



Gőzporlasztású gázturbina égő vizsgálata

TDK dolgozat

Készítette: Józsa Viktor (Yo1FNV)

Jelenlegi szak: BME Gépészmérnök MSc, 2. évfolyam

Konzulensek: Dr. Sztankó Krisztián, adjunktus, EGR Tanszék
Kun-Balog Attila, PhD hallgató, EGR Tanszék

A dolgozat bemutatását a TÁMOP - 4.2.2.B-10/1--2010-0009 "Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben" című program támogatta.

NYILATKOZAT

Név:	Józsa Viktor
Neptun kód:	Y01FNV
Egyetem:	Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Kar:	Gépészmérnöki Kar
Tanszék:	Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék
Mesterszak / Szakirány:	Gépészmérnöki mesterszak (MSc képzés) Áramlástechnika szakirány
TDK dolgozat címe:	Gőzporlasztású gázturbina égő vizsgálata
Beadás éve:	2012 / 2013 - I.

Alulírott, Józsa Viktor (Y01FNV), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással 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, és a szerzői jogi szabályoknak megfelelően kezeltem (a szükséges lábjegyzet / végjegyzet hivatkozásokat, valamint az ábrák hivatkozását megfelelően helyeztem el).

Egyúttal elfogadom, hogy a TDK dolgozatban szereplő tudományos eredményeket a konzulensem Tanszéke felhasználhatja további kutatási vagy oktatási célokra.

Budapest, 2012. október 29.

Józsa Viktor

Kivonat

Napjaink kapcsolt energiatermelésében egyre inkább a villamos áram előállításának irányába tolódik el az igény. Az általunk végzett kutatás erre épült. Hazai folyadék halmazállapotú megújuló tüzelőanyagok közül a biodiesel és a bioetanol emelkedik ki. Esetünkben utóbbi alkalmazását vizsgáltuk gázturbinás környezetben. Mivel ennek a kizárólagos felhasználása elég költséges lenne, ezért különböző koncentrációjú vizes oldatait is megvizsgáltuk.

A turbinából kilépő forró füstgáz hőtartalmával előállított etanol-víz keverék gőze, mint porlasztó segédközeg hatását elemeztük. A módszer segítségével csökkenthető az elsődleges tüzelőanyag, jelen esetben dízelolaj felhasználása. Megújuló energiaforrás alkalmazásával a környezetterhelést csökkenthető és a megtermelt villamos teljesítményre vonatkoztatott hatásfok javulása is kimutatható. A vizsgált lángképek az eredeti levegővel történő porlasztáshoz képest homogénebbek voltak, ami kedvező a turbina élettartamát tekintve az egyenletesebb hőmérséklet eloszlás miatt. A módosított konfigurációt akusztikai és emissziós szempontokból is értékeltük.

Egy kísérleti próbapad segítségével vizsgáltunk a folyadéküzemű Capstone C330-as típusú gázturbina üzemanyag fúvókáját. Forrcsővek alkalmazásával két lépcsőben gőzölgöttük el az etanol-víz keveréket, amit a fúvókás porlasztó segédközegeként alkalmaztunk. Mivel a megoldás nem a kompresszor kilépésénél uralkodó nyomásra támaszkodik, így szélesebb skálán tudtuk változtatni az üzemi körülményeket. Elemeztük a lángképeket, így meghatároztuk a porlasztást befolyásoló tényezőket és azok hatásait az égés minőségére.

Abstract

Nowadays in cogeneration the demand shifts towards electricity production. Our research was based on this statement. Biodiesel and bioethanol are dominant fluid type renewable fuels in Hungary. The last one was used in gas turbine environment. Because using the pure ethanol is expensive, different water-alcohol compositions were also tested.

Ethanol-water compound steam can be produced by the gas turbine's exhaust gas heat content. Our aim was analyzing the effect of these auxiliary mediums on vaporizer system. With this method the demand for main fuel, as for us diesel oil could be reduced. Applying renewable energy resources will reduce our ecological footprint. Last but not least efficiency improvement can be achieved for a certain electric performance. During test runs, we found that the atomization with pure or mixture steam resulted more homogeneous flame. Because of the more uniform temperature distribution, turbine's life can be extended. The modified configuration was evaluated also from acoustics and emission viewpoint.

Our test pad was equipped with a fluid fueled Capstone C330 gas turbine airblast atomizer. Ethanol-water compound steam was produced in boiler pipe system in two steps, than led to the atomizer's auxiliary nozzle, where air was used originally. Analysis of flame showed us what factors have effect on evaporation and flame quality.

Tartalomjegyzék

Nyilatkozat.....	i. oldal
Kivonat.....	ii. oldal
Abstract	iii. oldal
Tartalomjegyzék	iv. oldal
1. Megújuló tüzelőanyagok alkalmazása gázturbinában	1. oldal
1.1. Repülés	1. oldal
1.2. Energiatermelés	1. oldal
2. Égőterek kialakítása.....	3. oldal
2.1. Mitől jó egy égőtér?	3. oldal
2.2. Tüzelőanyag előkészítés	3. oldal
2.3. Ipari gázturbinák égőterei	5. oldal
3. Az égés folyamata.....	6. oldal
3.1. A lángok néhány tulajdonsága	6. oldal
3.2. A tüzelőanyag útja	7. oldal
3.3. Lángstabilitás	8. oldal
4. A kibocsátott füstgáz analízise	9. oldal
5. A Capstone C330-as mikro-gázturbina felépítése	10. oldal
6. A fúvóka mérése.....	12. oldal
6.1. A próbapad bemutatása.....	13. oldal
6.2. Lángképek elemzése.....	16. oldal
6.3. A füstgázelemzés módszereinek bemutatása	20. oldal
6.4. Füstgázelemzés	24. oldal
6.5. Az áramlási viszonyok elemzése.....	26. oldal
Összefoglalás	31. oldal
Irodalomjegyzék	33. oldal

1. Megújuló tüzelőanyagok alkalmazása gázturbinában

Napjaink egyik meghatározó hőerőgépe a gázturbina. Fő alkalmazásai közt megtaláljuk a légiközlekedést, a hadászatot és az energiatermelést is. Az egyes felhasználási területeken más-más szempontok élveznek prioritást. A gazdaságosan kitermelhető fosszilis energiahordozók mennyiségének csökkenése és az egyre inkább a figyelem középpontjába kerülő környezetszennyezés miatt a megújuló tüzelőanyagok használata egyre szélesebb körben jelenik meg.

1.1. Repülés

A gázturbinák kiemelt felhasználási területe a repülőipar. A járatok nagy száma és a repülőterek város melletti, mára már központi elhelyezkedése miatt szigorú kibocsátási korlátozások vonatkoznak ugyanúgy a repülőkre, mint az autókra és más közlekedési eszközökre. A NASA egy DC-8-as tesztrepülőgépét átalakította, hogy vizsgálják a gázturbinákat viselkedését, ha csirke- illetve marhazsír használják tüzelőanyagként. Így egy hajtóművet a 4-ből tisztán ilyen üzemanyaggal láttak el, egyet pedig félig a szabványos JP-8-cal, félig zsír alapú tüzelőanyaggal működtettek. Üresjáratban 90%, felszálláskor pedig 60% csökkenést értek el a koromkibocsátásban a megújuló üzemanyaggal járó hajtómű esetén. Fontos előnye még, hogy kevesebb a kén tartalma és kevesebb aeroszol keletkezik belőle, mint a ma használatos hajtóanyagokból. A többi kibocsátott károsanyag mennyisége is kedvezően alakult. Hátránya, hogy nagy mennyiségben ma nem áll rendelkezésre a teszthez használt üzemanyag. [1]



1. ábra: SR-71 Blackbird [2]

1.2. Energiatermelés

Az erőműveknek 3 csoportja ismeretes: alaperőmű, menetrendtartó és csúcserőmű. Mivel a gázturbinák viszonylag gyorsan indítható és leállítható berendezések, ezért csúcserőműként is kiválóan alkalmazhatók. Használják még kombinált ciklusú hőerőművekben is, amelyekben a gázturbina forró füstgázát hőcserélőkön keresztül gőzfejlesztésre használják, majd ezt egy gőzcikluson keresztül szintén tudják villamos áram termelésre használni. Az ilyen erőművek villamos teljesítményre vetített hatásfoka elérheti a 60%-ot is. Ha hozzávesszük a távhő szolgáltatásként értékesíthető energiát is, akkor az összhatétfok már a 80%-ot is meghaladhatja. Ez a típus alaperőmű, azaz állandóan szolgáltatja a villamos energiát, mivel a nagyteljesítményű gőzturbinákat rendszerint napokba telik felfűteni és előkészíteni az üzemre. A gázturbina viszonylag flexibilis gép

tüzelőanyag szempontjából, azonban fontos kritérium, hogy az üzemanyag hamu és koromtartalma lehetőleg minimális legyen, mivel a rendkívül magas hőmérsékleten üzemelő turbinalapátokat a nagyenergiájú szilárd részecskék károsíthatják. Így az egység a tüzelőanyagok széles skálájával képes megbízhatóan, jó villamos hatásfok mellett (35-43%) üzemelni [3].

Elsősorban földgázt (majdnem 100%-ban CH_4) használnak tüzelőanyagként gáz üzemű turbinákban. Összetételéből adódóan tisztán ég, azaz nincs hamutartalma, vízen és széndioxidon kívül más anyag csak alacsony koncentrációban van jelen a füstgázban. Repülőgépek azért nem használnak metánt tüzelőanyagként, mert folyékony állapotban is 70%-kal több a helyigénye, mint a keroziné, ráadásul a szárny eljegesedését elősegítené a tartály hűlése a fogyasztás miatt [4]. Azonban a Boeing egy friss tanulmánya szerint éppen ez lehet éppen a jövő repülőgépeiben az üzemanyag 2050-től [5].

A megújuló tüzelőanyagok a kőolajszármazékokhoz képest igen rövid múlttal rendelkeznek. Az Európai Unió 10 féle bio-üzemanyagot szabványosított. Ezek közül az 5 legígéretesebb: biodízel, bioetanol, biometanol, növényi olajak (VO), biodimetiléter (bio-DME). Ezek fűtőértéke általában 30-50%-kal kevesebb, mint a széné. Fő előnyei a kőolajszármazékokkal szemben [4]:

- Természetes eredetű, fajlagosan kevesebb széntartalom
- Magasabb lobbanáspont, így biztonságosabban kezelhető
- Alacsony (akár 0%) kéntartalom
- Alacsonyabb szénhidrogén és porkibocsátás

Fontosabb hátrányai:

- Magasabb viszkozitás, hidegben nagyobb hajlam paraffin kiválásra, így adalékanyagokra van szükség ennek elkerülésére
- Kisebb fűtőérték, így több tüzelőanyagot kell felhasználni
- Magasabb spontán gyulladási hőmérséklet, így alacsonyabb a cetánszáma
- Hamarabb eltömíti az üzemanyag vezetéket [6]



2. ábra: Bioerőmű [6]

2. Égőterek kialakítása [4]

2.1. Mitől jó egy égőtér?

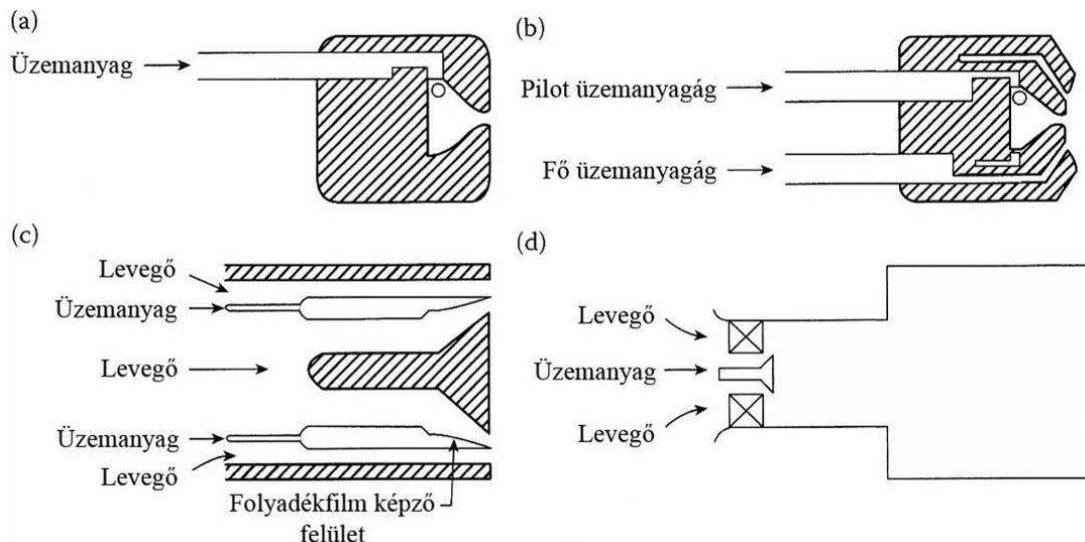
A gázturbinák égőtereivel szemben rengeteg követelményt támasztanak, ami függvénye a felhasználási területnek, jogszabályoknak, rendelkezésre álló tüzelőanyagnak, stb.. Azonban az alábbi néhány működési szempont közös:

- Jó hatásfokú égést biztosítson (azaz az üzemanyag minél nagyobb hányada égjen el, minél több kötött kémiai energiát szabadítsunk fel)
- Megbízható és kontrollálható égést biztosítson mind a szárazföldön (nagy hidegek esetén is) mind a repülőgépekben is, újraindítható legyen a folyamat egy esetleges lángkialvás bekövetkezése után a levegőben
- Széles üzemi tartomány (a lángnak stabilisnak kell lennie pl. nagy nyomásingadozás és változó levegő-üzemanyag keverék esetén is)
- Alacsony nyomásvesztés
- A kilépő hőmérsékletet úgy kell megválasztani, hogy az utána következő turbinalapátok és terelőlapátok élettartama maximális legyen
- Alacsony füst- és szennyezőanyag kibocsátás
- A tranziens üzem következtében kialakuló nyomáslengéseket el kell viselnie
- A gázturbina egyéb részeivel kompatibilis legyen méretben és kialakításban
- Könnyű gyárthatóság, minimális költség
- Karbantarthatóság
- Hosszú élettartam

Repülőgépek esetén rendkívül fontos szempont a súly is. Az ipari gázturbinák esetében ez már kevésbé korlátozó tényező. Azonban itt elvárt a hosszabb élettartam és kritérium a tüzelőanyagok széles skálájának alkalmazhatósága. Hadászati alkalmazásokban elsődleges szempont a maximális teljesítmény, kevésbé fontos a kibocsátás és egyes esetekben a fogyasztás, valamint az élettartam.

