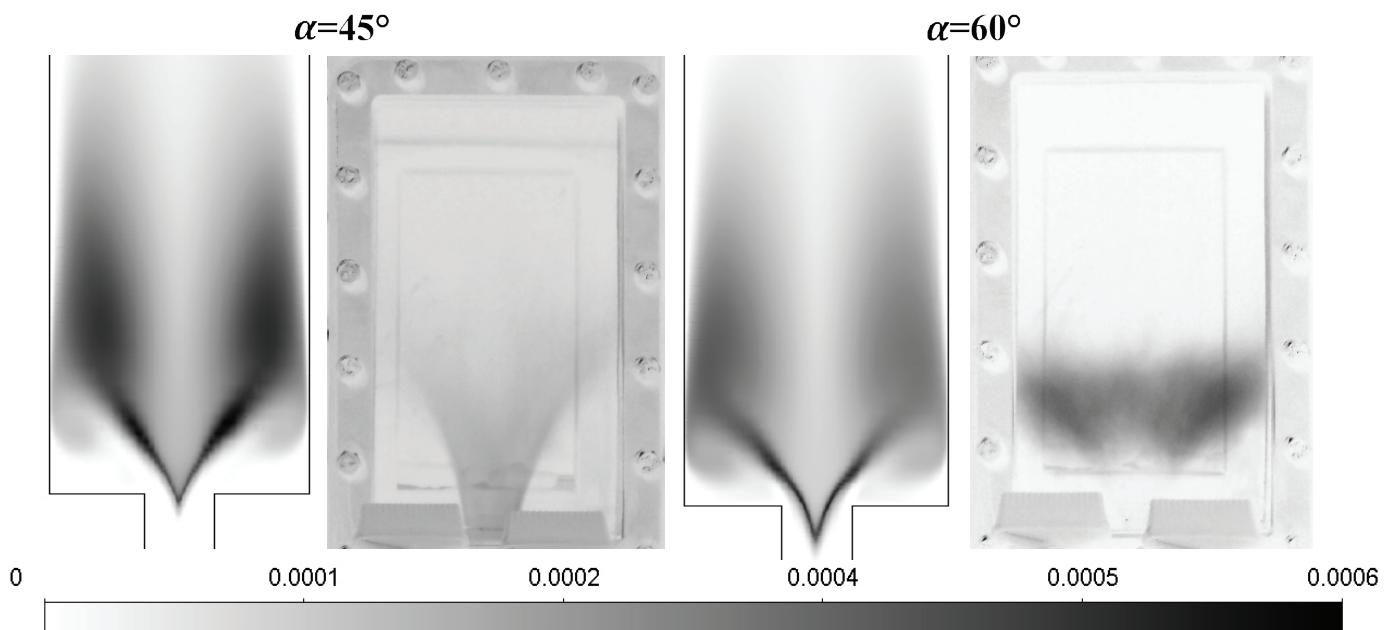
ami a jelenlegi térfogatban 76 mm-es axiális távolságnak felel meg. Az átlaghőmérséklet közel azonos a három esetben, a BG32H20

jobban közelíti a földgázt, melyet a kisebb CO₂ és főként a H₂ tartalom okoz. A sebesség értékek a V alak után ugyanazon értékhez tartanak. A kezdeti értékek magasabbak a biogázok esetén a nagyobb tömegáram miatt, melyeket a CO₂ tartalom mérsékel.

A 12. ábra az OH*-eloszlást mutatja, mivel ez a változó áll legközelebb a hőfelszabaduláshoz a CH* mellett [17]. Földgáztüzelés esetén ez a 13. ábrán található. Ezek alapján mindhárom esetben kialakul egy V alakú láng, mely mentes a visszaégéstől. Az OH* koncentráció a biogázok esetén alacsonyabb a kevesebb metán tartalom miatt, míg a H₂ tartalom egy erősebb koncentrációt és stabilabb égést biztosít.

