

# Előkeveréses égő stabilitási és spektrometriai vizsgálata

TDK dolgozat

Készítette: Hidegh Gyöngyvér (D2OGB0)

Konzulens: Józsa Viktor, doktorandusz



# Nyilatkozat

Név:	Hidegh Gyöngyvér
Neptun kód:	D2OGB0
Egyetem:	Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Kar:	Gépészmérnöki Kar
Tanszék:	Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék
Alapszak:	Energetikai mérnöki alapszak (BSc)
Szakirány:	Hőenergetika szakirány
TDK dolgozat címe:	Előkeveréses égő stabilitási és spektrometriai vizsgálata
Beadás éve:	2015 / 2016 / I.

Alulírott, Hidegh Gyöngyvér (Neptun kód: D2OGB0), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírásommal igazolom, hogy a bírálatra benyújtott TDK dolgozat kizárólag saját munkám eredménye, konzulensem útmutatásai alapján, meg nem engedett segítség nélkül magam készítettem.

A TDK dolgozat kidolgozásakor 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, 2015. október 26.

" livere

Hidegh Gyöngyvér

#### Kivonat

Manapság a gázturbinák meghatározó szereppel bírnak a repülés terén, és kiemelkedő jelentőséggel az erőművi felhasználásban. Az égőterek továbbfejlesztése a tökéletesebb és így minél jobb hatásfokú égés felé, illetve az egyre szigorodó károsanyag kibocsátási határértékek betarthatósága felé irányul. A fejlesztéseket korlátozzák az égéstérben fellépő instabilitások, azaz elsőként a lángstabilitás problémája vár megoldásra. A lángstabilitást többek között befolyásolja a kialakult áramkép, folyadék tüzelőanyag esetén annak illékonysága, a légfelesleg tényező és a porlasztási jellemzők. Az üzemanyag - levegő keverék paraméterein kívül természetesen fontos tényező az adott fúvóka kialakítása is.

Kutatásom során a tanszéki C-30-as gázturbina égőjét használom, 15 kW-os tüzelési teljesítmény mellett, gázolaj alapú láng vizsgálatára. A mérések folyamán a tüzelőanyag tömegárama állandó, az égéslevegő mennyisége viszont változik, azaz a légfelesleg-tényező is változik. A méréseket különböző porlasztónyomásokon, eltérő nyílásszögű diffúzorok használata mellett folytatom, melyek jó alapot adnak a különféle fúvóka konstrukciók összehasonlítására. Mivel a diffúzoros kialakítás használata során változik az áramkép, a stabilitási tartomány is módosul. A kísérletek során ezért különböző nyílásszögű (30°, 45°, 60°, 75°és 90°, azaz egyszerű csőtoldat), de azonos alkotójú elemeket vizsgáltam. A láng szétnyílása, majd leszakadása, azaz a stabilitás jellemzői vizuális úton, míg a kemilumineszcens összetevők fotospektroszkóp segítségével határozhatók meg. Az OH\*, CH\* és C2\* gyökök intenzitásainak arányából következtethetünk a lángban jelenlévő légfelesleg-tényezőre, és ennek ismeretében módosíthatunk az üzemi paramétereken például aktuátorok segítségével.

Az égés nyomásának növekedésével jellemzően a lángstabilitás is nő, így a légköri nyomáson történő mérések a gázturbinában lejátszódó jelenségeket a lángstabilitás tekintetében a biztonság felé eltérve támasztják alá. Korábbi mérési eredményekből ismert, hogy a lángstabilizálás közel sem triviális probléma, a diffúzor használata csupán egy lehetséges megoldás.

#### Abstract

#### Stability and spectrometry analysis of a lean premixed prevaporized burner

Nowadays gas turbines have determining role on the field of aviation, and significant function in usage as power plant. The improvement of combustion chambers tends towards the more complete and therefore the more efficient burning, respectively the capability of observing the more and stricter threshold limits of emission. The instabilities in the combustion chamber put the lid on the improvements, hence first the problem of flame stability needs to be solved. Flame stability is mostly affected by the flow field, in case of using liquid fuel - its volatility, the equivalence ratio and the vaporization's characteristic. Besides the parameters of the fuel - air blend, the nozzle's shape also plays an important role.

In my research I am using a burner of a C-30 gas turbine of the department, with 15 kW of firing power, to investigate diesel oil flames. During the measurements the fuel flow rate is constant, however the combustion air varies, so that means the equivalence ratio varies also. I am doing my studies setting variant atomizing pressure and applying different diffusers that gives a good basic for comparing several burner constructions. It is an understood thing that in case of using diffuser, the flame is going to be more stable, than using the original burner without any modification. However this effect has a minimum subtense which means that under a critical subtense the flame is not stable anymore. The features of stability – the flame's flushing and it's come away – can be determine in a visual way, while the components of the chemiluminescent signal are measured with a spectrometer. The dependence of OH\*, CH\* and C2\* radical ratio from the adjusted parameters is comparable. The chemiluminescent intensity imply the ratio of emission's components in the flame, and the factors of optimal emission.

While the burning's pressure grows, characteristically the flame stability is growing also, which means that the measurements made on atmospheric pressure are simulating the phenomena observable in the gas turbine as giving a safety. Previous measurement results shows, that the flame stability is not a trivial problem at all, the usage of diffusors – examined in the present paper – is not the only solution.

# Tartalomjegyzék

Nyi	Nyilatkozat					
Kiv	Kivonat					
Abs	stract	IV				
1.	Célkitűzés	1				
2.	Bevezetés					
	2.1. Porlasztási folyamat	3				
3.	Lángstabilitás	6				
	3.1. Lángstabilizálás csőszakaszban	8				
	3.2 Lángstabilizáló elemek	9				
4.	Fotospektroszkópia	11				
5.	Capstone C-30-as gázturbina felépítése 13					
6.	Mérőberendezés bemutatása 15					
7.	Mérés folyamata 1'					
8.	Kiértékelés 19					
9.	Stabilitási eredmények 2					
10.	Spektrometriai eredmények 2					
11.	Összefoglalás, továbblépési lehetőségek	29				
Iroc	lalomjegyzék	30				

# 1. Célkitűzés

Napjainkban a gázturbinák széleskörű felhasználása miatt (repülőgép ipar és energetika) számos kutatás folyik az optimalizálásuk, hatásfokuk, illetve hatásosságuk növelése érdekében. Ennek egy lehetséges iránya az égőtér fejlesztése, ahol az első számú probléma a lángstabilitásból adódik. A láng stabilizálása többféle módszerrel lehetséges, jelen dolgozatban különböző nyílásszögű diffúzorok használatát vizsgálom. Várhatóan jóval szélesebb légfelesleg tartományban lesz így stabil a láng, viszont valószínűleg nem minden nyílásszögű diffúzor esetében, így érdekes kérdés, milyen nyílásszögű elem esetén adódik a legstabilabb égés.

