

Diffúzoros kialakítású előkeveréses perdületes égő károsanyag kibocsátása lángcsőben tüzelés esetén

Hidegh Gyöngyvér

energetikai mérnök, gyongyver.hidegh@gmail.com

Józsa Viktor

okl. gépészmérnök, jozsa@energia.bme.hu

Az alacsony károsanyag kibocsátású, szegény, előkevert és előpárolgatott keverékkel üzemelő égők a lángfűvési határhoz lehető legközelebbi működést valósítanak meg. Ez azonban stabilitási problémákat vet fel, melyekre a megfelelő lángstabilizáló elemek nyújthatnak megoldást. Így kutatásunk során különböző nyílásszögű diffúzorok hatását vizsgáljuk lángcsőben tüzelés esetén a CO és NO_x alakulására. További változtatott paraméter a légfelesleg-tényező és a porlasztónyomás. A hosszú tartózkodási idő kellően alacsony CO kibocsátást eredményezett minden esetben, azonban a NO_x kibocsátás csak 1,6-os, illetve nagyobb légfelesleg-tényező esetén vált megfelelően alacsonnyá. A porlasztónyomás és a diffúzorok egyértelműen kihatással voltak a kibocsátásra, azonban a légfelesleg-tényezőre volt a legérzékenyebb a NO_x kibocsátás.

*

The lean premixing, prevaporizing swirl burners are operating as close as it is feasible to the blowout limit. However, this goal leads to flame stability issues which can be solved by using flame stabilizer elements. Therefore, the effect of quarls on CO and NO_x emission was investigated in the case of combustion in a flame tube. Additional variable parameters were the air-to-fuel equivalence ratio and the atomizing pressure. The long residence time ensured low CO emission in all the cases, however, above air-to-fuel equivalence ratio of 1.6 ensured low enough NO_x emissions. The atomizing pressure and quarls apparently affected the NO_x emission, nevertheless, it was principally governed by the air-to-fuel equivalence ratio.

A károsanyag kibocsátás csökkentésére történő fejlesztések során a tüzelőberendezések üzemi tartományának szélesítése és párhuzamosan a hatásfok növelése egyaránt kiemelt jelentőségű. Elsősorban az alacsony NO_x kibocsátás érdekében érdemes a stabil égés határáig szegényíteni a keveréket [1], így a lángfűvési határhoz közeli üzem a tervezési cél [2]. Amennyiben folyékony üzemanyaggal működtetünk egy berendezést, a lángfront előtt a tüzelőanyagot először porlasztani, majd elpárolgatni szükséges [3]. Ennek megfelelően a mai modern égők lehetővé teszik a tüzelőanyagcseppek megfelelő mértékű párolgását, a tüzelőanyagpára-levegő előkeverését, és perdületes áramlás kialakítása révén a szegény keverékekkel való stabil üzemet is [4].

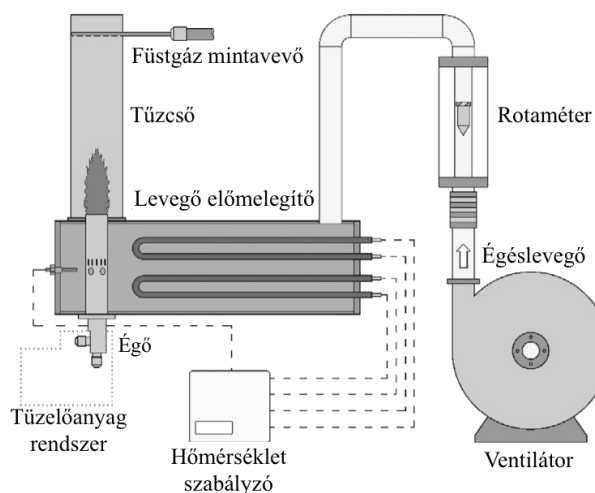
Az üzemi tartomány szélesítésére, tehát a minél szegényebb keverékkel való üzem elérésére egy lehetséges irányvonal az égő geometriai fejlesztése [5]. Az ipari égőkben megvalósuló égés során perdületes áramlás jön létre, és kialakul egy, a láng függőleges tengelyére szimmetrikus belső recirkuláció, illetve egy a lángot toroid alakban körülvevő külső recirkulációs zóna, amelyek az égést stabilizálják [6]. A külső recirkuláló zónát helyettesíthetjük egy diffúzorral, ami tovább szélesítheti az üzemi tartományt, azonban így a károsanyag kibocsátás is jelentősen változik [7]. A korábbi