Validáció

A perdítőelem és az égőtér szimulációjának validációját elsődlegesen a kísérleti berendezésen végzett mérések mentén végeztük el. A 13. ábrán a földgáztüzelés mérési és számítási eredményei láthatók 18 kW-os tüzelőhőteljesítmény esetén. Kijelenthető, hogy a valós lángot minőségileg jól közelíti mindkét lapátszögállású perdítőelem. Nagyobb perdület esetén a közeg jobban felül az égőtér falára, a láng jobban szétnyílik. Az alacsony teljesítmény miatt kevésbé intenzív a nyírás, így az égés is, emiatt az OH* koncentrációk is alacsonyabbak. Az egyezés 30 kW esetén is megmaradt, aminek a bemutatásától most eltekintünk.



13. ábra. Hőmérséklet-eloszlás [K] a középsíkon $\alpha=45^\circ$ -os és $\alpha=60^\circ$ -os perdítőelemnél a keverőcsőben és az égőtérben

A minőségi értékelés mellett a mennyiségi összehasonlítást az adiabatikus lánghőmérséklet segítségével végeztük el (3) alapján:

$$t_{ad} = \frac{\dot{Q}_{tüz}}{\dot{m}_{tüz} \cdot \mu_V \cdot \bar{c}_{pfg}} + t_{ref} \quad (3)$$

ahol μ_V a tömegre fajlagosított füstgázmennyiség, $\dot{Q}_{tüz}$ tüzelőhőteljesítmény, t_{ref} a környezeti és a belépő 20 °C-os referenciahőmérséklet. A \bar{c}_{pfg} átlagos füstgázfajhőt a numerikus eredményekből származtattuk és analitikusan visszaellenőriztük. Az adiabatikus lánghőmérsékletet az egyes esetek maximális hőmérsékletével, valamint a 11. ábrán is látható hossz menti keresztmetszeteken tömeg szerint átlagolt maximális hőmérséklet értékekkel hasonlítottuk össze. Az eredményeket a 2. táblázat tartalmazza. Mivel az adiabatikus lánghőmérséklet számítás nem veszi figyelembe a keveredést, az áramlási teret, a lokális légfeszleg-tényezőt, a környezettel történő hőcserét, így a magas hőmérsékletek miatt már jelentős hőszugárzást sem az értékek számottevően magasabbak a szimulációs eredményekhez képest.

2. táblázat. Maximum szimulált, adiabatikus láng, és szimulált tömegátlagolt hőmérsékletek

Eset	T_{max} [K]	T_{ad} [K]	$T_{\text{átl,max}}$ [K]
Földgáz, 45°	1807	2043	1640
Földgáz, 60°	1770	2048	1620
BG40, 60°	1743	1763	1489
BG32H20, 60°	1704	1822	1569

Összefoglalás

Jelen cikk 45°-os és 60°-os lapátszögállású perdítőelemek lángképre gyakorolt hatását mutatta be numerikus áramlástanai elemzés segítségével. A teljes geometriát két részre bontottuk: egyik felében tüzelés nélkül a perdítőelem közvetlen hatását elemeztük, másik felében az égést is szimulálva az előbbi modellen kialakult sebesség-, hőmérséklet-, nyomás-, koncentrációeloszlást a belépő keresztmetszetre vetítve. Először földgáztüzelést vizsgáltunk, amit lehetőségünk nyílt méréses úton validálni, majd két biogázt értékeltünk H₂ tartalommal, illetve anélkül azonos peremfeltételek mellett. A numerikusan származtatott perdületszám értékek az irodalmi becslésnél magasabb számértékű volt. Az égés modellezése és a tüzelőberendezéses vizsgálatok alapján is megfigyelhető, hogy a 60°-os perdítőelem esetén a láng könnyebben feltapad a tüzelőtér falára, ami a tüztér tervezésénél fontos szempont. Az eredmények alapján egyértelműen kijelenthető, hogy azonos tüzelési teljesítményen a biogáz is képes hasonló égésminőséget biztosítani, mint a földgáz, mely eredmény a későbbi méréses és numerikus vizsgálatok szempontjából. Természetesen a tüzelőanyagból jóval nagyobb tömegáramot kell alkalmazni a kisebb fűtőérték miatt, viszont a károsanyag-kibocsátás alacsonyabb lehet a kisebb adiabatikus lánghőmérsékletnek köszönhetően.