A másik probléma a lángszabályozás megvalósítása. A lángok kemilumineszcens emisszióját különböző gyökök adják, melyek intenzitásainak arányából következtethetünk a légfeleslegre, majd ezáltal szabályozhatjuk a lángot a megfelelő aktuátorok segítségével. A kutatás a szigorúan monoton függvények felé irányul, hiszen a többértékű függvények önmagukban kevéssé használhatók.

# 2. Bevezetés

A gázturbinák az üzemanyagok kémiailag kötött energiáját (fűtőértékét) hasznosítják úgy, hogy a felszabaduló tüzelőhőt mechanikai energiává alakítják, ami általában tengelyteljesítményt szolgáltat – kivéve a sugárhajtóműveknél. A gázturbinák teljesítménye a turbina fokozatokra jutó entalpiaváltozás hasznosításából származó teljesítmény és a kompresszor teljesítmény szükségletének különbsége, így érdekünk jó hatásfokú kompresszort használni. Ennek megalapozása Jendrassik György nevéhez fűződik [1].

A gázturbinák kis fajlagos súlya és térfogata különösen a közlekedésben való alkalmazásnál jelent előnyt. A repülőgépekben való alkalmazás ma már általános [2]. Napjainkban az energiaellátásban is egyre nagyobb teret kapnak a gázturbinák. A villamosenergia fejlesztésben különösen a csúcserőművi gázturbinák részesedése évről évre nő. Ezek előnye:

- egyszerű felépítés,
- kis helyfoglalás,
- rövid idő alatti telepíthetőség,
- gyors indíthatóság (terhelhetőség),
- környezetszennyező hatásuk lényegesen kisebb a hagyományos szén- és olajtüzelésű erőművekéhez képest,
- az eltávozó égéstermék energiája tovább hasznosítható pl. kombinált ciklusú erőművekben, vagy hőhasznosító egységekben, így a gazdaságosságuk is tovább növelhető.

A tüzeléstechnika területe folyton új kihívásokkal szembesül a tüzelőberendezések hatásosságának, megbízhatóságának, rugalmasságának és kiváltképp a károsanyag kibocsátás területén. Az új tüzelőtér- és égőtípusok fejlesztéséhez elengedhetetlen a berendezések folyamatos vizsgálata és a láng optimalizálása, ami bármely tüzelési folyamat jóságának alapja. Azonban a tüzelőberendezések folyamatos optimalizálására jelenleg nem túl széles a lehetőségek tárháza [3]. A gyakorlatban a legtöbb égő szabályozása – az égés fenntartásáhozfeltétlenül szükséges szabályozó rendszereken kívül – a füstgáz elemzésén

alapul, ami elegendő a kívánt légfelesleg és károsanyag kibocsátás mértékének meghatározásához.

Viszont a gázelemző készülékek által nyújtott információ a tüzelési folyamatról 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 néhány égőbeállítás 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 [4]. Emellett ez a megoldás bonyolult gyakorlati problémákat idéz elő. Első sorban azt, hogy a CO és NO<sub>x</sub> kibocsátása az előkevert, szegény keverékkel üzemelő égőtereknél ellentétes tendenciát mutatnak. Míg az alacsony láng hőmérséklet kedvező az NO<sub>x</sub> 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.

Másrészről az előkeveréses gázturbina égőterek a keverék szegénység határán üzemelnek, tehát a gázturbina sokkal inkább hajlamos komolyabb incidensek produkálására, mint például láng lefúvásra, instabilitásokra és nyomáshullámok okozta visszaégésre.

#### 2.1. Porlasztási folyamat [5][6]

A folyékony tüzelőanyagok csak azután elegyíthetők oxigénnel, ha elporlasztottuk azokat. A porlasztást a párolgás követi, ami kulcsfontosságú, mivel csak légnemű halmazállapotban lehet keverni a tüzelőanyagot az égéslevegővel, ezért az égés lefolyását korlátozza a porlasztás minősége. Mivel a tüzelőanyag pára képződése elengedhetetlen része a folyékony tüzelőanyagok égési folyamatának, a folyékony tüzelőanyagok legfontosabb

tulajdonságai azok, amelyek a páraképződést befolyásolják. A porlasztás, azaz a cseppképződés a páraképződés elősegítésének nélkülözhetetlen módszere.

Egy jól megtervezett égőnek a következőket kell biztosítania:

- a kívánt mennyiségű tüzelőanyag és levegő bejuttatását a tüzelőtérbe a megfelelő hőmennyiség felszabadulása érdekében,
- a hőfelszabadulás meghatározott lángforma mentén történjék,
- stabil gyulladást és biztonságos üzemeltetést,
- levegő és tüzelőanyag megfelelő keveredését,
- elégséges recirkulációs tartományt,
- legyen egyszerűen működtethető,
- alacsony légszennyező kibocsátást és minimális zajt,
- maximális hatékonyságot.

Összefoglalva, az égőt úgy kell megtervezni, hogy a láng az égőhöz képest meghatározott helyzetű legyen és az előre elvárt módon égjen. A láng széles égési tartományban meg kell hogy őrizze stabilitását. Ezen tényezőket leginkább az égő aerodinamikája befolyásolja.

A tüzelőanyag porlasztása során a nagyságrendileg pár 10 mikronos méretű cseppek térfogatához képest nagy felület jön létre, ami elősegíti a párolgást. Azaz, minél kisebb cseppek halmazára bontjuk a tüzelőanyagot, annál hamarabb párolog el és keveredik gőzfázisban a levegővel. Gázturbinákban alapvetően kétféle porlasztási típust alkalmaznak: nyomásos porlasztást, vagy levegő segédközeges porlasztást. Nyomásos porlasztás esetén a folyadékáram nyomása miatt a mozgási energiája meghaladja a felületi feszültség okozta erőket. A probléma ezzel a módszerrel, hogy a fúvóka geometriája jelentősen befolyásolja a porlasztás minőségét, a tüzelőanyag nyomásának csökkenése a porlasztás romlásával jár, és a fúvóka közvetlen közelében kialakuló túl nagy tüzelőanyag koncentráció magas koromképződést idéz elő.

