HIDEGH GYÖNGYVÉR

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA DOLGOZAT

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

ENERGETIKAI GÉPEK ÉS RENDSZEREK TANSZÉK

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA DOLGOZAT

A DOLGOZAT AZ EMBERI ERŐFORRÁSOK MINISZTÉRIUMA ÚNKP-17-2-I KÓDSZÁMÚ ÚJ NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ENERGETIKAI GÉPEK ÉS RENDSZEREK TANSZÉK

HIDEGH GYÖNGYVÉR

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA DOLGOZAT

Előkeveréses égő lángemissziós spektrometriai diagnosztikája

Témavezető:
Dr. Józsa Viktor
adjunktus

Budapest, 2017

Szerzői jog © Hidegh Gyöngyvér, 2017.

Szerzői jog © Dr. Józsa Viktor, 2017.

NYILATKOZAT AZ ÖNÁLLÓ MUNKÁRÓL

Alulírott, *Hidegh Gyöngyvér* (D2OGB0), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírásommal igazolom, hogy ezt a TDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és a TDK dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2017. október 26.

Hidegh Gyöngyvér

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretném megragadni az alkalmat arra, hogy köszönetemet és tiszteletemet fejezzem ki mindenkinek, aki a dolgozatom elkészítéséhez nagyban hozzájárult. Rendkívül szerencsésnek érzem magam, hogy *Józsa Viktor* személyében olyan konzulensem lehet, aki állandóan és azonnal a rendelkezésemre állt, akár szakmai vagy baráti segítségre, tanácsra volt szükségem a dolgozatom megírása, illetve az előkészületek közben.

Köszönettel tartozom *Fuchs Angelikának*, aki segítségemre volt a dolgozatomhoz szükséges mérések lebonyolításában.

Hálás vagyok *Családomnak*, akik szeretetükkel és odafigyelésükkel mindvégig támaszt nyújtottak eddigi tanulmányaim során, és a dolgozatom elkészítésének ideje alatt türelmet és megértést tanúsítottak irántam.

TARTALOMJEGYZÉK

Absztrakt xi
Abstract xiii
Előszó xv
1. Motiváció a lángok spektrumának vizsgálatára 1
2. Stacionárius tüzelés 5
3. LPP égőterek kihívásai 9
3.1. Tüzelési instabilitások 10
3.2. Tüzelési instabilitásokat okozó főbb mechanizmusok 11
3.2.1. Lángfelület változása 11
3.2.2. Légfelesleg-tényező változása 12
3.3. Előperdítéses égő áramlási viszonyai 13
4. Lehetőségek a tűztérben fellépő instabilitások csökkentésére 17
4.1.1. Passzív szabályzás 17
4.1.2. Aktív szabályzás 20
5. Optikai lángdiagnosztika 23
5.1. Kemilumineszcencia 24
5.1.1. A kemilumineszcens emisszió észlelése 25
5.1.2. Intenzitásarányok alkalmazhatósága 26
6. A mérőrendszer bemutatása 29
7. Korábbi eredmények rövid ismertetése 33
7.1. Diffúzorok alkalmazásának stabilitási vizsgálata 33
7.2. Diffúzorok alkalmazásának spektrometriai vizsgálata 35
8. Mérés kiértékelése és következtetések 37
8.1. Hibaszámítás 37
8.2. Validációs mérések 39
8.3. Kiértékelés folyamata 41
8.4. Eredmények bemutatása 43
8.5. Következtetések 53
9. Összefoglalás és továbblépési lehetőségek 55
Felhasznált források 57
Melléklet 61

ABSZTRAKT

A lángemissziós spektrometria már a XIX. század óta fontos részét képezi a tüzelési folyamatok megismerésének, illetve a különböző, rövid életű kémiai anyagok spektrális vizsgálatának. A foton kibocsátásával járó folyamat bonyolult molekulák szerkezeti vizsgálatát is lehetővé teszi. Felépült lángban egy elem spektruma viszonylag egyszerű, általában csak néhány rezonancia-vonalból áll, ennélfogva az elemek azonosítása jóval könnyebb, mint például egy elektromos ív vagy szikra esetében [1].

Az előkevert lángok kemilumineszcens emissziójának megfigyelése széles körben elterjedt technológia a lángdiagnosztikában, mivel az természetes módon jelen van a lángban, azaz nincs szükség külső megvilágításra, gerjesztésre [2]. Bár az ilyen tapasztalati megfigyelések sok esetben jól alkalmazhatóak, mégsem várható el, hogy információt adjanak a tüzelés közben lejátszódó elemi folyamatokról részleteiben, ugyanis a reakciók során többségében nem gerjesztett anyagok keletkeznek. Egyik fő célja a spektrum megfigyelésének az, hogy azonosíthatók legyenek a reakcióban résztvevő közbenső kémiai anyagok [3-4]. A spektroszkópia egy sajátos előnye, hogy a spektrumban megfigyelhető intenzitáscsúcsok relatív erősségeinek összehasonlításával megállapíthatjuk a közbenső elemek által kibocsátott energia eloszlását, és ebből az információból következtethetünk a lejátszódó kémiai folyamatokra és az egyes anyagok képződésének módjára [5].

Dolgozatomban egy adott előkeveréses égőt vizsgálok többféle égőszáj kialakítással. Korábbi méréseink eredményeképpen kimutattuk, hogy ha az égőszájra adott nyílásszögű diffúzoros kialakítású elemeket helyezünk, azok a nyílásszög függvényében akár 50%-kal is növelhetik az eredeti égőkialakítás működési tartományát. E mellett a károsanyag kibocsátásra is befolyással vannak a különböző konstrukciók. Tapasztalataink szerint ebből a szempontból a legkedvezőbben, illetve legkevésbé kedvezően viselkedő nyílásszögű diffúzorokkal foglalkozom jelen dolgozatomban. Az összehasonlítás alapjául az eredeti égőkialakítás és annak, a diffúzorok alkotójának hosszával megegyező magasságú egyenes csőszakasszal való megtoldása szolgál. A mérések során az egyes konstrukciók esetében változtattuk a porlasztónyomást és a légfelesleg-tényezőt, majd minden ily módon beállított pontban spektrofotométerrel vertikálisan végig pásztáztuk a

lángot. Az eredményekből megállapíthatjuk milyen hatással van az egyes paraméterek változtatása a láng szerkezetére.

ABSTRACT

Flame emission spectroscopy is strongly related to the analysis of combustion processes, and to the spectroscopic diagnostics of different, short life chemical species since the 19th century. Processes emitting photons enable the examination of complex molecules as well. The spectrum of a single element in a full-grown flame is relatively simple, therefore the identification is much easier than performing the analysis in an electrical arch or a spark [1].

The chemiluminescence emission exists naturally in the flame, there is no need for an external lighting or excitation, therefore the observation of the chemiluminescence emission of premixed flames is a widely used technology in flame diagnostics [2]. However, this empirical monitoring is well established, it provides low information on the elementary processes as most of the forming species are not excited. One of the main purpose of the observation of the spectrum is the identification of the intermediate chemical species during the combustion process [3-4]. The distribution of the emitted energy of the intermediate elements during the combustion process can be established by the comparison of the intensity peaks. It follows that the chemical processes and the formation of certain elements can be determined, which is one of the main advantage of the observation of the spectrum [5].

A premixed burner with different configurations of the burner lip is examined in this paper. Previous measurements showed that the application of a diffuser on the burner lip extends the flame blowout stability up to 50%. Secondly, a diffuser has an impact on the pollutant emission as well. Considering this, the diffusers with the best and the worst cone angle are examined in this paper. For comparison, the original burner construction, and a diffuser with 0° half cone angle are examined too. Measurements were carried out using the constructions mentioned above at various air-fuel equivalence ratios and atomizer pressures. In each measurement point, the flame is vertically scanned with a spectrometer. The results show the effect of the changes of each parameter on the structure of the flame.

ELŐSZÓ

A tűz csiholója

Csak akkor születtek nagy dolgok,
Ha bátrak voltak, akik mertek
S ha százszor tudtak bátrak lenni,
Százszor bátrak és viharvertek.
Az első emberi bátorság
Áldassék: a Tűz csiholója,
Aki az ismeretlen lángra
Úgy nézett, mint jogos adóra.

Mint egy Isten, hóban vacogva
Fogadta szent munkája bérét:
Még ma is minden bátor ember
Csörgedezteti az ő vérét.

Ez a világ nem testálódott
Tegnaphoz húzó, rongy pulyáknak:
Legkülönb ember, aki bátor
S csak egy különb van, aki: bátrabb.

S aki mást akar, mint mi most van,
Kényes bőrét gyáván nem óvja:
Mint ős-ősére ütött Isten:
A fölséges Tűz csiholója.

Ady Endre, 1913.

1. MOTIVÁCIÓ A LÁNGOK SPEKTRUMÁNAK VIZSGÁLATÁRA

A 21. század legnagyobb kihívása a fenntarthatóság elérése. A problémák többsége a folyamatosan növekedő energiaszükséglet fedezésével kapcsolatos. Mivel manapság a felhasznált energia 80%-a fosszilis tüzelőanyagokon alapul, a tüzeléstechnikával foglalkozó mérnökök vállára egyre nagyobb súly nehezedik a tüzelés hatásosságának növelését és a károsanyag kibocsátás csökkentését illetően. Előre láthatóan, kiváltképp a közlekedésben, ezentúl is a folyékony üzemanyagok lesznek dominánsak versenyképes alternatíva hiányában. Mivel napjainkban továbbra is a dízelolaj a legelterjedtebb folyékony üzemanyag a releváns tüzelőberendezések körében, az ezzel kapcsolatos kutatások eredményei azonnal gyakorlatba ültethetőek [1].

A gázturbina égőterében meghatározó szerepe van az áramkép, a porlasztás és a láng kapcsolatának. A szegény keverékkel üzemelő előkeveréses égők esetében gyakran alkalmaznak perdületes áramlást [6-8]. A perdületes lángok előnye, hogy kis térfogatban nagymértékű energia átalakítást tesznek lehetővé, továbbá megkönnyítik a gyújtás folyamatát és stabil égést eredményeznek széles működési tartományon. A NO_X kibocsátás minimalizálása érdekében napjaink gázturbinái minél szegényebb keverékkel üzemelnek. Ilyen körülmények között viszont a láng nem kívánatos instabilitások sorozatának van kitéve, mint például a termoakusztikus oszcillációk. Az instabilitást okozó mechanizmusok létrejöttéért az áramlási mezők komplex kapcsolata, a nyomás, a keverék képzés és a kémiai reakciók felelnek. Ezen jelenségek viszont még manapság sem teljesen ismertek. A numerikus módszerek még nem elég fejlettek a probléma megoldásához, egy használatban lévő életnagyságú tüzelőtér részletes vizsgálata pedig nehezen kivitelezhető. Ígéretes megoldás lehet laboratóriumi körülmények között „standard” égőteret vizsgálni. Ez egyrészt praktikus, másrészt részletes és átfogó méréseket tesz lehetővé pontos, a lejátszódó folyamatokat nem zavaró technológiákkal. A kapott adatok felhasználhatók a numerikus szimulációk fejlesztésére, melyekkel később a különböző alkalmazott égőterek működése modellezhetővé válik [7]. Tehát a tüzelőanyagok égésének feltérképezése manapság továbbra is a tapasztalati úton szerzett ismeretekre támaszkodva mutat eredményeket.

A gyertya lángjának spektrumát először Swan vizsgálta 1857-ben, az 1860-as években pedig Bunsen és Kirchoff folytatott spektrális megfigyeléseket a lángok fémtartalmának

kimutatása érdekében [9]. Az egyik első alkalmazása a lángok tanulmányozásának minőségbeli analízis volt, valójában néhány elemet fedeztek föl először a láng spektrumában mutatott karakterisztikájuk alapján, mint például a rubídiumot Bunsen és Kirchoff 1861-ben. A mennyiségi analízis alkalmazása manapság gyakori és fontos az iparban és a kutatásban egyaránt. A kialakult lángban egy elem spektruma viszonylag egyszerű, általában csak néhány rezonancia-vonalból áll, ennélfogva az elemek azonosítása jóval egyszerűbb, mint egy elektromos ív vagy szikra esetében [1]. A lángok spektrumának feltérképezése egyre növekvő ütemben folyik, és ezekből a tanulmányokból szerzett tudás napjainkban is jelentős előrelépést eredményez az égés során lejátszódó folyamatok megértéséhez.

A fő különbség az égés és más kémiai reakciók között az, hogy az égés során (a hidrogén láng kivételével) látható a reakciózóna, azaz a láng, ami nem más, mint fotonok sorozatos kibocsátása. Belátható, hogy a láng által kibocsátott fény minőségének és mennyiségének feltérképezése fontos részét képezi a tüzelési folyamatok megismerésének. A láng minőségének, azaz a spektrumnak az elemzése az első spektroszkópos vizsgálatok között volt az egyszerű lángok megfigyelésére. Minden lángnak megvan a saját karakterisztikája a spektrumban [1]:

- az égő szén-monoxid kék lángja a zöld színtől az ultraibolyáig tartó tartományban többnyire folytonos spektrumot mutat, amire számtalan, önmagában alig észrevehető sáv szuperponálódik;
- a hidrogént tartalmazó lángok kevéssé fényesek a látható hullámhossz tartományban, viszont az ultraibolya tartományhoz közel egy sávban, körülbelül 306 nm-nél feltűnően erős kemilumineszcens emisszió tapasztalható;
- a Bunsen-típusú szénhidrogén lángok a mindenki által jól ismert zöld-kék belső kúppal rendelkeznek, mely a spektrumban a zöld, kék és ibolya tartományokban van jelen;
- a hideg éter lángok pedig kék színűek és viszonylag egyszerűen definiálható csoportot képeznek a kék és ibolya tartományokban.

A tüzelőanyag-levegő arány függvényében is meghatározhatók a jellemző színképek: a tüzelőanyagban gazdag szénhidrogén lángok a zöld szín tartományában erősebbek, míg a szegény keverékek színképe az ibolya tartományban kimagaslóbb. Ennélfogva, elegendő tapasztalattal, a lángok tisztán empirikus vizsgálata alapján felismerhetők a

különböző tüzelőanyagok és tüzelési paraméterek. Például a gázturbinák tüzelőterében a láng általában az égő szénmonoxid karakterisztikáját mutatja a spektrumban, viszont ha az égés nem tökéletes, megtalálható lehet a spektrumban az égő szénhidrogének karakterisztikája is, míg bizonyos esetben a tüzelőanyag utólagos befecskendezése a hideg lángokéhoz hasonló spektrumot mutat [1, 6].

Kutatásom során feltérképezem egy adott tüzelőanyag-porlasztó lehetséges módosításaikor kialakuló vertikális lángszerkezeteket. A vizsgált berendezés a tanszéki C-30-as mikro-gázturbina égője, az alkalmazott tüzelőanyag gázolaj volt. Korábbi kutatásaim során azonos alkotójú, különböző nyílásszögű diffúzorok hatását vizsgáltam a károsanyag kibocsátásra és az üzemi tartomány befolyásolására nézve [10-13]. A diffúzorok az említett égő szájára helyezve mintegy toldatként szolgálnak, az egyes konstrukciókat különböző porlasztónyomásokon és légfeleslegtényezőkkel vizsgáltam, azonos tüzelőanyag-tömegáram mellett. Az eredmények azt mutatták, hogy az üzemi tartományt az egyes toldatok akár 50 %-kal kiszélesíthetik. A szén-monoxid kibocsátás az érvényben lévő rendelet szerint sok esetben jóval meghaladja a határértéket, viszont adódik olyan konstrukció, amelynél kedvező a szén-monoxid kibocsátás és az üzemi tartomány is szélesebb, mint az eredeti égőkialakítás esetében. Jelen munkám során is a korábbi beállítások mellett végeztem a méréseket. A dolgozatom célja egyrészt, hogy a már megismert karakterisztikák mellet új szemszögből vizsgáljam az égést a megfelelő beállítások mellett, kibővítve ezzel a korábban kapott képet. Másrészt, hogy a lángok feltérképezése útján egy olyan szenzor pozíciót lehessen meghatározni, amellyel a változtatott paraméterektől függetlenül következtetni lehet a légfelesleg-tényezőre.

2. STACIONÁRIUS TÜZELÉS

A stacionárius tüzeléssel kapcsolatos problémák nem csak a dolgozatban is vizsgált gázturbina alkatrészekre, illetve égőterekre terjednek ki, hanem valós kihívást jelentenek például a kemencék, kazánok, olvasztók és hasonló tüzelőberendezések fejlesztésében. Így a jelen kutatás eredményei a műszaki világ tüzeléstechnikával foglalkozó széles területén jelenthetnek előrelépést a tüzelőberendezések folyamatos optimalizálásban.

A legtöbb égő szabályozása – az égés fenntartásához feltétlenül szükséges szabályozó rendszereken kívül – a füstgáz elemzésén alapul, ami elegendő a kívánt légfelesleg és károsanyag kibocsátás mértékének meghatározásához. Mindazonáltal a gázelemző készülékek által nyújtott információ a tüzelési folyamatokról igen hiányos, és belátható, hogy az égők hatékony és biztonságos szabályozására önmagukban ezek a berendezések nem elegendők. Gyakorlatban az elsődleges akadály inkább a megbízható lángdiagnosztikai eszközök hiányából ered, mint az igen komplex többváltozós szabályozó algoritmusok szükségességéből – sok esetben a kívánt eredmény elérhető az égők beállításának optimalizálásával, mint például a légfelesleg állításával.

A károsanyag kibocsátásra vonatkozó szabályozásoknak köszönhetően manapság a legtöbb gázturbina tüzelőtér előkevert, tüzelőanyagban szegény módon üzemel, ami jelentősen csökkenti a nitrogén-oxidok keletkezését [14]. Ez a megoldás viszont bonyolult gyakorlati problémákat idéz elő. Egyrészt a CO és NOx kibocsátása az előkevert, szegény keverékkel üzemelő égőtereknél ellentétes tendenciát mutatnak. Tehát amíg az alacsony láng hőmérséklet kedvező az NOx csökkentés szempontjából, az egyidejűleg okozhatja a CO és a szénhidrogének tökéletlen oxidációját. Ennek következtében az égési folyamatnak, pontosan szabályozva, úgy kell lejátszódnia, hogy a károsanyag komponensek keletkezésének egy optimuma álljon be. Másrészt, mivel az előkeveréses gázturbina égőterek a keverék szegénységi határán üzemelnek, a gázturbina sokkal inkább hajlamos komolyabb incidensek produkálására, mint például a láng lefúvására, illetve különböző instabilitások produkálására és nyomáshullámok okozta visszaégésre.

Tüzelőtér tervezéskor az alapvető kihívások a következők:

- keverék könnyű begyújthatósága,
- széles üzemi tartomány,

- üzemanyag költségek minimalizálása,
- minimális károsanyag kibocsátás,

miközben adott befecskendezési helyről érkezik a tüzelőanyag a fix kialakítású égőtérbe. Mivel egyes követelmények ellentmondanak egymással, a végső eredmény elkerülhetetlenül kompromisszumokat igényel. Egy jó példa a konstrukciós ellentmondásra a károsanyag kibocsátás csökkentésére folyamatosan fennálló igény: a hagyományos égőterek esetében bármely módosítás, ami enyhíti a NO_X kibocsátást, az majdnem mindig a CO és UHC (elégetlen szénhidrogének, Unburned HydroCarbons) kibocsátás növekedését fogja eredményezni, és viszont. Tehát egy hőerőgép termikus hatásfokának javítása nem merül ki az üzemeltetési költségek csökkentésében, a károsanyag kibocsátás csökkentése is hasonló jelentőséggel bír.

A tüzelés során fellépő instabilitások határt szabnak az alacsony károsanyag kibocsátású, szegény keverékkel üzemelő előkeveréses tüzelőberendezések fejlesztésének. Hagyományosan az erőművi- és sugárhajtóműként való alkalmazásban is a gázturbinák égőterében diffúz lánggal történt a tüzelés a megbízható üzemeltethetőségnek köszönhetően. Azonban az ilyen típusú égőterek általában elfogadhatatlanul nagy mennyiségben bocsátanak ki nitrogén-oxidokat és kormot egyaránt. A károsanyag kibocsátásra vonatkozó egyre szigorúbb szabályozások a gázturbina fejlesztőket olyan berendezések tervezése felé terelik, hogy az új berendezések többféle szabályozást betartva legyenek képesek üzemelni. Napjaink a gázturbina tervezésének alapvető irányai a következők [15]:

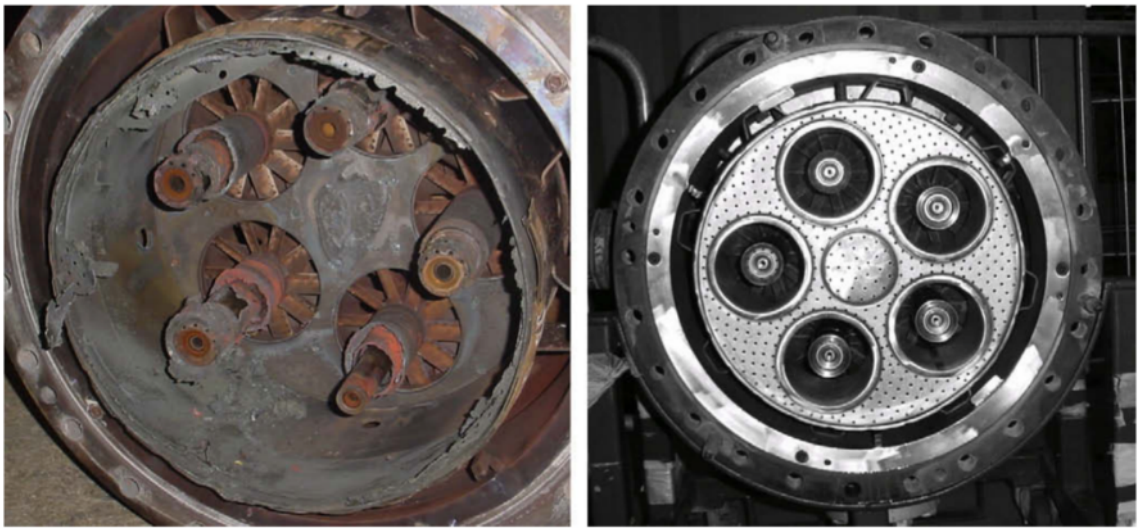
- szegény keverékkel üzemelő előkeveréses-, és folyékony tüzelőanyag esetén tüzelés előtti előpárologtatás alkalmazása;
- RQL (Rich-burn/Quick-quench/Lean-burn) égőterek alkalmazása, amelyekben zónás tüzelést valósítanak meg;
- katalitikus égőterek alkalmazása, amelyekben a beépített katalizátorágy hatására jelentősen redukálódhat a károsanyag kibocsátás.