mérések során az égő nyitott volt a környezet felé, így jelen cikkben egy lángcső alkalmazása mellett vizsgáljuk meg a diffúzorok hatását a károsanyag kibocsátásra. Mivel a lángcsőben elég idő áll rendelkezésre a teljes kiégéshez, illetve a sugárzásos hőátadás intenzív, ezért a tökéletlen égésből származó alkotók koncentrációja alacsonyra várható. Azonban ezzel párhuzamosan magas termikus NO_x kibocsátás feltételezhető [8].

A geometria mellett a porlasztónyomás hatását is értékeljük, mivel korábban nyílt tüzelés mellett a legalacsonyabb kibocsátás 0,75 bar porlasztási túlnyomás mellett adódott [9]. Ennek hatása a lángképre igen bonyolult probléma, aminek a részletes vizsgálatával jelenleg nem foglalkozunk, csak a károsanyag kibocsátásra gyakorolt hatásával, mely döntően a permet finomságára vezethető vissza. A lángcsőben való tüzelés áramképét Hadef és munkatársai kísérleti úton elemezték folyadék- és gáztüzelés esetén egyaránt [10].

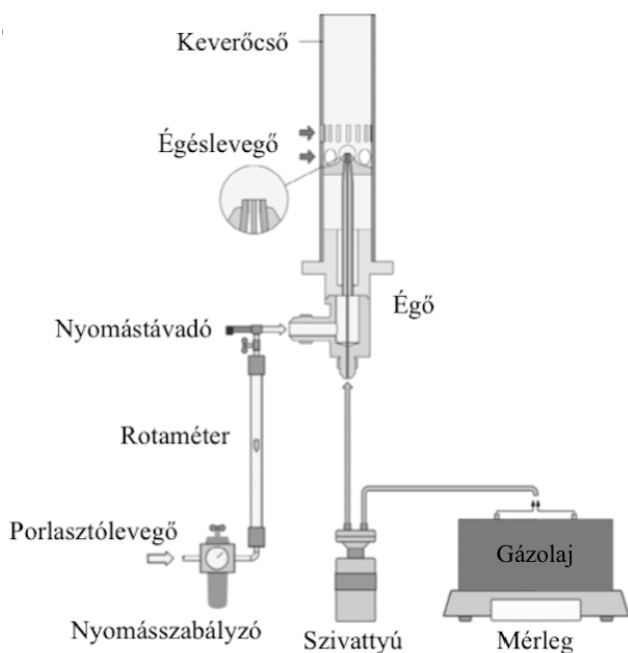
A mérőberendezés bemutatása

Az 1. ábrán látható a 15 kW-os tüzelési teljesítményű atmoszférikus égővizsgáló tesztberendezés. Az égéslevegő szállítására egy ventilátor szolgált. A különböző üzemállapotok beállítását egy fokozatmentes frekvenciaváltó tette lehetővé. Az égéslevegőt egy szabályozható előmelegítő segítségével melegítettük 400 °C-ra, mielőtt belépett az égő keverőcsővébe. A szükséges égéslevegő mennyiség meghatározása füstgázelemzés segítségével történt. A Testo 350 típusú hordozható füstgázelemző mintavevője az égőszájra koncentrikusan helyezett lángcsőbe volt bevezetve, 600 mm-rel az égőszáj fölött. A lángcső átmérője 100 mm volt, magassága 650 mm, falvastagsága 2 mm. A mérési pontok beállítása a füstgáz oxigéntartalma szerint történt, a mérési pontokat 1%-os oxigénszint szerinti lépésközzel felvéve 3-12%-os értékig. Ennek hibája 0,4% 95%-os szignifikancia szintre vonatkozhatva. Az égéslevegő ágba szerelt rotaméter így az égéslevegő térfogatáramának ellenőrzésére szolgált.