2.2. Tüzelőanyag előkészítés

Az égés szempontjából fontos a megfelelően előkészített tüzelőanyag. A folyadék állagúakat porlasztanunk kell, hogy kellő mennyiségű pára keletkezzen belőle, ami elkeveredik a levegővel még az égési zóna előtt. Ezzel az eljárással megnöveljük az adott üzemanyag mennyiség felületét, ebből következően pedig felgyorsul a párolgás folyamata. A cseppek mérete nagyban befolyásolja az égési teljesítményt. Már kis átlagos átmérő növekedés esetén is rohamosan csökkenhet az égés minősége. Így pedig instabilabb lángot, kisebb égési hatásfokot és több károsanyag kibocsátást kaphatunk eredményül.



3. ábra: Porlasztó kialakítások

Az említett feladatok ellátására elterjedt megoldás az örvénykamrás „szimplex” porlasztó (3a ábra). Itt nagy nyomással érkezik az üzemanyag, majd egy nyíláson jut ki, általában 110° -os porlasztási kúpszöggel. Tervezési problémákat vet fel, hogy a szükséges tüzelőanyag áram szélsőértékeinek aránya gyakran 40:1. Ha kicsire választjuk a porlasztónyílás méretét, akkor kis tüzelőanyag térfogatáramok esetén megfelelő lesz a porlasztási kép, ha több tüzelőanyagra van szükségünk, az ehhez szükséges nyomás túlzottan magas lenne. Nagyobb nyílás esetén viszont a kis légáram és a kis nyomás (nagy repülési magasságban ez általános) teszi használhatatlanná a berendezést, a tüzelőanyag csöpög ilyen esetben belőle.

A felvetett problémákra megoldás a kettős örvénykamrás porlasztó (3b ábra). Kis szükséges üzemanyag mennyiségek esetén csak a középső (ún. pilot) ágat használjuk, majd növekvő teljesítményigény esetén a külső ágat (főág) is bekapcsoljuk. Egyszerű felépítésükből adódóan megbízhatóan üzemelnek akár légszegény környezetben is. Hátrányuk, hogy könnyen eltömődnek az üzemanyagból kiváló részecskékkel és nagy égési nyomás esetén a koromképződés megnő, mivel a szénhidrogén molekulákról először a hidrogén válik le, majd a maradék szénlánc a nyomás miatt közel kerül más molekulákhoz, és megindul a polimerizáció, a szénatomok összekapcsolódnak. Így kormot kapunk eredményül.

Szintén gyakran alkalmazott megoldás a légporlasztó (3c ábra). Itt az üzemanyagot a karburátorral megegyező elven juttatjuk be a tűztérbe. Az érkező légáramot konfúzor segítségével gyorsítjuk fel, ami magával ragadja a fali határréteg kialakulása miatt a tüzelőanyagot. Kellően finom felbontást úgy érhetünk el, ha minél nagyobb érintkezési felületet biztosítunk a levegőnek az üzemanyaggal. Az ajak mindkét oldalán ugyanúgy szükségünk van a nagy légsebességre. A megfelelő porlasztási kép biztosítása mellett a módszer alkalmazása nem teszi lehetővé a cseppek felhalmozódását szilárd felületeken, mivel nagysebességű légáramra van szükség a működéséhez, így biztonságosabb. A légporlasztó előnye, hogy a belépő légáram határozza meg a porlasztott üzemanyag mennyiségét, így a turbinára érkező közeg hőmérséklete megfelelően érzéketlen a tüzelőanyag változó térfogatáramára, mert nem fordulhat elő a légfelesleg hirtelen változása. Az égéstermék koromtartalma kellően alacsony. Az égőtér falának hűtése

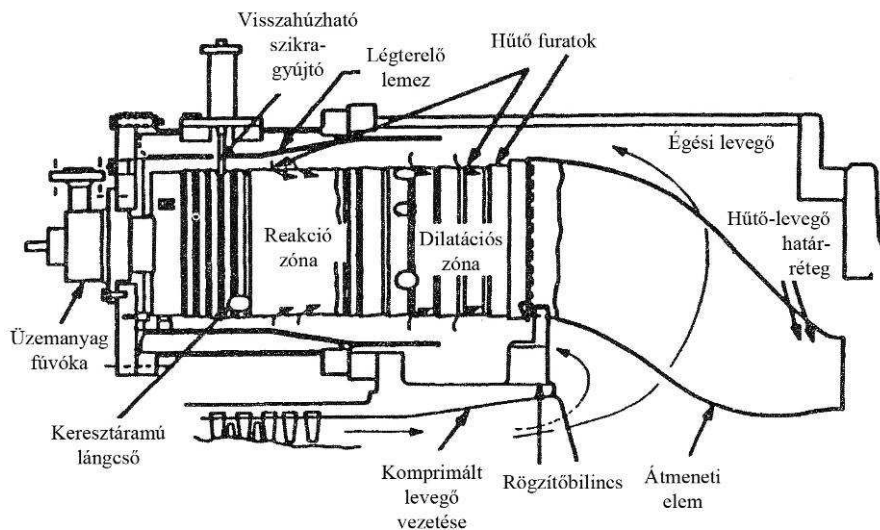
megoldott, az érintkező légáram hőmérséklete megegyezik a kompresszor utáni hőmérséklettel. Hátránya az erős légáramfüggőség, így viszonylag szűk tartományban képes jól üzemelni. Indításkor rossz porlasztási képet ad az alacsony légsebesség miatt. Ezeket a problémákat megoldhatjuk, ha egy pilot örvénykamrás porlasztót építünk középre. Ennek alkalmazásával indításkor is megfelelő minőségű keveréket tudunk előállítani, ami könnyen begyűjthető és széles üzemi tartományban teljesít megfelelően. Nagyobb égési teljesítmény esetén bekapcsol a légporlasztó, amivel kevesebb koromkibocsátást és kedvezőbb üzemet tudunk biztosítani.

Nagy fűtőértékű gázok égetésekor, mint amilyen a földgáz, több problémával is számolnunk kell. Az alacsony hőtartalom miatt az üzemanyag térfogatárama akár a légáram ötöde is lehet, ami eltérést okoz a kompresszor és a turbina által forgalmazott térfogatáramok között, így csavaró igénybevétel jelentkezik a tengelyen. Ez a jelenség egyszerre többféle tüzelőanyag alkalmazásakor hatványozottan kerül elő. Az égési sebesség is alacsonyabb, így nagyobb térfogatú égési zónát kell biztosítanunk. Gázok tűztérbe juttatására használnak előperdítőket (3d ábra), venturi csöveket és síkfúvókákat is.

2.3. Ipari gázturbinák égőterei

Az energetikai szektorban teljesítő gázturbinákkal szemben támasztott követelmény a gazdaságosság és megbízhatóság hosszú távon. Az egységek jellemzően moduláris felépítésűek. Általános követelmények: alacsony beszerzési és üzemeltetési költség, alacsony szennyezőanyag kibocsátás. A gyors és egyszerű karbantartás – így minimális kiesés a termelésből - a vevő szempontjából kedvező tulajdonság. Ha szemügyre veszünk egy iparban

alkalmazott tűzteret, akkor azt tapasztaljuk, hogy sokkal hosszabbak, mint a repülésben használt megoldások. A hosszú tartózkodási idő kedvezően hat az emisszióra, tökéletesebb égést biztosít, főként gyengébb minőségű üzemanyagok esetén. Az égőtérben az áramlási sebesség és a nyomásesés is kisebb.



4. ábra: GE MS7001 gázturbina tűztere

Az egyik legsikeresebb ipari gázturbina a General Electric gyártmányú 80 MW teljesítményű MS7001-es. A 10 különálló égőtérből álló rendszer mindegyike a 4. ábrán látható módon van felépítve, még a burkolat is egyedi.

Több üzemanyag befecskendezőt találunk az ipari gázturbinák égőtérében, mivel így rövidebb lángot és egyenletesebb hőmérsékletprofilú közeget tudunk biztosítani a dilatációs zóna előtt. A Siemens gyártmányú égőtér siló hibrid befecskendező fejeket tartalmaz, aminek segítségével a földgázt diffúziós (alacsony teljesítmény esetén) és előkevert

üzem módban is (magas teljesítmény esetén) előkészíthetjük az alacsonyabb károsanyag kibocsátás érdekében. Ez a megoldás alkalmazható különböző kategóriájú egységek esetén, így a gyártó csak a fejek számát módosítja ezekben. Az újabb gyártmányú gyűrűs égőtereiben már egyaránt 24 injektor fejet találunk. A kialakításuk teljesen megegyezik, egyedül a méretükben van különbség. A 9 MW-os egységektől a 150 MW-os egységekig ezeket alkalmazzák.

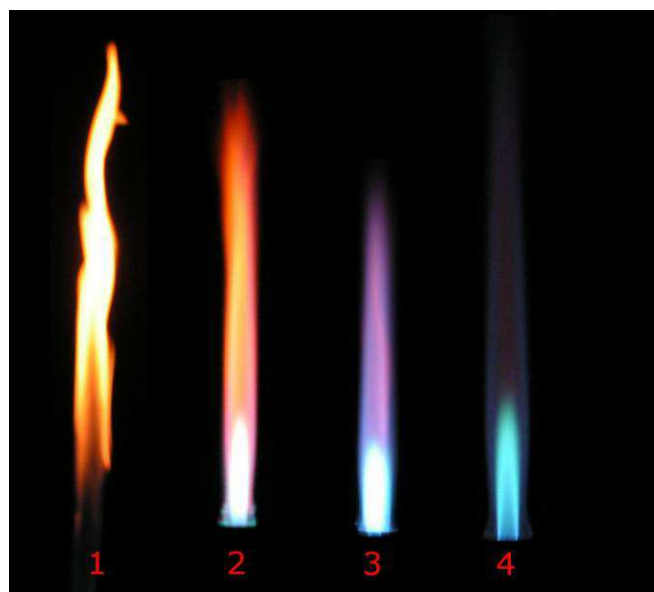
3. Az égés folyamata [4]

Az égés legegyszerűbb definíciója: tüzelőanyag és oxidáló anyag exoterm reakciója. Gázturbinák esetén az üzemanyag lehet gáz és folyadék halmazállapotú is, viszont az oxidálószer minden gyakorlati esetben levegő. Az égési folyamatnak több formája is van, ezek közül nem mindegyiknek kísérőjelensége a láng vagy lumineszcencia.

Az égés során kevesebb, mint 1 ms alatt lezajlik a teljes folyamat több mint 80%-a. A kialakuló láng folyamatosan az érkező keverék felé halad. A lángot definiálhatjuk egy gyorsan lezajló kémiai reakcióként, ami egy vékony rétegben megy végbe, nagy hőmérséklet és koncentráció gradienst okoz, ami lumineszcenciával jár. Makroszkopikus szemmel tekintve a jelenségre egy lángfrontot figyelhetünk meg, ami az elégett és az elégetlen anyag közt folyamatosan jelen van. A füstgáz hőmérséklete, térfogata sokkal nagyobb, mint az égés előtti állapotban. Szénhidrogének esetén a lángfront terjedési sebessége 1 m/s alatti érték.

3.1. A lángok néhány tulajdonsága

Az elméleti lángtani kutatások abból indulnak ki, hogy a tüzelőanyag gáz halmazállapotú vagy folyadékok esetén megfelelően porlasztott. Továbbá a láng halad az elégetlen keverék irányába. A stabilizálás érdekében folyamatosan tápláljuk éghető keverékkel. Ezen feltételek teljesülése mellett két fő osztályt különböztethetünk meg: az előkevert és a diffúziós lángot attól függően, hogy az üzemanyag és a levegő össze van keverve az égés előtt, vagy diffúziósan keveredik a láng zónájában. Az uralkodó áramlási sebesség ismeretében az osztályokat tovább bonthatjuk laminárisra és turbulensre.



A gyakorlatban egy további probléma merül fel folyadéktüzelés esetén: ha az üzemanyag nincs megfelelően porlasztva, mielőtt az égési zónába lép, akkor heterogén égés figyelhető meg a megmaradt cseppek jelenléte miatt. Így előkeverés esetén is megfigyelhető a lángban a diffúzió jelensége. Ha mindkét reagens légnemű, akkor az égés homogén.

A legegyszerűbb példa diffúziós égésre a gyertya lángja. A kanócról leváló paraffin pára csak a környező levegő oxigéntartalmát tudja felhasználni a reakcióhoz.

5. ábra: Bunsen-égő lángja [7]

Előkevert gázelegyek esetén bárhol elindulhat a reakció, ha kialakítjuk a szükséges hőmérséklet pl. elektromos szikra vagy forró felület segítségével. A láng végig fog söpörni a keverék teljes térfogatán. A turbulencia kiemelt fontossággal bír, ugyanis a legtöbb keverék áramlása már eleve ilyen. A turbulens láng nagyobb áramlási sebesség mellett is stabil égést biztosít.