Az RQL technológia elterjedését akadályozza a nagymértékű koromképződés, és a tüzelőanyagban még gazdag égéstermékek és a levegő nem túl jó keveredése. A katalitikus tüzelőberendezésekre nézve kihívást jelent a költséghatékonyság, a hosszú élettartam és a biztonságos alkalmazás lehetővé tétele, ez a technológia még napjainkban

is fejlesztés alatt áll. Így a szegény keverékkel üzemelő előkeveréses-, előpárologtatós (LPP, Lean Pre-mixed Prevaporised) tüzelés dominál manapság.

3. LPP ÉGŐTEREK KIHÍVÁSAI

Az LPP égőterekben a tüzelés nagy légfelesleggel történik a lánghőmérséklet csökkentése érdekében, tehát a termikus NO_X képződés visszaszorul, bár így is ez a domináns keletkezési mechanizmus. A szegény keverékkel való üzem nem megfelelő szabályozás esetén könnyen vezethet égési instabilitásokhoz. Ezeknek egyik okozója az áramlás változó mértékű oszcillációja, ami egy olyan általános probléma, amely nagyban megnehezíti az LPP égőterek fejlesztését. Az áramlás okozta oszcillációk amplitúdója elérheti azt az értéket, amely már túlzott szerkezeti vibrációhoz és hőveszteséghez vezet. A *3.1. ábrán* egy, az égési oszcillációk károsította égőszerkezet és annak sértetlen változata látható.



3.1. ábra. Tüzelési oszcillációk okozta égőszerkezet károsodása (balra) és a sértetlen égőszerkezet (jobbra) [15].

Az égési oszcillációk nem csak a gázturbina égőterekben okozhatnak kárt, gyakorlatilag az összes sugárhajtómű és ipari méretű kazán fejlesztése során megfigyelhető, általános probléma. A jelenség definiálható egy dinamikus rendszerben való változó mozgásként, ahol a rendszer nagymértékű oszcillációk fenntartására képes széles frekvencia tartományon üzemel.

Mivel az LPP égőterek a láng kialvásának feltételeit megközelítő szegény keverékkel üzemelnek, a légfelesleg-tényező kismértékű ingadozása jelentős változást okozhat a

hőfelszabadulásban. Ez hogyha fázisban van az égőtérbeli akusztikai módussal, akkor az égési oszcillációkkal öngerjesztett rezgést eredményez, ami a berendezés károsodásához vezet. A konvencionális diffúziós lánggal üzemelő tűzterekkel ellentétben az LPP tűzterekben bizonyos mennyiségű hígító- vagy filmhűtésre alkalmazott levegő van bevezetve az égőtér fala mellett. Az égőtér hűtőrendszere általánosságban úgy viselkedik, mint egy hatékony akusztikai csillapító, amely képes elnyomni a tüzelési oszcillációkkal fázisban lévő komponenseket. Az előkeveréses égőterekben – kiváltképp az erőművi gázturbinák égőterében – a láng hossza relatíve kicsi a longitudinális akusztikai hullámhosszokhoz képest, és tipikusan az akusztikai nyomáshullámok szélsőértékeinél helyezkedik el. Egy akusztikailag kompakt kialakítás megkönnyíti az oszcilláló hőfelszabadulás és az áramlás közti interakciót. E mellet, mivel a láng rögzítve van az aerodinamikailag indukált recirkuláló áramlással, az erős áramlásbeli oszcillációk visszaáramlást vagy akár visszaégést okozhatnak, visszavezetve a lángot az üzemanyag fúvókák felé [15]. A recirkuláció kialakulásáról az *4.4. ábrán* látható egy példa, illetve a *4. fejezetben* kerül részletesebben bemutatásra.

Attól függetlenül, hogy az alkalmazott tüzelőanyag folyékony vagy gáznemű, annak befecskendezése, és az égéslevegővel és égéstermékekkel való elegyítése kritikus feladat a mai követelmények szerinti jó hatásfokú, alacsony károsanyag kibocsátású tüzelés elérésének szempontjából. A gáznemű tüzelőanyagok esetében a legfontosabb vonatkozás a megfelelő szintű keverékképzés fenntartása. Amikor folyékony tüzelőanyagot alkalmazunk, a tüzelési zónába való belépés előtt a tüzelőanyagot minél kisebb cseppekre kell bontani és optimális arányban elkeverni az égéslevegővel. Tehát a porlasztó egy igen érzékeny része a rendszernek, mivel ennek a berendezésnek a feladata a megfelelő minőségű égőképes keverék előállítása, illetve képes befolyásolni az áramlási teret és a tüzelési folyamatokat az égőtérben.

3.1. Tüzelési instabilitások

Áramlási oszcilláció mindig jelen van a tüzelőberendezésekben, még stabil üzem közben is. A kis amplitúdójú nyomáslengések (tűztértől függően például ez jelentheti, hogy kisebb, mint az átlagos tűztérnyomás 5%-a [15]) lépnek fel a tűztérben, akkor stabil üzemről beszélünk. Tüzelési instabilitásról akkor van szó, ha nagy amplitúdójú periodikus nyomáslengések alakulnak ki a tűztérben. Tehát az instabil tüzelést

meghatározott frekvenciákon történő nagy amplitúdójú áramlási oszcillációk jellemzik, míg a stabil tüzelés közben többnyire csak a turbulens áramlás zaját halljuk, aminek a spektruma egyenletes, domináns frekvenciáktól mentes. Bizonyos körülmények között, a stabil üzemállapot megkülönbözhető az instabil állapottól a nyomásingadozásokon kívül a láng helye és alakja alapján is.

A tüzelési instabilitások spontán módon is gerjedhetnek a rendszerben, vagy pedig mesterséges, illetve természetes külső zavarás is lehet az instabilitás létrejöttének kiváltó oka.

3.2. Tüzelési instabilitásokat okozó főbb mechanizmusok

Az egyik fő energiaforrás az áramlási oszcillációk meghatározásában a kémiai reakciókból eredő hőfelszabadulás. Az ilyen nem állandósult jelenségek fenntartásához viszont rendkívül kis mennyiségű hőfelszabadulásra van csak szükség. Az instabilitások többnyire nem tartanak hosszú ideig, hacsak bizonyos dinamikus kapcsolatok nem jönnek létre az ingadozó hőfelszabadulás és az akusztikai nyomáslengések között. Ezek a Rayleigh-kritériummal írhatók le, amely kimondja, hogy ha a hőfelszabadulás növekszik amikor a nyomásoszcilláció a maximum közelében van, akkor a nyomásingadozás amplitúdója nőni fog. Ha viszont akkor lép fel hőfelszabadulás, amikor a nyomásoszcilláció a minimum pont közelében van, akkor az gyengíteni fogja a nyomásingadozás mértékét [15].

3.2.1. LÁNGFELÜLET VÁLTOZÁSA

Gáznemű tüzelőanyagból táplált előkevert lángok esetén a térfogategységre eső hőfelszabadulás a *3.1. képlet* szerint fejezhető ki [15].

$$Q = q \cdot \rho \cdot w_l \cdot A \,, \qquad (3.1.)$$

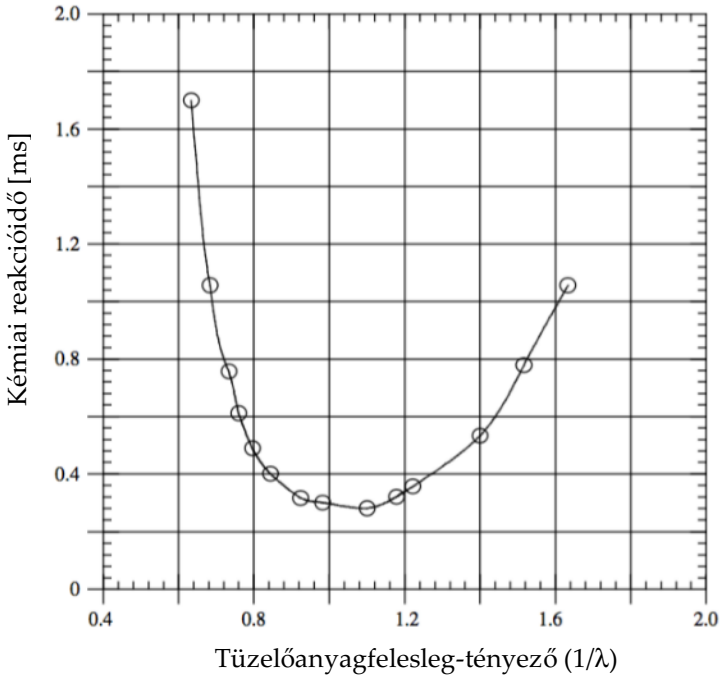
ahol q a felszabaduló hőmennyiség egységnyi tömegre vonatkoztatva, ρ az elégetlen gáz sűrűsége, w_l a lángterjedési sebesség és A a lángfelület nagysága egységnyi térfogatra vonatkoztatva. Feltételezhetjük, hogy a lángfelület kivételével a többi tényező konstans, így a hőfelszabadulás mértékének ingadozása arányos a lángfelület változásával.

Rendszerint ez az ideális állapot nem létezik a gyakorlatban megfigyelhető lángoknál. Az áramlási körülményektől függően a lamináris láng instabillá válhat. Ekkor a lángfront

fodrozódni kezd, ami megnövekedett lángfelületet jelent, és turbulens láng kialakulásához vezethet. Turbulens áramlás esetén problémákat vet fel, hogy a lángfelület fodrozódása széles határok között módosíthatja a felület nagyságát. A fodrozódás – okozzák azt kisméretű örvények vagy nagyobb összefüggő szerkezetek – jelentősen megváltoztathatja az egész lángfelületet és ezáltal a létrejöhető reakciók arányát, sebességét.

3.2.2. LÉGFELESLEG-TÉNYEZŐ VÁLTOZÁSA

A légfelesleg-tényező ingadozása az egyik legjelentősebb forrása a hőfelszabadulás ingadozásának, kiváltképp szegény keverékkel való üzemelés során. A szegény, előkevert módon való tüzelés instabilitásra való hajlamára a légfelesleg-tényező és a kémiai reakcióidő közti összefüggés adhat magyarázatot. A *3.2. ábra* szerint a sztöchiometrikus állapotot elhagyva kémiai reakcióidő a légfelesleg-tényező reciprokának függvényében jelentősen megnő ahogy a láng egyre szegényebb lesz.



3.2. ábra. Kémiai reakcióidő alakulása a tüzelőanyagfelesleg-tényező függvényében [15].

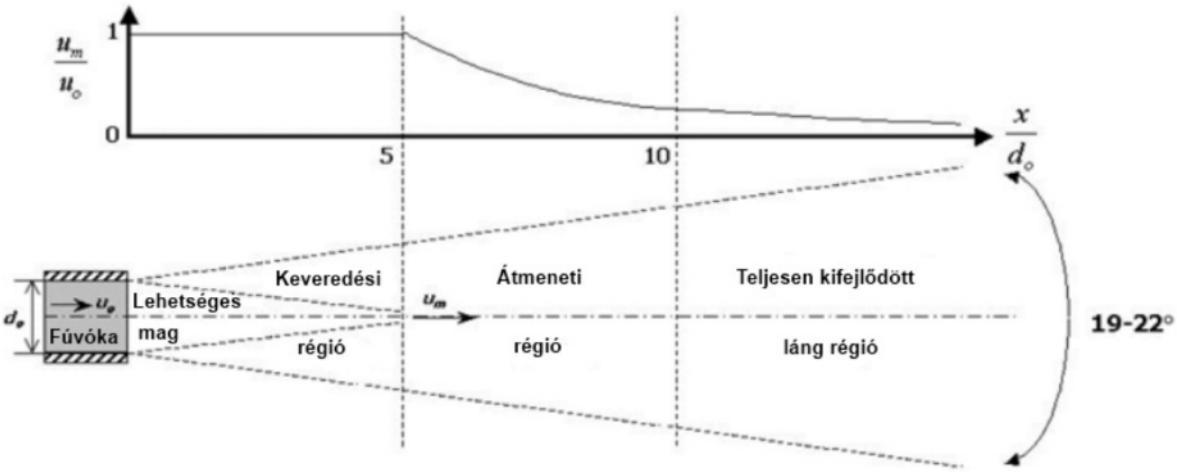
Mivel a kémiai reakcióidő fordítottan arányos a reakciók számával, szegény körülmények között a légfelesleg-tényező kismértékű változása is nagy ingadozásokat

okozhat a reakciók mennyiségében. Így a változó mennyiségű kémiai reakciókból származó hőfelszabadulás majd összekapcsolódik a tüzelési rendszer akusztikájával, ami által a nyomás-oszcillációk amplitúdója erősödni fog.

A légfelesleg-tényező ingadozása eredhet a tüzelőanyag és levegő rossz keveredéséből, vagy azok tömegáramának ingadozásából a befecskendezési pontban. Az előbbit eredményezheti a megfelelő keverékképzéshez korlátozottan rendelkezésre álló hely és idő. A nem tökéletes keveredés ugyancsak elősegíti az instabil tüzelés létrejötté, így a lángot tápláló tüzelőanyag – levegő keverék minőségére úgy tekintünk, mit a tüzelési instabilitások okozójának eredőjére.

3.3. Előperdítéses égő áramlási viszonyai

Ha egy turbulens láng áramlik a szabad térbe, a *3.3. ábrán* látható jelenség játszódik le.

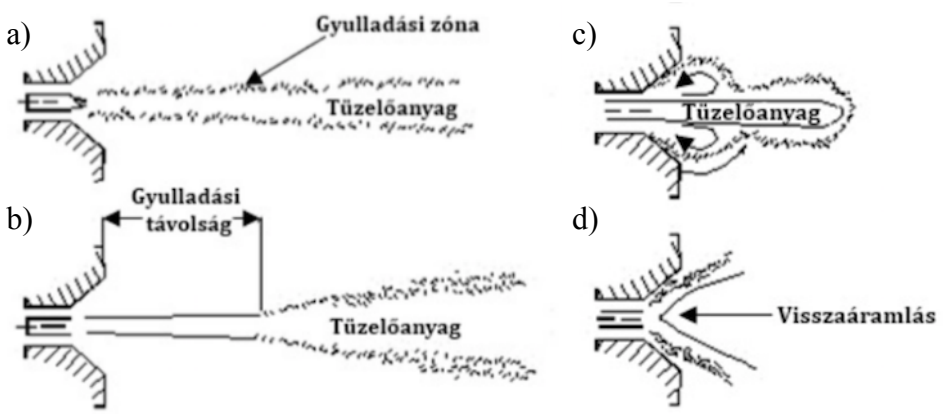


3.3. ábra. Szabadsugár áramlás [16].

A fúvóka d_0 átmérőjű kilépő keresztmetszetében a sebesség a határrétegtől eltekintve állandó, u_0 sebességű. A fúvókából kilépő légsugár kölcsönhatásba lép a közepén áramló tüzelőanyag-sugárral, a kerülete mentén pedig érintkezik és kölcsönhatásba lép a környezetében lévő álló levegővel. Így a környező levegő egyre nagyobb részét mozdítja meg, ragadja magával, ami miatt a környező levegő fékező hatással lesz a sugárra. A sugár u_0 sebességgel jellemzett átmérője a távolsággal közel arányosan csökken és

körülbelül $5d_0$ távolságban már csak a tengelyben egyezik meg a sebesség a kifúvási sebességgel. Eddig tart a szabadsugár kezdeti szakasza. Ezt egy lassuló szakasz követi, mivel itt az áramlási sebességek kisebbek az u_0 sebességnél és a sugár hossza mentén csökkennek. A sugárba bekeveredő környezeti levegő folyamatosan áramlik a sugár irányába, közel merőlegesen a sugár tengelyére. A sugár határát azok a pontok határozzák meg, ahol a levegő sebességének tengely irányú komponense éppen különbözik zérustól. A tapasztalatok szerint ezek a pontok közelítően egy kúpfelületen helyezkednek el, melynek kúpszöge a 19-22° körüli érték a turbulencia fok függvényében [16]. A *3.3. ábra* diagramján a sugár egy adott keresztmetszetében mért u_m maximális sebesség és a kifúvási sebesség arányának változása látható a fúvóka átmérővel dimenziótlanított kifúvástól mért távolság függvényében. A kezdeti szakaszon a két sebesség megegyezik egymással, majd a dimenziótlan értékük hiperbola szerint csökken.

Turbulens áramlási viszonyok között a beérkező levegő sebessége jóval nagyobb, mint a lamináris lángterjedési sebesség. A turbulencia okozta örvények hatására a lamináris lángfront eltorzul, nagyobb felületet biztosítva a kémiai reakcióknak. Ez esetben az átlag áramlási sebesség jóval nagyobb is lehet a lamináris lángterjedési sebességnél, viszont a lángfront sebessége ennek ellenére egyensúlyt képes tartani vele. Egy példa a lángok csoportosítására a *3.4. ábrán* látható.



3.4. ábra. Lángok csoportosítása [16].

Az *a)* láng az égőszájhoz kapcsolódik, perdület mentes, hosszú, és erősen világító stabil láng. A *b)* láng szintén perdület mentes, viszont a nagy áramlási sebesség már majdnem kioltja a lángot, tehát ez a láng nem stabil. A *c)* láng mérsékelt perdülettel rendelkezik, így itt megkezdődik az elsődleges recirkuláció, azaz az égés tengelyében

visszaáramlik az égéstermék. Eleinte a keverékáram még elég erős ahhoz, hogy áttörjön ezen a recirkulációs zónán, így egy toroid alakú zóna jön létre. A recirkulációs zónák kialakulása a *4. fejezetben* kerül részletezésre. Összességében tehát a láng kiszélesül és lerövidül. Ez a láng széles recirkulációs tartományban stabil. A *d)* láng nagy perdülettel rendelkezik, az elsődleges recirkuláció legyőzi a keverékáramot és megosztja a lángot, így a középvonalban alakul ki a visszaáramlási zóna. Ez a lángtípus szélesebb stabilitási tartománnyal rendelkezik, mint a korábban bemutatottak.

4. LEHETŐSÉGEK A TŰZTÉRBEN FELLÉPŐ INSTABILITÁSOK CSÖKKENTÉSÉRE

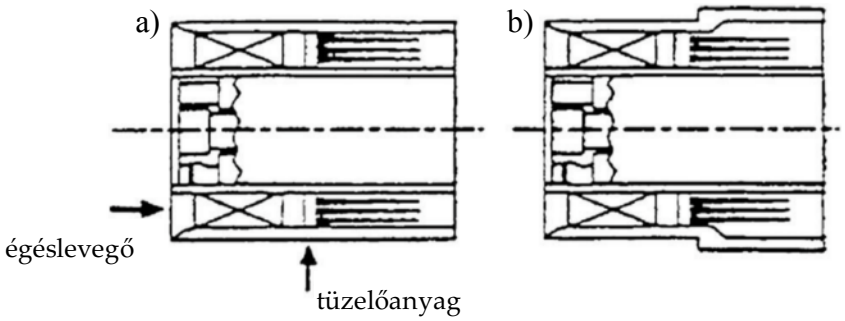
A tüzelési instabilitások kiiktatásához az akusztikai hullámok és a változó hőfelszabadulás közötti kapcsolatot meg kell szüntetni [15]. Kétféle módszer ismert az instabilitások csökkentésére: a passzív vagy aktív szabályzási technika alkalmazása.

4.1.1. PASSZÍV SZABÁLYZÁS

A passzív szabályzás magába foglalhatja:

- a tüzelőanyag váltást;
- a rendszer kialakításának, úgy mint a befecskendező rendszer vagy az égőtér geometria újra tervezését;
- az akusztikai csillapítók beépítését.

A befecskendező geometriájának módosítására, mint passzív szabályzásra látható egy példa a *4.1. ábrán*. A befecskendező részei, mint például a keverőcső belső átmérője, jelentős hatással van a tüzelés dinamikájára, befolyásolva a befecskendezőből való kilépési sebességet, vagy pedig a tüzelőanyag – levegő előkevertségének mértékét.

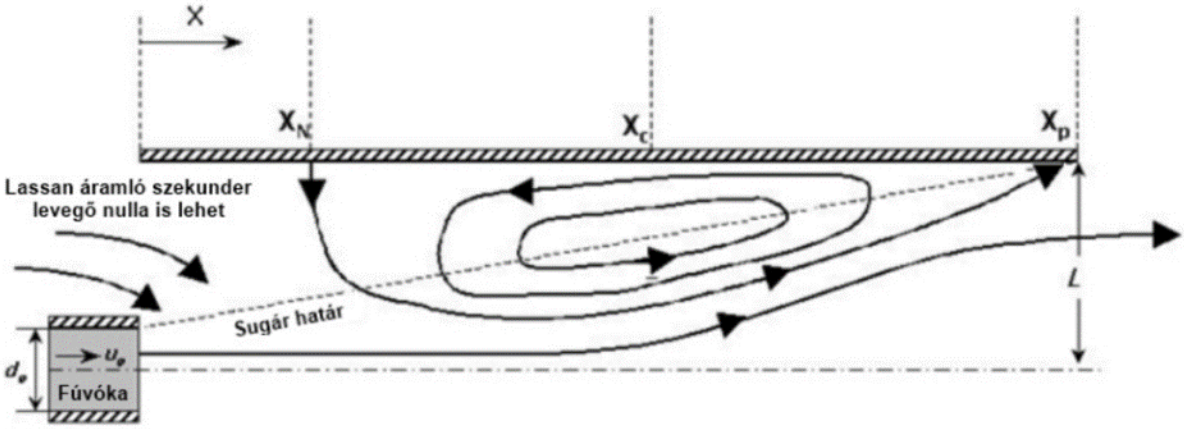


4.1. ábra. Befecskendező kialakítások [15].