Levegő segédközeges porlasztás esetén a folyékony tüzelőanyagot körülvevő nagy sebességű levegő okozta viszkózus súrlódás kicsiny cseppekre szakítja a tüzelőanyagot. Az üzemeltetési tartomány szélesebb egy levegő segédközeges porlasztó esetén, örvénykamrás porlasztóból viszont szükség van egy kis terhelésre beállítottra és egy nagy terhelésre, nagy tömegáramra alkalmazhatóra, amennyiben hasonlóan széles üzemi tartományt kell átfogni.

A levegő segédközeges porlasztó így egyszerűbb konstrukciót eredményezett, ezért kiszorította az örvénykamrás megoldást a repülésből. A levegő segédközeges és az örvénykamrás porlasztó metszete a 2.1. ábrán látható.



2.1. ábra: Levegő segédközeges és örvénykamrás porlasztó [6]

A cseppek középátmérőjének alakulását különböző levegő áramlási sebességek esetén a *2.2. ábra* szemlélteti. Látható, hogy a növekvő porlasztó levegő - tüzelőanyag tömegáram arányokkal a cseppek átmérője eleinte jelentősen csökken, majd egy bizonyos érték után (háromszoros levegő mennyiség után) gyakorlatilag konstans értéket vesz föl minden levegő áramlási sebesség esetén. Nagyobb áramlási sebességgel a folyadék kisebb cseppekre porlasztható.



2.2. ábra: Cseppek középátmérőjének alakulása különböző levegő áramlási sebességek esetén [6]

# 3. Lángstabilitás [5]

Az előkevert lamináris lángsebesség az a sebesség, amivel a láng áthatol a tüzelőanyag - levegő keveréken. Ez a keverék alapvető fizikai - kémiai tulajdonságától függ, ezt tehát az égő aerodinamikája nem befolyásolja. A gyakorlatban nagyon kevés égő produkál lamináris lángot, ezért az égő szájánál mért sebesség és a lamináris lángsebesség közötti kapcsolat közvetett. Ilyen áramlási körülmények között a lángfront nagyon vékony (körülbelül 1 mm, vagy gyakran még vékonyabb), és a helyzete úgy változik, hogy a lángsebesség és az áramlási sebesség egyenlő marad, ha stabil a láng.

Turbulens áramlási viszonyok között a beérkező levegő sebessége jóval nagyobb, mint a lamináris lángsebesség. A turbulencia olyan örvényeket okoz, melyek eltorzítják a lamináris lángfrontot. Ez esetben az átlag áramlási sebesség jóval nagyobb a lamináris lángterjedési sebességnél, viszont a lángfront sebessége megegyezik vele. Belátható, hogy nagy égési sebesség mellett stabil láng fönntartásához szükség van valamilyen módodon hő visszaáramoltatására, ami történhet például sugárzással, vagy a forró gáznemű égéstermékek recirkuláltatásával. Ahhoz, hogy széles határok között stabil lángot hozzunk létre, fenn kell tartani egy olyan területet a lángon belül, vagy hozzá csatlakozóan, ahol a tüzelőanyag levegő keverék az éghetőség határai között van, és ahol a közeg áramlási sebessége nem elég nagy ahhoz, hogy kioltsa a lángot.

A lángok csoportosításának egyszerű sémája a 3.1. ábrán látható.



3.1. ábra: Lángok csoportosítása [5]

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, azaz ez a láng nem stabil. A *c*) láng mérsékelt perdülettel rendelkezik, így megkezdődik az elsődleges recirkuláció, ami az égés tengelyében visszaáramló égéstermék. Eleinte a keverék áram még elég erős ahoz, hogy áttörjön ezen a recirkulációs zónán, így egy toroid alakú zóna alakul ki. Összességében a láng kiszélesül és lerövidül. Ez a láng széles recirkulációs tartományban stabil. A *d*) láng nagy perdülettel rendelkezik, az elsődleges recirkuláció legyőzi a keverék áramot és megosztja a lángot, így a középvonalban alakul ki a visszaáramlási zóna. Ez a lángtípus szélesebb stabilitási tartománnyal rendelkezik, mint a korábban bemutatottak.

Ha egy turbulens láng áramlik a szabad térbe, a 3.2. ábrán látható jelenség játszódik le. A fúvóka d<sub>0</sub> átmérőjű kilépő keresztmetszetében a sebesség a határrétegtől eltekintve állandó, u<sub>0</sub> sebességű. A fúvókából kilépő levegő sugár 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<sub>0</sub> sebességgel jellemzett átmérője a távolsággal közel arányosan csökken és körülbelül 5d0 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 u<sub>0</sub> 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 [5]. A 3.2. ábra diagramján a sugár egy adott keresztmetszetében mért um maximális sebesség és a kifúvási sebesség arányának változása látható a fúvóka átmérővel dimenziótlanított kifúvástól mért távolság függvényében. A kezdeti szakaszon a a két sebesség megegyezik egymással, majd a dimenziótlan értékük hiperbola szerint csökken.



3.2. ábra: Szabadsugár áramlás [5]

#### 3.1. Lángstabilizálás csőszakaszban

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 lángsebesség is nő, és a láng új helyzetben stabilizálódik a cső 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 visszaármlanak az égéstérbe, ami kedvez a lángstabilitásnak, ez a másodlagos recirkuláció. A *3.3.* és a *3.4. ábrán* megfigyelhető az elsődleges és másodlagos recirkuláció kialakulása. A *3.3. ábrán* a sugár szabad sugárként x<sub>p</sub> távolságban ütközik a falnak, a recirkuláció középpontja x<sub>c</sub> távolságban félúton helyezkedik el x<sub>n</sub> (ahol a keveredés 0) és x<sub>p</sub> távolság között. A *3.4. ábrán* a Borda-Carnot elemben történő recirkuláció látható.