1. ábra. Az égővizsgáló tesztberendezés

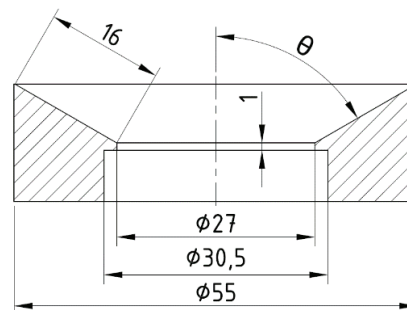
A 2. ábrán látható a tüzelőanyag-rendszer. A folyékony tüzelőanyagot egy digitális mérlegre helyezett edényből egy feszültségvezérelt lamellás szivattyú juttatta az égőbe. A tüzelőanyag-fogyasztás mérésére egy mérleget használtunk. A tömegcsökkenést 30 másodpercenként regisztrálva határoztuk meg a tömegáramot. Így a tüzelési teljesítmény beállításának hibája 4% 95%-os szignifikancia szint mellett. Azonban ez a hiba lényegében az üzemi állapot beállításánál jelentkezik, folyamatos mérés esetén mértéke nem változik. Az alkalmazott előkeveréses, előpárolgatató rendszerű perdületes égőben a porlasztást egy egyszerű sugaras levegő segédközeges porlasztó valósította meg, ahol a központi tüzelőanyag vezetékekkel koncentrikusan, gyűrű keresztmetszetben lép ki a nagysebességű porlasztólevégő. A porlasztás során keletkező permet méreteloszlását és jellemző térfogati-felületi közepes cseppátmérőjét korábban vizsgáltuk [11]. A két közeg sebességkülönbsége vezet a folyadék-sugár felbomlásához és a cseppek képződéséhez. A porlasztólevégő kívánt nyomását egy nyomáshatároló szelep segítségével állítottuk be. Korábbi vizsgálataink alapján az igen szűk fűvókában végbemenő állapotváltozást igen jól közelíti az adiabatikus expanszió [3]. Az égéslevégő négy tisztán radiális kör keresztmetszetű és tizenöt 45°-os téglalap keresztmetszetű nyíláson keresztül lép be a keverőcsőbe. Itt megtörténik a cseppek részleges elpárolgása, tehát már egy relatíve homogén tüzelőanyag-levegő keverék éri el a lángfrontot.



2. ábra. Tüzelőanyag-rendszer

Mivel a különböző félkúpsögű diffúzoros toldatok azonos méretű hengerekből lettek kimunkálva, a tömör anyag maradéka hűti a lángot. Részből emiatt terjedt ki a mérés a 0°-os félkúpsögű elemre is, ami a keverőcső megtoldását jelentette 21%-kal. A vizsgált konfigurációk metszetét a 3. ábra szemlélteti. A diffúzorok alkotója minden esetben 16 mm volt. Ezeket a 30 mm külső átmérőjű égő szájára illesztettük a megvezetés segítségével. Nyílásszög tekintetében a 0°–60°-ig terjedő sorozatot hasonlítottuk össze az eredeti konfiguráció tulajdonságaival, 15°-os lépésközzel. A diffúzor nélküli esetre eredeti kialakításként, a 0°-osra egyenes kialakításként, míg a különböző diffúzorok esetén a félkúpsög számértékével hivatko-

zunk. A mérések a következőképpen zajlottak: adott tüzelőanyag tömegáram és fűvóka konstrukció mellett állandó porlasztónyomáson, a beállított füstgáz oxigéntartalom mellett regisztráltuk a füstgáz NO_x és CO tartalmát. Korábbi mérési eredmények tapasztalatai alapján a 0,3–1,6 bar porlasztási túlnyomás értékek közötti tartományt vizsgáltuk. Erre a későbbiekben egyszerűen porlasztónyomásként hivatkozunk.

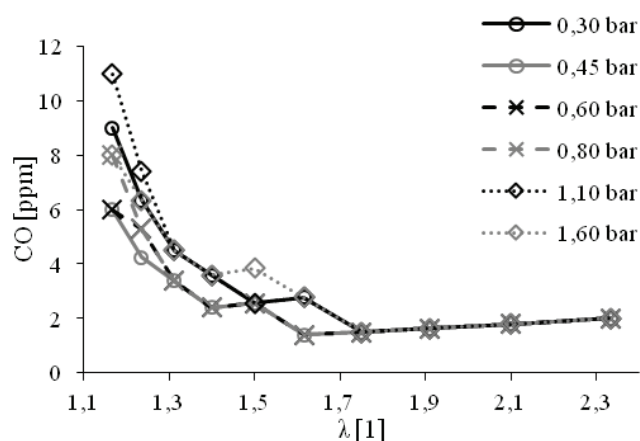


3. ábra. Az alkalmazott diffúzorok keresztmetszete. A θ paraméter jelöli a félkúpsögöt