A két befecskendező közötti különbség, hogy a *4.1.b) ábrán* az előkeverő csatorna keresztmetszete meg van növelve a *4.1.a) ábrán* láthatóéhoz képest. A változtatás jelentős hatással van a tüzelőanyag – levegő keverék tartózkodási idejére, mivel a befecskendezőből kilépő axiális sebesség lecsökken, és ezáltal stabilizálódhatnak az oszcillációk az égőtérben.

Megfelelő geometriai módosítás lehet még például a kisméretű örvénykeltők beépítése a tűztérbe, vagy az elliptikus égőkialakítás, mely feladata, hogy axiális örvények keltésével elősegítse a keveredést [15].

A tüzelés során felszabaduló kémiai energia mennyisége nagyságrendekkel nagyobb, mint az áramló közeg kinetikus energiája. Ez azt jelenti, hogy megfelelő áramlási mező kialakítására van szükség, amely a tüzelőanyag – levegő keveréket képes folyamatosan a lángfronthoz juttatni. A gázturbinákban túlnyomó részt perdületes égőket alkalmaznak, amely a *4.4. ábrán* is jól megfigyelhető, belső toroid alakú recirkulációt létrehozva domináns a lángot stabilizáló mechanizmusban [8]. Az égőtestet vizsgálva az látható, hogy a gyakorlatban a csőfal fontos szerepet játszik a lángstabilizálásban, úgy viselkedik, mint egy hőnyelő, elfojtva ezzel a reakciót. Amikor az áramlási sebesség meghaladja a lángsebességet, a láng elkezd elemelkedni a cső végén, így a hőveszteség a csőfalon csökken, a lánghőmérséklet nő, ezért a lángterjedési sebesség is nő, és a láng új helyzetben stabilizálódik a cső nyitott szája irányában. Az áramlási sebesség további növelése lefújja a lángot. A fal a sugár túl gyors szétterjedését is akadályozza. A fal mentén az égési gázok visszaáramlanak az égéstérbe, ami kedvez a lángstabilitásnak, ez a másodlagos recirkuláció. A *4.2. ábrán* megfigyelhető az elsődleges és másodlagos recirkuláció kialakulása is. A sugár szabad sugárként x_P távolságban ütközik a falnak, a recirkuláció középpontja x_C távolságban félúton helyezkedik el x_N (ahol a keveredés 0) és x_P távolság között.

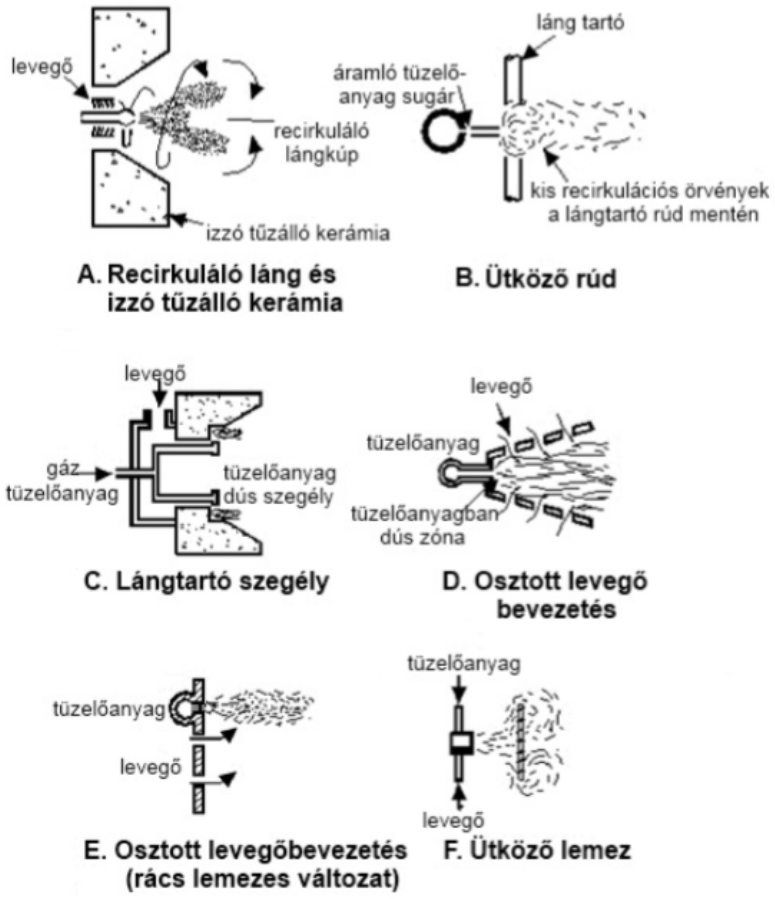


4.2. ábra. Másodlagos recirkuláció zárt sugárban [16].

A fúvókából való kiáramlás során gyors expanzió megy végbe, örvények jelennek meg és kialakul egy recirkulációs zóna. A visszaáramlás során a forró égéstermékek

visszajutnak a fúvóka szájához elősegítve a láng lokális gyújtását és ezzel szélesítve a láng stabilitási tartományát [6]. A fúvókából kiáramló közeg és a recirkulációs zóna között létrejövő nyíró rétegben keverednek egymással a friss- és forró gázok.

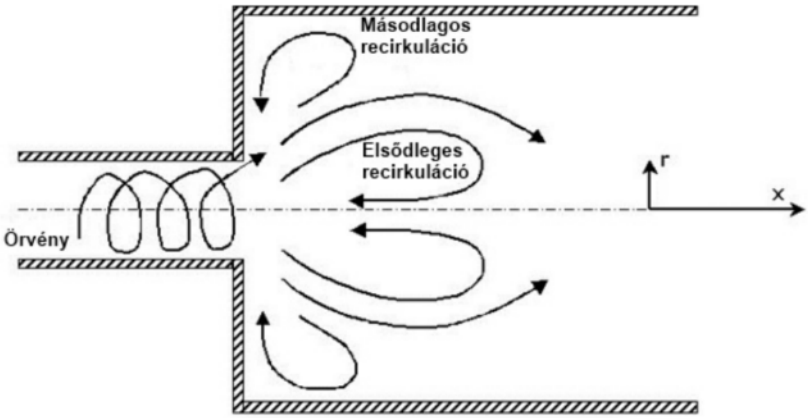
Közvetlen az égőszájnál a láng stabilizálására alkalmazható néhány elemet mutat be a *4.3. ábra.* Például ha egy áramló közeg útjába torlasztó testet helyezünk, a közeg megkerüli azt, és mögötte alacsony nyomású tér lakul ki. Tehát a test mögött leválási buborék keletkezik, amiben létrejön egy recirkulációs zóna, melyet a *4.3.F ábra* szemléltet. Így ha a láng nekiütközik egy csőnek vagy tárcsának, annak hatására tüzelőanyagban és levegőben gazdag örvények keletkeznek. Ezek egy része az áramba sodródik, ahol egyik része gyújtóforrásként szolgál, másik része pedig a torlóelem felszínén marad és újraképződik, amivel folyamatos szabályozást biztosít.



4.3. ábra. Lángstabilizálást segítő módszerek [16].

Ha a *4.3.A ábra* szerint diffúzort helyezünk az égőszájra, akkor a diffúzor felmelegszik, illetve a láng körül létrejön egy recirkulációs zóna. A *4.4. ábrán* a Borda-Carnot elemben történő recirkuláció szerint, ha a másodlagos recirkuláció kialakulásához vezető hirtelen

keresztmetszet-változást eltérő kúpszögű felületekkel közelítjük, akkor a másodlagos recirkuláció ennek függvényében változhat, azaz lehet meghatározható szerepű vagy akár ki sem alakulhat. Az utóbbi esetben a diffúzor fala helyettesítheti a recirkulációs zónát, így határréteg épül fel a diffúzor fala mellett. A megfelelő nyílásszögű diffúzor alkalmazásával recirkuláció és a hősugárzás széles tartományon stabilizálhatja a lángot. A *7.* és *8. fejezetben* bemutatásra kerülő mérések során alkalmazott diffúzoros kialakítású égőszájra helyezett toldatok révén kerül szemléltetésre a különböző nyílásszögű elemeknek a lángra gyakorolt hatása.

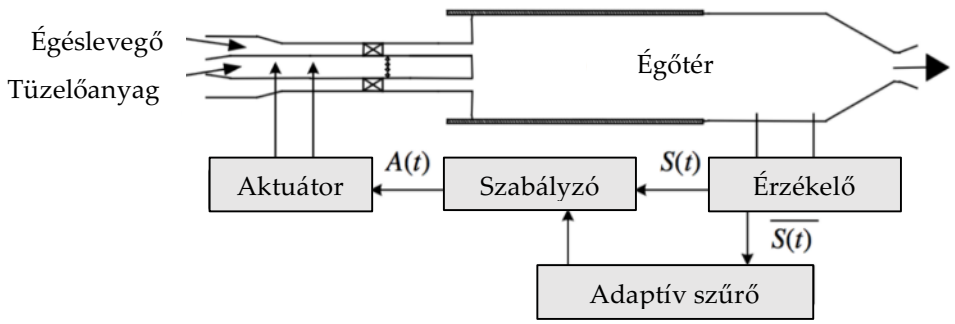


4.4. ábra. Belső (elsődleges) és külső (másodlagos) recirkuláció kialakulása [16].

4.1.2. AKTÍV SZABÁLYZÁS

Az aktív szabályzás külső energia alkalmazásával éri el a rendszer szabályzását. Ennél a módszernél az elsődleges cél a rendszer pillanatnyilag megkívánt és aktuális paraméterei közötti eltérés minimalizálása. Az aktív szabályzás jelentheti az instabilitások érzékelését, majd egy visszacsatoló szabályzókör alkalmazását egy, vagy akár több bemeneti paraméter módosítására. Ezzel tehát megszűntetheti a kapcsolatot a változó hőfelszabadulás és az akusztikai hullámok között. Az aktív tüzelés-szabályzás területe az instabilitások csökkentése mellett az állandósult állapotban történő megfelelő üzemelésért is felelős, így például a károsanyag kibocsátási határértékek betartásáért.

A *4.5. ábrán* egy sematikus vázlata látható az aktív tüzelés szabályzó rendszernek, amely tartalmazhat különféle szenzorokat, aktuátorokat és vezérlőket.



4.5. ábra. Aktív tüzelés-szabályozás sematikus vázlata [15].

Aktív szabályzás alkalmazása vonzó lehet, hiszen a tüzelési rendszer paramétereinek megfelelő modulációján alapul, míg a passzív szabályzás az áramlást kell hogy megváltoztassa. Meglévő rendszerhez egy szabályzókör hozzáépítése jóval egyszerűbb és praktikusabb, mint egy geometriai módosítás megvalósítása, így az aktív szabályzás rugalmas alkalmazkodást és a költséges konstrukciós módosítások elkerülését teszi lehetővé.

Az aktív szabályzó rendszerek gyakorlati alkalmazása megköveteli a megbízható szenzorokat és a megfelelő válaszidővel rendelkező aktuátorokat. Az érzékelő feladata gyorsan és pontosan szolgáltatni az információt az instabilitásokat okozó dinamikusan változó mennyiségekről. A legelterjedtebben használt érzékelők a nyomás távadók, mivel az instabilitások könnyen leírhatók a nyomás lengések alapján [15].

Az aktív szabályzórendszer részeit képezhetik az optikai lángdiagnosztikai céllal is alkalmazható, az *5. fejezetben* bemutatott berendezések. A passzív és aktív szabályzások alkalmazása természetesen nem zárja ki egymást, a gyakorlatban többnyire mindkét típusú szabályzás egyszerre segíti a stabil tüzelés fenntartását.

5. OPTIKAI LÁNGDIAGNOSZTIKA

A károsanyag kibocsátási határértékek betartása kivétel nélkül kötelező, a kibocsátott mennyiséget pedig leginkább a helyi légfelesleg-tényező befolyásolja. A légfelesleg-tényező változtatása – optimális esetben – széles határok között lehetséges a tüzelőberendezés működtethetőségére nézve. Ez azt jelenti, hogy a hatékony, megfelelő szabályozás érdekében valósidejű lángfigyeléssel és gyors szabályozási képességgel rendelkező berendezésre van szükségünk. A légfelesleg precíz szabályozása segít megakadályozni a komoly balesetek előfordulását is, mint például a nyomáshullámok okozta visszaégést, láng lefúvást, vagy pedig az égőtér sérülést [17]. A mintavételezésen alapuló mérések égőterekben kevésbé alkalmazhatóak, mivel megzavarják az áramlást és megváltoztathatják a stabilitás és a lejátszódó reakciók feltételeit lokálisan, de akár globálisan is. Turbulens áramlásról optikai méréstechnika alkalmazásával kaphatunk megbízható információt [7].

Az infravörös abszorpció alkalmazható a lánghőmérséklet és a lángösszetevők koncentrációjának mérésére. A lézer-abszorpció elvén működő berendezésekkel nagy idő- és térbeli felbontással mérhető akár egy időben több jellemző. Egy ilyen műszer a Fázis Doppler Anemométer, amely egyedi gömbszimmetrikus részecskék méretének és sebességének folyamatos mérésére hivatott [18]. Ezen berendezéseket lassú válaszidejük miatt viszont az égőtérbeli körülményeket figyelembe véve nem praktikus alkalmazni [8].

A hőmérséklet feltérképezésére a pirometriához érdemes fordulni, amely technológia a korom részecskék hősugárzásának mérésén alapul. Ez azt jelenti, hogy csak olyan lángok esetében használható, amilyenek például a régebbi kazánokban megtalálhatók, azonban a modern tüzelőberendezések kevésbé világító lángú, szegény tüzelőanyag-levegő keverékkel üzemelnek, így itt ez a technológia nem alkalmazható. Költség hatékony megoldás lehet, alkalmas szűrőket használva, a kemilumineszcens jelek regisztrálása. A fényérzékelő szenzorok megfelelő szűrőkkel alkalmazva képesek mérni a láng kemilumineszcens emisszióját, melyet különböző kibocsátó gyökök eredményeznek a reakciózónában. A mért jelek hozzávetőleges információt adhatnak a változó hőfelszabadulásról, ami a tüzelési instabilitások létrejöttéhez szolgáltat energiaforrást. Mindazonáltal ez a technológia nem működőképes azon a tartományon, ahol a pirometria jól alkalmazható. Ha a lángban korom, vagy más szélessávú zavarás

van jelen, akkor az erősen korlátozza a kemilumineszcencia jelenségén alapuló információnyerést [8].

5.1. Kemilumineszcencia

Egyes kémiai reakciókban gerjesztett részecskék jönnek létre, melyek egy része, az egyensúlyi állapotukba kerülésük során, fotont bocsát ki, ez a kemilumineszcencia. A gerjesztés során az elektron egy vagy több pályával feljebb kerül, mint ahol stabil. Amikor visszaugrik a stabil állapotba, akkor az alacsonyabb és a magasabb energiaállapot közti különbséget a fotonban érjük nyomon. Minél nagyobb energiaveszteséggel jár számára ez az ugrás, annál kisebb a foton hullámhossza. A jelenség az ultraibolya tartománytól az infravörös tartományig figyelhető meg, és a reakciólépcsők az alábbiak [5]:

1. két kiinduló részecskéből gerjesztett részecske jön létre: $A + B \rightarrow R^* + egyéb$, ahol R a „radical" kifejezésre utal, azaz gyök, tehát nem stabil állapotú anyag. A gerjesztett állapot miatt annak fizikai tulajdonságai (például a fajhője és a viszkozitása) megváltoznak;
2. a gerjesztett részecske spontán vagy ütközés során leadja az energiatöbbletét egy foton kibocsátásával, a stabil állapota elérésének érdekében: $R^* + (M) \rightarrow R + (M) + hv$, ahol M egy tetszőleges anyag, lehet stabil molekula vagy gyök.

Az elektromágneses sugárzás hullámhossza az R gyöktől és az elektronátmenettől függ. Minden stabil részecske jellemezhető egy, vagy több emisszió görbével, melyek karakterisztikus csoportokba rendezhetők, így a különféle emittáló részecskék együttes jellemzői képezik a kemilumineszcencia színképét a lángokban. A kemilumineszcencia általi fő kibocsátók szénhidrogén lángokban az OH*, CH*, C_2* és CO_2*. A keletkezésüket leíró reakcióegyenletek és a hullámhossz maximumok az *5.1 táblázatban* láthatók.

Gyök	Reakció		Hullámhossz [nm]
OH*	R1:	$CH + O_2 \rightarrow CO + OH^*$	282.9, 308.9
	R2:	$H + O + M \rightarrow OH^* + M$	
	R3:	$OH + OH + H \rightarrow OH^* + H_2O$	
CH*	R4:	$C_2H + O_2 \rightarrow CO_2 + CH^*$	387.1, 431.4
	R5:	$C_2H + O \rightarrow CO + CH^*$	
C_2*	R6:	$CH_2 + C \rightarrow C_2^* + H_2$	513, 516.5
CO_2*	R7:	$CO + O + M \rightarrow CO_2^* + M$	350-600

5.1. táblázat. A gerjesztett részecskék reakcióegyenletei és hullámhossz maximumai [19].

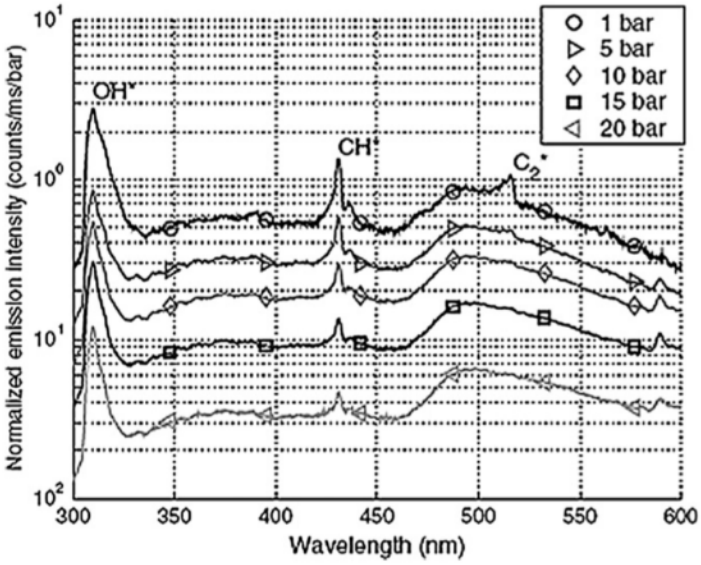
5.1.1. A KEMILUMINESZCENS EMISSZIÓ ÉSZLELÉSE

Az OH* gyökök ultraibolya sugárzást bocsátanak ki, főleg szénhidrogén lángokban keletkeznek (*R1*) és ritkábban hidrogén alapú lángokban (*R2* és *R3*). A CH* és C_2* gyökök színképe rendre kék és zöld. A CO_2* gyökök folytonos spektrummal jellemezhetők, a háttérsugárzásért nagy mértékben felelősek és a 350-600 nm hullámhossztartományban figyelhetők meg.

Az emissziós spektrumot számos változó befolyásolja, úgy mint a légfelesleg, a turbulencia, a tüzelőanyag tulajdonságai, vagy a nyomás. A légfelesleg hatását több tanulmányban is vizsgálták, melyekben a fő motiváció a láng-sztöchiometria optikai jelekből való megbecslése volt [3-5,15]. Bizonyos határig a tüzelőanyagban egyre szegényebb lángokban egyre magasabb az OH*, CH*, C_2* és CO_2* gyökök intenzitása. A szegény koncentrációhatárt közelítve a lánghőmérséklet nagymértékben csökken, és így az intenzitástól is ez várható. Az OH* és CH* gyökök kibocsátásának csúcsát $0{,}91 < \lambda < 1$-nél találták, a C_2*-nek köszönhető maximális emissziót $0{,}83 < \lambda < 0{,}91$-nél figyelték meg, bár ez a kibocsátás erősen függ a kísérlet körülményeitől: kisebb nyomáson és csökkenő légfeleslegnél tovább növekszik [19].

A nyomás szintén erősen befolyásolja az emissziós spektrum alakját. Figyelemre méltó a CH* és C_2* gyököknek köszönhető csúcsok csökkenő jelentősége. Ez a hatás a gyakorlatban igen fontos, mivel így a nagy nyomás alatt üzemelő égőterekben az

emissziós csúcsok diagnosztikára való használata mindig körülményesebb. Ez a jelenség jól megfigyelhető az *5.1. ábrán*. Az intenzitás logaritmikus skálán való ábrázolása mellett is már jól látszik, hogy a nyomás növekedésével a CH* és C_2* csúcsok egyre kevésbé láthatók a spektrumban, azonban az OH* továbbra is jól azonosítható marad.



5.1. ábra. Metán láng spektruma λ = 1 légfeleslegtényező értéknél [19].

A különböző összetételű lángok spektruma lényegesen eltérő, például ha adott mennyiségű tisztán földgáz tüzelőanyaghoz egyre több hidrogént keverünk, a CH* és C_2* csúcsok egyre jelentéktelenebbek lesznek. Szénhidrogén mentes lángokban, úgy mint tiszta hidrogén, vagy szintézis gáz lángokban, melyek fő összetevői a hidrogén és a szénmonoxid, ezek az intenzitáscsúcsok már nem láthatóak.