Az 5. ábrán látható egy Bunsen-égő lángja különböző üzemállapotokban. Az első egy előkeverés nélküli beállítás, kis légfelesleggel. A láng a korom diffúziós égése miatt sárga. Jobbra haladva egyre tökéletesebben előkevert lángokat láthatunk. A 4. láng az égés szempontjából ideális esetet mutatja. Itt már nem képződik korom, a színt pedig a kémiai reakciók tulajdonsága adja.

Nem minden keverék képes begyulladni vagy robbanni. A kereteket az alsó- és felső gyulladási határkoncentráció adja. Jellemzően ez 2-es és 0.33-as légfelesleg tényezőt jelent. Ha a nyomást a környezeti fölé növeljük, általában szélesebb koncentráció tartományban tud végbemenni a reakció. 10 kPa és 5 MPa közt a felső gyulladási határ változik látványosan, az alsó határkoncentráció majdnem független a nyomás értékétől.

3.2. A tüzelőanyag útja

Az üzemanyag a tartályból/hálózathoz a fűvókáig egy szivattyú segítségével jut el. Néhány kivételtől eltekintve (rakéták, speciális hajtóművek) a rendszer működése szempontjából lényeges változás nem történik vele ez idő alatt.

Megfelelő porlasztás során az üzemanyag teljes egészében kis cseppekké esik szét. A folyamat során a felületi feszültség a legkisebb energiaszintnek megfelelő gömb alak felvételét segíti, míg az aerodinamikai erő (az érkező légsugár folyadék felszínére ható nyomása) ez ellen dolgozik. Amikor utóbbi felülkerekedik a viszkozitás hatásán, megtörténik a szétszakadás kisebb cseppekre.

A gázturbinák folyékony tüzelőanyagának porlasztása két folyamatból áll. Az első során a tüzelőanyag sugár szétfoszlik, tórusz jellegű gyűrűket formálva. Második lépésben ezek cseppekké bomlanak, amik aztán még kisebb és kisebb cseppekre esnek szét. Ez a folyamat határozza meg a porlasztási képet, így a cseppek sebességét és méretét.

A porlasztást a levegő és a folyadék közti relatív sebesség szerint négy nagy csoportra oszthatjuk:

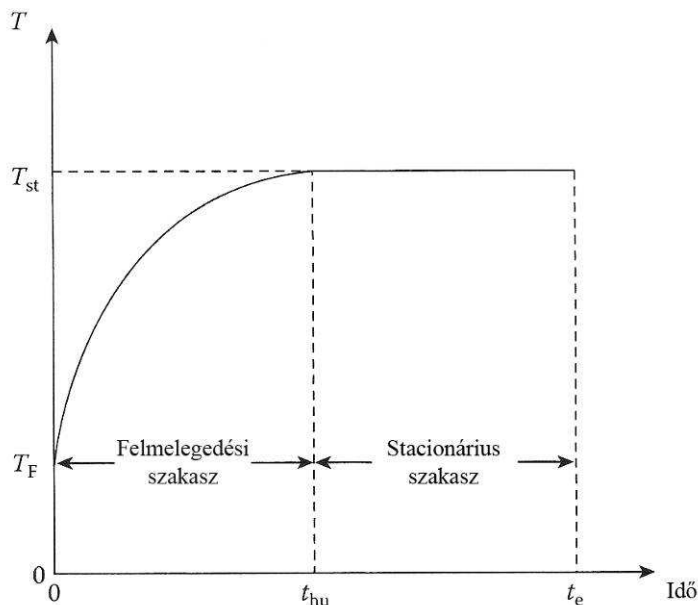
1. Alacsony sebességkülönbség esetén jellemzően hengerszimmetrikus hullámok keletkeznek, amik a sugár széteséséhez vezetnek. A porlasztott anyag cseppjeinek átmérője a kiömlési nyílás kb. kétszerese, a méretük szinte azonos.
2. A légsugár sebességének növelésével még ugyanaz a mechanizmus játszódik le a folyadékban, viszont az így keletkező cseppek átmérője kisebb, megegyezik a sugár átmérőjével. Itt már nem elhanyagolható az aerodinamikai erő hatása. [8]
3. További sebességnövelés esetén a levegő és a sugár felszíne közti kölcsönhatás eredményeként keletkező kis hullámok instabil növekedése a sugár foszlásához vezet, majd cseppek alakulnak ki. Az átmérőjük már sokkal kisebb lesz, mint a kiömlőnyílásé. Egy folyadékmagot továbbra is megfigyelhetünk a kilépés után. [9]
4. Nagy porlasztónyomás esetén, a kiömlőnyílás végén már közvetlenül a cseppek jelennek meg, nincs jelen a mag. A leíró mechanizmust mindmáig nem sikerült senkinek megfejtetni. Egy elmélet szerint a szűk szakaszban létrejövő kavitációs

buborékok létrejötte, majd összeroppanása okozza a folyadék cseppekké aprózódását. Ez a porlasztási mód jellemző a diesel üzemű belsőégésű motorok tüzelőanyag befecskendező rendszereire. Itt a porlasztónyomás akár 2000 bar is lehet. [10]

Az 1-3-as kategóriába tartozó porlasztási képek a klasszikus megközelítés szerinti folyamatokat figyelhetjük meg, ami függ a folyadék viszkozitásától, a környező levegő sűrűségétől és a folyadéksugár átmérőjétől. A 4. típus gyors porlasztást takar, melyben az előbb felsorolt jellemzők kevésbé befolyásolják az eredményt.

Az üzemanyagcseppek párolgása egyaránt hő- és anyagátadás kíséretében történik. A környező levegő és a csepp felszíne közt a hőátadás szállítási és vezetékes úton megy végbe. A keletkező gőz konvekció és diffúzió révén jut be a légáramba. A folyamat függ a környező nyomástól, hőmérséklettől, a tüzelőanyag hőmérsékletétől, illékonyságától, a porlasztott cseppek átmérőjétől, és ezek a környezethez viszonyított sebességtől.

A csepp rövid élete során az első szakaszban felmelegszik, a felvett hő szinte teljes része erre fordítódik. Majd az egyensúly beállta után a felvett energia csak a párolgásra fordítódik (6. ábra).



6. ábra: Egy csepp felmelegedése és párolgása

Automatikus vagy más néven spontán égés jön létre, ha jelen van megfelelő koncentrációjú tüzelőanyag/levegő keverék és az égéshez szükséges hőmérséklet is előáll. Ezt előidézheti láng vagy akár szikra is. Nagy légfeslelegre méretezett égőterekben mindenáron el kell kerülni a jelenséget az erre kijelölt égési zóna előtt, mert egyrészt a károsanyag kibocsátás sokszorosára nő, másrészt az égőtér alkatrészeinek élettartamát is rövidítik.

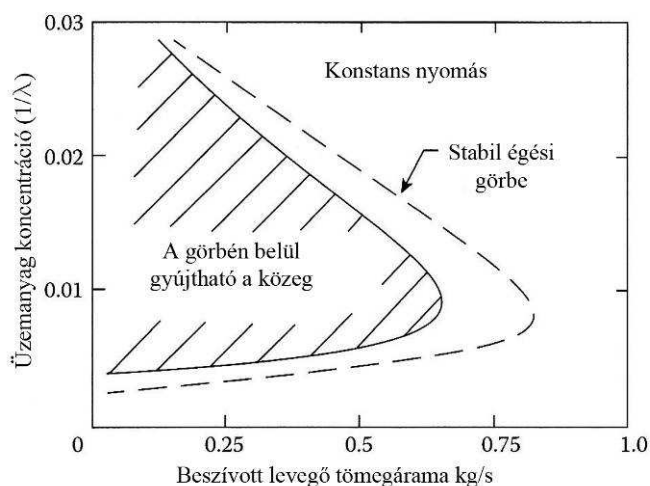
3.3. Lángstabilitás

A gázturbina változó üzemi körülmények mellett is stabil üzemet kell, hogy biztosítson. Ez főként a repülőgépek sugárhajtóművét érinti. Nagy magasságban alacsony hőmérséklet és nyomás uralkodik, az út során olyan légfeslelegek esetén is működni kell, amelyek messze kívül esnek normál esetben az éghetőségi határon. A lángfront meg kell, hogy maradjon az erősen turbulens áramlásban, mely sokkal nagyobb sebességű, mint az üzemanyag normál égési sebessége. Továbbá az üzem során előfordulhat trópusi vihar, jégeső és homokvihar is, amiket szintén el kell viselnie a gázturbinának.

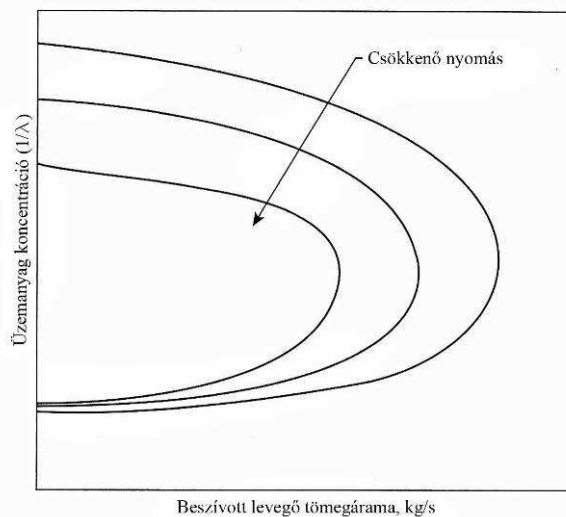
Amikor egy új égőtér stabilitását mérik, konstans belépő nyomást és hőmérsékletet állítanak be. A gyújtás után a légáramot egészen addig csökkentik, amíg ki nem alszik a láng. A feljegyzett alsó határ után a légáramot növelik, majd a lángleválás paramétereit is rögzítik. Utána nagyobb tüzelőanyag mennyiség esetén is ugyanígy járnak el, míg ki nem rajzolódik

tisztán a stabilitási görbe (7. ábra). A tűztér stabil üzemi tartományának teljes feltérképezése érdekében különböző nyomások esetén megismétlik a mérést (8. ábra). Üzem közben túlmelegedés is felléphet, ha sok tüzelőanyagot engednek a tűztérbe. Ezért a mérés során felvett görbeseregek rendszerbe való beprogramozásánál figyelembe veszik ezt is.

A keverék gyújthatósági vizsgálatát is hasonló elven el lehet végezni, így az indításhoz szükséges feltételeket is megismerhetjük. A kiadódó jelleggörbe rendszerint hasonló az égési vizsgálat során kapottakéhoz, azonban ez mindig a stacionárius égés határait képző görbén belül helyezkedik el (7. ábra).



7. ábra: Az égés stabilitási görbéje



8. ábra: A stabilitási görbe nyomásfüggése

4. A kibocsátott füstgáz analízise [4]

Az égés során keletkező szennyezőanyag kibocsátásának szabályozása a figyelem középpontjában áll, mivel kihatással van a környezetünkre és az egészségünkre. Az elmúlt évtizedben a szabványokat szigorították, amit az ipar kénytelen volt gyorsan lekövetni. Ezzel párhuzamosan a légiközlekedés is ugrásszerűen nőtt. A szárazföldi gázturbinák száma folyamatosan gyarapodott, mint a kombinált ciklusú erőműveké a jó villamos hatásfokuk (akár 60%) miatt.

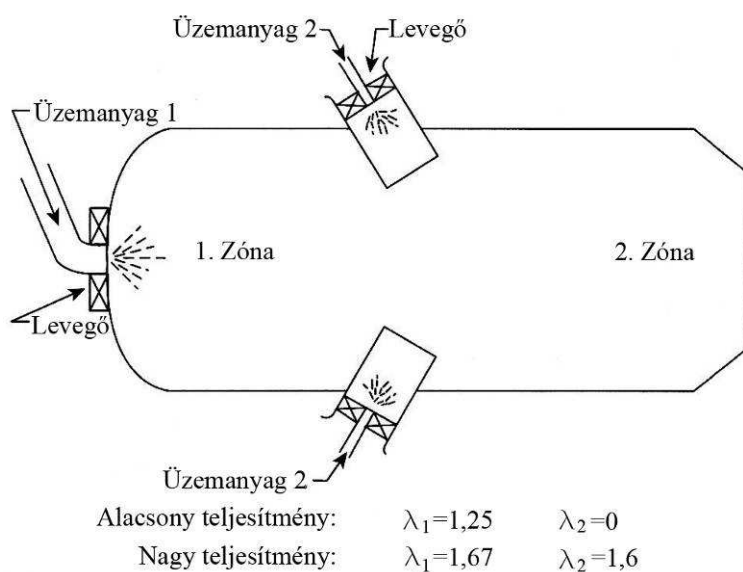
Egy repülőgép gázturbinájából kilépő füstgáz az alábbiakat tartalmazza: szénmonoxid (CO), széndioxid (CO₂), víz/pára (H₂O), elégetlen szénhidrogén (UHC), szemcsék, nitrogénoxidok (NO_x) és a beszívott levegő nitrogén illetve a fel nem használt oxigéntartalma. Ezek egy része (H₂O, CO₂) ugyan teljesen természetes anyag, viszont a globális felmelegedést elősegítik. Így az egyetlen mód ezek csökkentésére, ha a fogyasztást tudjuk csökkenteni.

A kőolajfinomításból származó maradékokkal és hosszú szénláncú szénhidrogénnel üzemelő gázturbinák esetén a kénoxidok kibocsátása is számottevő.

Egy jó égőtér széles üzemi tartománnyal rendelkezik, jó hatásfokú égést biztosít, kevés káros anyagot bocsát ki, egy befecskendezési helyről ellátható és a képzett keverék könnyen begyújtható. Ezek a feltételek egyszerre biztosan nem teljesíthetőek, kompromisszumokra van szükségünk a kialakításánál. A legtöbb égőtérrel elmondható, hogyha törekszünk a füst és a nitrogénoxidok (NO_x) mennyiségének a csökkentésére, akkor

ezzel garantáltan a szénmonoxid (CO) és az elégetlen szénhidrogének (UHC) keletkezését szorgalmazzuk. Ez visszafelé is érvényes, tehát alacsony CO és koromkibocsátás magas NO_x kibocsátást indukál.