Az eredmények értékelése

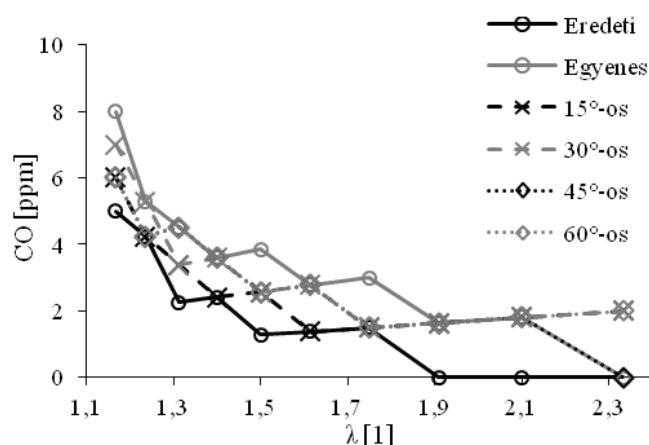
A korábbi mérések során, amikor lángcső nélküli tüzelést valósítottunk meg, porlasztónyomástól és égőkialakítástól függően, kevés esetben fordult elő, hogy 2,2-es légfesleg-tényező érték fölött is stabil üzemet tapasztaljunk [7]. Itt jegyezzük meg, hogy az égéslevégő egy része biztosan nem jutott be a reakciózónába, mivel légköri viszonyok mellett a szénhidrogének elméleti felső gyulladási határkoncentrációja a 2-es légfesleg-tényező [12]. Lángcsőben való tüzeléskor azt tapasztaltuk, hogy az oxigénszint 12%-os értékig való növelése az üzemelésre nézve sehol nem jelentett problémát, a lángfűvési határt meg sem közelítettük egyik esetben sem. A lángcső alkalmazásával a láng egy másodlagos támasztása és a forró égéstermékek további visszagázrása valósult meg.

A kibocsátási értékeket minden esetben 3% oxigénszintre korrigáltuk, ami tipikus a kis légfesleg mellett üzemelő atmoszférikus berendezések körében, mint amilyenek a kazánok is. A jelen esetben mért maximális CO tartalom 19 ppm volt, míg a korábbi, a környezet felé nyitott mérések alkalmával több mint egy nagyságrenddel magasabb értékeket is regisztráltunk [7]. A 4. ábrán látható a 15°-os nyílásszögű diffúzor alkalmazásakor mért CO kibocsátás. A légfesleg növelésével ez minden porlasztónyomás esetén csökken, majd egy bizonyos oxigéntartalom után kis mértékben nő, azonban itt ez az 1 ppm kibocsátásnak, ami a műszer osztásából adódik, a 3% oxigénszintre való korrekció következménye. A különböző konstrukciók esetében is hasonló trendek figyelhetők meg, azonban az egyes porlasztónyomásokhoz tartozó görbék egymáshoz való viszonya között nem található közvetlen szabályszerűség, mivel a lángalakra is kihatása van a porlasztónyomásnak. Az ilyen irányú vizsgálatok későbbi méréseink alapját képezik. Az érvényben lévő károsanyag kibocsátásra vonatkozó szabványok, országtól szinte függetlenül, stacionárius üzemben működő tüzelőberendezések esetén 50–100 ppm CO koncentrációt állapítanak meg felső határként. Mivel a füstgázelemző műszer bizonytalansága 95%-os szignifikanciaszint mellett 6 ppm, mely a légfesleg-tényező növelésével növekszik a korrekció mértékével. Esetünkben a statisztikailag szignifikáns eredmények az 1,3-es légfesleg-tényező értékig találhatók.