5.1.2. Intenzitásarányok alkalmazhatósága

A láng kemilumineszcens emissziójának megfigyelése széles körben elterjedt technológia a lángdiagnosztikában [3-5]. Főként az OH* és CH* gyökök kemilumineszcenciája, amit gyakran használnak az adott láng hőkibocsátásának mérésére. A tökéletesen előkevert lángok átfogó vizsgálatával már többen kimutatták, hogy az OH* és CH* gyökök kemilumineszcens intenzitása arányos a tüzelőanyag-levegő keverék tömegáramával, a légfeleslegtényezővel pedig exponenciális kapcsolatot mutat az *5.1. képlet* szerint [4]:

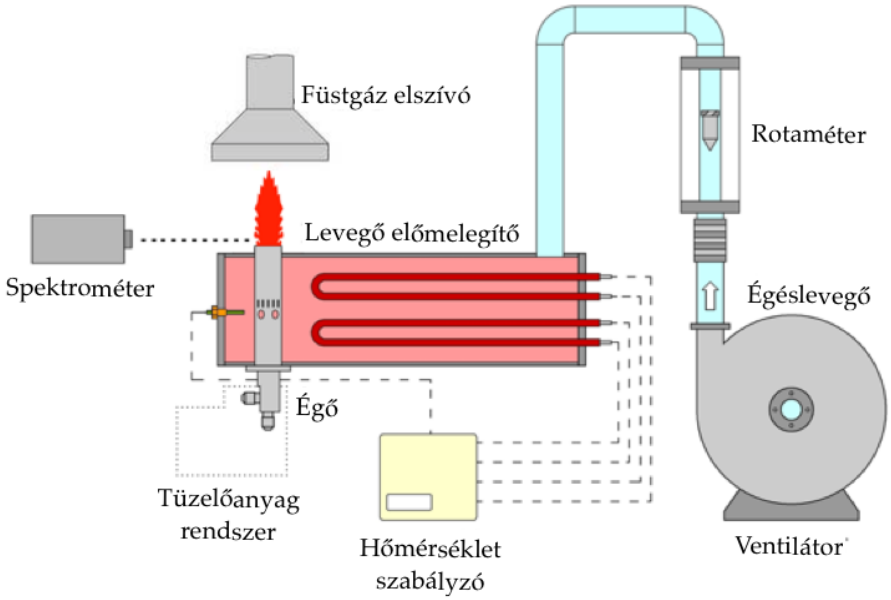
$$I = k \cdot m \cdot \lambda^{-\beta}, \qquad (5.1.)$$

ahol k és β a kémiai összetevőre vonatkozó konstansok, λ a légfeleslegtényező valamint m a tömegáram. Így az említett két gyök intenzitásarányát véve, mivel ugyanazon tüzelőanyagban fellépő intenzitásokat hasonlítunk össze, a kémiai összetevőre vonatkozó konstansok kiesnek. Konstans tömegáramot feltételezve, ez azt jelenti, hogy az OH* és CH* gyökök intenzitásának aránya csak a légfelesleg-tényező függvénye, azaz mérésükkel következtethetünk a légfeleslegre.

Napjaink meghatározó kutatásai az optikai módszerekkel való valósidejű lángfigyelésre a láng emissziós spektrometriára fókuszálnak [8, 16]. Ezek az alacsony karbantartási költségű, megbízható berendezések képesek a lokális légfelesleg-tényező megállapítására a gerjesztett gyökök kemilumineszcens emissziója alapján. Többnyire a CH*/OH* intenzitásarányokat használják erre, mivel ez exponenciálisan függ a légfelesleg-tényezőtől és az üzemi nyomástól is, a tömegáram pedig arányos vele [3-5]. Korábbi kutatásaim során a különböző égőszáj kialakítások esetében mért intenzitásarányok nem mindig mutattak egyértékű függést a légfelesleg-tényezőtől. Ezek az eredmények a *7. fejezetben* kerülnek ismertetésre.

6. A MÉRŐRENDSZER BEMUTATÁSA

A *6.1. ábrán* látható tesztpad környezeti nyomáson üzemel, a magasabb üzemi nyomás helyett. Mivel az égés nyomásának növekedésével jellemzően a lángstabilitás is nő, a mért eredmények szűkebb stabilitási tartományt mutatnak, így a gázturbinás alkalmazás során biztos, hogy a megállapított üzemi tartomány jól alkalmazható lesz valós körülmények között is [9].



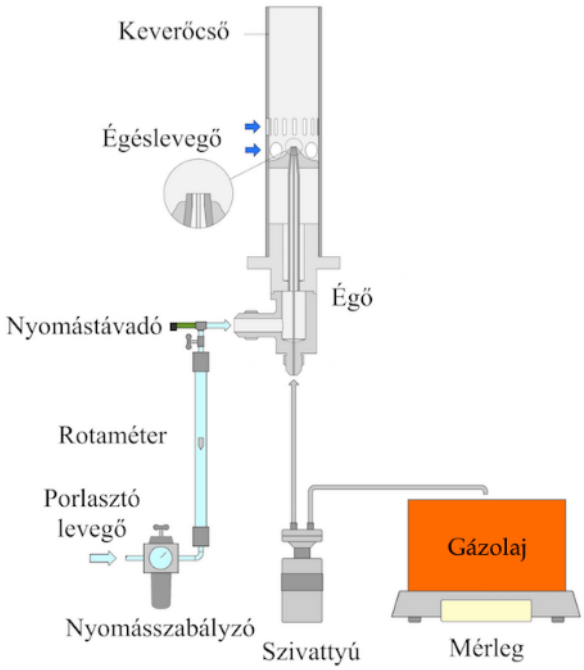
6.1. ábra. Égéslevegő rendszer [21].

A szükséges légmennyiség szállítására egy ventilátor szolgál, a szállított levegő térfogatárama egy rotaméterről olvasható le. A különböző térfogatáramok beállítását egy frekvenciaváltó teszi lehetővé. A levegő előmelegítése egy szabályozható előmelegítő segítségével valósul meg, amely 400°C-ra emeli a levegő hőmérsékletét mielőtt az belép az égőbe.

A mérés során használt spektrométer az OpLab Kft. terméke. A fixen elhelyezett, 20 mm átmérőjű kvarc objektív fókusztávolsága 0,5 m, látószöge ebben a távolságban 5 mm. A vizsgált lángtérfogat alsó határa 2 mm-re van az égő szájától minden esetben, mivel ebben a pozícióban mérhető a maximális intenzitás. Az eszköz egy 1024 pixel felbontású n-csatornás fém-oxid félvezető (nMOS) fénydetektorral rendelkezik [22]. A spektrométer integrálási ideje 100 ms-ra volt állítva. A mintavételezés ideje 6,4 s minden beállításnál.

Az eszköz vertikális irányban történő mozgatása, így a mérési pontok beállítása manuálisan történt.

A mérőberendezés tüzelőanyag rendszer része a 6.*2. ábrán* látható.



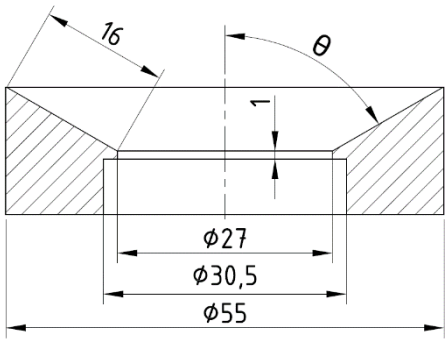
6.2. ábra: Tüzelőanyag rendszer [21].

A C-30-as mikro-gázturbinában használttal megegyező, LPP rendszerű égőt alkalmaztuk a méréseinkhez. A porlasztást egy egyszerű sugaras levegő segédközeges porlasztó valósítja meg, azaz a központi tüzelőanyag vezetékkel párhuzamosan, gyűrű keresztmetszetben lép ki a nagysebességű porlasztólevegő. A két közeg sebességkülönbsége vezet a folyadéksugár felbomlásához és a cseppek képződéséhez. A forró égéslevegő belépését négy tisztán radiális kör keresztmetszetű és tizenöt félig radiális, félig axiális téglalap formájú nyílás teszi lehetővé. Ezáltal a keverőcsőben perdületes áramlás alakul ki, ami miatt hosszabb lesz a részecskék pályája, ezzel jobb keveredés érhető el ebben a térrészben, tehát a tüzelőanyag homogénebb keveréket tud alkotni az égéslevegővel mire eléri a lángfrontot.

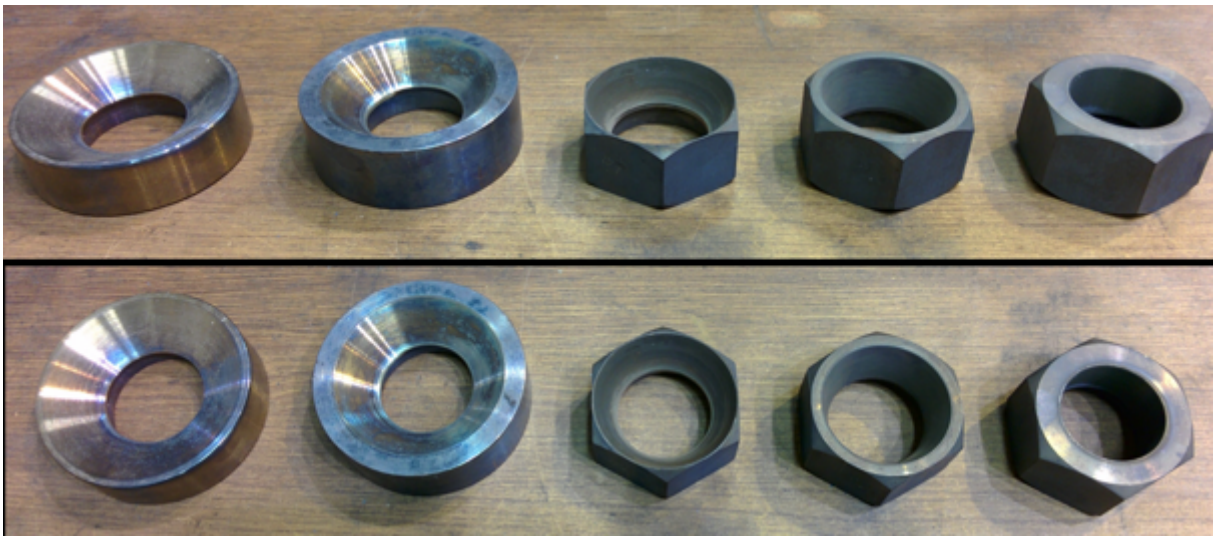
A folyékony tüzelőanyagot egy digitális mérlegre helyezett edényből egy feszültség vezérelt fogaskerék-szivattyú juttatja az égőbe. Az üzemanyagtartály aktuális súlyát egy számítógép rögzíti 30 s-onként. A mérések során a tüzelőanyag tömegárama állandó,

0,35 g/s volt. A porlasztólevegő térfogatáramát szintén egy rotaméter méri, a kívánt porlasztónyomás pedig egy nyomáshatároló szelep biztosítja, és egy nyomástávadó méri.

Mivel a különböző félkúpszögű diffúzoros toldatok azonos méretű hengerekből lettek kimunkálva, a többlet anyag lehűtheti a lángot. Részben emiatt terjedt ki a mérés a 0°-os félkúpszögű elemre is, ami gyakorlatilag a keverőcső megtoldását jelentette mintegy 21%-kal. A vizsgált konfigurációk metszetét a *6.3. ábra* szemlélteti, a *6.4. ábrán* pedig megtekinthetők a felhasznált diffúzorok. Ezek 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 hasonlítottam össze az eredeti konfiguráció tulajdonságaival, 15°-os lépésközzel. A mérések a következőképpen zajlottak: állandó porlasztónyomás és égéslevegő mennyiség mellett az eredeti kialakítása esetében 8, a diffúzorok alkalmazása mellett 6 ponton regisztráltuk a láng intenzitását 5 mm-enként. Korábbi mérési eredmények tapasztalatai alapján [23] a 0,3-1,6 bar porlasztási túlnyomás értékek közötti tartományt vizsgáltuk. Erre a későbbiekben egyszerűen porlasztónyomásként hivatkozom.



6.3. ábra. Az alkalmazott diffúzorok metszete.



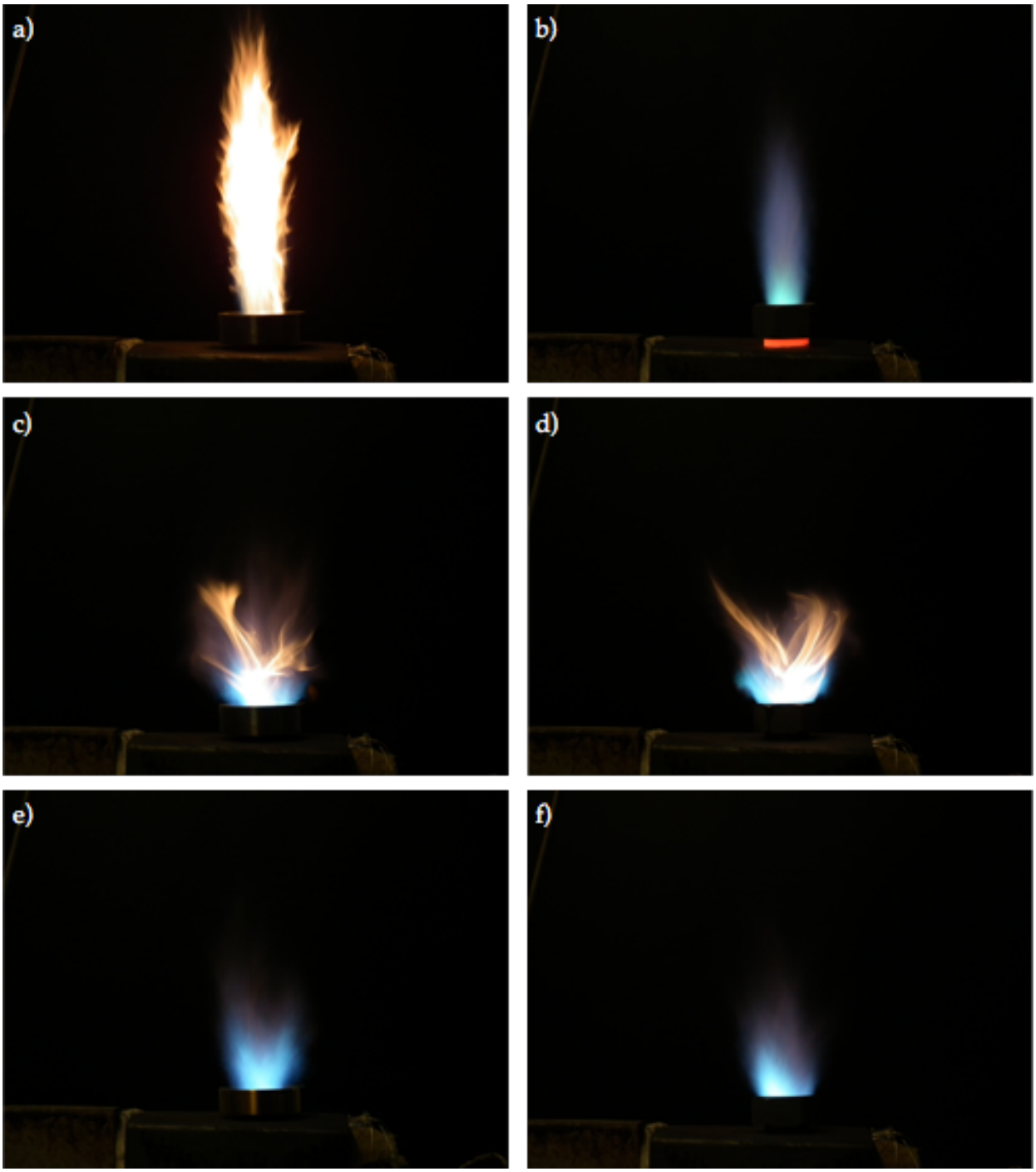
6.4. ábra. Az alkalmazott diffúzorok.

7. KORÁBBI EREDMÉNYEK RÖVID ISMERTETÉSE

7.1. Diffúzorok alkalmazásának stabilitási vizsgálata

A tüzelés során a következő jellemzők figyelhetők meg: a láng kezdetben egyenes, majd bistabillá válik, szétnyílik, végül leszakad. A láng bistabillá válása alacsonyabb égéslevegő tömegáramnál következik be, mikor a láng egyre nagyobb perdülettel kezd rendelkezni, így az elsődleges recirkuláció elkezdi az erősen világító stabil lángot egy másik stabilitási tartományba átvinni. Az égéslevegő mennyiségének további növelésével, az elsődleges recirkuláció legyőzi a keverékáramot és megosztja a lángot, így a középvonalban kialakul a visszaáramlási zóna. Ez mindaddig fennmarad, míg elérjük azt az áramlási sebességet, amivel a lángterjedési sebesség már nem tud egyensúlyt tartani, ezért a láng kialszik.

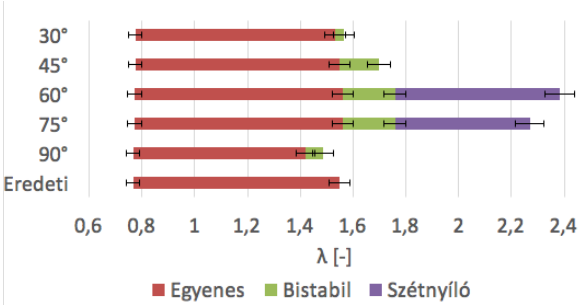
A tüzelés során létrejövő tipikus lángalakokat a *7.1. ábrán* tekinthetjük meg, a felvételek 1/100 másodperces záridővel készültek. A *7.1.a)* és *b) ábrákon* egyenes lángalakok láthatók, rendre kis és nagy porlasztónyomás esetén. A lángok alakjából és színéből levonható a következtetés, hogy a kisebb porlasztónyomás esetén a koromképződés okán létrejövő feketetest-sugárzás miatt erősen világító, sárga lángot látunk. Nagy porlasztónyomáson ($p_{porl} \simeq 2{,}3$ bar) a tökéletes párolgás, előkeverés és a nagy áramlási sebesség miatt a lánghossz lerövidül, a láng alakja jól meghatározható lesz, színképe pedig a kékes-lilás tartományban található. A *7.1.c)* és *d) ábrákon* a bistabil lángalakra láthatunk egy-egy példát rendre kis és nagy porlasztónyomás esetén. Megfigyelhető, hogy kialakulóban van a szétnyíló lángalak, ez a külső kékes színű lángrész körülveszi a még fölfelé törekvő, az egyre erősödő recirkulációnak még engedni nem akaró, sárgás színű lángrészt. Látható, hogy ez már közel sem egységes, jól bemutatja a két stabil állapot közti változást. A *7.1.e)* és *f) ábrákon* szétnyíló lángokat láthatunk szintén kis, illetve nagy porlasztónyomások esetén. A lángok itt újból jobbára szimmetrikusnak feltételezhetők. Jól látható a láng közepén kialakult visszaáramlási zóna és a lánghossz jelentős lerövidülése.



7.1. ábra. A tüzelés során megfigyelhető lángalakok: *a)* Egyenes láng (p_{porl}≃0,5 bar); *b)* Egyenes láng (p_{porl}≃2,3 bar); *c)* Bistabil lángalak (p_{porl}≃0,5 bar); *d)* Bistabil lángalak (p_{porl}≃1,2 bar); *e)* Szétnyíló láng kis porlasztónyomáson (p_{porl}≃1,6 bar); *f)* Szétnyíló láng nagy porlasztónyomáson (p_{porl}≃2,3 bar) [13].

Korábbi mérések során a diffúzorok alkalmazása az elvárásoknak megfelelően bizonyította, hogy ez egy jó módszer a lángstabilizálásra. A legstabilabb eredményeket a 15°-os és a 30°-os félkúpszögű elemek használatánál kaptuk, azaz volt hogy a 15°-os, volt hogy a 30°-os diffúzor esetében volt stabilabb a láng. Egy példaként a *7.2. ábrán*

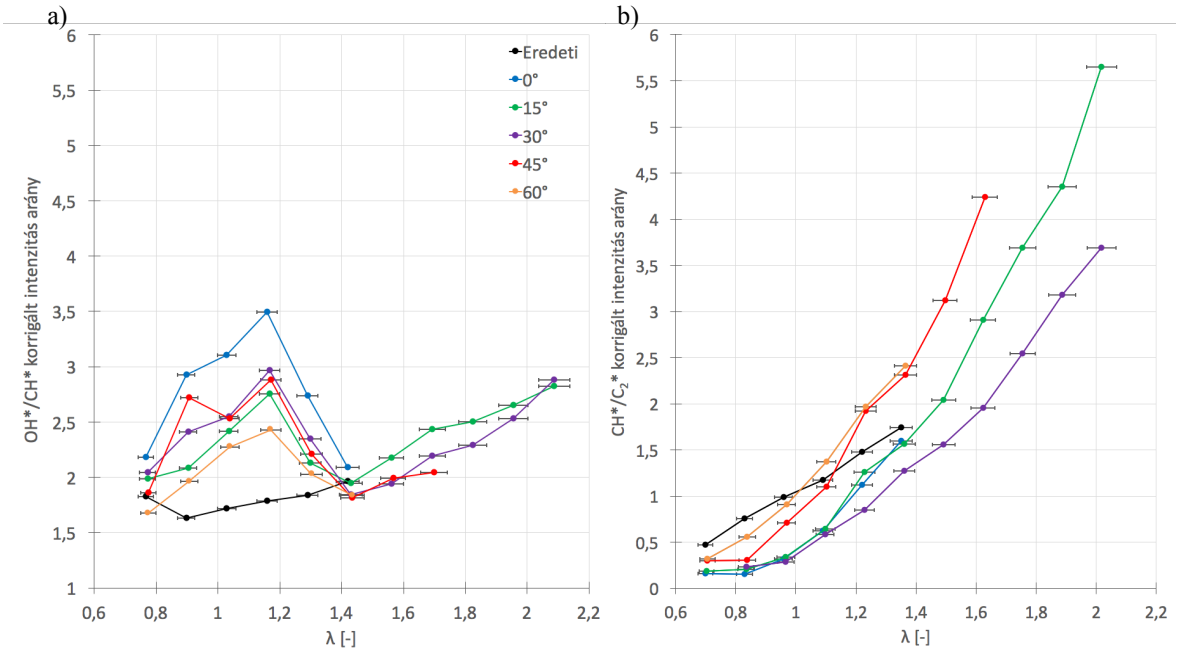
1,6 bar porlasztási túlnyomás alkalmazása mellett látható a stabilitási diagram. A diagram függőleges tengelyén az adott égőszáj kialakítások olvashatók, a vízszintes tengelyen pedig a légfelesleg-tényező található. A piros sáv tartozik az egyenes lángalakhoz, a zöld sáv a bistabil lánghoz, a lila sáv pedig a szétnyíló lángalakhoz. A bistabil láng alakja az egyenes és szétnyíló alak között váltakozott. A lángot a piros sáv indulásánál gyújtottuk be, és a lila sáv végénél aludt ki. Egyértelműen látszik, hogy a 15° és 30°-os nyílásszögű diffúzorok használata eredményezte a legszélesebb stabilitási tartományt, és 2-2,4-es légfelesleg-tényező értékig volt stabil a láng.