A felvetett problémák enyhítésére egy ötlet a primer zóna levegőjének szabályozása változtatható geometriájú alkatrészek beépítésével. Nagy nyomás esetén sok levegőre van szükségünk a koromképződés és a NO_x kibocsátás visszaszorítására. Kis nyomásoknál a fő légáramot csökkentjük, így a légfelesleg és az égési sebesség egyaránt csökken, így kiváló égési hatásfokot kapunk és kevesebb lesz a CO és UHC kibocsátás is. Fontos szempont, hogy ezzel az eljárással az üzemanyag/levegő keverék begyújtása is egyszerűbb. A megoldás ellen szól, hogy alkalmazásával bonyolult működésű mechanizmusokat építünk be, amelyek megfelelő vezérlést és szabályozást igényelnek. Ez plusz költséget és súlyt jelent, aminek eredményeként kisebb gázturbinákban és repülőgép hajtóművekben egyáltalán nem találkozunk ilyen szerkezetekkel.



9. ábra: Szakaszos tűztér

Egy másik megközelítés a szakaszos égőtér használata. Itt az égési zónát két elkülönített részre osztjuk fel. A 9. ábrán látható axiális elrendezésű szakaszos tűztér kis teljesítményű első zónája 1,25 körüli légfelesleggel működik. Így a CO és UHC kibocsátás minimális. Ha megnő a terhelés, a légfelesleget a középső (pilot) ágban és az oldalsó ágakban 1,67-re állítják, ami kevesebb NO_x és füstkibocsátást eredményez. Ezt a megoldást ipari gázturbinákban gyakran látjuk viszont. Alkalmazásával megfelelően alacsony káros-

anyag kibocsátást érhetünk el, így mellőzni tudjuk az erre a célra használt leválasztókat.

5. A Capstone C330-as mikro-gázturbina felépítése [11]

A Capstone C330 típusú mikro-gázturbina az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék laboratóriumában található, a dolgozatban ennek a légporlasztóját vizsgáljuk. Ezt a gázturbina típust a '90-es években fejlesztették ki a turbótöltőkből. Ennek oka a decentralizálttá váló energiatermelés volt [12]. Nyilvánvalóan ezek hatásfoka elmarad a nagyteljesítményű erőművektől, viszont lehetőséget ad kapcsolt energiatermelésre, valamint szigetüzemet is meg tud valósítani. Maximális teljesítményük 30 kW-65 MW-ig terjed egységenként.

Előnyök:

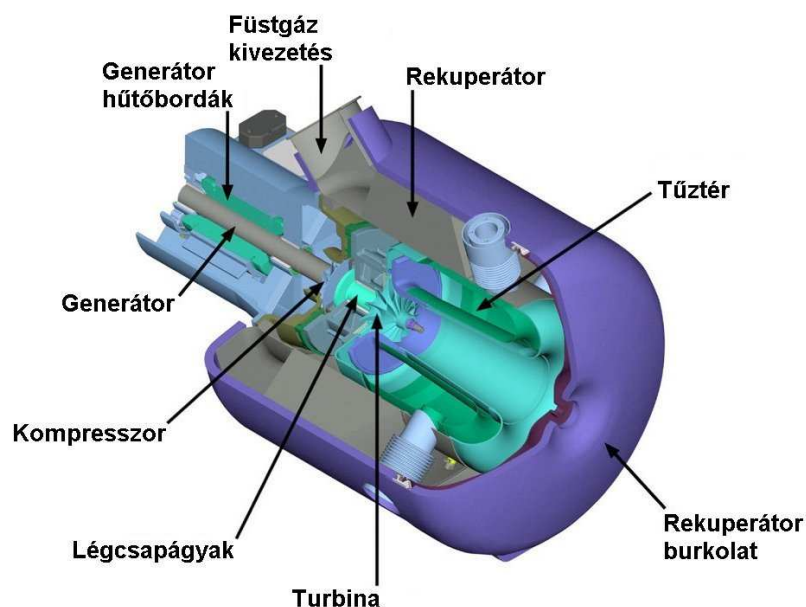
- Kis tömeg
- Kisebb teljesítményű egységek viszonylag mobilak
- Olcsó fenntartás a nagyobb turbinákhoz képest

- Távvezérelhetőség
- Részterhelésen is jó hatásfok
- Hálózati gázvezeték is elég az üzemeltetéséhez

Hátrányok:

- Elérhető villamos hatásfoka 28%, míg egy gázturbinás erőműé 43% is lehet
- A változó fordulatszám miatt biztonságos frekvenciaváltó szükséges
- Hosszútávon térül csak meg a beruházás

A C330-as kompresszora és a turbinája is radiális kialakítású. A beszívás egy hangszigeteléssel ellátott csőbe történik. Itt egy légszűrő után a generátoron áramlik a hideg levegő, így hűtve azt. Utána következik a kompresszor, ami maximálisan 3,5-ös nyomásviszonyt valósít meg. A komprimált levegő egy ellen-keresztáramú hőcserélőbe ér, ahol a füstgázzal közvetve érintkezik. A fordítókamrás gyűrűs elrendezésű tűztér után a füstgáz expandál a turbinán. A rekuperátorból kilépve a füstgáz hőmérséklete $\sim 275^\circ\text{C}$. Indításkor a generátor 0,3 s alatt 10 000 1/min fordulatszámra gyorsítja a turbinát. Ez után már elég nyomást tud leadni a kompresszor és a légcsapágyat már el tudja látni. A turbina 25 000 fordulat/perc értékig gyorsul fel, utána kinyitja a tüzelőanyag szelepeket. A gyújtás 55 000 1/min értéken történik. Ha a tűztér elérte az üzemi hőmérsékletet, akkor már szabadon tudjuk változtatni a terhelést a teljes tartományban. Amennyiben a turbinát leállítjuk, 45 000 1/min fordulaton beindul a hűtési folyamat. Erre a hőfeszültség okozta tönkremenetel elkerülése miatt van szükség. A generátor 4 pólusú, permanens mágnes forgórészű. A nagyfrekvenciás váltóáramot előbb egyenárammá, majd 400 V feszültségű 50 Hz frekvenciájú háromfázisú váltóárammá alakítja. A gázturbina 3 légorlasztóval rendelkezik, melyek 120° -onként vannak elhelyezve. [13] [14] [15]



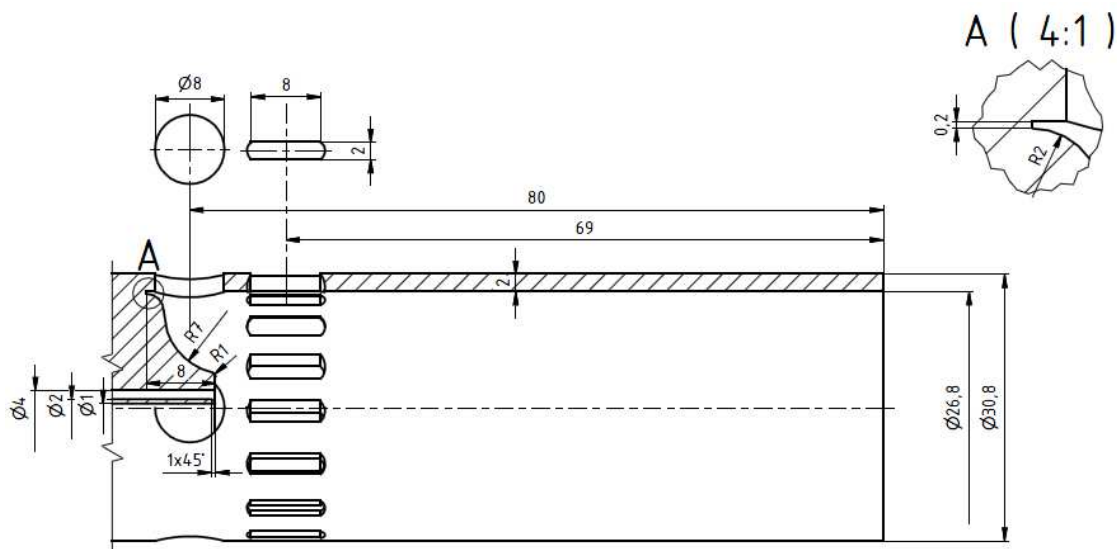
10. ábra: C330 metszete [15]

6. A fúvóka mérése

A mérésünk célja egy egyedi gázturbina légporlasztó vizsgálata, melynek a porlasztási segédközegét kicseréltük vízgőzre, etanolgőzre, illetve a kettő elegyének alkalmazását is vizsgáltuk. Az utóbbi szimulált anyag, a valóságban veszélyes hulladéknak minősülő elő- illetve utópárlatokat fogunk alkalmazni. Ennek hasznosításával a semlegesítés magas költségei megspórolhatók. Célszerűen a légporlasztó a Capstone C330 mikro-gázturbinából származik, mivel a tesztpadi mérések során nyert tapasztalatok alapján beépíthetjük ezt a gázturbinába és a teljes rendszert egészében vizsgálhatjuk.



11. ábra: A C330 üzemanyag fúvókája



12. ábra: A fúvóka áramlás szempontjából érdekes részének műszaki rajza [16]

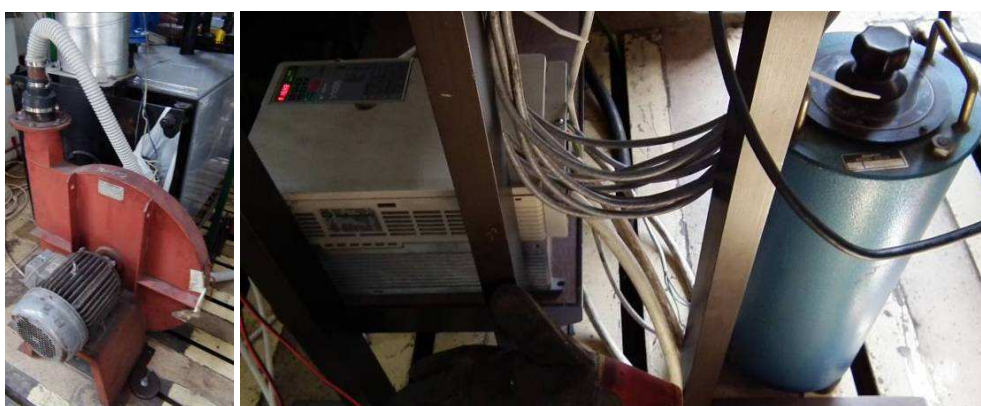
A fúvóka légbevezető nyílásokkal rendelkezik (4 tisztán radiális, kör alakú; 15 félig radiális, félig axiális, téglalap keresztmetszetű), amelyeken keresztül az égéslevegő perdületesen érkezik a fúvóka belsejébe a megfelelő előkeverés érdekében. A tüzelőanyag a 11. ábra bal oldalán található csatlakozón érkezik, a felfelé néző csatlakozáson pedig a porlasztási segédközeg.

A próbapadi mérések során az említett segédközegek elgőzöltetéséhez külső energiaforrást használtunk, azonban a gázturbinás alkalmazás során a hulladékhő felhasználásával fedezni tudjuk az elgőzöltetéshez szükséges hőt.

6.1. A próbapad bemutatása

A tesztpadot környezeti nyomáson üzemeltettük az üzemi 3,5 bar abszolút nyomás helyett. Ez szűkebb stabilitási tartományt jelent, így a gázturbinás alkalmazás során biztosak lehetünk benne, hogy a megállapított üzemi tartomány jól alkalmazható lesz valós körülmények között is. Ezt részletesen a 3.3. fejezetben írtuk le.

A szükséges légmennyiség szállítására egy ventilátor szolgált, a légáramot rotaméterrel mértük. A különböző térfogatáramok beállítását egy frekvenciaváltó segítségével értük el.

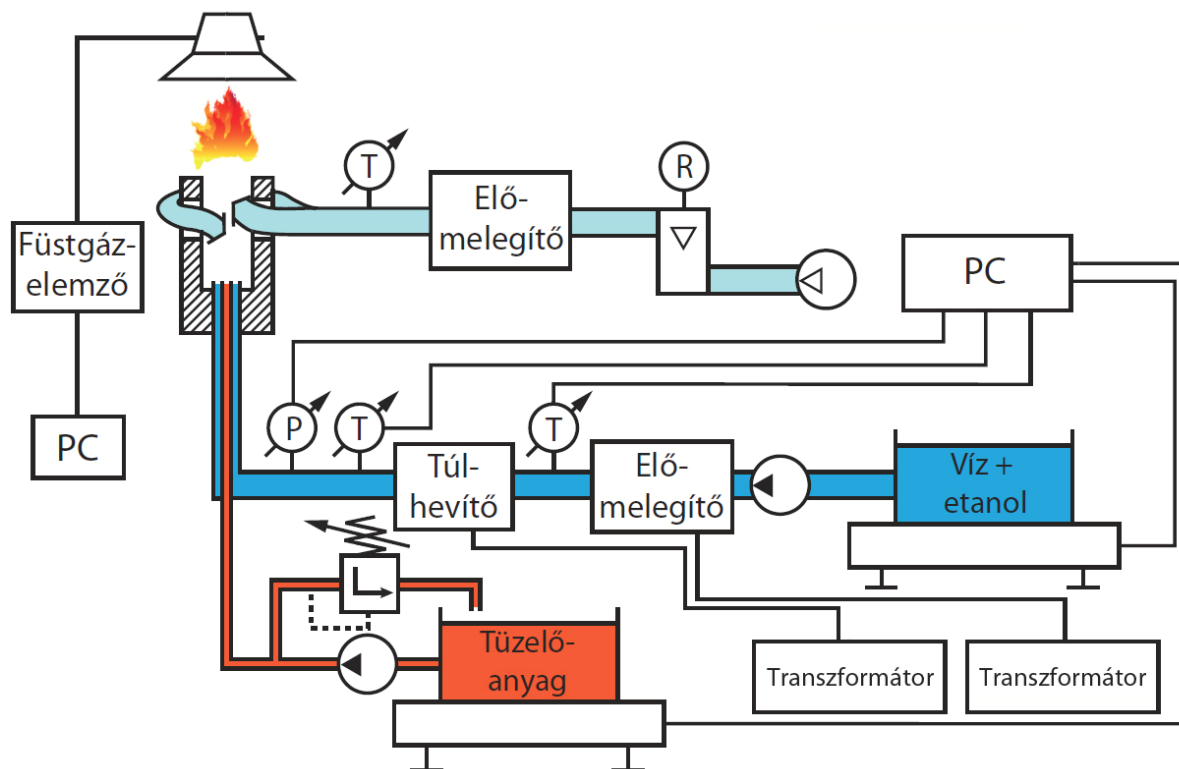


13. ábra: A ventilátor, a frekvenciaváltója és az egyik toroid transzformátor

Egy szabályozható előmelegítő segítségével beállítottuk az égéslevegő hőmérsékletét a turbina üzemi adatainak megfelelően.