4. ábra. CO kibocsátás a 15°-os diffúzor alkalmazásakor

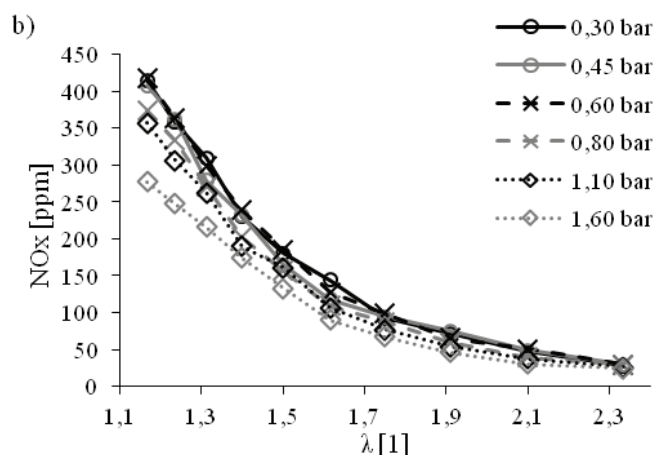
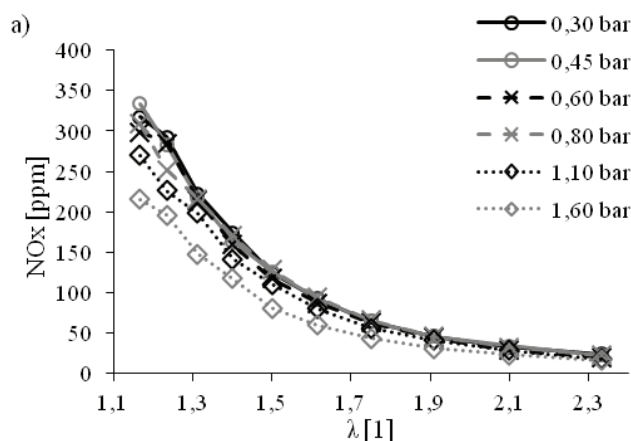
Az 5. ábrán 0,45 bar porlasztónyomás alkalmazásakor mért CO kibocsátási értékek láthatók a légfeslesleg-tényező növelése során a különböző égőkialakítások esetében. A görbék jellege itt is hasonló: a légfeslesleg-tényező növelésével a CO kibocsátás csökken, majd egy bizonyos oxigénszint elérése után már nem mérhető.



5. ábra. CO kibocsátás 0,45 bar porlasztási túlnyomás esetén

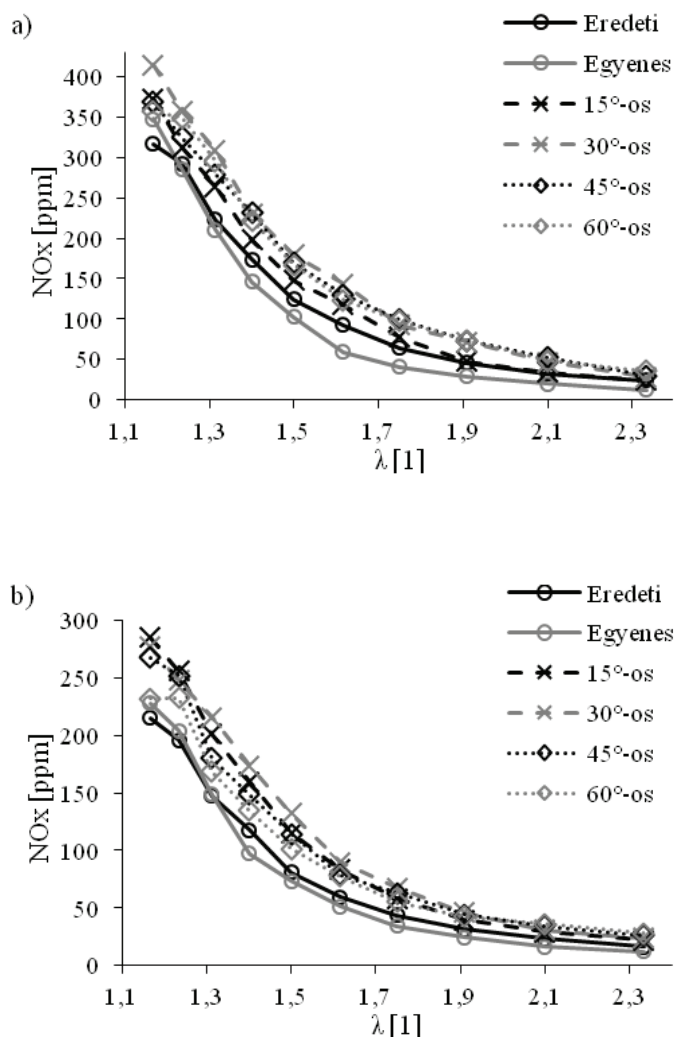
A NO_x kibocsátás változása a különböző égőkialakítások esetében a porlasztónyomás, illetve a légfeslesleg-tényező változtatásával hasonló trendek szerint alakul a CO-hoz képest, ezt az eredeti égőkialakítás és a 30°-os diffúzor alkalmazása mellett a 6. ábra szemlélteti. Az egyes porlasztónyomásokhoz tartozó görbék a légfeslesleg-tényező növelésével exponenciális jellegű lecsengést mutatnak. 1,17-es légfeslesleg-tényező mellett a maximális NO_x kibocsátási értékek láthatók, mely maximum értékek között az eredeti kialakítás esetében 119 ppm, a 30°-os diffúzor esetében 140 ppm eltérés adódott. Minden konstrukció esetében a porlasztónyomások görbeseregét alulról a legnagyobb (1,6 bar) porlasztási túlnyomás alkalmazásakor kapott görbe határozza. Ebből adódóan általánosan levonható az a következtetés, hogy a vizsgált tartományon belül a porlasztónyomás növelésével csökken a NO_x kibocsátás, mivel a kisebb cseppek hamarabb el tudnak párologni és így keveredni az égéslevegővel, tehát az égő keverék homogenizálódik. A légfeslesleg-tényező növelésével a NO_x kibocsátás csökken, a görbék 2,1-es légfeslesleg-tényező érték felett összefutnak. Itt porlasztónyomástól függetlenül 10-40 ppm NO_x tartalom volt mérhető a füst-