7.2. ábra. Lángstabilitási eredmények 1,6 bar porlasztónyomás esetén [10].

7.2. Diffúzorok alkalmazásának spektrometriai vizsgálata

A spektrometriai vizsgálat célja adott porlasztó nyomáson a különböző nyílásszögű diffúzorok használata mellett fellépő intenzitások arányának összehasonlítása. Az irodalomban legtöbbször megtalálható OH* és CH* gyökök kemilumineszcens intenzitásarányának mérése korábbi tapasztalataim szerint nem alkalmas arra, hogy szabályozó algoritmus segítségével kontrollálhassuk a lángot. Ha a CH* és C_2* gyökök intenzitásarányát vizsgáljuk, több esetben egyértékű függvényeket kapunk, ami így lehetővé teszi szabályozó algoritmus alkalmazását a lángszabályozásra. A két intenzitásarányokra vonatkozóan egy-egy példa látható a *7.3. ábrán*.



7.3. ábra. Intenzitásarányok 1,6 bar porlasztónyomás esetén: *a)* OH*/CH* intenzitásarány; *b)* CH*/C_2* intenzitásarány [10].

8. MÉRÉS KIÉRTÉKELÉSE ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

8.1. Hibaszámítás

A légfelesleg-tényező számítása a *8.1. képlet* szerint történt.

$$\lambda = \frac{m_p + m_{é}}{m_t \cdot L_0}, \qquad (8.1.)$$

ahol m_p, $m_é$ és m_t [kg/s] rendre a porlasztó levegő, az égéslevegő és a tüzelőanyag tömegárama, L_0 (kg/kg) az elméletileg szükséges levegőmennyiség 1 kg tüzelőanyag tökéletes égéséhez. Az elméleti levegőszükséglet a tüzelőanyag összetételéből számítható, ami szabványosított [24]. A légfelesleg-tényező *8.1. képlet* szerinti számításához szükséges légmennyiségek meghatározása rendre a *8.2.*, és *8.3. képlet* szerint történt.

$$m_p = \left(\frac{p_0}{p_0+p_p}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \cdot \frac{p_0+p_p}{R \cdot t_0} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{1-\kappa} \cdot R \cdot t_0 \cdot \left(1 - \left(\frac{p_0}{p_0+p_p}\right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}\right)} \cdot A, \qquad (8.2.)$$

ahol p_0 és p_p [Pa] rendre az atmoszférikus nyomás és a porlasztási túlnyomás, t_0 [K] a környezeti hőmérséklet, A [m^2] a porlasztó kilépő keresztmetszete, κ = 1,4 [1] az adiabatikus kitevő és R =287 [J/kgK] az specifikus gázállandó.

$$m_{é} = \frac{p_0 \cdot v_{é}}{R \cdot t_0} \cdot \sqrt{\frac{\frac{p_{ref}}{R \cdot t_{ref}}}{\frac{p_0}{R \cdot t_0}}}, \qquad (8.3.)$$

ahol $v_é$ [m^3/s] az égéslevegő a rotaméterről leolvasott térfogatárama, p_{ref} [Pa] és t_{ref} [K] a leolvasás korrekciójához szükséges referencia nyomás- és hőmérséklet.

A *8.2.* és *8.3. képletek* szerinti összefüggéseket visszahelyettesítve a *8.1. képletbe*, majd azt az egyes mért mennyiségek szerint parciálisan deriválva, a légfelesleg-tényező hibája a *8.4. képlet* szerint számítható.

$$\delta\lambda = \sqrt{\left(\delta p_0 \cdot \frac{\partial\lambda}{\partial p_0}\right)^2 \cdot \left(\delta(p_0+p_p) \cdot \frac{\partial\lambda}{\partial(p_0+p_p)}\right)^2 \cdot \left(\delta t_0 \cdot \frac{\partial\lambda}{\partial t_0}\right)^2 \cdot \left(\delta v_{é} \cdot \frac{\partial\lambda}{\partial v_{é}}\right)^2 \cdot \left(\delta m_t \cdot \frac{\partial\lambda}{\partial m_t}\right)^2},$$

(8.4.)

ahol a δp_0, $\delta(p_0+p_p)$, δt_0, $\delta v_é$ és δm_t mért mennyiségekre jellemző hibák a *Mellékletben* feltüntetett műszerek pontatlansága alapján adhatók meg.

A légfelesleg-tényező számításából adódó pontatlanságok a *8.2. és 8.3. ábrán* fel vannak tüntetve hibasávokkal.

A mért kemilumineszcens jelek kiértékeléséhez a következőket kell figyelembe vennünk: ismert, hogy az OH* gyök intenzitása közvetlen mérhető, mivel ehhez nem adódik hozzá másik kemilumineszcens összetevő intenzitása [3-5, 8]. Ez nem igaz viszont a CH* gyökre, mivel ehhez hozzáadódik a CO_2* gyök szélessávú emissziója 350-600 nm között. Ezen kívül a feketetest sugárzást is számításba kell venni, ami koromképződés előjele és nő a láng fényességével. Ez a jelenség is megfigyelhető a spektrumban. Azaz a CH* gyök kemilumineszcens intenzitását korrigálni kell a feketetest sugárzás figyelembe vételével. Mivel a maximális lánghőmérséklet 2000 K körül várható [11], az OH* gyök intenzitását ez nem befolyásolja, így ezt az intenzitást nem kell korrigálni. Egy lehetséges megoldás [23] a kemilumineszcens intenzitás korrigálására, hogy az adott gyök emissziós csúcsából kivonjuk a csúcs melletti jelet. Ez a következő képpen történik: a csúcsnál egy alacsonyabb és magasabb hullámhossz tartományon 5-5 nm szélességű tartományon először átlagoljuk az intenzitásokat, majd megfelelően súlyozzuk a tartományokat.

Az OH*/CH* korrigált intenzitásarányok hibája a (*8.5.)* képlet szerint számítható:

$$\left.\frac{OH^*}{CH^*_{korr}}\right|_{hiba} = \sqrt{\left(\frac{1}{k_1 \cdot CH^*_{korr}}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot OH^*}{k_2 \cdot \left(CH^*_{korr}\right)^2}\right)^2}, \qquad (8.5.)$$

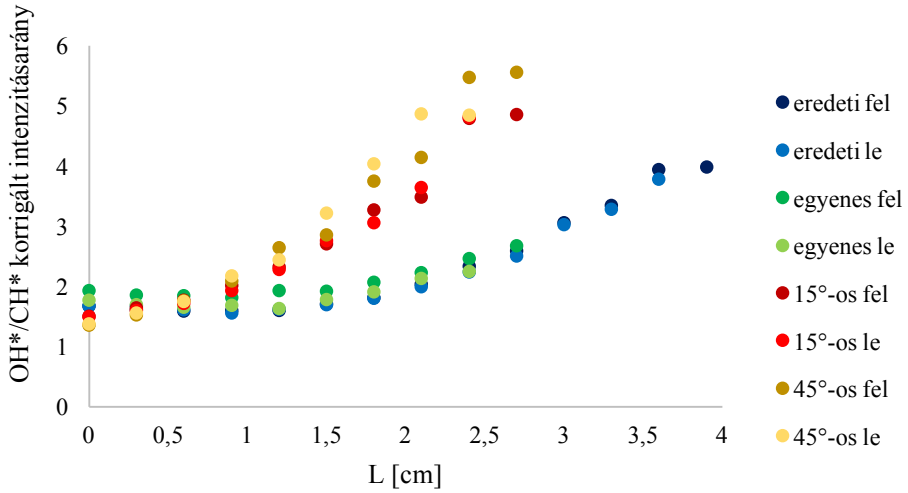
ahol k_1 és k_2 konstansokkal rendre az OH* és CH* gyökök egységnyi hibáját szükséges nagyítani. Az 1-es szorzó annyit jelent, hogy a kapott intenzitás feltételezett bizonytalansága egy osztás. Az első tag az OH* gyök szerinti derivált, a második tag a CH* gyök szerinti derivált. Ennek a hibának a maximális értéke 1 %, alatti, így a hibasávok a jelölők takarásába kerülnének, például ezért nincsenek a *8.2 ábrán* sem feltüntetve. A későbbiekben még tárgyalásra kerülő CH*/C_2* és OH*/C_2* gyökök intenzitásarányának hibaszámítása a fentiekben ismertetetthez hasonló módon történt, a hibák szintén 1 % alattiak voltak.

A magasság manuális beállításából származó hiba minden beállítás esetén az állandó értékű leolvasási pontatlanságnak, 1 mm-nek vehető. Az eredményeket bemutató ábrákon ezek az azonos szélességű hibasávok a könnyebb értelmezhetőség érdekében nincsenek feltüntetve.

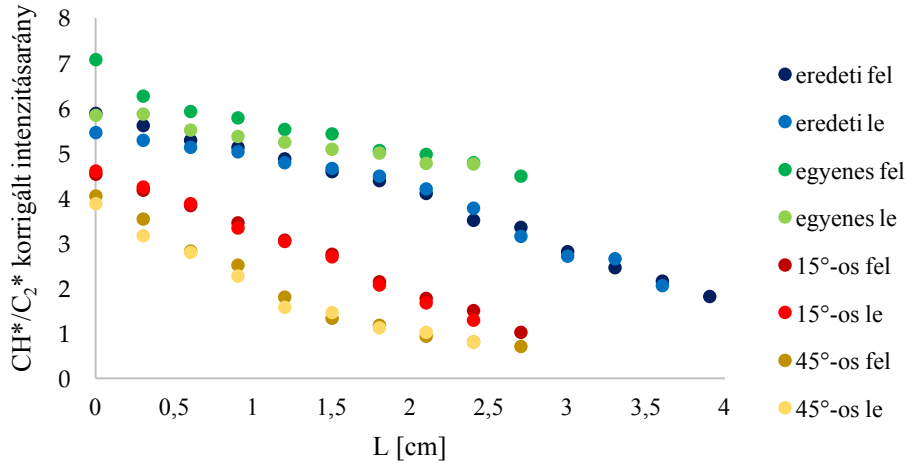
8.2. Validációs mérések

A lángok vertikálisan történő végigpásztázása előtt a teljes vizsgált porlasztónyomás – légfelesleg-tényező síkon szükségesnek találtuk a mérőműszer tesztelését a hiszterézisre való hajlama szempontjából. Ez azt jelentette, hogy egy választott vizsgált porlasztó nyomás és légfelesleg-tényező értéket beállítva különböző konstrukciókat alkalmazva vettük föl a mérési pontokat a láng függőleges tengelye mentén a kilépés pontjától kezdve, egyenlő, 3 mm-es osztásközzel felfelé majd lefelé haladva. A légfelesleg-tényezőt sztöchiometrikus (λ = 1) értékre állítottuk be, a porlasztónyomás értéke 0,3 bar túlnyomás volt. Az OH*, CH* és C_2* gyökök intenzitásarányai a kilépés pontjától mért távolság függvényében a *8.1. ábrán* láthatók. A vizsgált kialakítások, az eredeti égőkonstrukción kívül, annak az egyenes csőszakasszal, a 15 és 45°-os diffúzorokkal való megtoldása volt. Az jelmagyarázatban a „fel” megnevezés a kilépés pontjától felfelé való haladási irányt jelenti a mérési pontok felvételét illetően, a „le” megnevezés pedig a legfelső ponttól való visszahaladást a legalsó mérhető pont felé.

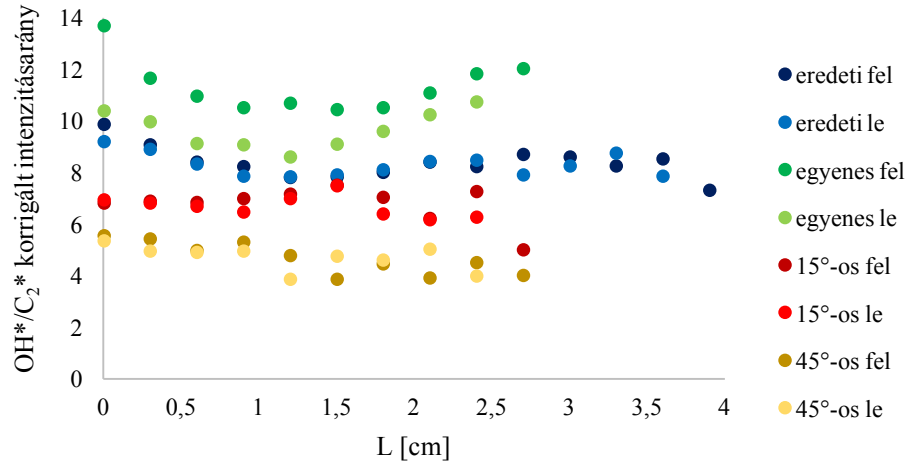
a)



b)

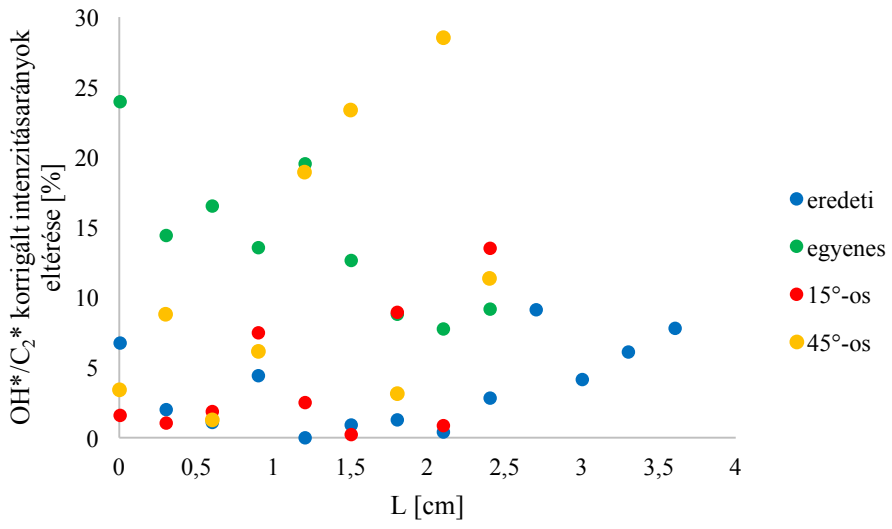


c)



8.1. ábra. Spektroszkóp hiszterézis hajlamának vizsgálata.

Megfigyelve az összetartozó pontsorokat láthatjuk, hogy a jelölők többnyire egybeesnek, tehát a legtöbb esetben nincs jelentős eltérés a fölfelé és lefelé haladva mért intenzitás-arányok között. Néhány kivétel adódik, ezek közül a legszembetűnőbb a *8.1.c) ábrán* látható, ahol az egyenes toldatnál mért adatsorok nem esnek egybe. A lefelé és felfelé haladva mért intenzitások különbségét a felfelé haladva mérthez képest százalékosan ábrázolva a *8.2. ábrát* kapjuk.



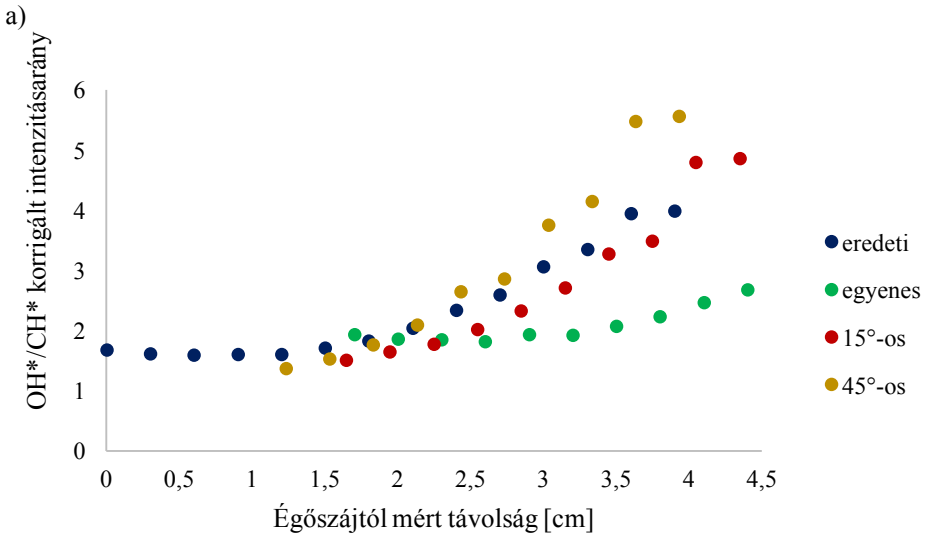
8.2. ábra. OH*/C_2* intenzitásarányok százalékos eltérése

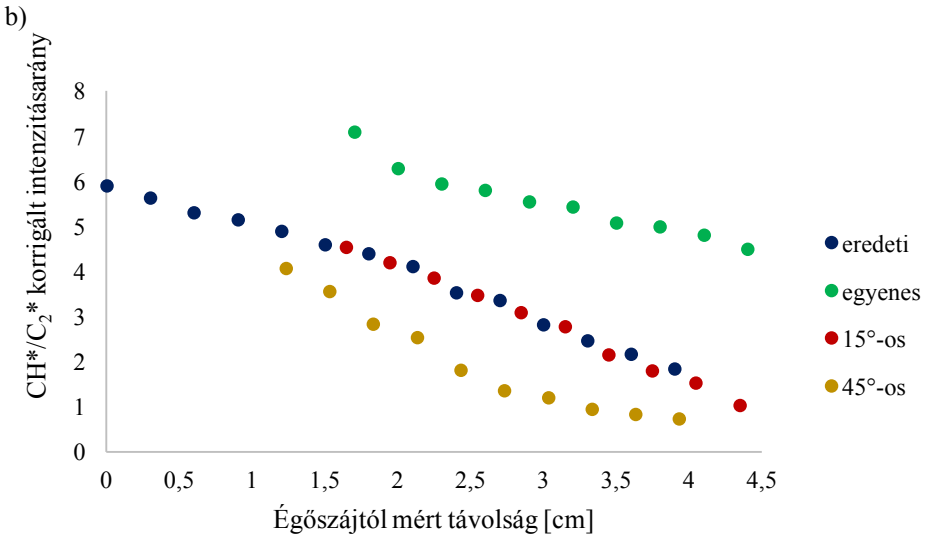
A *8.2. ábra* szerint a 45°-os esetben látható a legnagyobb eltérés, viszont az eltérések változása és a magasság között nem áll fent egyértelmű kapcsolat. Az egyenes toldattal kiegészített esetben magasak az eltérések és az eltérés mértéke az égőből való kilépéstől távolodva csökken. Mivel ez a karakterisztika csak ebben az esetben figyelhető meg, nem jelenthető ki, hogy a mérőeszközhöz köthető hibáról lenne szó, valószínűleg a magasság manuális beállításának pontatlanságához köthető a jelenség. Ebből kifolyólag a továbbiakban azzal a feltételezéssel végeztük a méréseket, hogy a spektrofotométer nem rendelkezik hiszterézissel, így elegendő csak egy irányban felvenni a mérési pontokat.

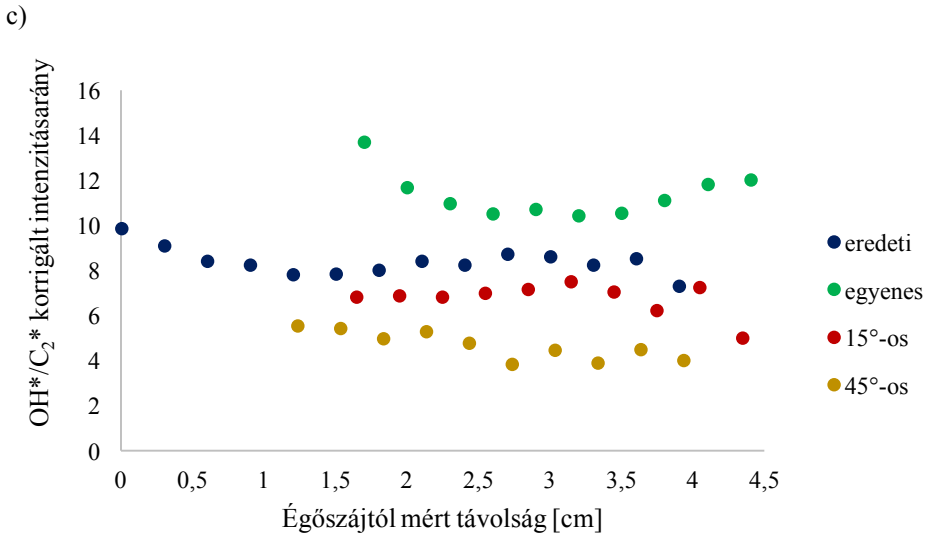
8.3. Kiértékelés folyamata

A *8.1.* és *8.2. ábrán* 0 cm-nek jelölt magasság minden esetben az alkalmazott konstrukció magasságát jelentette, azaz azt a kilépési pontot, ahol a spektroszkóppal először volt lehetőség felvételt készíteni (tehát az eredeti kialakítás esetén az égőszáj síkját, diffúzoros toldat alkalmazásakor a diffúzor felső síkját). A *8.3. ábrán* az intenzitásarányok viszont oly módon kerültek ábrázolásra, hogy a 0 cm-rel jelölt pont minden esetben az égőszáj síkját jelenti. A toldattal rendelkező esetekben az adatsorok regisztrálása így nem 0 cm-nél kezdődik, hanem abban a magasságban, ahol az égőszájra helyezett elemből kilépve először látja a spektrométer a lángot. Továbbá, a *8.3. ábrán* már csak a felfelé haladva mért adatok vannak feltüntetve. Ennek az ábrázolási módnak a célja feltérképezni azt, hogy található-e olyan beállítás, ahová a műszert elhelyezve a

változtatott konstrukcióktól függetlenül következtetni lehet valamely gyökök intenzitásarányára, amelyből pedig a *7. fejezetben* ismertetettek szerint meghatározható lehet a légfelesleg-tényező értéke.