14. ábra: A hidraulikus tápegység és a mérleg a tüzelőanyaggal, valamint a porlasztási segédközeggel



15. ábra: A tesztpad elvi felépítése

Az üzemanyag ellátásról egy feszültségvezérelt fogaskerékszivattyú gondoskodott. A fűvókát eredetileg dízelolajra és kerozinra tervezték, azonban a későbbiekben kísérletezni fogunk nehezebben porlasztható, megújuló tüzelőanyagokkal is, mint például a repce-metil-észter (RME). Ehhez azonban a porlasztás körülményeit részletesen meg kell ismernünk.



16. ábra: A levegő előmelegítő és a 2 fűtőpatron

A következő egysége a tesztpadnak a porlasztási segédközeget előállító rendszer. A vizes alkohol szállítására egy ugyanolyan típusú fogaskerékszivattyút alkalmaztunk, mint a tüzelőanyag ellátására. A túlhevített gőz előállítása két lépcsőben történik. Az első 1,5 kW maximális fűtőteltjesítményű patronban a telítési állapotig melegíti a közeget. Az ide bekötött hőmérséklet távadó segítségével így meghatározhatjuk a közeg pontos termodinamikai állapotát, amennyiben rendelkezünk a közegre vonatkozó diagramokkal. Az ezzel sorba kötött második patron túlhevíti a keletkező gőzt a kívánt hőmérsékletre. Mivel a víz és az alkohol fajlagos hőkapacitása és a forrpontja jelentősen eltérnek, ezért a keverék viselkedését pontosan ismerni kell a megfelelő konfiguráláshoz majd a gázturbinás vizsgálat sikeres elvégzéséhez. A két patron 1-1 toroid transzformátorral vezéreltük. A rendszer viselkedését analitikus számításokkal közelítettük, majd a szükséges teljesítményt ezek alapján állítottuk be. Az alkalmazott összefüggés etanolra:

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_e \cdot [c_{e,f} \cdot (t_{e,fp} - t_k) + r_e + c_{e,g} \cdot (t_0 - t_{e,fp})]$$

ahol:

$\dot{m}_e$ az etanol tömegárama

$c_{e,f}$ az etanol folyékony halmazállapotában a fajlagos hőkapacitása

$t_{e,fp}$ az etanol forrpontja

t_k a környezeti hőmérséklet

r_e az etanol párolgáshője

$c_{e,g}$ az etanol gőz halmazállapotában a fajlagos hőkapacitása

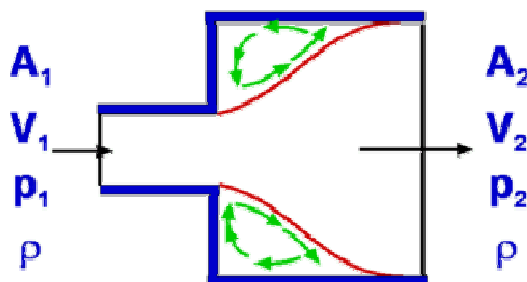
t_0 a kívánt porlasztási hőmérséklet

A számítást MathCAD szoftver segítségével végeztük el, amely rendelkezett a vízgőz tulajdonságainak számításokhoz alkalmazott bővítménnyel, így csak a tömegáramot, a kiindulás és a véghőmérsékletet, valamint a nyomást kellett megadni. Mivel a valóságban ez a rendszer a környezettel is kapcsolatban áll, ezért mérési tapasztalatok alapján egy szorzótényezőt is megállapítottunk, amely a számítás eredményének korrigálására szolgál.

Korábban próbálkoztunk a patronok PID szabályzóval történő vezérlésével is. Azonban egy lüktetés benne maradt a rendszerben. Ugyanis az elgőzöltető patron elején még víz volt jelen, majd gőz képződött belőle. A térfogati növekedés nyomásemelkedést vonz magával, mivel a fúvóka keresztmetszete szűk és a vízgőz hangsebességnél gyorsabban nem tud rajta kiáramlani. Azonban a gőzoszlop egyszer csak összeomlott, így a nyomás leesett, majd a gőz helyére víz érkezett, azaz a patronban változott a vízszint. A hőmérséklet ezzel egy időben felfelé szökött, mivel nagyon kevés gőz keletkezett. A patron nem volt tele vízzel, így a forrcső végén átadódó hőteljesítmény – mivel kevés gőz állt rendelkezésre – ennek hőmérsékletét a kilépésnél nagyon megemelte. A fogaskerék szivattyún végig pozitív tömegáramot mértünk. Ez a probléma egy elméleti vizsgálat része lehet majd a jövőben, mivel a rendszert nem sikerült néhány PID szabályzási paraméterváltoztatás után sem

stabilizálni. Az automata beállítás sem hozott eredményt. Ennek valószínűleg a nyomás és a hőmérséklet közt jelentkező 180°-os fáziskülönbség lehetett az oka.

A láng stabilizálásának érdekében a fúvókával koncentrikusan elhelyeztünk egy acélhengert, mely a felmelegedése után részben hősugárzás segítségével érte el a hatást. Mivel a fúvóka kilépő átmérője kisebb volt, ezért egy Borda-Carnot átmenetnek tekinthető ez a megoldás. Amint az a 17. ábrán is látszik, a hirtelen keresztmetszet változás egy tórusz alakú örvényt indukál [17]. Ez a lángfront hőjének egy részét visszaforgatja a fúvóka kilépése felé, így melegítve azt. Tehát konvektív módon is történik hőátadás a tüzelőanyag-levegő keverék felé.



17. ábra: Borda-Carnot átmenet [18]

Az üzemanyag és a víz-etanol keverék egy-egy edényben voltak tárolva (14. ábra), ezeket külön digitális mérlegre helyeztük. Az aktuális súlyukat számítógépen rögzítettük. Az időbeli változásból kiszámítható a fogyasztás. A lángot egy Bunsen-égővel gyújtottuk meg.

6.2. Lángképek elemzése [19]

A tesztpad működése alatt folyamatosan képeket és videókat készítettünk a vizuális kiértékelés érdekében. Ez idő alatt mértük az előmelegített folyadék és a túlhevített vízgőz hőmérsékletét és a porlasztónyomást. A képek készítésének idejét szinkronizáltuk a számítógépes mintavételezés idejével. A tapasztalat alapján a láng minőségét a túlhevítési hőmérséklet látványosan nem befolyásolta. A porlasztónyomás viszont egyértelműen a legfontosabb üzemi jellemző.



18. ábra: Lángképek

(képek balról jobbra)	1. kép	2. kép	3. kép	4. kép	5. kép
Záridő [s]	1/160	1/250	1/25	1/30	1/30
Porlasztónyomás [bar]	2,1	1,7	1,5	2,1	2,1

1. táblázat: A 18. ábrához tartozó adatok

A tökéletlen porlasztást jelzi az inhomogén lángkép. A 2. és 3. képen egyaránt jól látszanak az üzemanyagcseppek jelenléte miatt kialakuló sárgás lángcsíkok. Az 1. és 4. kép esetén megfelelő volt a porlasztás, ugyanis a nagyobb porlasztónyomás miatt fellépő nagyobb kiáramlási sebesség kisebb üzemanyagcseppeket eredményezett, amelyek még a lángfront előtt megfelelően el tudtak párologni és keveredni az égéslevegővel. Az 5. képen látható láng nagyobb üzemanyag tömegáram mellett készült, de még ekkor sem jelentek meg - csíkot hagyva a képen - égő üzemanyagcseppek a relatíve hosszúnak számító záridő (1/30 s) mellett sem, tehát a porlasztás megfelelő volt.

A továbbiakban olyan konfigurációk bemutatása következik, amelyek mérése már a porlasztónyomás hatásának ismeretében történt. Ennek megfelelően a jó összehasonlíthatóság érdekében a fényképezőgépen a fókusz, a fényképezőgép a fókusz és a rekesztértéket állandón tartottuk. Az egyedüli változtatott paraméter a záridő volt. Ezek a következők voltak: 1/30 és 1/100 s. Mivel a diffúziós láng esetében sokkal intenzívebb lumineszcenciát tapasztaltunk, ezért kellett több záridőt is felvenni, így jobban össze lehet hasonlítani a készült felvételeket. A túl alacsony porlasztónyomás esetén a záridőt – hogy értékelhető képet kapjunk – volt, hogy 1/4000 s-ig is csökkenteni kellett. Az itt bemutatott ábrákhoz tartozó emissziós értékeket a 6.3. fejezetben vizsgáljuk majd meg.

Először a levegős porlasztás során készített képeket mutatjuk be a 19. ábrán. A kapcsolódó értékek a 2. táblázatban találhatóak.



19. ábra: Levegő segédközeges porlasztás

(képek balról jobbra)	1. kép	2. kép	3. kép	4. kép
Záridő [s]	1/4000	1/100	1/30	1/30
Porlasztónyomás [bar]	0,25	0,5	1	1,35

2. táblázat: A 19. ábrához tartozó adatok

Látható, hogy a porlasztónyomás alacsony értéke miatt relatíve magas lángot kaptunk, az égés erősen diffúziós jelleget mutatott. Az nagy lumineszcencia miatt szükséges volt rendkívül rövid záridőt választani a kép elkészítéséhez. A porlasztónyomás növekedésével a lángfront mérete egyre kisebb lesz, mivel egyre jobb előkeverést biztosítunk. Azonban a diffúziós jelleg teljesen nem szűnik meg, a lángképen az inhomogenitások jól megfigyelhetők végig.

A 20. ábra a tisztán vízgőzzel történő porlasztás lángképeit mutatja be. Ebben az esetben mindegyik képet sikerült 1/30 s záridővel elkészíteni, az alacsony porlasztónyomás sem okozott intenzív lumineszcenciát, a képek értékelhetőek maradtak így is.



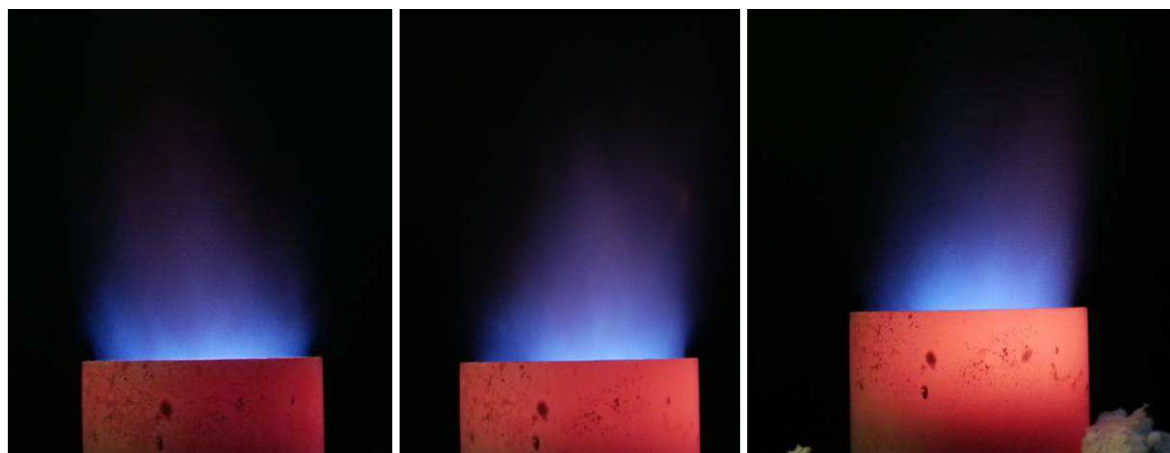
20. ábra: Vízgőz segédközeges porlasztás

(képek balról jobbra)	1. kép	2. kép	3. kép	4. kép	5. kép
Záridő [s]	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30
Porlasztónyomás [bar]	0,24	0,53	0,73	1	1,45

3. táblázat: A 20. ábrához tartozó adatok

Bár a porlasztónyomást széles tartományban változtattuk, ennek ellenére mégsem tapasztalunk az 1. eset után olyan lényegi változásokat a felvételeken, mint az a levegő esetében (19. ábra) látható volt. A láng diffúziós jellege már 0,53 bar porlasztónyomás esetén gyakorlatilag eltűnt, így a lángfront egyenletes, homogén jelleget mutatott.

A 21. ábrán mutatjuk be a víz-etanol keverékes porlasztás lángképeit. A kapcsolódó értékek a 3. táblázatban találhatók. A képkészítés szempontjából itt is elég volt az 1/30 s záridő, megfelelő minőségű eredményt kaptunk ezzel a beállítással.