3.3. ábra: Másodlagos recirkuláció zárt sugárban [5]



3.4. ábra: Elsődleges és másodlagos recirkuláció kialakulása [5]

#### 3.2. Lángstabilizáló elemek

Ha egy áramló közeg útjába torlasztó testet helyezünk, a közeg megkerüli azt, és mögötte alacsony nyomású tér lakul ki. Azaz a test mögött leválási buborék keletkezik, és abban van a recirkulációs zóna, melyet a *3.5. ábra* szemléltet.



3.5. ábra: Torlóelem mögött kialakuló recirkuláció [5]

A lángstabilizálás égőkővel is lehetséges, ami egy kúp alakú idom, mely körülveszi az égőszájat. Az égőkövet felhevítik, így az képes lesz hőt sugározni a keverékbe. A divergáló áramlású területen csökken a keverék sebessége, recirkulációs zóna jön létre a láng közepében, közevetlenül a fúvókával szemben, aminek köszönhetően a friss tüzelőanyag - levegő keverék kapcsolatba kerül a visszaáramló forró égéstermékkel.

Ha a láng nekiütközik egy csőnek vagy tárcsának, annak hatására tüzelőanyagban és levegőben gazdag örvények keletkeznek. Ezek egy része az áramba sodródik, ahol gyújtóforrásként szolgál, másik része pedig a torlóelem felszínén marad és újraképződik, amivel folyamatos szabályozást biztosít.

Ha diffúzort helyezünk az égőszájra, akkor a diffúzor felmelegszik, illetve a láng körül létrejön egy recirkuláló zóna. A megfelelő nyílásszögű diffúzor alkalmazásával ez a két jelenség széles tatrományon stabilizálhatja a lángot.

A lángstabilitást segítő néhány módszer a 3.6. ábrán figyelhető meg.



3.6. ábra: Lángstabilizálást segítő módszerek [5]

# 4. Fotospektroszkópia

Egyes kémiai reakciókban gerjesztett részecskék jönnek létre, melyek egy része az egyensúlyi állapotukba kerülésük során fényt bocsát ki. A kemilumineszcencia jelensége az ultraibolya és infravörös tartományokban figyelhető meg, és a reakciólépcsők az alábbiak [7]:

- 1. két kiinduló részecskéből gerjesztett részecske jön létre  $(A + B \rightarrow R^* + egyéb)$ ,
- 2. a gerjesztett részecske spontán leadja az energiatöbbletét egy foton kibocsátásával, a stabil állapota elérésének érdekében ( $R^* \rightarrow R + hv$ ).

Az elektromágneses sugárzás hullámhossza a stabil részecskétől (*R*) és az adott átalakulástól 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<sub>2</sub>\* gyökök. A reakcióegyenletek és a hullámhossz maximumok a *4.1. táblázatban* láthatók.

Gyök	Reakciók		Hullámhossz (nm)
OH*	R1: R2: R3:	$\begin{array}{l} CH+O_2 \rightarrow CO+OH^* \\ H+O+M \rightarrow OH^*+M \\ OH+OH+H \rightarrow OH^*+H_2O \end{array}$	282.9, 308.9
CH*	R4: R5:	$\begin{array}{l} C_2H + O_2 \rightarrow CO_2 + CH * \\ C_2H + O \rightarrow CO + CH * \end{array}$	387.1, 431.4
C <sub>2</sub> *	R6:	$CH_2 + C \rightarrow C_2^* + H_2$	513, 516.5
CO <sub>2</sub> *	R7:	$\rm CO + O + M \rightarrow \rm CO_2* + M$	Folytonos spektrum 350-600

4.1. táblázat: A gerjesztett részecskék reakcióegyenletei és hullámhossz maximumai [7]

Az OH\* gyökök ultraibolya sugárzást bocsátanak ki, főleg szénhidrogén lángokban keletkeznek (*R1*) és ritkábban hidrogén alapú lángokban (*R2* és *R3*). A CH\* és C<sub>2</sub>\* gyökök színképe rendre kék és zöld. A CO<sub>2</sub>\* 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 jó néhány tanulmányban vizsgálták, melyekben a fő motiváció a láng-sztöchiometria optikai jelekből való megbecslése volt [7][8][9][10]. Tüzelőanyag szegény lángokban magasabb az OH\*, CH\*, C<sub>2</sub>\* és CO<sub>2</sub>\* gyökök intenzitása. Az OH\* és CH\* gyökök emissziós csúcsát 0,91 <  $\lambda$  < 1-nél találták, a C<sub>2</sub>\*-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 [7].

A nyomás szintén erősen befolyásolja az emissziós spekrtum 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 nem lehetséges.

A különböző összetételű és halmazállapotú lángok spektruma lényegesen eltérő. Például ha adott mennyiségű tisztán földgáz tüzelőanyaghoz egyre több hidrogént keverünk, a CH\* és C<sub>2</sub>\* 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 intenzitás csúcsok teljesen eltűnnek.

A láng kemilumineszcens jeleinek megfigyelése széles körben elterjedt technológia az égés diagnosztikájában [8][9][10]. Főleg 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 légfelesleg tényezővel pedig exponenciális kapcsolatot mutat:

$$I = k \cdot m \cdot \lambda^{-\beta}$$

ahol k és  $\beta$  a kémiai összetevőre vonatkozó konstansok, valamint m a tömegáram. Ez azt jelenti, hogy az említett gyökök intenzitásának aránya csak a légfelesleg tényező függvénye, azaz mérésükkel következtethetünk az légfeleslegre.

# 5. Capstone C-30-as gázturbina felépítése [11][12]

A Capstone C-30 típusú mikro-gázturbina az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék laboratóriumában található, a mérésekhez ennek a légporlasztóját használtam. A teljes mikro-gázturbinás egység magában foglalja a gázturbinát, generátort, tüzelőanyag ellátó szabályzó szelepeket, frekvencia átalakító egységet és vezérlő egységet. Metszete a *5.1. ábrán* látható.