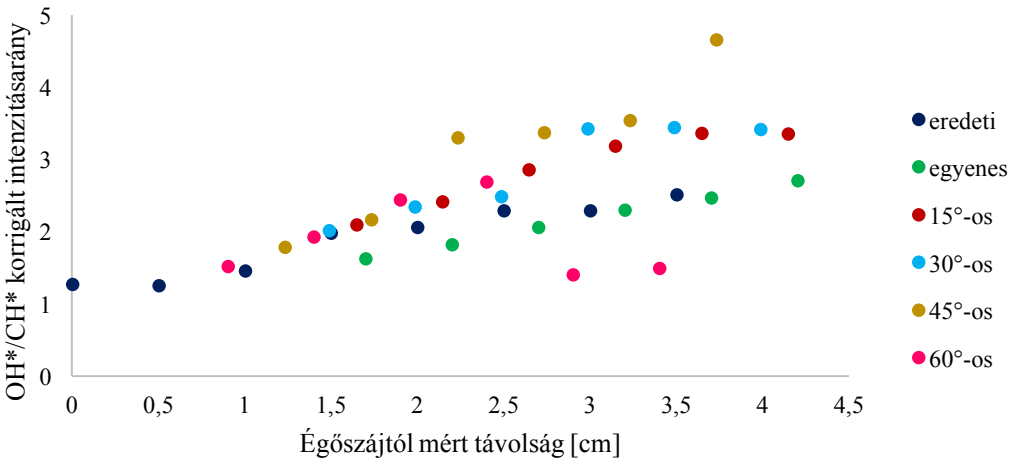
8.3.ábra. Intenzitásarányok az eltolt távolság függvényében.

Az előzetes mérések alapján, ahogy a *8.3.a)* és *b) ábra* szerint is látható, található olyan beállítás, ahol több konstrukció esetében is hasonló értékűek az intenzitásarányok. A *8.3.c) ábrán* nem találunk példát ilyen beállításra, azonban jelenleg ez a megállapítás csak a vizsgált üzemi pontra igaz, tehát az eredmények bemutatása során szükségszerűnek tartottam kitérni rá, hogy további légfelesleg-tényező – porlasztó nyomás értékek esetén hogyan viselkednek az OH^*/C_2^* intenzitásarányok.

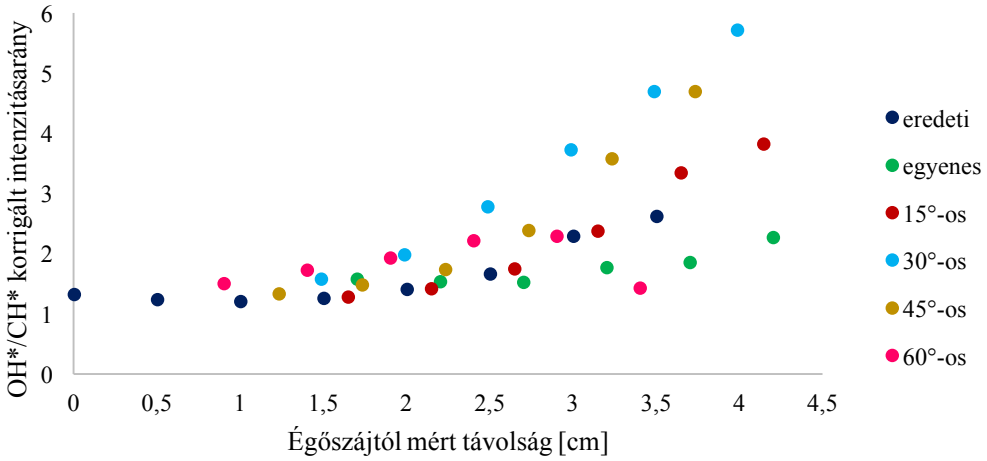
8.4. Eredmények bemutatása

A mért intenzitás-arányokat három különböző légfelesleg-tényező és porlasztó nyomás értéken hasonlítottam össze. Ezáltal bemutathatók az egyes intenzitásarányok különböző porlasztó nyomásokon dús (λ = 0,8), sztöchiometrikus (λ = 1) és szegény (λ = 1,2) tüzelési körülmények között is. A *8.4. ábrán* 0,3 bar porlasztási túlnyomás esetén mért OH*/CH* intenzitásarányok láthatók dús, sztöchiometrikus és szegény üzemállapotok során.

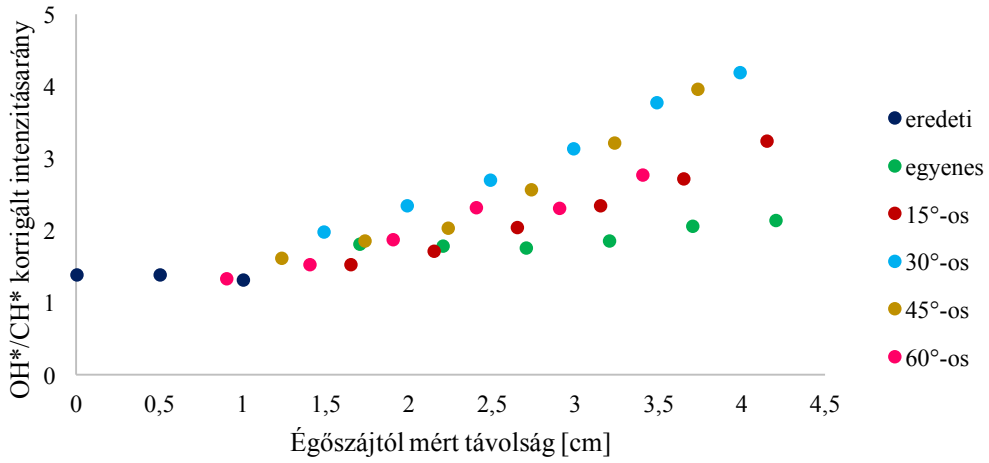
a)


OH*/CH* korrigált intenzitásarány
0
1
2
3
4
5
0
0,5
1
1,5
2
2,5
3
3,5
4
4,5
Égőszájtól mért távolság [cm]
eredeti
egyenes
15°-os
30°-os
45°-os
60°-os

b)


OH*/CH* korrigált intenzitásarány
0
1
2
3
4
5
6
0
0,5
1
1,5
2
2,5
3
3,5
4
4,5
Égőszájtól mért távolság [cm]
eredeti
egyenes
15°-os
30°-os
45°-os
60°-os

c)



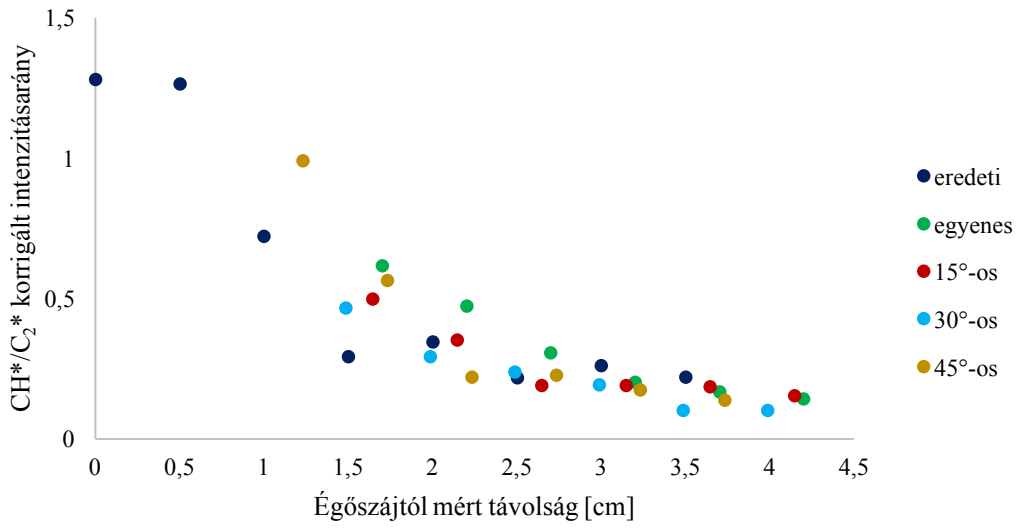
8.4. ábra. OH*/CH* intenzitásarányok 0,3 bar porlasztási túlnyomáson, *a)* dús keverék esetén; *b)* sztöchiometrikus keverék esetén; *c)* szegény keverék esetén.

A *8.4. ábra* alapján általánosan megállapítható, hogy a láng alsó részétől felfelé haladva nő az OH*/CH* intenzitásarányok értéke. Kivétel ez alól a *8.4.a)* és *c)* ábrán látható 60°-os félkúpszögű elemre vonatkozó adatsor. Ebben az esetben a szétnyíló láng már nem olyan magas, hogy felvételt lehessen készíteni róla ezekben a pontokban, így ezen adatok a jelen elemzés szempontjából nem relevánsak, azonban a teljesség kedvéért a további ábrákon is szerepelni fognak. A *8.4.c) ábrát* megfigyelve látható, hogy az eredeti égőkialakítás esetében csak az első három beállításban vannak adatok az intenzitásarányról. Ez annak köszönhető, hogy ez a konstrukció a beállított légfeleslegtényező – porlasztó nyomás értékek mellett már az üzemi tartománya határán működik, így nem volt lehetőségünk több mérési pont felvételére a láng lefúvás miatt.

A *8.4.a) ábrán* látható, hogy az égőszájtól mért 2 cm-es magasságig az egyenes toldathoz tartozó adatsoron kívül egy egyenesre illeszkednek a különböző konstrukciókhoz tartozó pontok. A *8.4.b)* és *c) ábrán* sztöchiometrikus és szegény keverék esetében nem figyelhető meg ilyen tendencia, azonban találhatók néhány magasságban olyan különböző konstrukciókhoz tartozó intenzitásarányok, amelyek közel azonos értékűek, mint például 1,5-2 cm magasság között az egyenes és 45°-os félkúpszögű toldat esetében mért pontok, vagy 2-2,5 cm-es magasság között az egyenes és 15°-os félkúpszögű toldathoz tartozó adatok.

A *8.5. ábrán* a 0,3 bar porlasztási túlnyomás esetén mért CH*/C_2* intenzitásarányok láthatók dús üzemállapotok során. Sztöchiometrikus és szegény körülmények között a

CH^*/C_2^* intenzitásarányokat egyaránt csökkenő tendencia jellemzi a láng alsó határától felfelé haladva. Ezekhez az üzemállapotokhoz tartozó ábrákon nem látható egyezés adott magasságokban valamely különböző konstrukciók alkalmazásakor mért intenzitásarányokban. Az ábrák megtekinthetők a *Mellékletben* az *M.1. ábrán*.

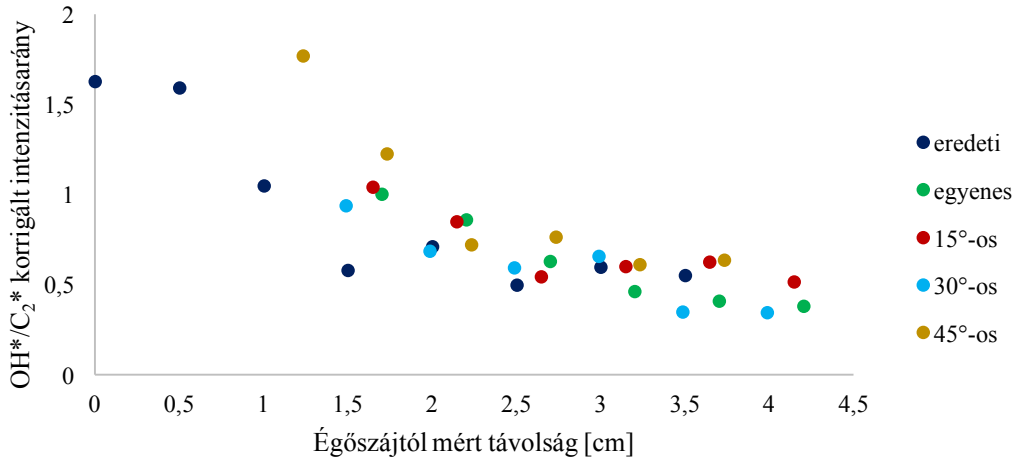


8.5. ábra. CH^*/C_2^* intenzitásarányok 0,3 bar porlasztási túlnyomáson, dús keverék esetén.

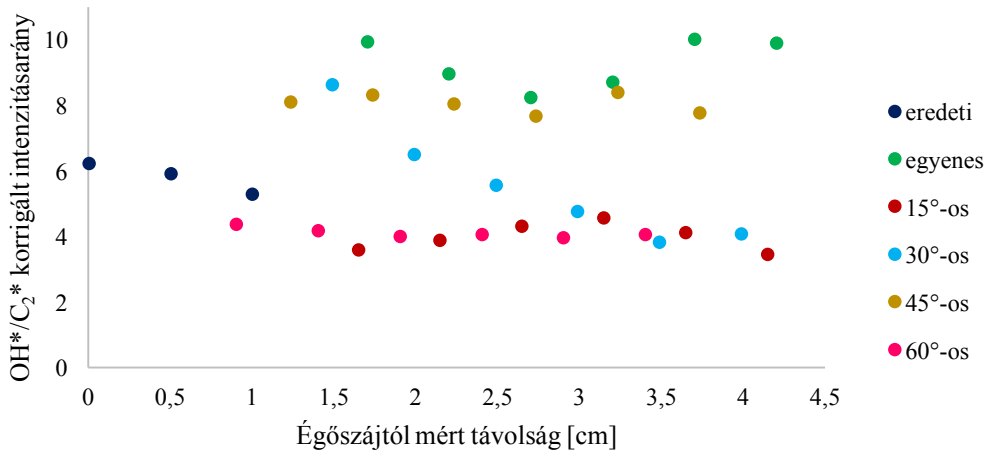
A *8.5. ábrán* egymással egyező, monoton csökkenő karakterisztika figyelhető meg az intenzitásarányok változásának függvényében. Egyes intenzitásarányok több helyen gyakorlatilag egybe esnek. A függőleges tengely skálázását figyelembe véve megállapítható, hogy az eredeti és 30°-os, illetve az egyenes, a 15°-os és a 45°-os félkúpszögű toldatok alkalmazása mellett a legtöbb magasságban csak elhanyagolhatóan kis mértékben tér el az intenzitásarányok értéke. A 60°-os félkúpszögű elemhez tartozó adatsor nem szerepel az ábrán (egyes esetekben a későbbiekben sem). Ezeknél nem relevánsak a mért értékek, így mindenképp szükséges a mérés ezen részének reprodukálása.

A *8.6. ábrán* a 0,3 bar porlasztási túlnyomás esetén mért OH^*/C_2^* intenzitásarányok láthatók dús és szegény üzemállapotok során. A sztöchiometrikus körülmények között regisztrált intenzitásarányok a *Melléklet M.2. ábráján* tekinthetők meg.

a)



b)



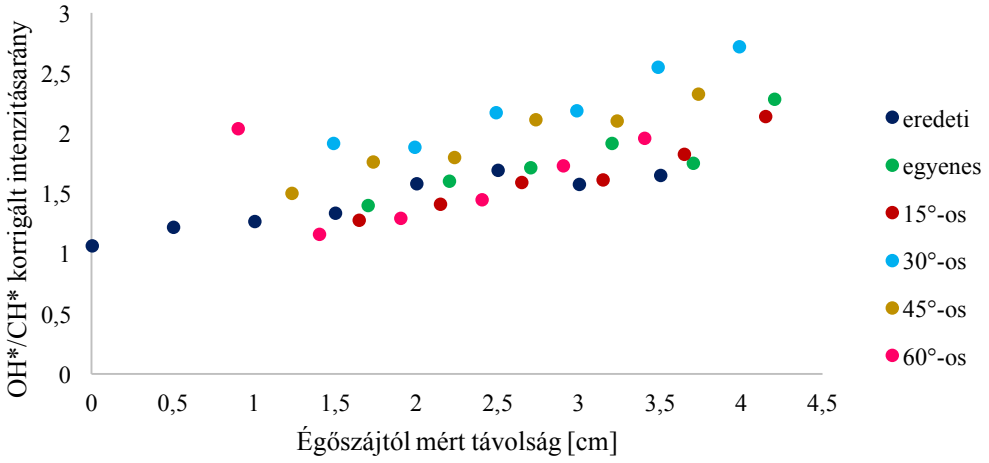
8.6. ábra. OH*/C_2* intenzitásarányok 0,3 bar porlasztási túlnyomáson, *a)* dús keverék esetén; b*)* szegény keverék esetén.

A *8.6.a) ábráról* hasonlók mondhatók el, mint a *8.5.a) ábra* esetében ismertetettek. Látható, hogy a mért OH*/C_2* intenzitásarányok is több esetben egybeesnek, illetve szintén a függőleges tengely beosztását figyelembe véve megfigyelhető, hogy az eredeti és 30°-os, illetve az egyenes, a 15°-os és a 45°-os félkúpszögű toldatok alkalmazása mellett a legtöbb magasságban csak elhanyagolhatóan kis mértékben tér el az intenzitásarányok értéke. A *8.6.b) ábrán* a 15°-os és 60°-os toldatokhoz tartozó adatsorok illeszthetők egy görbére.

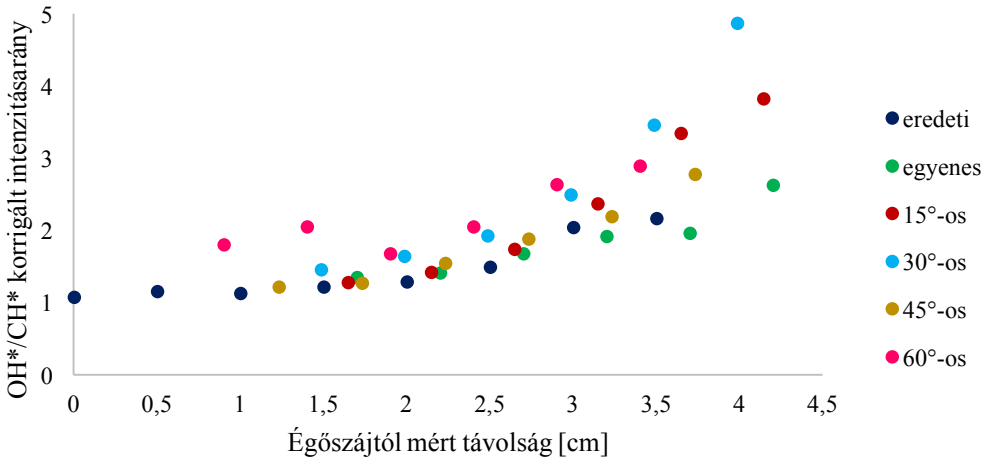
A *8.7. ábrán* a 0,8 bar porlasztási túlnyomás esetén mért OH*/CH* intenzitásarányok láthatók dús, sztöchiometrikus és szegény üzemállapotok során. A *8.7.a)* ábrán a 15°-os

és 60°-os félkúpszögű toldatokhoz tartozó adatsorok szintén jó közelítéssel egy görbére illeszthetők. Az egyenes toldathoz és a 15°-os kialakításhoz tartozó intenzitásarányok egy kivétellel, hibahatáron belül megközelítik egymást. A *8.7.b) ábrán* megfigyelhető, hogy 1,5-3 cm magasság között a mért intenzitásarányok egy pont köré esnek az egyenes, a 15°-os és a 45°-os félkúpszögű toldat esetén, illetve a 30°-os és a 60°-os félkúpszögű toldat esetén. A *8.7.c) ábrán* 2,5 cm magasságig az egyenes, a 15°-os és a 45°-os félkúpszögű toldatnál mért OH*/CH* intenzitásarányok közel azonos értékűek. Az égőszájtól még inkább eltávolodva az egyenes toldathoz tartozó intenzitásarányok alacsonyabb értékűek, mint a másik két kialakításhoz tartozók, azonban ezeknek az intenzitásarányoknak a megváltozása továbbra is egy tendenciát mutat.