21. ábra: Etanol-víz 50 m%-os elegy gőzével történő porlasztás

(képek balról jobbra)	1. kép	2. kép	3. kép
Záridő [s]	1/30	1/30	1/30
Porlasztónyomás [bar]	1	1,27	1,56

4. táblázat: A 21. ábrához tartozó adatok

Az etanol esetében már csak 4 mérési pontot vettünk fel. Ezek azok voltak, ahol a vízgőz alkalmazása már megfelelő porlasztást eredményezett. Mivel itt 3 értékelhető kép született, így a 21. ábrán ezeket mutatjuk be. A képeket elemezve láthatjuk, hogy nagy különbséget nem látunk ezek közt. Ugyanolyan jelleget tapasztalunk, mint vízgőz esetén. A képek jobb megértéséhez érdemes megvizsgálni a mért emissziós értékeket (6.4. fejezet), valamint a készített numerikus szimuláció legfontosabb eredményeit is (6.5. fejezet).

A lángról készítettünk nagyfrekvenciás videókat is, a képrögzítés sebessége 1000 képkocka/s volt. A lejátszásnál az alapértelmezett 30 képkocka/másodperc sebesség mellett sikerült kicsit lassabban is megvizsgálni az áramlást. A gyors képkockotás a felbontás kárára megy. Így az egyetlen választható mód a 224*64 pixeles méret volt. A videók közül az alacsony porlasztónyomás esetén készültek viszonylag jó minőségűek lettek, ugyanis itt a rövid idő alatt elég fény jutott az objektívbe. Viszont a gőzös porlasztások esetén a videók már kevésbé látványosak. Ez az eredmény várható is volt, hiszen a 2. 3. és 4. táblázatot megvizsgálva láthatjuk, hogy pont ilyen nyomásértékek mellett tapasztalunk nagyobb lumineszcenciát és alkalmazunk rövidebb záridőt, ahol szükséges. A videót az előadáson fogjuk bemutatni.

6.3. A füstgázelemzés módszereinek bemutatása [20]

A HORIBA gyártmányú mérőrendszert nagyteljesítményű Otto-motorok és személygépjármű Diesel-motorok folyamatos és direkt emisszió mérésére fejlesztették ki, US szövetségi regiszter Vol. 42 No. 174 (1977) szabványának megfelelően. Azóta a mérőrendszert és annak kialakítását elfogadja az ENSZ EGB 49.03 sz. előírás illetve az ESC (EEC Directive 88/77, EEC Journal Officiel L36, 8 Feb. 1988) vizsgálat is.

A berendezés jelenlegi kiépítettségében 4 csatornás, a CO, CO₂, THC és NO/NO_x kibocsátás mérésére alkalmas. Az egyes csatornák típusa:

CO elemző: AIA-23 (HORIBA),

mérési elv: NDIR (nem-diszperzív infravörös),
mérési tartományok: 0-0,1 és 0-0,5 V/V %

CO₂ elemző: AIA-23 (HORIBA),

mérési elv: NDIR (nem-diszperzív infravörös),
mérési tartományok: 0-8 és 0-16 V/V %

THC elemző: FIA-22 (HORIBA),

mérési elv: H FID (fűtött lángionizációs),
mérési tartományok: 0-10, 0-20, 0-50, 0-100, 0-200, 0-500, 0-1000, 0-2000 és 0-5000 ppm

NO/NO_x elemző: CLA-53

mérési elv: H CLD (kemilumineszcens),
mérési tartományok: 0-10, 0-20, 0-50, 0-100, 0-200, 0-500, 0-1000, 0-2000 és 0-5000 ppm

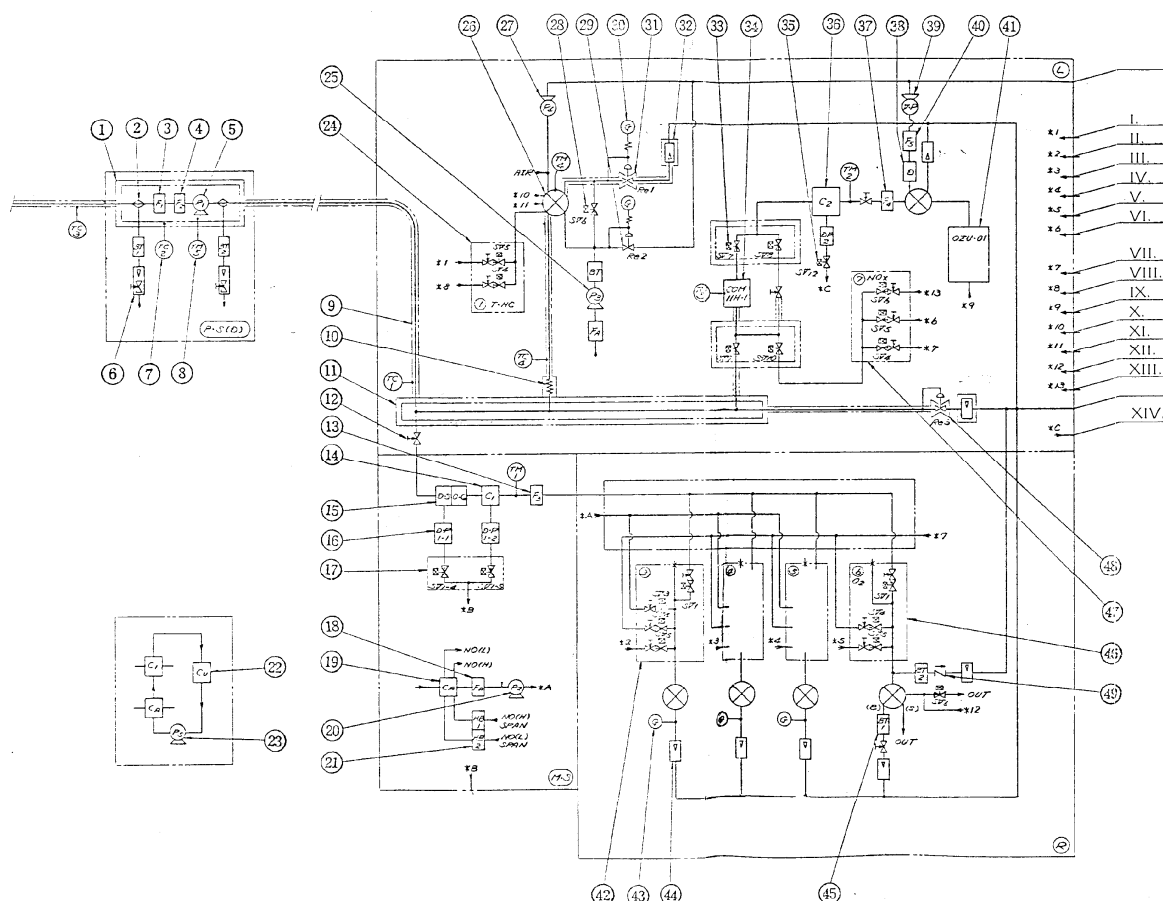
Főbb üzemi paraméterek:

Minta térfogatáram:	15 l/perc,
Fűtött elemek hőmérséklete:	190 °C,
Bemelegedési idő:	2 óra,
Beállási idő:	5 s (5 méteres mintavevő vezeték esetén),
Minta hűtési hőmérséklete (NDIR elemzők):	5 °C,
Elektromos hűtés (CLD):	7 °C,

A berendezés a mintát először az előfűtött mintavevőcsövön (pre-sample) a magas hőmérsékletű kamrába szívja, ahol két szűrő után jut a mintaszállító szivattyúba. Innen jut a minta fűtött mintavevő vezetéken keresztül a mérőrendszerbe. Itt a fűtött mintaelosztó vezetékből négy irányban halad tovább az NDIR érzékelők hűtő hőcserélőjébe, fűtött kapillárison a H FID érzékelőhöz és a H CLD érzékelő irányába a NO/NO_x konverter választó szelepeihez. A felesleg a megkerülő ágon a nyomásszabályzó után a füstgázágban távozik. A NDIR (CO, CO₂) ág egy további szűrő után az érzékelők a minta, nulla- és kalibráló gáz kiválasztó és szabályzó szelepei után jut az érzékelőkhöz. Innen a csatornák mennyiségellenőrző rotaméterei után jut a gyűjtő füstgázágba és távozik a rendszerből.

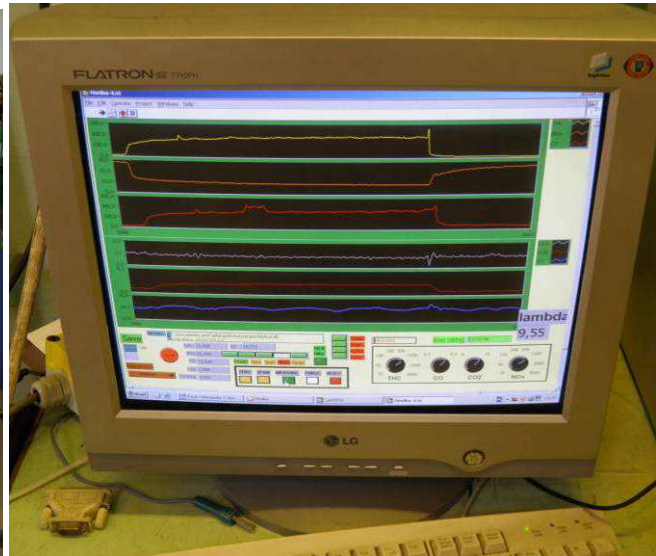
A H CLD (NO/NO_x) ág a konverter és annak kiválasztó szelepei (NO vagy NO_x) után az elektromos hűtőn és egy szűrőn keresztül jut az érzékelőbe, ahol reagál az ózongenerátorból érkező O₃-mal. A mérés után a vákuumszivattyú juttatja a mintát a gyújtó füstgázágba. Az ellenőrző rotaméter a megkerülő ágba van építve.

A H FID (THC) ág egy további fűtött mintavevő vezetéken keresztül jut az érzékelőhöz, innen egy nyomásszabályzó és az ellenőrző rotaméter után távozik a gyújtó füstgázágba [20].



22. ábra: HORIBA MEXA-8120 F emisszió mérőrendszer felépítése

1. magas hőmérsékletű kamra, 2. választó szelep, 3. Szűrő I., 4. Szűrő II., 5. mintaszállító szivattyú, 6. Rotaméter, 7. Hőmérséklet jeladó (szabályzás), 8. Hőmérséklet jeladó (adatgyűjtés), 9. Fűtött mintavevő, 10. Kapilláris, 11. Minta elosztó vezeték, 12. Szabályzó Szelep, 13. Szűrő, 14. Hűtőhőcserélő, 15. Olaj és kondenz leválasztó, 16. Kondenz edény, 17. Szelep egység, 18. Levegőszűrő, 19. Tisztítógáz hőcserélő, 20. Tisztítógáz szivattyú, 21. NO kalibráló gáz nedvesítő, 22. Hűtőegység, 23. Víz keringető szivattyú, 24. Szelep egység, 25. Levegő szabályzó szivattyú, 26. Analizátor, 27. Szivattyú, 28. Szelep, 29. Nyomásszabályzó, 30. Nyomásmérő, 31. Nyomásszabályzó, 32. Rotaméter, 33. Szelep, 34. NO-NO_x konverter, 35. Szelep, 36. Elektromos hűtő, 37. Szűrő, 38. Ózon bontó, 39. Vákuum szivattyú, 40. Szűrő, 41. Ózon előállító generátor, 42. Szelep, 43. Nyomásmérő, 44. Rotaméter, 45. Puffer tartály, 46. Szelep, 47. Szelep, 48. Nyomásszabályzó, 49. Ellenőrző szelep.



23. ábra: Az emissziómérő vetélőegysége és az emissziómérő programja



24. ábra: Az emissziómérő mintavételező egysége

Az MSZ ISO 11042-1 szabvány rögzíti a mérési eredmények emissziós határértékekkel való összehasonlításának módját. A leírtak szerint jártunk el mi is a kiértékelés során. Meg kell határozni az adott füstgáz összetevő koncentrációját meghatározott oxigén tartalom esetére.

$$EV_{15, \text{száraz}} = \varphi_{\text{száraz}} \cdot \frac{20,95 - 15}{20,95 - \varphi_{O_2, \text{száraz}}}$$

ahol:

$\varphi_{\text{száraz}}$: egy adott füstgáz összetevő koncentrációja száraz füstgáz esetén

$\varphi_{O_2, \text{száraz}}$: a mért oxigéntartalom százalékban

$EV_{15, \text{száraz}}$: egy adott füstgáz összetevő 15% oxigéntartalomra átszámított koncentrációja

Végül meg kell határozni az adott összetevő koncentrációját [mg/m³]-ben az előzőleg átszámított értékből.

$$EM_{15,sz\acute{a}raz} = EV_{15,sz\acute{a}raz} \rho_n$$

ahol:

$EM_{15,sz\acute{a}raz}$: a füstgázösszetevő koncentrációja 15%-os oxigéntartalmú, normálállapotú száraz füstgázra átszámítva [mg/m³]

ρ_n : az adott komponens normál sűrűsége

A normál sűrűség az összetevő móltömegének és normáltérfogatának hányadosaként adódik:

$$\rho_n = \frac{M}{V_{mn}}$$

ahol:

M : a komponens móltömege [kg/kmol]

V_{mn} : a komponens normáltérfogata [m³/kmol]

Az emissziós határértékekre tájékoztató jelleggel a 23/2001. (XI. 13.) KöM rendeletben megadott értékek:

Légszennyező anyag	Kibocsátási határérték [mg/m ³]
Szilárd anyag	5
Szén-monoxid (CO)	100
Nitrogén-oxidók (NO ₂ -ben kifejezve)	350
Kén-dioxid és kén-trioxid (SO ₂ -ben kifejezve)	35 ⁽¹⁾

5. táblázat: emissziós határértékek [21]