5.1. ábra: Capstone C-30 metszete [12]

A generátor, kompresszor és turbina egy tengelyen helyezkedik el. Az egyszerűbb üzemeltetés érdekében és a nagy fordulatszámokra való tekintettel a tengely megtámasztását légcsapágyak végzik. A generátor négypólusú állandó mágneses háromfázisú generátor, mely nagyfrekvenciás váltakozó áramot állít elő. A levegőt a generátoron keresztül szívja be a kompresszor, ezzel biztosítva annak hűtését. A kompresszor és a turbina is centrifugális kialakítású, rendre radiális és axiális kiömléssel rendelkeznek. A gyűrűs fordítókamrás tüzelőtérbe három tüzelőanyag fúvóka nyúlik bele, melyek szimmetrikusan vannak elhelyezve. A hatásfoknövelés érdekében egy belső hőcserélő található a gázturbinában. A kompresszorból kilépő nagynyomású levegő keresztül áramlik ezen a füstgáz/levegő rekuperátoron, így megtörténik a levegő felmelegítése. A fúvókákon beáramló tüzelőanyag a levegővel keveredve a tüzelőtérben elég. A forró égéstermék a turbinán expandál, majd a rekuperátorba kerül. Innen kilépve a füstgáz hőmérséklete még mindig ~275 °C, azaz megfelelő kapcsolt melegvíz termelésre, ezért egy víz/füstgáz hőcserélőbe van bevezetve.

A mikro-gázturbina névleges villamos teljesítménye 30 kW, az ehhez tartozó fordulatszám 96000 1/min. A villamos teljesítményre vonatkoztatott hatásfoka 26%.

# 6. Mérőberendezés bemutatása

A *6.1. ábrán* látható tesztpad környezeti nyomáson üzemelt, 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.

A szükséges levegő mennyiség szállítására egy ventilátor szolgál, a szállított levegő térfogatárama egy rotaméterről olvasható le. A különböző térfogatáramok beállítását egy frekvenciaváltó teszi lehetővé.

A levegő előmelegítés hőmérséklete egy szabályozható előmelegítővel állítható be a turbina üzemi paramétereinek megfelelően.

A gázolajat egy digitális mérlegre helyezett edényből egy feszültségvezérelt fogaskerékszivattyú juttatta az égőbe. A tüzelőanyag fogyasztás mérése az Országos Mérésügyi Hivatal által hitelesített 0,2 g-os bizonytalanságú mérleggel történt. Az üzemanyag aktuális súlyát egy számítógép rögzítette, így annak időbeli változásából kiszámítható a fogyasztás.

A porlasztó levegő térfogatárama szintén egy rotaméter segítségével mérhető, a kívánt nyomás a nyomásszabályozóval állítható be.

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

A tesztpad 15 kW-os tüzelési telejesítményre lett tervezve, így minden mérési beállítást ilyen körülmények között vizsgáltunk. Ahogy a *4. fejezetben* is ismertettem, az intenzitás arányos a tüzelőanyag tömegáramával, azaz az intenzitás arányok függetlenek a tüzelési teljesítménytől, ezért a különböző tüzelési teljesítmény mellett folytatott mérések valószínűleg nem változtatnának az eredményeken. A 43 MJ/kg fűtőértékű gázolaj tömegárama 0,35 g/s volt.

15



6.1. ábra: Mérőberendezés [13]

A 6.2. ábrán látható a C-30-as mikro-gázturbinából kivett üzemanyag fűvóka. 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, azaz nő a tartózkodási idejük ebben a térrészben. Tehát a tüzelőanyag részecskéknek több ideje van párologni, ezzel homogénebb keveréket tudnak az égéslevegővel alkotni.



6.2. ábra: Üzemanyag fúvóka [13]

A mérések során az eredeti fúvóka konstrukció vizsgálata mellet, az égőszájra helyezett különböző nyílásszögű (30°, 45°, 60°, 75°és 90°, azaz egyszerű csőtoldat), de azonos alkotójú diffúzorokkal való megtoldott változatát is vizsgálom.

# 7. Mérés folyamata

A mérések a következő képpen zajlottak: adott tüzelőanyag tömegáram és fúvóka konstrukció mellett állandó porlasztónyomáson, egyenlő lépésközönként fokozatosan növeltük az égéslevegő mennyiségét 12 kg/h-tól, amíg a láng le nem szakadt. Minden egyes pontban mentettük a spektroszkóp által mért adatokat, majd újabb porlasztónyomáson végeztük el ugyan ezt. A vizsgált porlasztónyomások a következők voltak: 0,3 bar; 0,5 bar; 0,8 bar; 1,1 bar; 1,6 bar és 2,2 bar. A legkisebb porlasztónyomás 0,3 bar volt, mivel körülbelül ennyi a Capstone gázturbina becsült üzemi porlasztónyomása, valamint kisebb porlasztónyomások mellett a porlasztás már nem megfelelő. A többi nyomást a könnyű reprodukálhatóság miatt választottuk, mivel így egész osztásoknál tudtuk a rotaméterről leolvasni a levegő mennyiséget. Az átlagos cseppátmérő jelen körülmények között a következő képlet szerint határozható meg [14]:

$$SMD = 0,48 \cdot d_0 \cdot \left(\frac{\sigma}{\rho_{pl} \cdot U_R^2 \cdot d_0}\right)^{0,4} \cdot \left(1 + \frac{\dot{m}_{tii}}{\dot{m}_{pl}}\right)^{0,4} + 0,15 \cdot d_0 \cdot \left(\frac{\mu_{tii}^2}{\sigma \cdot \rho_{tii} \cdot d_0}\right)^{0,5} \cdot \left(1 + \frac{\dot{m}_{tii}}{\dot{m}_{pl}}\right)^{0,4}$$

ahol  $d_0$  ( $\mu m$ ) a porlasztó szájának átmérője,  $m_{pl}$  és  $m_{t\bar{u}}$  (kg/s) rendre a porlasztó levegő és a tüzelőanyag tömegárama,  $\rho_{pl}$  és  $\rho_{t\bar{u}}$  ( $kg/m^3$ ) rendre a porlasztó levegő és tüzelőanyag sűrűsége,  $U_R$  (m/s) a porlasztó levegő relatív sebessége a tüzelőanyag sebességéhez képest,  $\sigma$  (N/m) a cseppek felületi feszültsége és  $\mu_{t\bar{u}}$  (kg/ms) a tüzelőanyag dinamikai viszkozitása.

Az átlagos cseppátmérrő alakulása a porlasztónyomás függvényében a 7.1. ábrán látható. Mivel a görbe kisebb porlasztónyomásokon meredekebb, így ebben a tartományban érdemes sűrűbbre választani a mérési pontokat, míg nagyobb nyomásokon már kevésbé meredek, így itt praktikusabb nagyobb lépésközöket hagyni.