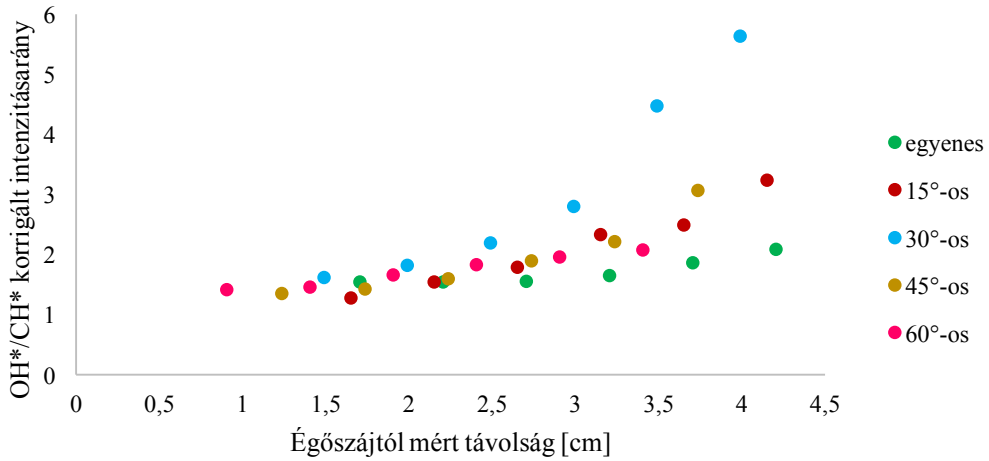
a)



b)



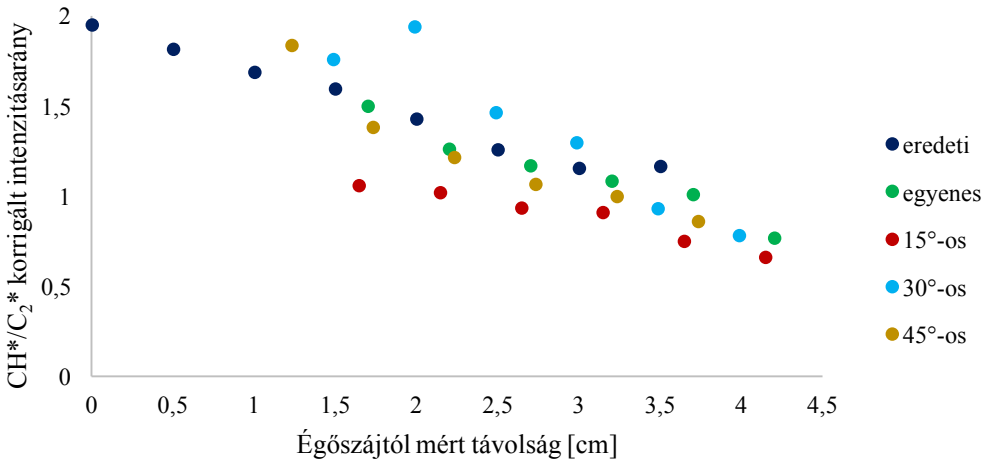
c)



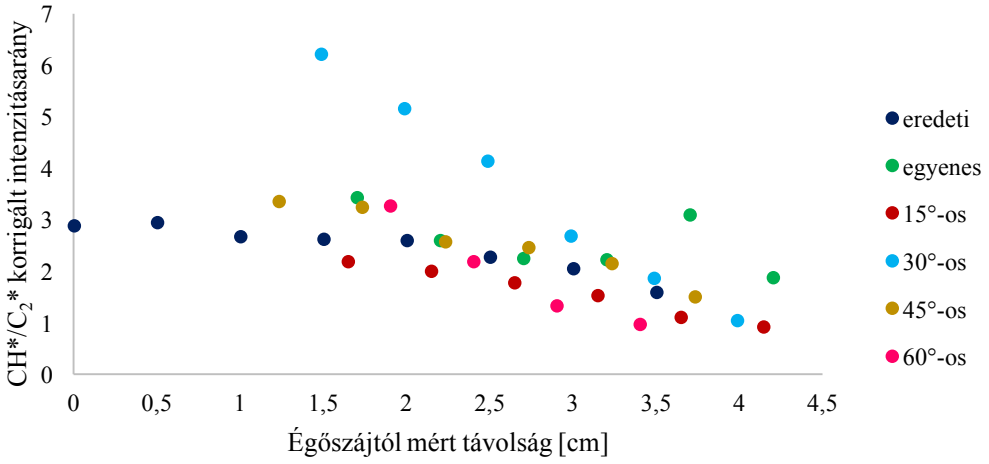
8.7. ábra. OH*/CH* intenzitásarányok 0,8 bar porlasztási túlnyomáson, *a)* dús keverék esetén; *b)* sztöchiometrikus keverék esetén; *c)* szegény keverék esetén.

A *8.8. ábrán* a 0,8 bar porlasztási túlnyomás esetén mért CH*/C_2* intenzitásarányok láthatók dús és sztöchiometrikus üzemállapotok során. A szegény keverék mellett mért CH*/C_2* intenzitásarányok a *Melléklet M.3. ábráján* láthatók. A *8.8.a) ábrán* is megfigyelhetők a dús keverék esetében a C_2* intenzitásarányokat figyelembe vevő, *8.5.* és *8.6.a) ábrákon* korábban tapasztaltak, miszerint az eredeti és 30°-os, illetve az egyenes, a 15°-os és a 45°-os félkúpszögű toldatok alkalmazása mellett a legtöbb magasságban csak elhanyagolhatóan kis mértékben tér el a mért intenzitásarányok értéke. A *8.8.b) ábrán* látható, hogy 3,5 cm-es magasságig az egyenes és 45°-os félkúpszöggel rendelkező kialakítás mellett a CH*/C_2* intenzitásarányok hasonló értékűek, illetve a 15°-os és 45°-os félkúpszögű elemekhez tartozó adatsorok 2-4 cm között egy görbére illeszthetők.

a)

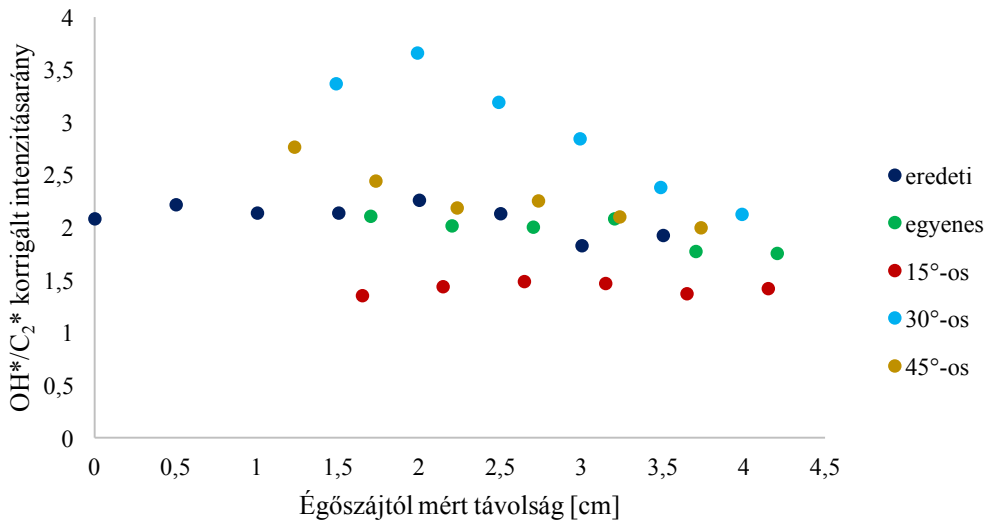


b)



8.8. ábra. CH*/C_2* intenzitásarányok 0,8 bar porlasztási túlnyomáson, *a)* dús keverék esetén; *b)* sztöchiometrikus keverék esetén.

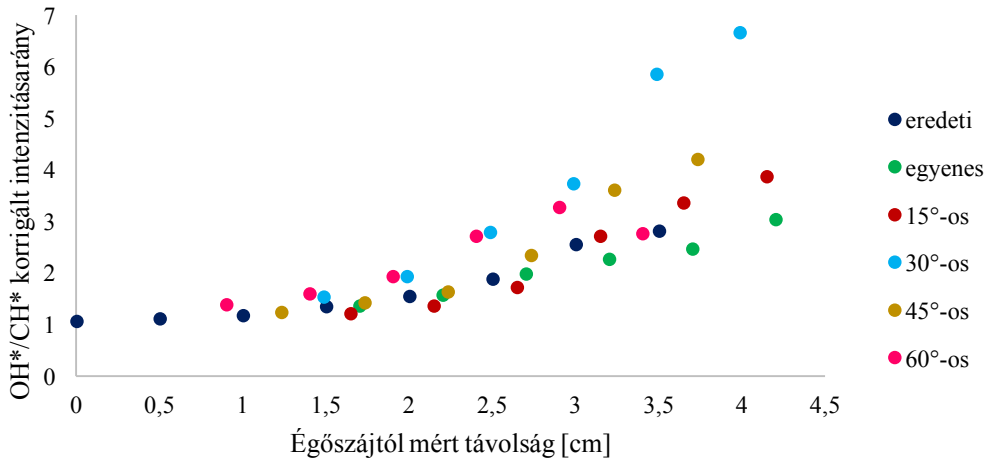
A *8.9. ábrán* a 0,8 bar porlasztási túlnyomás esetén mért OH*/C_2* intenzitásarányok láthatók dús üzemállapotok során. A sztöchiometrikus és szegény keverék mellett mért OH*/C_2* intenzitásarányok a *Melléklet M.4. ábráján* láthatók. A *8.9. ábrán* 3-3,5 cm magasság között található egy pont, ahol az egyenes és 45°-os félkúpszögű toldathoz tartozó intenzitásarányok értéke megegyezik.



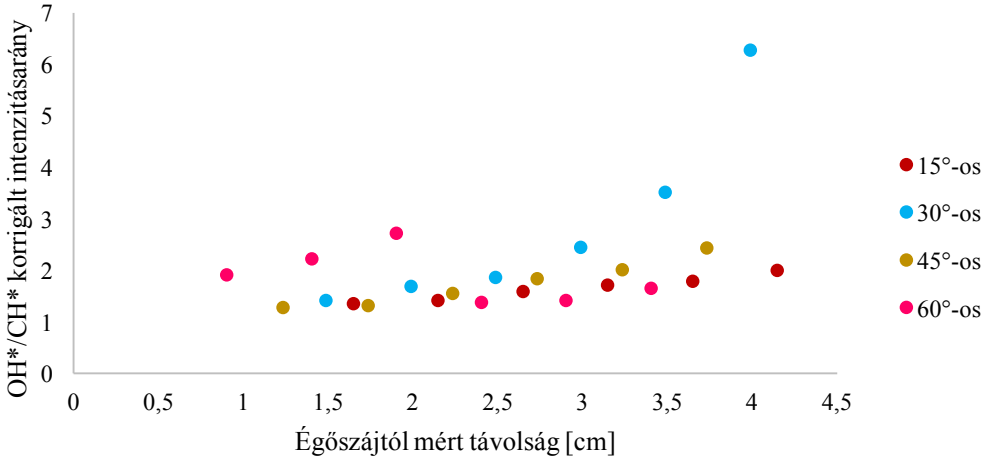
8.9. ábra. OH*/C_2* intenzitásarányok 0,8 bar porlasztási túlnyomáson, dús keverék esetén.

A *8.10. ábrán* a 1,6 bar porlasztási túlnyomás esetén mért OH*/CH* intenzitásarányok láthatók dús és sztöchiometrikus üzemállapotok során. A dús keverék mellett mért OH*/CH* intenzitásarányok a *Melléklet M.5. ábráján* láthatók. A *8.10.a) ábrán* megfigyelhető, hogy 2,5 cm-es magasság alatt a 30°-os és 60°-os félkúpszögű toldatnál mért intenzitásarányok a beállítási pontatlanságot figyelembe véve hasonló értékűek. Ugyan ezen magasságig az egyenes, a 15°-os és a 45°-os toldathoz tartozó intenzitásarányok is közel megegyező értékűek A *8.10.b) ábrán* megfigyelhető, hogy a 15°-os és 60°-os félkúpszögű elemekhez tartozó OH*/CH* intenzitásarányok változása egy görbére illeszthető.

a)

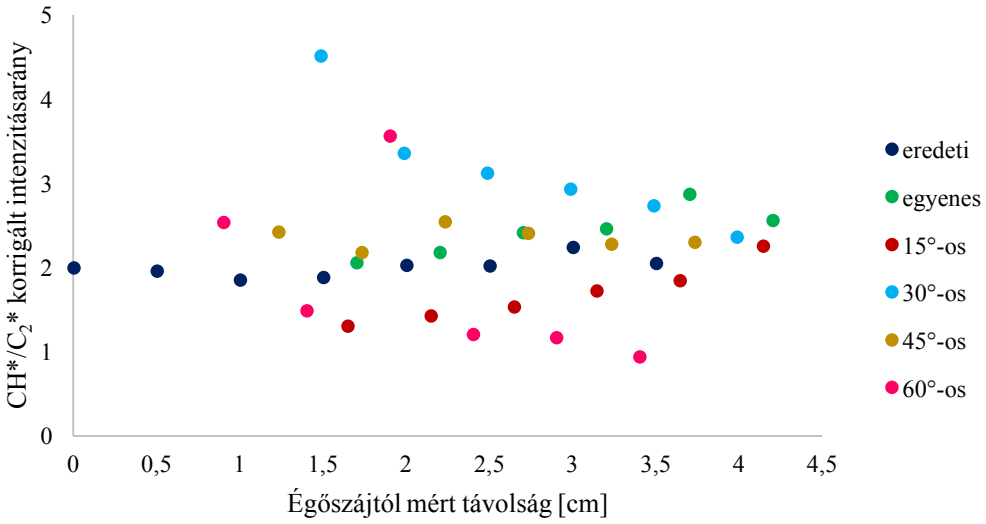


b)



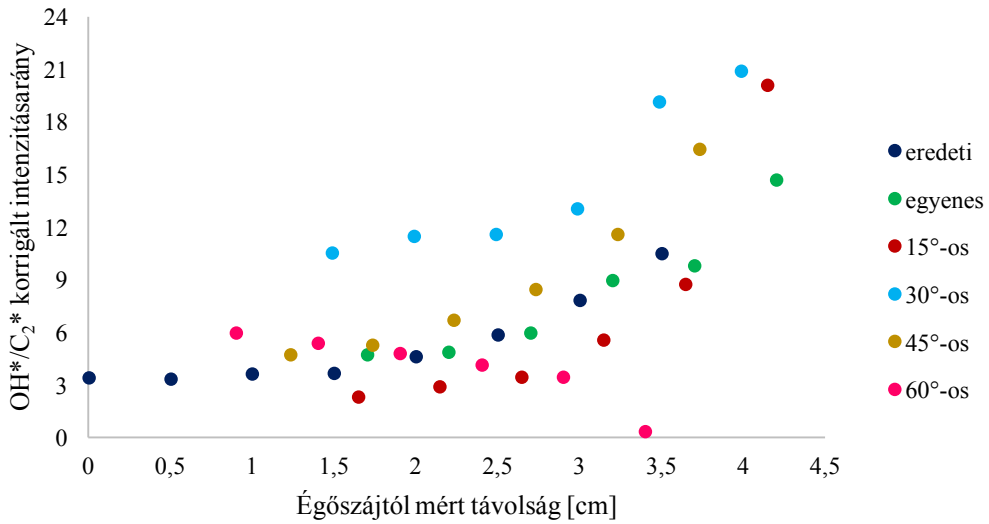
8.10. ábra. OH*/CH* intenzitásarányok 1,6 bar porlasztási túlnyomáson, *a)* sztöchiometrikus keverék esetén; *b)* szegény keverék esetén.

A *8.11. ábrán* a 1,6 bar porlasztási túlnyomás esetén mért CH*/C_2* intenzitásarányok láthatók sztöchiometrikus üzemállapotok során. . A dús és szegény keverékek esetében mért CH*/C_2* intenzitásarányok a *Melléklet M.6. ábráján* láthatók. A *8.11. ábrán* megfigyelhető, hogy az egyenes és 45°-os félkúpszögű elem esetében több magasságban is gyakorlatilag egybeesik a mért intenzitásarányok értéke.



8.11. ábra. CH*/C_2* intenzitásarányok 1,6 bar porlasztási túlnyomáson, sztöchiometrikus keverék esetén.

A *8.12. ábrán* a 1,6 bar porlasztási túlnyomás esetén mért OH*/C_2* intenzitásarányok láthatók sztöchiometrikus üzemállapotok során. A dús és szegény keverékek mellett mért OH*/C_2* korrigált intenzitásarányok a *Melléklet M.7. ábráján* láthatók. A *8.12. ábrán* szintén látható, ahol az egyenes és 45°-os félkúpszögű elem esetében gyakorlatilag azonosnak látjuk a mért intenzitásarányok értéke, azonban a függőleges tengely beosztását figyelembe véve, ez a megállapítás már nem állja meg a helyét.



8.11. ábra. OH*/C_2* intenzitásarányok 1,6 bar porlasztási túlnyomáson, sztöchiometrikus keverék esetén.

8.5. Következtetések

Az eredményeket látva, következtetésképpen elmondható, hogy az egyenes és 45°-os félkúpszögű toldat alkalmazásakor a bemutatott esetekben több alkalommal közel azonos értékűnek mértük az intenzitásarányokat, azonban nem állapítható meg olyan beállítás, amely mellett a többi paramétert változtatva mindig ugyanakkora lenne a két konstrukció esetében mért valamely gyökök intenzitásaránya. Egyes esetekben nem csak a fent említett konstrukciókhoz tartozó intenzitásarányok értékében találtam egyezést, hanem a 15°-os félkúpszögű toldathoz tartozó adatok is hasonló értékűnek adódtak.

Szintén több esetben láthattuk, hogy a 15°-os és 60°-os félkúpszögű toldat esetében mért intenzitásarányok változása egy görbére illeszthető, azonban ez a tulajdonság sem csak egy adott keverék minőség, intenzitásarány vagy porlasztó nyomás jellemzője.

Kevesebbszer figyelhettük meg, hogy a 30°-os és 60°-os félkúpszögű toldat esetben mért intenzitásarányokat vizsgálva is található több olyan beállítás is, amikor az adott intenzitásarányok közel azonos értéket vesznek fel.

9. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS TOVÁBBLÉPÉSI LEHETŐSÉGEK

Kutatásom során egy adott gázturbina égőt vizsgálva különböző égőszáj kialakítások hatását tanulmányoztam a vertikális lángszerkezetre. A mérések különböző légfelesleg-tényező és porlasztó nyomás értékeken történtek, a láng kemilumineszcens jeleit egy spektrométerrel regisztráltuk. Az égőszájra eltérő nyílásszögű diffúzoros kialakítású elemeket helyezve adott légfelesleg-tényező és porlasztó nyomás értékeken a berendezést függőleges irányban mozgatva több pontban regisztráltuk a láng intenzitását. A mérések célja többek között az, hogy a vertikális lángszerkezet megismerése révén olyan szenzor pozíciót lehessen meghatározni, amely mellett változtatott paraméterektől függetlenül következtetni lehet valamely gyökök intenzitásarányára, amiből lehetőség adódik a légfelesleg-tényező megállapítására.

Először a spektrométer ellenőrző mérése történt meg, amely során megbizonyosodtunk róla, hogy a műszernél hiszterézis hajlam nem tapasztalható, tehát a mérési pontok felvétele függetleníthető attól, hogy a műszerrel milyen haladási irányban pásztázzuk végig a lángot.

Több beállítás mellet is tapasztalható volt, hogy megegyeznek, vagy pedig egy görbe mentén változnak a mért intenzitásarányok. Az egyenes és 45°-os félkúpszögű toldat alkalmazásakor több alkalommal mutatott egyezést valamely gyökök intenzitásarányának értéke, illetve néhány beállításban a 15°-os félkúpszögű toldat alkalmazásakor mért intenzitásarányok is megegyeztek ezzel. A 30°-os és 60°-os félkúpszögű toldat esetében szintén pár alkalommal hasonló eredményt mutatott valamely gyökök intenzitásarányának értéke. A 15°-os és 60°-os félkúpszögű toldat esetében több alkalommal megfigyelhető volt, hogy egy görbe mentén változik valamely intenzitásarányának értéke. A megállapítások azonban nem általánosíthatók, mivel az eredmények alapján az egyezések nem köthetők kifejezetten egy gyökpár intenzitásarányához, keverék minőséghez vagy porlasztó nyomás értékhez. Mindazonáltal megállapíthatók a változtatott tényezőknek megfelelően olyan tartományok, melyekben két konstrukció esetén a változtatott paraméterektől függetlenül következtetni lehet adott gyökök intenzitásarányára.

Összességében az eredmények jól bemutatják, hogy nem egyszerű a kitűzött célnak megfelelően olyan üzemállapotot találni, ahol megegyeznek az egyes intenzitásarányok. A jelen tapasztalatok azonban nélkülözhetetlenek a téma további kutatásához, mintegy

előzetes mérésként szolgálhatnak a most egyezést mutató pontok további feltérképezéséhez.

Az előbbiek mellett a továbbiakban szeretnék foglalkozni *4. fejezetben* is bemutatott, más típusú lángstabilizálásra alkalmas elemek viselkedésével nem csak a lángszerkezetre nézve, hanem a károsanyag kibocsátást is vizsgálva, hiszen ez napjainkban már elengedhetetlen része bármely tüzelőberendezés értékelésének. Szeretném kivenni a részem a mérőberendezés fejlesztésében, többek között a könnyebb üzemeltetetőség és pontosabb beállítások lehetővé tétele érdekében. Örömömre szolgálna, ha a jelen égő mellet olyan változatot is vizsgálhatnék, amelynél állítható a perdítőelem szöge, így a perdület paraméter változtatása is tanulmányozható lenne. Végül, de nem utolsó sorban pedig az *5. fejezetben* nagyvonalakban bemutatott különböző optikai mérőeszközökkel is szeretnék mélyebben megismerkedni, a jelenlegi tesztpadon lehetne például fotoelektron sokszorozóval is kemilumineszcens jelet detektálni, az eredményt pedig akusztikai mérésekkel összevetni.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

[1] A. G. Gaydon, *The Spectroscopy of Flames*, 2. kiadás, London: Chapman and Hall Ltd, 1974.

[2] C. S. Panoutsos, Y. Hardalupas és A. M. K. P. Taylor, "Numerical evaluation of equivalence ratio measurement using OH* and CH* chemiluminescence in premixed and non-premixed methane-air flames," *Combust. Flame*, vol. 156, pp. 273–291, 2009.

[3] B. Higgins, M. McQuay, F. Lacas és S. Candel, "An experimental study on the effect of pressure and strain rate on CH chemiluminescence of premixed fuel-lean methane / air flames," *Fuel*, vol. 80, pp. 1583–1591, 2001.

[4] D. Guyot, F. Guethe, B. Schuermans, A. Lacarelle és C. O. Paschereit, "CH*/OH* Chemiluminescence Response of an Atmospheric Premixed Flame Under Varying Operating Conditions," in *ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air*, 2010.

[5] B. Higgins, M. Q. McQuay, F. Lacas, J. C. Rolon, N. Darabiha és S. Candel, "Systematic measurements of OH chemiluminescence for fuel-lean, high-pressure, premixed, laminar flames," *Fuel*, vol. 80, pp. 67–74, 2001.

[6] E. Salaün, P. Malbois, A. Vandel, G. Godard, F. Grisch, B. Renou, G. Cabot és A. M. Boukhalfa, "Experimental investigation of a spray swirled flame in gas turbine model combustor," pp. 1–23, 2016.

[7] M. Lackner, G. Totschnig, G. Loeffler, H. Hofbauer és F. Winter, "In-situ laser spectroscopy of CO, CH4, and H2O in a particle laden laboratory-scale fluidized bed," pp. 13–27, 2002.

[8] V. Józsa, "Application of lean premixed prevaporized burner for renewable fuels, PhD Thesis," Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Eneregetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, 2016.

[9] A. H. Lefebvre és D. R. Ballal, *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions*, 3. CRC Press Taylor & Francis Group, 2010.

[10] Gy. Hidegh, "Előkeveréses égő stabilitási és spektrometriai vizsgálata," Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Tudományos Diákköri Konferencia, Energetika 1 szekció, 2015.

[11] Gy. Hidegh, "BSc. Szakdolgozat," Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi

Egyetem, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, 2016.