gázban, ami igen kedvező égést mutat, különösen, ha a vonatkozó alacsony CO kibocsátást is figyelembe vesszük. A füstgázelemzés során a NO_x mérésének hibája 95%-os szignifikanciaszint mellett 4 ppm volt, ami a mért mennyiségek alapján igen pontos mérést jelent. Ebből kifolyólag a hibaszávok mérete összemérhető az alkalmazott jelölők méretével. Az egységes oxigénszint miatt itt is a légfeslesleg növelésével a hiba a korrekció mértékével növekszik. A NO_x kibocsátás korlátozásának szokásos értéke stacionárius tüzelés mellett 100 ppm, így gyakorlati alkalmazásokhoz a jelenlegi rendszer kiválóan illeszthető.



6. ábra. NO_x kibocsátás a) az eredeti égőkialakítás esetén, b) a 30°-os diffúzor alkalmazásakor

A 7. ábrán látható a NO_x kibocsátás változása a légfeslesleg-tényező növelésével a különböző égőkialakítások esetében, rendre 0,3 és 1,6 bar porlasztási túlnyomásokon. A görbék exponenciális jellegű lefutása és a légfeslesleg-tényező növelésével történő összetartása ezeken az ábrákon is megfigyelhető. A maximális NO_x kibocsátások között 0,3 bar esetén 98 ppm, 1,6 bar esetén 70 ppm eltérés adódik. Minden porlasztónyomás esetében a különböző konstrukciók alkotta görbeseregét alulról az egyenes toldat alkalmazása során kapott görbe határozza 1,3-es légfeslesleg-tényező érték felett, míg ezalatt a legkisebb NO_x kibocsátást az eredeti égő alkalmazása mellett kaptuk. A vizsgált tartományon a legmagasabb NO_x kibocsátást általánosan a 30°-os diffúzor alkalmazása mellett mértük. A többi diffúzorhoz tartozó görbék elrendeződésére vonatkozólag nem állapítható meg egyértelmű szabályszerűség.