7.1. ábra: Átlagos cseppátmérők a porlasztónyomás függvényéban

### 8. Kiértékelés

Ismert, hogy az OH\* gyök intenzitása közvetlen mérhető, mivel ehez nem adódik hozzá másik kemilumineszcens összetevő intenzitása. Ez nem igaz a CH\* gyökre, mivel ehhez hozzáadódik a CO<sub>2</sub>\* gyök szélessávú emissziója 310-600 nm között. Ezen kívül a fekete test sugárzást is számításba kell venni, ami nő a láng fényességével. Ez a jelenség a koromképződés előjele és megfigyelhető a spektrumban. Azaz a CH\* gyök kemilumineszcens intenzitását korrigálni kell a fekete test sugárzás figyelembe vételével. Mivel a maximális lánghőmérséklet 2000 K körül várató, az OH\* gyök intenzitását ez nem befolyásolja, így ezt az intenzitást nem kell korrigálni. Egy lehetséges megoldás [13] a kemilumineszcens intenzitás korrigálására, hogy az adott gyök emissziós csúcsából kivonjuk a csúcs melletti jelet. Ez a következő képpen történt: a csúcsnál egy alacsonyabb és magasabb hullámhossz tartományon 5-5 nm szélességű tartományon először átlagoltuk az intenzitásokat, majd megfelelően súlyoztuk a tartományokat.

Az OH\*/CH\* korrigált intenzitás arányok hibája a következő képlet szerint számítható:

$$\frac{OH^*}{CH^*_{korr}}\Big|_{hiba} = \sqrt{\left(\frac{l}{k_1 \cdot CH^*_{korr}}\right)^2 + \left(\frac{l \cdot OH^*}{k_2 \cdot (CH^*_{korr})^2}\right)^2}$$

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 osztása egységnyi. Az első tag az OH\* gyök szerinti derivált, a második tag a CH\* gyök szerinti derivált. Ennek a hibának a maximális értéke 1,4%, ez olyan kicsi, hogy a hibasávok a jelölők takarásába kerülnének, ezért nincsenek a *10.1. ábra* diagramjain ábrázolva.

A légfelesleg tényező számítása a következő képpen történt:

$$\lambda = \frac{m_{pl} + m_{\ell l}}{\dot{m}_{tii} \cdot L_0},$$

ahol  $L_0$  (kg/kg) az elméletileg szükséges levegőmennyiség 1 kg tüzelőanyag tökéletes égéséhez. Az elméleti levegőszükséglet a tüzelőanyag összetételéből számítható, ami szabványosított [15].

A légfelesleg tényező hibaszámítása a következő képlet szerint történt:

$$\lambda_{hiba} = \sqrt{\left(\left(\frac{po_{rpl} \cdot 30}{v_{pl} \cdot 4} + \frac{po_{rpl} \cdot 3}{4}\right) \cdot \frac{\dot{m}_{pl}}{\dot{m}_{til} \cdot L_0}\right)^2 + \left(\left(\frac{po_{r\ell l} \cdot 30}{v_{\ell l} \cdot 4} + \frac{po_{r\ell l} \cdot 3}{4}\right) \cdot \frac{\dot{m}_{\ell l}}{\dot{m}_{til} \cdot L_0}\right)^2 + \left(\frac{0.2}{30 \cdot \dot{m}_{til}^3 \cdot L_0}\right)^2}$$

ahol  $po_{rpl}$  és  $po_{rel}$  (%) rendre a porlasztó levegő és az égéslevegő térfogatáramát mérő rotaméter pontossági osztálya,  $v_{pl}$  (*l/perc*) és  $v_{el}$  ( $m^3/h$ ) rendre a polasztó levegő és égéslevegő térfogatárama. A porlasztó levegőt mérő rotaméter pontossági osztálya 4%, az égéslevegőt mérő 2,5%. A pontossági osztályok 1/4-e vonatkozik a teljes skálára, 3/4-e a mindenkori leolvasási pontosság. A porlasztó levegő térfogatáramát mérő rotaméter 30 l/perc-ig, az égéslevegő térfogatáramát mérő rotaméter 30 m<sup>3</sup>/h-ig van skálázva. A mérlegnek 0,2 g-os a pontatlansága, és 30 s-onként átlagolja a mért értékeket. A képlet első tagja az égéslevegő tömegárama szerinti derivált, második tagja a porlasztó levegő tömegárama szerinti derivált (mivel a közegek sűrűségét nem mértük, csak számítottuk, így a deriválások valójában a térfogatáramók szerint történnek). Mindkét tagban az összeg első tagja a teljes skálára vonatkoztatott bizonytalanságot veszi figyelembe, a második tagja a leolvasási pontatlanságot. A képlet harmadik tagja a mérleg bizonytalanságából adódó hibát veszi figyelembe. A légfelesleg tényező számításából adódó pontatlanságok a *10.1. ábrán* vannak feltüntetve hibasávokkal.

# 9. Stabilitási eredmények

A stabilitási vizsgálat a különböző nyílásszögű diffúzorok hatásával foglalkozik a lángstabilitás vonatkozásában. A mérések során a következő jellemzők voltak megfigyelhetők: a láng bistabillá válása, szétnyílása, majd leszakadása. A láng bistabillá válása alacsonyabb égéslevegő tömegáramnál következett be, mikor a láng egyre nagyobb perdülettel kezdett rendelkezni, így az elsődleges recirkuláció elkezdte az erősen világító stabil lángot egy másik stabilitási tartományba átvinni. Miután tovább növeltük az égéslevegő mennyiségét, az elsődleges recirkuláció legyőzte a keverék áramot és megosztotta a lángot, így a középvonalban kialakult a visszaáramlási zóna. Ez mindaddig fennmaradt míg elértük azt az áramlási sebbességet, amivel a lángterjedési sebesség már nem tudott egyensúlyt tartani, ezért a láng kialudt.

A stabilitási eredmények a 9.1. ábrán láthatók. A diagramok függőleges tengelyén az adott égőszáj kialakítások olvashatók, a vízszintes tengelyen pedig a légfelesleg tényező található. A diagramokon 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.

Mindegyik diagramon egyértelműen látszik, hogy a 60° és 75°-os nyílásszögű diffúzorok használata eredményezte a legszélesebb stabilitási tartományt, és 2-2,4-es légfelesleg tényező étrékig volt stabil a láng. A másik szembetűnő részlet, hogy a porlasztónyomás növekedésével, az előbbi két konstrukciót kivéve minden esetben jóval korábban aludt ki a láng, mint a legkisebb mért porlasztó nyomás (0,3 bar) esetében. Azaz 0,3 baron a legkisebb a stabilitási tartományok közti differencia. Ezen a nyomáson a legszélesebb tartomány a szétnyíló láng tartománya.