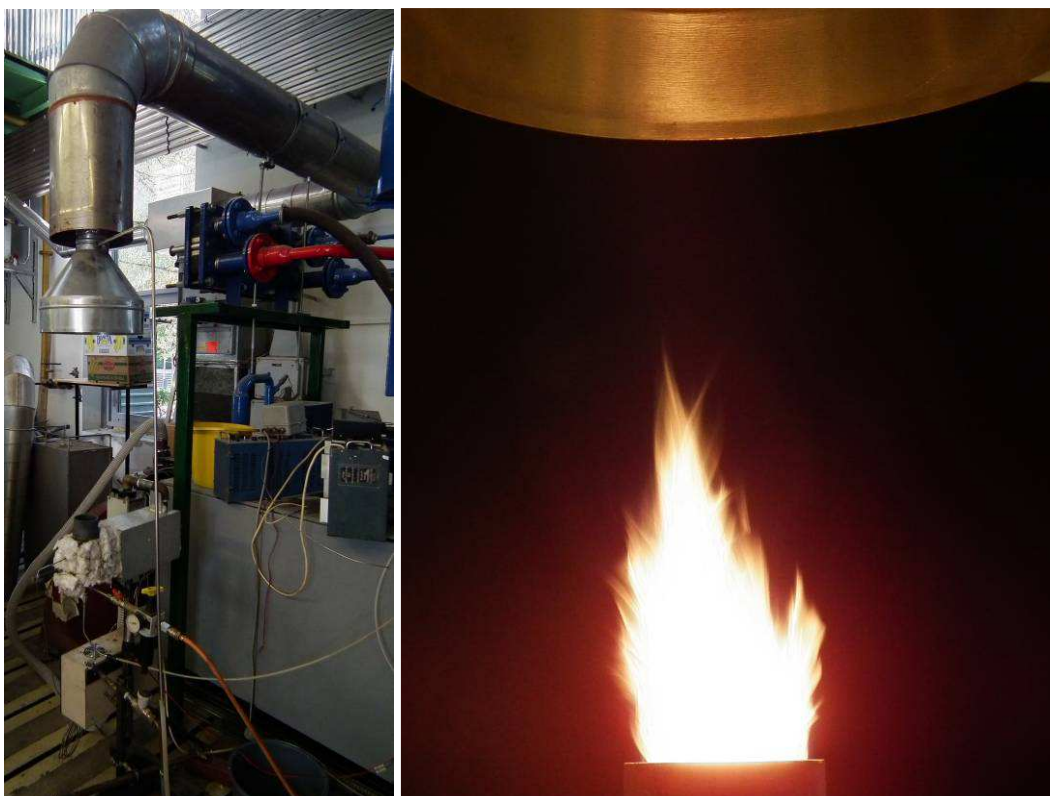
Megjegyzés:

(1) Kőolajfinomításnál keletkező alacsony fűtőértékű gáz (fűtőgáz) és kohógáz esetében: 300 mg/m³. Koksizoló kemencegáz (kamragáz) esetén: 400 mg/m³. A mg/m³-ben kifejezett koncentrációk száraz (vízmentes), 273 K hőmérsékletű, 101,3 kPa nyomású, 3% oxigéntartalmú füstgázra vonatkoznak; biogáz tüzelés esetében a vonatkoztatási oxigéntartalom 11% [21].

Ezen értékek 140 kW-50 MW névleges teljesítményű, gázüzemű gázturbinás berendezésekre vonatkoznak. A kibocsátási mérés eredményeit minden esetben átszámítottuk és összehasonlítottuk határértékekkel.

6.4. Füstgázelemzés

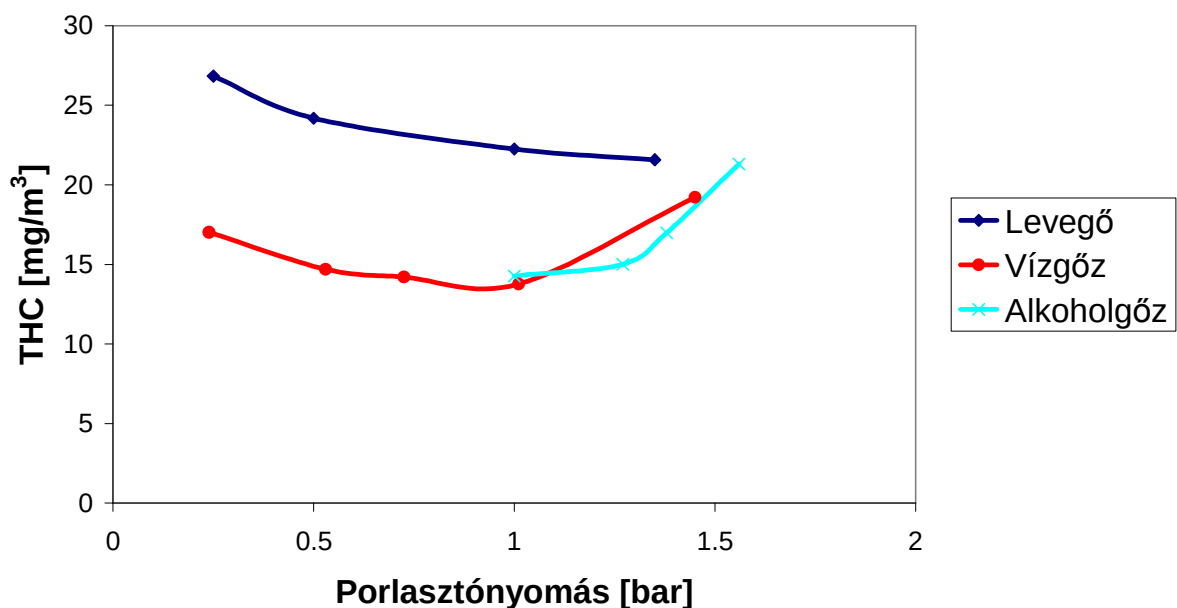
A tesztpad fúvókája alapvetően a légkörre van nyitva, így a keletkező füstgáz is oda távozik. A mintavételezéshez egy olyan csövet kellett építeni, ami garantáltan csak a füstgázt tartalmazza. Ezért egy ernyőt helyeztünk a fúvóka fölé megfelelő magasságba, amely a teljes füstgáz mennyiséget nem tudja befogadni. Ez az állapot - a hőmérsékletkülönbség következtében létrejövő törésmutató változás (Schlieren jelenség) – szabad szemmel is jól látszik, így könnyen be tudtuk állítani az ernyőt a megfelelő pozícióba. Ezt egy meglévő füstgázelszívó csőre rögzítettük (25. ábra), majd a legszűkebb keresztmetszetre kötöttük az emissziómérő fűtött mintavételező vezetékét. A füstgázvezeték megfelelő működéséről egy beépített ventilátor gondoskodott. Így biztosan folyamatos volt az elszívás.



25. ábra: Az ernyő a füstgázvezetékkel, valamint a porlasztó üzem közben

Az emissziómérés eredményeit a 26. 27. és 28. ábrán mutatjuk be. A mérőberendezés által regisztrált értékeket egy LabVIEW környezetben írt, tanszéki fejlesztésű program segítségével rögzítettük. A felhasznált beállítások a következők voltak: tisztán levegővel, tisztán desztillált víz gőzével, valamint 50 tömegszázalékos etanol-desztillált víz keverék gőzével végeztük a tüzelőanyag porlasztását. A bemutatott értékeket eredetileg ppm-ben mértük, azonban ezeket átszámoltuk a szabvány kívánalmainak megfelelően. Minden mérés előtt az emissziómérőt kalibráltuk az ismert koncentrációjú (tisztá N_2) és a semleges (tisztá O_3) gázzal.

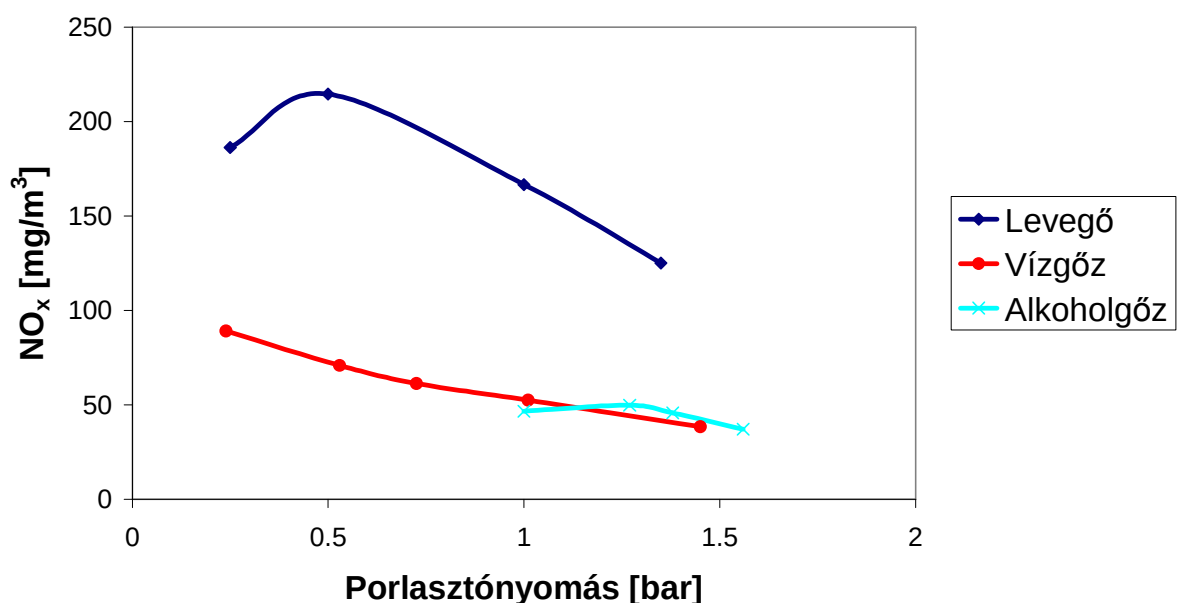
A porlasztónyomás hatása a THC kibocsátásra



26. ábra: THC kibocsátás a porlasztónyomás függvényében

A THC mérése során egy lángkialvás drasztikus mértékben megnöveli a rendszerben jelenlévő elégetlen szénhidrogének mennyiségét, ezért kiemelten figyeltünk a láng stabilizálására, ugyanis a rendszerben még jelenlévő anyag egy időre lehetetlenné teszi a pontos mérést. A kapott értékek már levegő esetén is meglehetősen alacsonynak bizonyultak, így az észlelhető minimális javulás megfelelő eredmény.

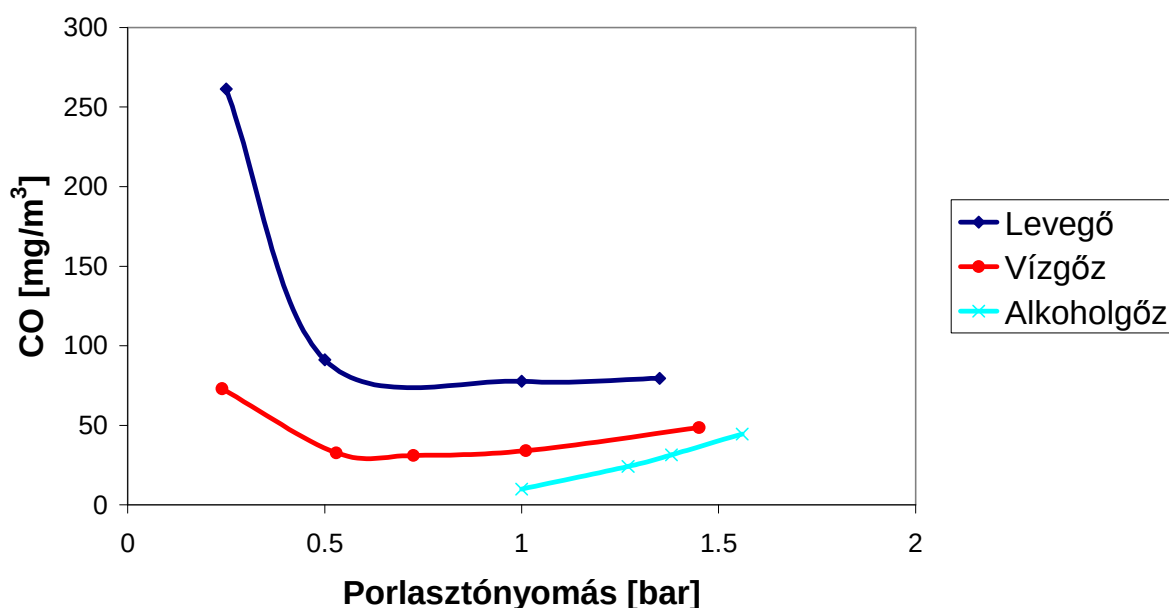
A porlasztónyomás hatása a NO_x kibocsátásra



27. ábra: NO_x kibocsátás a porlasztónyomás függvényében

A 27. ábrán látszik a levegős mérési adatsor jellegéből, hogy a porlasztási segédközeg tömegárama nagyban befolyásolja a légfelesleget is. Ez nem véletlen, hiszen a cseppek képzéséhez felhasznált légmennyiség 1,5 bar esetén már a fele az égéslevegőnek [22]. Az elért csökkenés a kibocsátásban rendkívül figyelemreméltó, ugyanis 1,35 bar porlasztónyomás esetén az eredeti érték harmadára, 0,25 bar esetén felére sikerült redukálni az NO_x kibocsátásunkat. A köztes értékek esetén tapasztalhatunk nagyobb arányokat is.

A porlasztónyomás hatása a CO kibocsátásra



28. ábra: CO kibocsátás a porlasztónyomás függvényében

A 28. ábra esetében is a légfelesleg hatását láthatjuk viszont a mérési eredményeink közt. Ha a 0,25 bar porlasztónyomáshoz tartozó értékeket most figyelmen kívül hagyjuk, akkor megállapíthatjuk, hogy vízgőz esetében megfeleztük, etanol esetén pedig volt, hogy 1/8-adára csökkentettük a CO kibocsátásunkat.