Köszönetnyilvánítás

Jelen cikk a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával a FIEK 16-1-2016-0007 és az OTKA-FK 124704 projektek támogatásával készült, a számításokhoz használt Quadro P6000-es kártyát az NVIDIA Corporation adományozta a BME Tüzeléstechnikai Kutatócsoportjának.

Irodalmi hivatkozások

- [1] Huang Y, Yang V. Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion. *Prog Energy Combust Sci* 2009;35:293–364. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.01.002>.
- [2] Beér JM, Chigier NA. *Combustion Aerodynamics*. London: Robert E. Krieger publishing company, inc.; 1972.
- [3] Khandelwal B, Lili D, Sethi V. Design and study on performance of axial swirler for annular combustor by changing different design parameters. *J Energy Inst* 2014;87:372–82. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.03.022>.
- [4] ANSYS Fluent Theory Guide. Canonsburg: ANSYS, Inc.; 2017. [https://doi.org/10.1016/0140-3664\(87\)90311-2](https://doi.org/10.1016/0140-3664(87)90311-2).
- [5] Samiran NA, Chong CT, Ng JH, Tran MV, Ong HC, Valera-Medina A, és mtsai. Experimental and numerical studies on the premixed syngas swirl flames in a model combustor. *Int J Hydrogen Energy* 2019;44:24126–39. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.158>.
- [6] Khan UI, Othman MHD, Hashim H, Matsuura T, Ismail AF, Rezaei-dashtarzhandi M, és mtsai. Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilisation and storage. *Energy Convers Manag* 2017;150:277–94. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.035>.
- [7] Füzesi D, Józsa V. Perdületszám égésre gyakorolt hatásának elemzése. *OGÉT 2019 Konf. kiadvány, Nagyvárad: 2019, o. 133–6*.
- [8] Füzesi D, Józsa V. Numerical analysis of biogas combustion in a lean premixed swirl burner. 2019 7th Int. Youth Conf. Energy (IYCE), IEEE Xplore Digit. Libr., Bled, Slovenia: 2019.
- [9] Martin M, Holge K, szerkesztő. *VDI Heat Atlas. 2. kiad.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2010.
- [10] NIST Chemistry WebBook é. n. <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/> (elérés 2019. október 20.).
- [11] Faramawy S, Zaki T, Sakr AA-E. Natural gas origin, composition, and processing: A review. *J Nat Gas Sci Eng* 2016;34:34–54. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.06.030>.
- [12] Mameri A, Tabet F. Numerical investigation of counter-flow diffusion flame of biogas-hydrogen blends: Effects of biogas composition, hydrogen enrichment and scalar dissipation rate on flame structure and emissions. *Int J Hydrogen Energy* 2015:1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.035>.
- [13] Casey M, Wintergerste T. *ERCOFTAC Best Practice Guidelines*. Fluid Dynamics Laboratory Sulzer Innotec; 2000.
- [14] Galley D, Ducruix S, Lacas F, Veynante D. Mixing and stabilization study of a partially premixed swirling flame using laser induced fluorescence. *Combust Flame* 2011;158:155–71. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.08.004>.
- [15] Durox D, Moeck JP, Bourgoïn JF, Morenton P, Viallon M, Schuller T, és mtsai. Flame dynamics of a variable swirl number system and instability control. *Combust Flame* 2013;160:1729–42. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.03.004>.
- [16] Candel S, Durox D, Schuller T, Bourgoïn J-F, Moeck JP. Dynamics of Swirling Flames. *Annu Rev Fluid Mech* 2014;46:147–73. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010313-141300>.
- [17] Panoutsos CS, Hardalupas Y, Taylor AMKPMKP. Numerical evaluation of equivalence ratio measurement using OH* and CH* chemiluminescence in premixed and non-premixed methane-air flames. *Combust Flame* 2009;156:273–91. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2008.11.008>.