[12] Gy. Hidegh és V. Józsa, “Diffúzor alkalmazása perdületes égő lánglefúvási stabilitásának növelésére,” *Energiagazdálkodás*, vol. 3–4, pp. 17–20, 2016.

[13] Gy. Hidegh, “Diffúzorok alkalmazásának hatása előkeveréses égők károsanyag kibocsátására,” Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Tudományos Diákköri Konferencia, Fenntartható energetika szekció, 2016.

[14] N. Docquier, F. Lacas és S. Candel, “Closed-Loop Equivalence Ratio Control of Premixed Combustors Using Spectrally Resolved Chemiluminescence Measurements,” *Proc. Combust. Inst.*, vol. 29, pp. 139–145, 2002.

[15] 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.

[16] Á. B. Palotás, *Ipari tüzeléstechnika*. Nemzeti Tankönyvkiadó, 2009.

[17] M. M. Tripathi, S. R. Krishnan, K. K. Srinivasan, F. Yueh és J. P. Singh, “Chemiluminescence-based multivariate sensing of local equivalence ratios in premixed atmospheric methane – air flames,” *Fuel*, vol. 93, pp. 684–691, 2012.

[18] A. Urbán, “Levegő segédközeges porlasztó vizsgálata Fázis Doppler Anemométer segítségével,” Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Tudományos Diákköri Konferencia, Energetika 1 szekció, 2015.

[19] J. Ballester és T. García-Armingol, “Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 36, pp. 375–411, 2010.

[20] T. Parameswaran, P. Gogolek és P. Hughes, “Estimation of combustion air requirement and heating value of fuel gas mixtures from flame spectra,” *Appl. Therm. Eng.*, 2014.

[21] A. Kun-Balog, V. Józsa és K. Sztankó, “Pollutant emission analysis of aqueous bioethanol combustion,” *Proc. 11th Conf. Sustain. Dev. Energy, Water Environ. Syst.*, no. SDEWES2016.0369, p. 8, 2016.

[22] “NMOS linear image sensor S3901/S3904 series,” *HAMAMATSU PHOTONICS K.K.*, 2014. [Online]. Elérési hely: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s3901-128q_etc_kmpd1036e.pdf.

[23] A. Kun-Balog és V. Józsa, “Spectroscopic analysis of crude rapeseed oil flame,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 139, pp. 61–66, 2015.

[24] *MSZ EN 590:2013 Gépjármű-hajtóanyagok, ICS 75.160.20 Folyékony tüzelőanyagok.*

MELLÉKLET

MÉRŐBERENDEZÉS RÉSZEI

Ventilátor

- Típus: Szellőző Művek Budapest, KNV 71
- Névleges nyomás növekedés: 750-487 Pa (540-1290 Nm^3/h-nál)
- Névleges fordulatszám: 2880 1/perc

Rotaméter (égés levegő)

- Típus: Unirota 93-50-196
- Mérési tartomány: 3-30 Nm3/h
- Pontosság: 1,6 %-os pontossági osztály a VDI/VDE 3513 útmutató szerint

Rotaméter (porlasztó levegő)

- Típus: Unirota RM-02 12-468-431
- Mérési tartomány: 3-30 Nl/perc
- Pontosság: 4,0 %-os pontossági osztály a VDI/VDE 3513 útmutató szerint

Mérleg

- Típus: Radwag WLC 12/30/C1/R
- Pontosság: 0,2 g
- Hitelesítve: Országos Mérésügyi Hivatal

Nyomástávadó

- Típus: Siemens SITRANS P serie Z
- Modell szám: 7MF1563-5BE00
- Mérési tartomány: 0-4 bar abszolút nyomás
- Pontosság: 1000 kPa

Levegő előmelegítő

- Típus: egyedi, rendelésre gyártott
- Pontosság: 1 °C
- Szabályzó: relé alapú, HAGA KD48P-1200
- Megjegyzés: az égési levegőt 400 °C-ra melegíti föl

Szivattyú

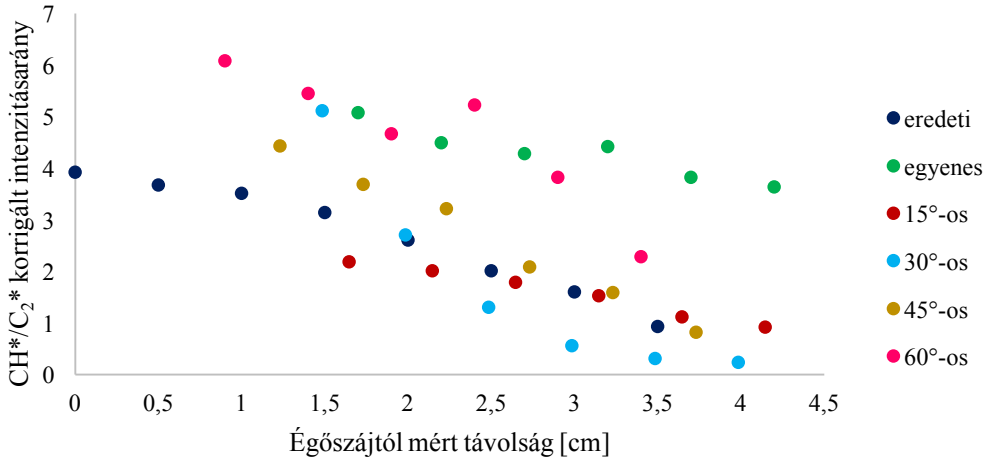
- Típus: Bosch JKB850C3
- Vezérlés: DC feszültség

Nyomásszabályzó

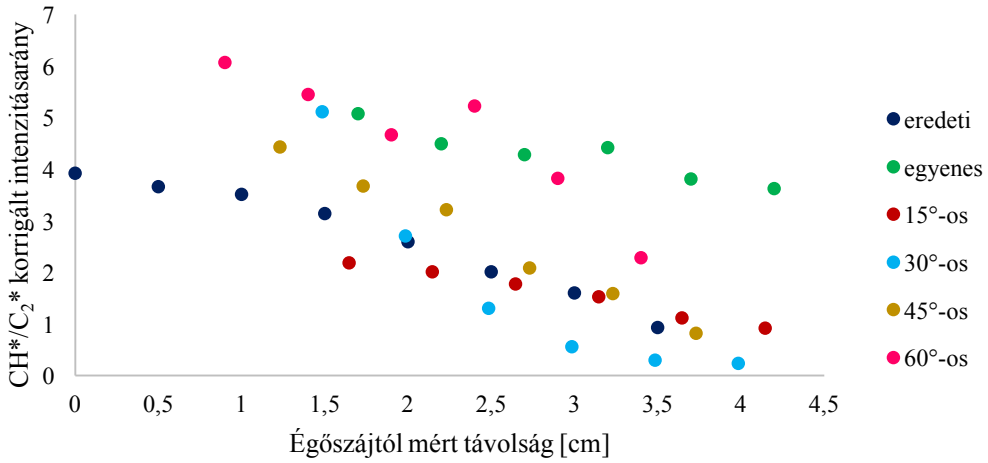
- Típus: Rexroth AS3-FRE-6012-GAU FD:208
- Belépő nyomás: 6 bar

MÉRÉSI EREDMÉNYEK

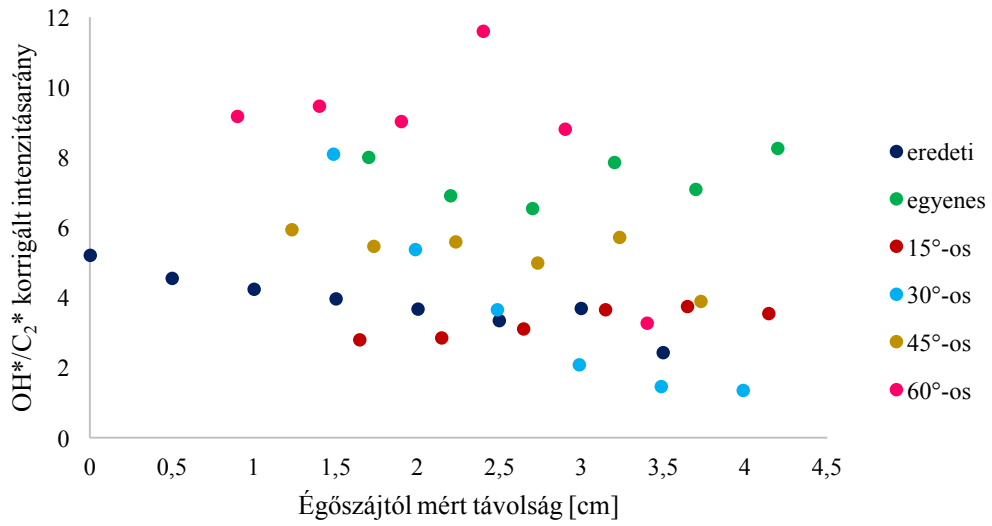
a)



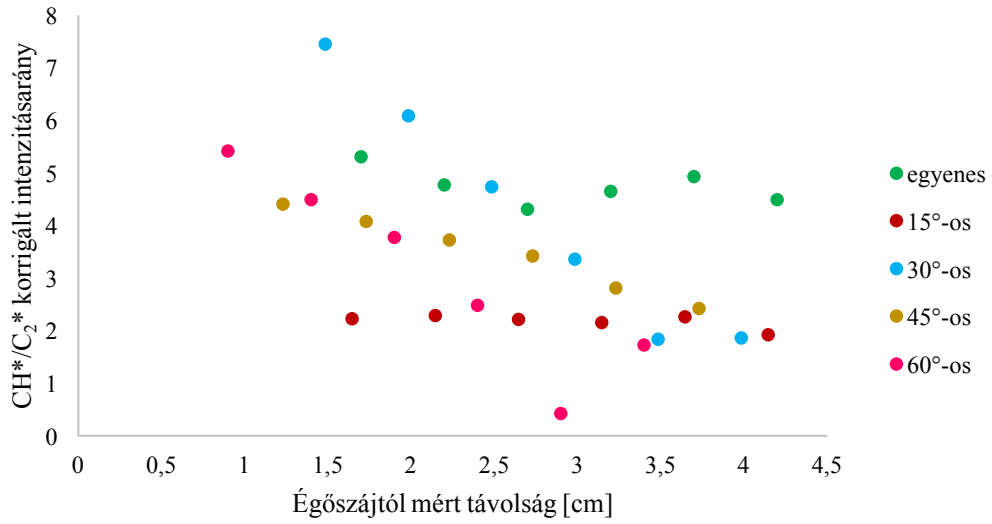
b)



M.1. ábra. CH*/C_2* intenzitásarányok 0,3 bar porlasztási túlnyomáson, *a)* sztöchiometrikus keverék esetén; *b)* szegény keverék esetén.

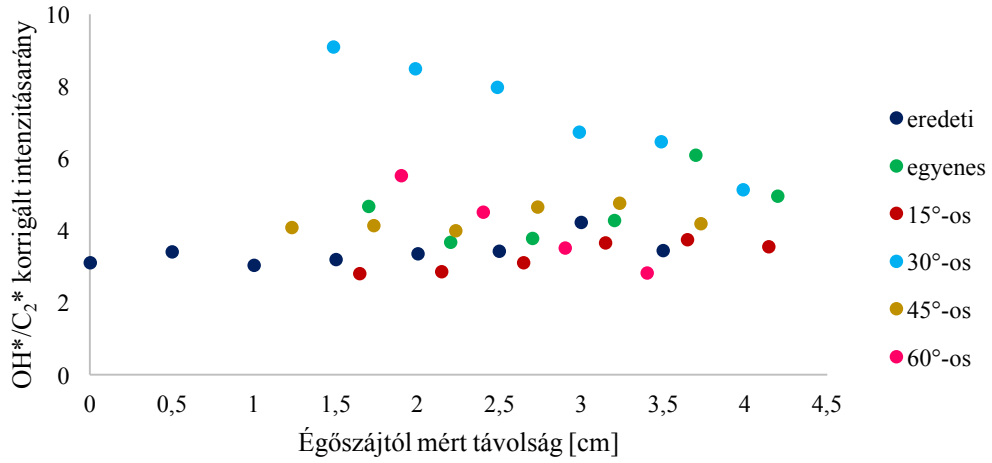


M.2. ábra. OH*/C_2* intenzitásarányok 0,3 bar porlasztási túlnyomáson, sztöchiometrikus keverék esetén.

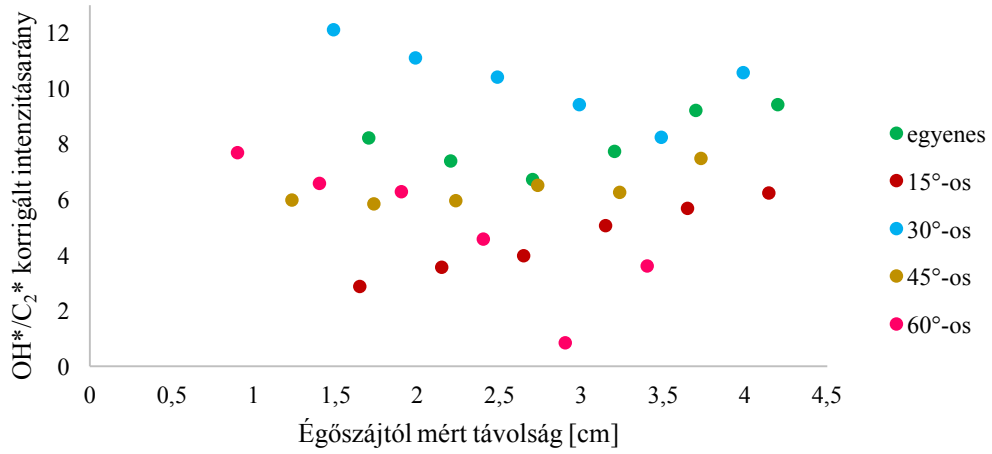


M.3. ábra. CH*/C_2* intenzitásarányok 0,8 bar porlasztási túlnyomáson, szegény keverék esetén.

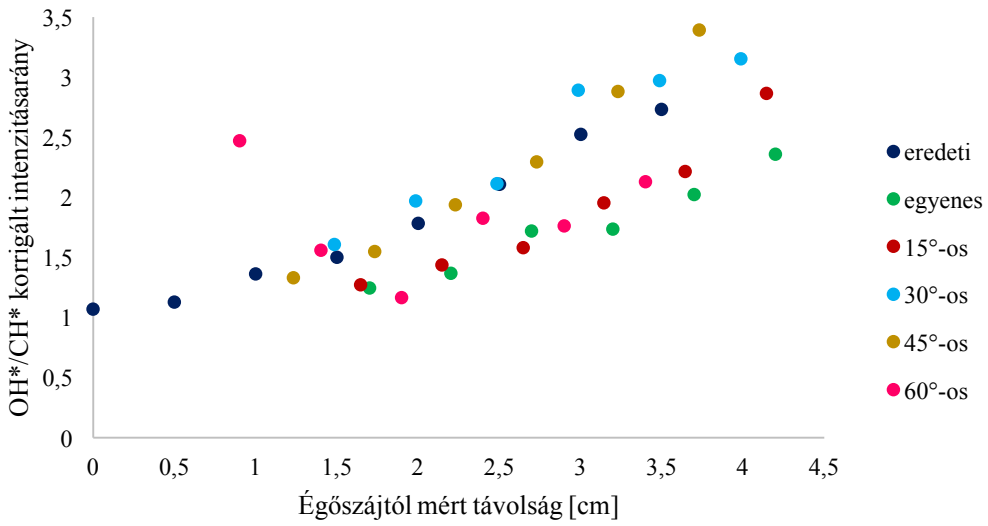
a)



b)

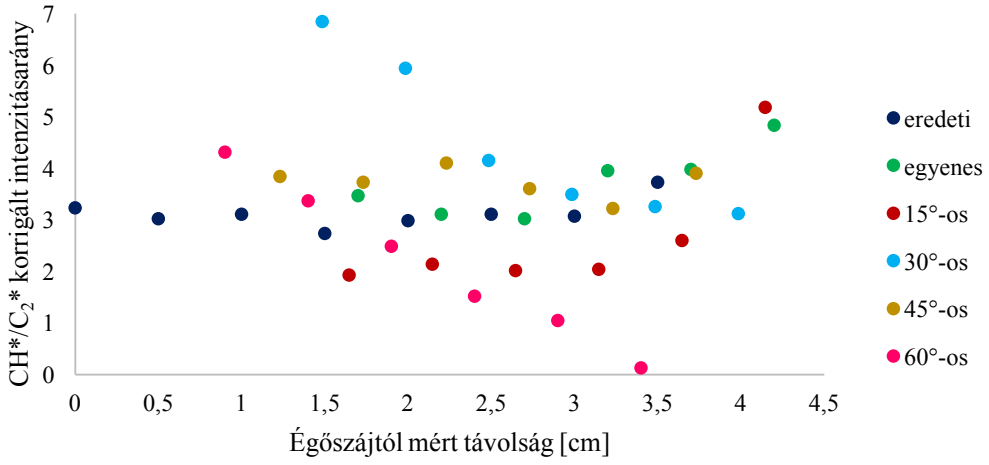


M.4. ábra. OH*/C_2* intenzitásarányok 0,8 bar porlasztási túlnyomáson, *a)* sztöchiometrikus keverék esetén; *b)* szegény keverék esetén .

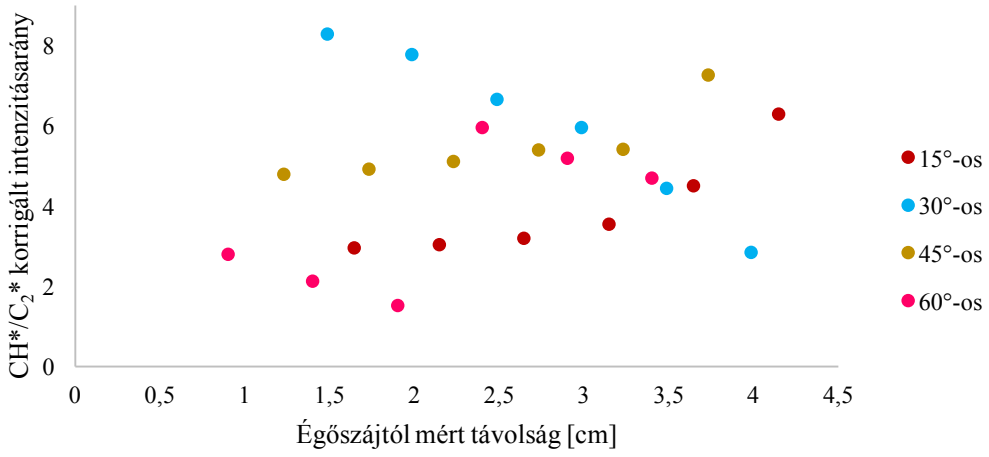


M.5. ábra. OH*/CH* intenzitásarányok 1,6 bar porlasztási túlnyomáson, dús keverék esetén.

a)

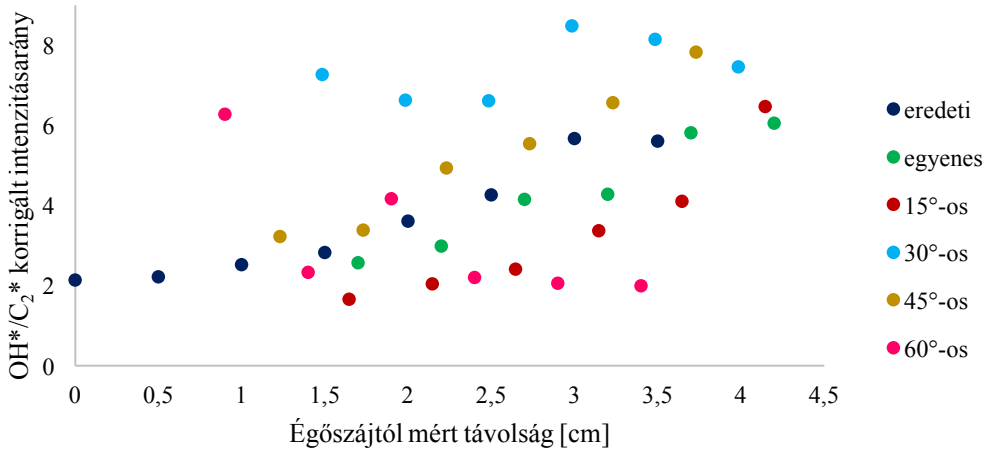


b)

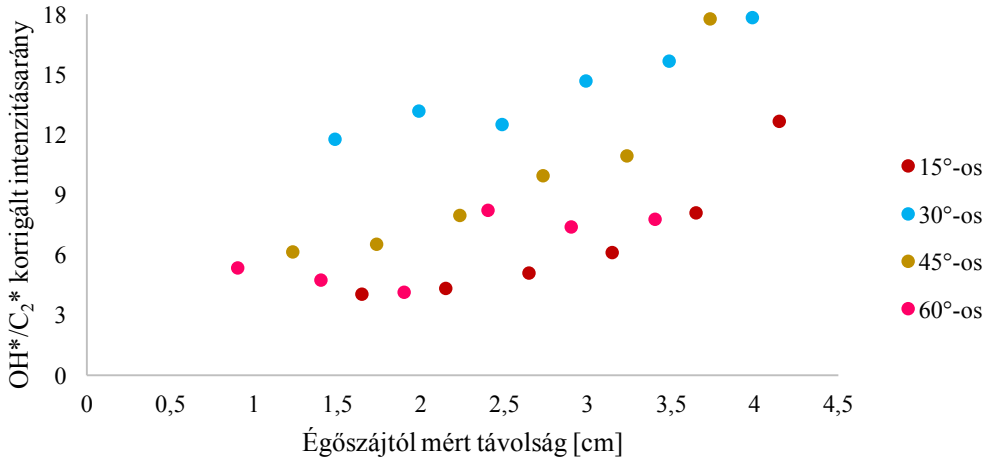


M.6. ábra. CH*/C_2* intenzitásarányok 1,6 bar porlasztási túlnyomáson, *a)* dús keverék esetén; *b))* szegény keverék esetén.

a)



b)



M.7. ábra. OH*/C_2* intenzitásarányok 1,6 bar porlasztási túlnyomáson, *a)* dús keverék esetén; *b)* szegény keverék esetén.