0,5 baron később kezdett bistabillá válni a láng, viszont ez nem jelentette azt, hogy később is aludt ki. Kivéve az eredeti és az egyszerű csőtoldatos kialakítást, ahol már az 1,6-os légfelesleg tényező értéket sem érte el a láng. Az eredeti kialakításhoz tartozó eredményeket összevetve az látszik, hogy 0,3 baron a karakterisztika még hasonló a többi kialakításéhoz, azaz kb. 1-es légfelesleg tényező értékig a láng stabil, egyenes alakú.

21

Egy rövidebb bistabil időszak után újból stabilizálódik szétnyíló formában, és majdnem eléri az 1,8-as légfelesleg tényező értéket mielőtt kialudna. A porlasztónyomás növekedésével a szétnyíló lángalak fennállása egyre kisebb tartományban figyelhető meg, majd teljesen eltűnik. A bistabil tartománynál hasonló a helyzet, 1,6 barnál már csak egyenes láng figyelhető meg, ami viszont majdnem 1,6-os légfelesleg tényező értékig stabil.

0,8 baron a legszélesebb a bistabil tartomány, összevethető méretű a stabil tartományokkal. Az eddigi, 75°-os nyílásszögű diffúzornál megjelenő legkésőbb kialvó lángnál hosszabb életű a 60°-os nyílásszöghöz tartozó láng, és ez a porlasztó nyomások növelésével így is marad.

1,1 baron és magasabb porlasztónyomásokon egyértelműen látszik, hogy a 60° és 75°hoz tartozó láng jóval nagyobb légfelesleg tényező értékig képes fennmaradni. Az egyenes láng tartománya minden kialakításnál kb. ugyanaddig tart, viszont az előbb említett két kialakítás esetében nem alszik ki a láng ezután, vagy a bistabillá válása után, hanem átlendül egy másik stabilitási tartományba és tovább ég. A legszembetűnőbb különbség 1,6 baron figyelhető meg, ahol a 60° és 75°-os kialakítás esetében a láng kb. 2,3-as légfelesleg tényező értékig képes fennmaradni, míg a többi kialakításnál már kb. 1,6-os légfelesleg tényező értéknél kialszik. Mivel a láng begyújtása kb. 0,8-as légfelesleg tényezőnél történt, ez majdnem kétszeres stabilitási tartományt jelent! 2,2 baron is még jelentős a különbség, a 60° és 75°-os esetben kb. 2,1-es légfelesleg tényező értékig ég a láng, míg a többi kialakításnál 1,5-ös légfeleslegnél alszik ki.



9.1. ábra: Stabilitási eredmények

# 10. Spektrometriai eredmények

A spektrometriai vizsgálat célja adott porlasztó nyomáson a különböző nyílásszögű diffúzorok használata mellett fellépő intenzitások arányának összehasonlítása. A *10.1. ábrán* látható a különböző porlasztónyomások esetében mért OH\* és CH\* gyökök intenzitásának aránya a légfelesleg tényező függvényében az egyes fúvóka kialakításoknál.





*10.1. ábra:* OH\*/CH\* korrigált intenzitás arányok

A legszembetűnőbb, hogy az egyszerű csőtoldat esetén kisebb porlasztónyomásokon a többi kialakítástól lényegesen eltérő jelleggörbét látunk. Ez adódhat az egyes gyökök nagy léptékű változásától, illetve mindkét gyök egy irányba történő változásától, ezért érdemes megvizsgálni külön az OH\* és CH\* gyökök intenzitását. Mivel a többi diffúzor esetében jó közelítéssel együtt futnak az intenzitás arány vonalak, egyet kiválasztottam közülük és arra is vizsgáltam a két gyök intenzitását. A választás a 75°-os diffúzorra estett, mivel ez esetben tapasztaltuk az egyik legstabilabb lángot, és e mellett az eredeti konstrukciót is ábrázoltam az összehasonlíthatóság végett. Mivel 0,3 és 2,2 bar között a görbék alakulásában egy folyamatot lehet észrevenni, ezen a két szélső nyomáson láthatók az intenzitások a *10.2. ábrán*.



10.2. ábra: OH\* és CH\* gyökök intenzitása

Minden esetben az látható, hogy az összetartozó görbe párok hasonló trenddel futnak, egymáshoz képest nincs hirtelen kiugrás. Az egyszerű csőtoldat esetén viszont 0,3 baron megfigyelhető, hogy a két görbe távolsága egymástól nagyobb, mint a másik két esetben. Amíg a 90°-hoz tarozó OH\* intenzitása a legmagasabb, úgy szintén a 90°-hoz tartozó, CH\* intenzitás a legkisebb. Ezzel magyarázható a *10.1. ábrán* látható kádgörbe jelleg.

A *10.1. ábra* diagramjain látható, hogy a diffúzorok használata mellett mért intenzitás arányokhoz tartozó görbék trendje teljesen eltér az eredeti esetben mérttől. Így ez a különbség jól szemlélteti, hogy milyen jelentős változást okoz egy lángstabilizáló elem a láng összetételében.

Az intenzitás arány karakterisztikák meghatározásának az a célja, hogy lehetőség legyen ez alapján szabályozó algoritmust írni a lángszabályozásra. Belátható, hogy ez egy gyökpár figyelembe vételével csak monoton függvények esetén valósítható meg. A *10.1. ábra* diagramjait ilyen szempontból megvizsgálva azt látjuk, hogy egyik kialakítás sem felel meg ennek a kritériumnak, a függvények legjobb esetben is kétértékűek. Ez a probléma maga után vonja, hogy más kemilumineszcens gyökök intenzitás arányát is vizsgáljuk. A *10.3. ábra* a korrigált CH\* és  $C_2$ \* gyökök intenzitás arányát szemlélteti.





10.3. ábra: CH\*/C2\* korrigált intenzitás arányok

A CH\*/C<sub>2</sub>\* korrigált intenzitás arányok hibája az OH\*/CH\* korrigált intenzitás arányokhoz hasonlóan számítható. A hibák százalékos bizonytalansága eltérő, átlag értékük 0,8%, a maximális hiba pedig 4,5%-ra adódik, viszont a tengely léptéke miatt a jelölők kitakarják a hibasávokat.