7. ábra. NO_x kibocsátás a) 0,3 bar porlasztónyomás esetén, b) 1,6 bar porlasztónyomás esetén

Összefoglalás

A jelenlegi kutatás során egy előkeveréses perdületes égő szájára helyezhető, különböző nyílásszögű diffúzoros elemek hatását vizsgáltuk a CO és NO_x kibocsátásra. Az atmoszférikus tesztpadon lévő égőt egy lángcső vette körül, közelítve a valós berendezések égőterében felépülő környezetet. A mérések különböző porlasztónyomásokon történtek, továbbá különböző félkúpszögű diffúzorokat illesztettünk az égő szájára 0°-tól 60°-ig 15°-os lépésközzel. Az emissziós értékeket minden esetben 3% vonatkoztatási oxigéntartalomra adtuk meg.

A maximálisan mért CO koncentráció a füstgázban 19 ppm volt. A füstgáz CO tartalmára a különböző porlasztónyomások és égőkialakítások mellett általánosan jellemző a kibocsátott mennyiség csökkenése a légfeszültség-tényező növelésével. 1,8-es légfeszültség-tényező érték felett már gyakorlatilag elenyésző volt CO kibocsátás. A füstgáz NO_x tartalmának változása jelentősebb volt. 3%-os oxigéntartalom mellett 200-450 ppm kibocsátást mértünk, ami 10-40 ppm-re csökkent 2,3-es légfeszültség-tényező mellett. A legalacsonyabb NO_x kibocsátás az 1,6 bar-os porlasztónyomás esetén adódott. Adott porlasztónyomás esetén, összehasonlítva az egyes égőkialakítások mellett kialakuló NO_x kibocsátást a légfeszültség-tényező növelésével a füstgáz NO_x tartalma exponenciális jelleggel csök-

ken. 1,3-es légfeszültség érték alatt az eredeti égőkialakítás esetében látható a legalacsonyabb NO_x kibocsátás, míg e felett az egyenes toldattal rendelkező konstrukcióhoz tartozó görbe határozza alulról a görbesereget. Azonban a diffúzor félkúpszögének változtatásával a porlasztónyomáshoz hasonló trend egyértelműen nem állapítható meg, mivel a 30°-os diffúzor alkalmazása mellett mértük a legmagasabb NO_x kibocsátást.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás az Emberi Erőforrások Minisztériumának az ÚNKP-17-2-I. kódszámú, Új Nemzeti Kiválóság Program és a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával, az NKFI Alapból az OTKA-FK 124704 projekten keresztül valósult meg.

Irodalom

- [1] J. M. Bergthorson és M. J. Thomson, "A review of the combustion and emissions properties of advanced transportation bio-fuels and their impact on existing and future engines," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 42, pp. 1393–1417, 2015.
- [2] A. H. Lefebvre és D. R. Ballal, *Gas turbine combustion*, 3. kiadás, Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [3] V. Józsa és D. Csemány, "Evaporation of renewable fuels in a lean premixed prevaporized burner," *Period. Polytech. Mech. Eng.*, vol. 60, no. 2, pp. 82–88, 2016.
- [4] N. Syred, "A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 32, no. 2, pp. 93–161, Jan. 2006.
- [5] Y. Huang és V. Yang, "Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 35, no. 4, pp. 293–364, 2009.
- [6] J. M. Beér és N. A. Chigier, *Combustion aerodynamics*. London: Robert E. Krieger Publishing Company, Inc., 1972.
- [7] V. Józsa és A. Kun-Balog, "Effect of diffusers on the blowout stability and emission of pollutants of a liquid fueled swirl burner," *J. Eng. Gas Turbines Power*, 2018.
- [8] U. Maas és S. B. Pope, "Simplifying chemical kinetics: Intrinsic low-dimensional manifolds in composition space," *Combust. Flame*, vol. 88, no. 3–4, pp. 239–264, 1992.
- [9] A. Kun-Balog és K. Sztankó, "Reduction of pollutant emissions from a rapeseed oil fired micro gas turbine burner," *Fuel Process. Technol.*, vol. 134, no. x, pp. 352–359, 2015.
- [10] R. Hadeif, K. Merkle, B. Lenze és W. Leuckel, "An experimental study of airblast atomizer spray flames," *J. Inst. Energy*, vol. 73, no. 494, pp. 50–55, 2000.
- [11] A. Urbán, M. Zaremba, M. Malý, V. Józsa és J. Jedelský, "Drop-let dynamics and characterization of high-velocity airblast atomization," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 95, pp. 1–11, 2017.
- [12] I. Glassman és R. Yetter, *Combustion*, 4th ed. Burlington: Academic Press, 2008.