A 10.3. ábra diagramjain az egyszerű csőtoldat kivételével a többi diffúzorhoz tartozó jelleggörbék a kisebb nyomásokon (1,1 barig) közel lineáris karakterisztikájúak, azaz egyértékű függvények. Magasabb nyomásokon már nem tisztán közel lineáris a diffúzorok esetén látható jelleg, kis légfelesleg tényező értékeknél fordított a görbék monotonitása. Azonban jellemzően a modern tüzelőberendezéseket szegény körülmények közt üzemeltetjük az alacsony kibocsátás elérése éredekében, így az anomália a görbék elején nem feltétlenül releváns. Az eredeti kialakítás esetében az figyelhető meg, hogy egyedül 0,3 baron nem monoton függyvény a gyökpárok aránya, tehát ebben az esetben is eltérő ez a kararterisztika a diffúzoros esetekétől, mégha nem is olyan látványosan, mint az OH\* és CH\* gyökök intenzitásának arányánál.

Ez azt jelenti, hogy a CH\*/C<sub>2</sub>\* korrigált intenzitás arányok figyelembe vételével kialakítás és porlasztónyomás szerint is viszonylag széles skálán lehetőség van szabályozó algoritmus írására.

# 11. Összefoglalás, továbblépési lehetőségek

A diffúzorok alkalmazása az elvárásoknak megfelelően bizonyította, hogy ez egy jó módszer a lángstabilizálásra. Láttuk, hogy a legstabilabb eredményeket a 75°-os és a 60°-os elemek használatánál kaptuk, azaz volt hogy a 75°-os, volt hogy a 60°-os diffúzor esetében volt stabilabb a láng. A továbbiakban érdemes lehet optimalizálni a nyílásszöget, megkeresni a 75° és 60° között azt a szöget, amelyiknél minden esetben a legstabilabb a láng. A diffúzorok alkalmazása a gázturbina égőterekben nem triviális, hiszen az utólagos beépítést akadályozhatja a hely hiánya, illetve az, hogy az égőtér kiképzése áramlástani szempontból optimalizálva van, és hiába a lángstabilizáló elem, az égés összhatásfokán csak rontana. Új égőtér tervezésekor a lángstabilizáló elem alkalmazásának határt szabhatnak a költségek és az égőtér méreteinek korlátjai. Összefoglalva, a tesztpadon kiemelkedően teljesítő nyílásszögű diffúzorok gázturbinabeli alkalmazását rendszer szinten kell vizsgálni, az égőtér egyéb paramétereinek figyelembe vételével.

Az irodalomban legtöbbször megtalálható OH\* és CH\* gyökök kemilumineszcens intenzitás arányának mérése ez esetben tapasztalataim szerint nem alkalmas arra, hogy szabályozó algoritmus segítségével kontrollálhassuk a lángot. Ha a CH\* és C<sub>2</sub>\* gyökök intenzitás arányát vizsgáljuk, több esetben egyértékű függvényeket kapunk, ami így lehetővé teszi szabályozó algoritmus alkalmazását a lángszabályozásra.

Ahhoz, hogy teljes képet lehessen adni a diffúzorok, különböző porlasztónyomások és légfeleslegek hatásáról, füstgázelemzést szükséges végezni az egyes esetekben, hiszen napjainkban egyre nagyobb prioritást kap a károsanyag kibocsátás csökkentése. Ha a füstgáz bármely összetevőjének koncentrációja átlépi a rá előírt kibocsátási határértéket, hiába a diffúzor stabil tulajdonsága, nem lehet használni. Így a későbbiekben ezek a mérések további fontos következtetésekhez vezethetnek.

# Irodalomjegyzék

- [1] Penninger Antal: Kalorikus Gépek, 2013. 6. fejezet
- [2] Dr. Fülöp Zoltán: Gázturbinák, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975
- [3] Javier Ballestera, Tatiana García-Armingol: Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames, Progress in Energy and Combustion Science 36 (2010) 375–411
- [4] Nicolas Docquier, François Lacas and Sébastien Candel: Closed-loop equivalence ratio control of premixed combustors using spectrally resolved chemiluminescence measurements, Proceedings of the Combustion Institute, Volume 29, 2002/pp. 139– 145
- [5] Dr. Palotás Árpád Bence: Ipari tüzeléstechnika, Nemzeti Tankönyvkiadó, 2009
- [6] Penninger Antal: Tüzeléstechnika, Budapest, 2014
- [7] Javier Ballestera, Tatiana García-Armingol: Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames, Progress in Energy and Combustion Science 36 (2010) 375–411
- [8] B. Higgins, M.Q. McQuay, F. Lacas, J.C. Rolon, N. Darabiha, S. Candel: Systematic measurements of OH chemiluminescence for fuel-lean, high-pressure, premixed, laminar flames, Fuel 80 (2001) 67–74
- [9] B. Higgins, M.Q. McQuay, F. Lacas, S. Candel: An experimental study on the effect of pressure and strain rate on CH chemiluminescence of premixed fuel-lean methane/air flames, Fuel 80 (2001) 1583–1591
- [10] Daniel Guyot, Felix Guethe, Bruno Schuermans, Arnaud Lacarelle, Christian Oliver Paschereit: CH\*/OH\* chemiluminescence response of sn atmospheric premixed flame under varying operating conditions, Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air (2010)
- [11] <u>http://physics.oregonstate.edu/~hetheriw/energy/topics/doc/elec/msw/landfill/</u> <u>SpecSheetlandfill-digester.capstone.pdf</u> (Capstone Model 330 Micro Turbine System Manual)

- [12] <u>http://remotelab.energia.bme.hu/index.php?page=capstone1&lang=hu</u> (Capstone C-30 mikrogázturbina bemutatása)
- [13] V. Józsa, A. Kun-Balog, Spectroscopic analysis of crude rapeseed oil flame, Fuel Processing Technology (2015), http:// dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.08.011
- [14] Arthur H. Lefebvre, Dilip R. Ballal: Gas Turbine Combustion, Third Edition, CRC Press, 2010
- [15] MSZ EN 590:2013, Gépjármű-hajtóanyagok. Dízelgázolaj. Követelmények és vizsgálati módszerek, ICS 75.160.20 Folyékony tüzelőanyagok