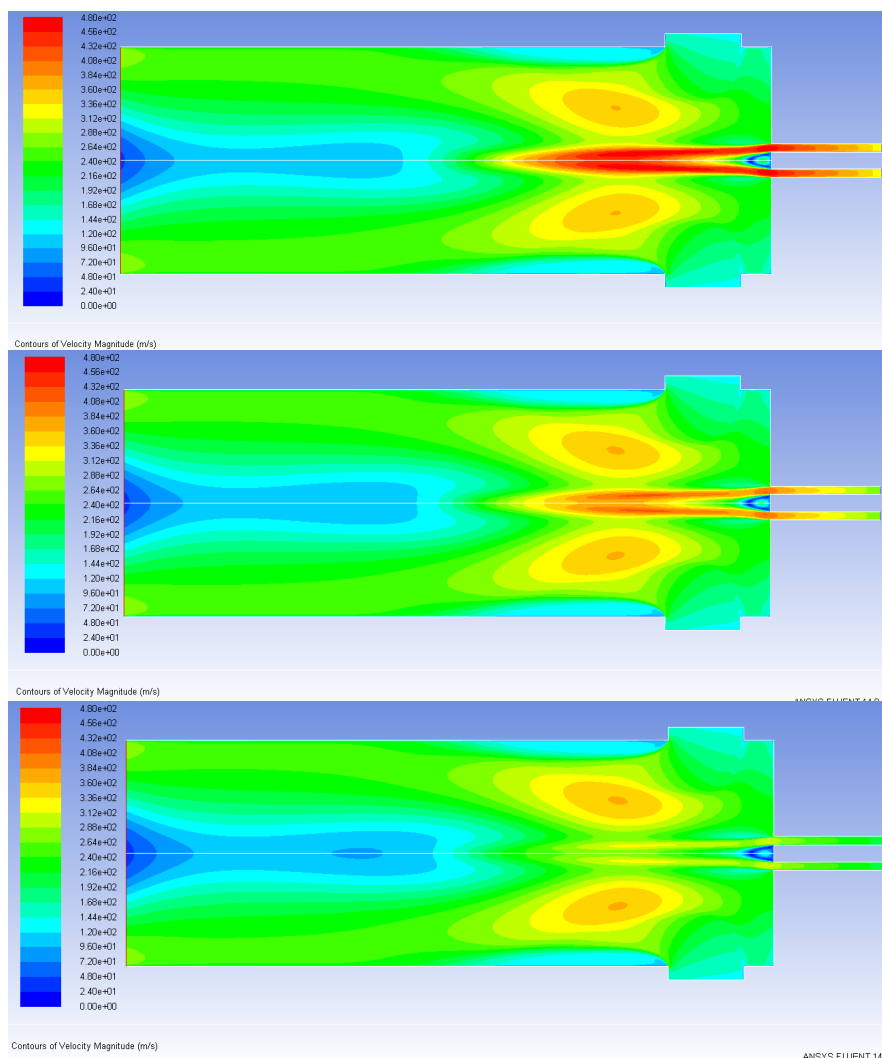
A kapott eredmények rendkívül kedvezőek számunkra. A 4.1. fejezetben leírtuk, hogy a NO_x illetve CO-THC értékek a gyakorlatban csökkenthetők, de a másik jellemző növekedni fog. A mi esetünkben a kimért tartományok mindegyikében a levegős porlasztáshoz képest javulást tudtunk elérni.

6.5. Az áramlási viszonyok elemzése [22]

A füstgázelemzés megmutatta, hogy a kibocsátás szempontjából – ami egyre inkább elsődleges tervezési kritérium manapság – milyen előremutató eredményeket érhetünk el a fűvóka segédközegének megfelelő megválasztásával. A 3.3. fejezetben bemutattuk, hogy a nagyobb nyomás hogy hat a stabilitásra. Ezzel együtt az emisszió is változik, mégpedig kedvezőbb értékeket kapunk általában, ha növeljük az égés nyomását. Ha a megoldásunkat integráljuk a gázturbinába, akkor már nehezebb lesz különböző eseteket vizsgálni, mivel ott

egy komplex rendszerrel kell együttműködni majd. Ezért szükséges, hogy a fúvóka vizsgálatánál már megtaláljuk az optimális üzemi körülményeket. Ebben sokat segíthet a fúvókában kialakuló áramlás megértése. A folyamat viszonylag komplex, így analitikus formulák használata az esetünkben körülményes, illetve a kapott eredmények pontatlanok lesznek. Ezért készítettünk numerikus áramlástan szimulációt ANSYS FLUENT 14.0 szoftverkörnyezetben a jelenség mélyebb megértése céljából.

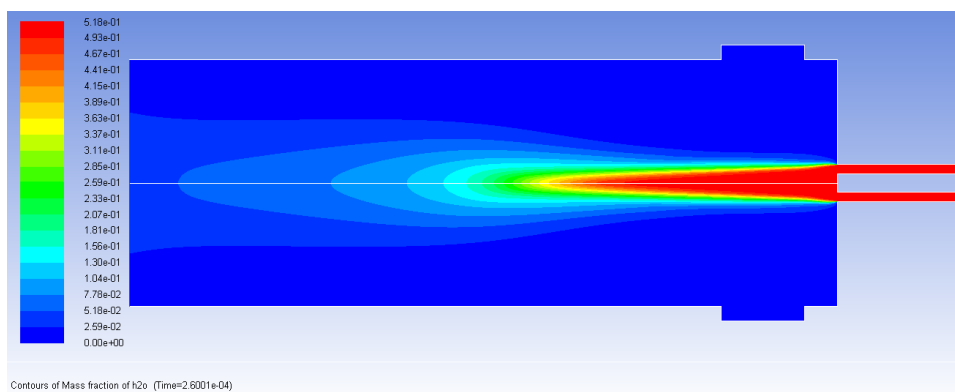
A következő néhány ábrán bemutatjuk a legjelentősebb eredményeket. A különböző konfigurációk könnyen beállíthatók, mivel a peremfeltételeknél csak egy számot kell átírni, ezért a CFD is segít az optimalizációban. A viszonylag kevés cella (216000) miatt pedig a szimuláció 1 óra alatt lefut. A megfelelő egyenletek megválasztása kulcsfontosságú, egyébként a megoldás nem lesz konvergens, vagy más helyre konvergál, mivel más fizikai problémát oldunk meg. A bemutatott modellek minden esetben 2D-s, axiszimmetrikus szimuláció eredményei. A forgástengelyre tükröztük az eredményeket, így látvány szempontjából egy teljes fúvóka metszetét láthatjuk viszont. A viszonylag rövid futási idő és a megfelelő minőségű háló érdekében az eredeti geometriát egyszerűsítettük.



29. ábra: vízgőz (fent), víz-etanol keverék gőz (középen) és etanolgőz (lent) segédközegű porlasztás sebességszámértéke (porlasztónyomás: 40 kPa)

Az etanol és a vízgőz közti különbségre világít rá a 29. ábra. A megadott sebességmaximum mind a három esetben 480 m/s volt. Látható, hogy az etanol fizikai tulajdonságai miatt, ugyanolyan peremfeltételek esetén lassabban áramlik ki a fúvókából, a keverék pedig várható módon a kettő közt helyezkedik el. Azonban a nyomás növelésével növelhetjük a kiáramlás sebességét. Tehát ha ugyanazt az áramlási teret akarjuk visszakapni, etanol, vagy etanol-víz segédközeg alkalmazása esetén, akkor a porlasztónyomást kell növelnünk. Ez a hatás – mivel kis különbségekről van szó – magyarázatot adhat arra, hogy az emissziómérés eredményeit tartalmazó ábrákon miért esik közel egymáshoz a vízgőzös és a vízgőz+etanolgőzös porlasztás esetében kapott görbe és miért helyezkedik el enyhén balra tolva a vízgőzhöz tartozó adatsor az alkoholgőzhöz képest.

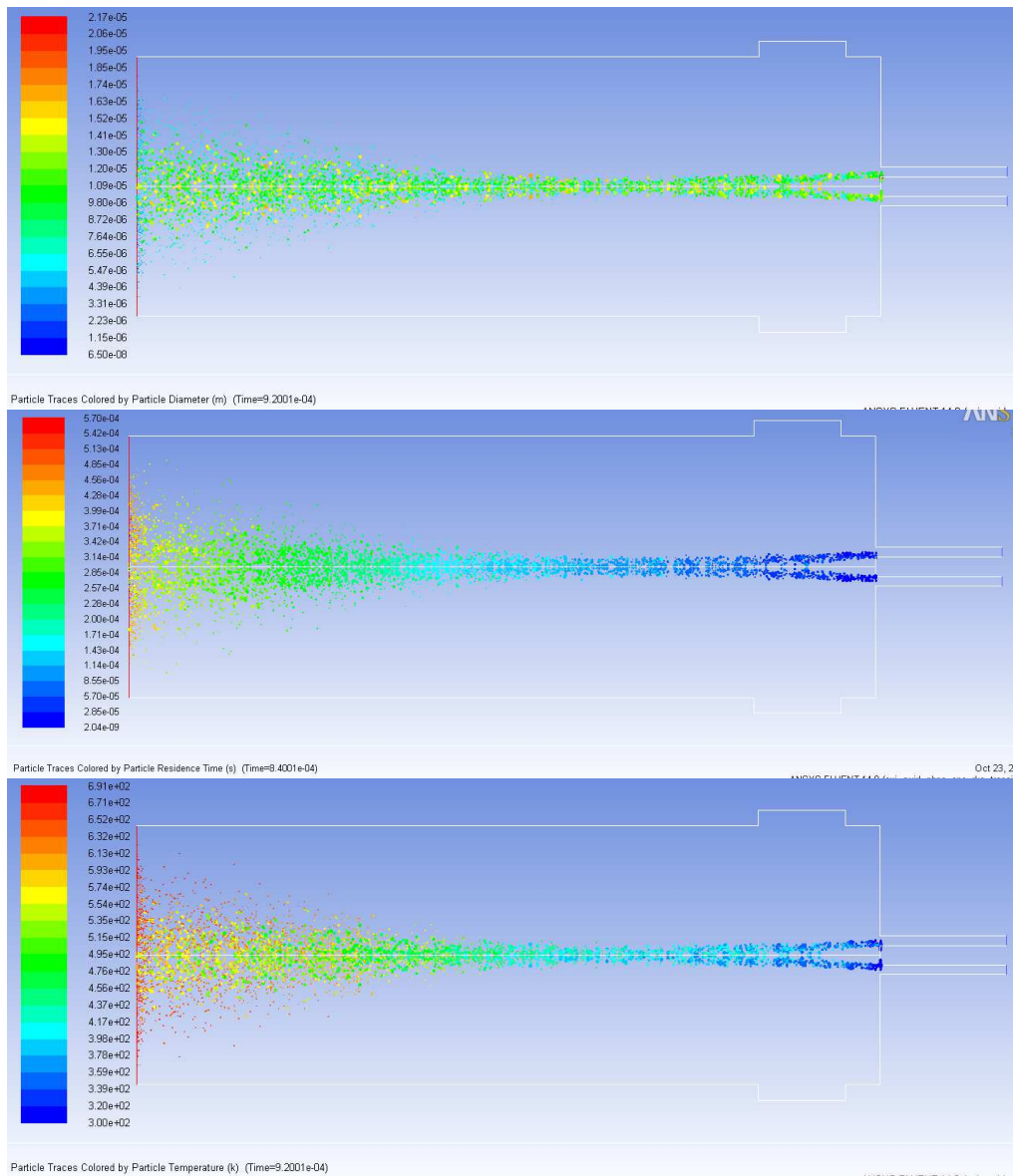
Nem szabad megfeledkezni arról sem, hogy a használt segédközegekben az oxigén kötött állapotban volt jelen. Tehát a segédközeg szabadsugarában nem volt meg az égéshez szükséges koncentráció, így itt biztosan nem tud még megindulni az égés. Mivel a CFD modellünk még nem tartalmaz égési számításokat és a fúvókánkban kialakuló áramlási tér is csak a jövőben lesz kimérve, ezért kellő bizonyíték hiányában nem állítjuk, hogy a levegőhöz képest elért kisebb kibocsátásnak részben ez az oka. Így ezt a lehetőséget részletesebben meg fogjuk vizsgálni a későbbiekben. A 30. ábrán látható a vízgőz koncentrációjának a kontúrja.



30. ábra: A víz koncentrációjának kontúrja

A porlasztás vizsgálata numerikusan elég körülményes. A FLUENT beépített megoldói empirikus formulákat használnak fel erre [23]. Igaz, ezek az egyenletek viszonylag széles tartományban működnek elfogadhatóan, de érdemes távolságtartással kezelni a kapott eredményeket.

Az emissziós értékek közül a CO és a THC kibocsátás (26. és 28. ábra) a növekvő porlasztónyomás hatására növekedésnek indul. Ez magyarázható lehet azzal, hogy hiába eredményez kisebb cseppátmérőt a nagyobb áramlási sebesség, de ha a szabadsugár túl hosszú, akkor ebben nagyon gyorsan tudnak haladni a folyadékcseppek és így lerövidül a tartózkodási idejük. Ennek megfelelően az égési zóna előtt nem tudnak kellően elpárologni és elkeveredni az égéslevegővel, így a kibocsátás romolhat. A 31. ábrán a szimulált tüzelőanyagcsepp eloszlást mutatjuk be a fúvóka belsejében.



31. ábra: A folyadékcseppek kiszínezve átmérő szerint (fent), tartózkodási idő szerint (középen) és hőmérséklet szerint (lent)

A folyadékcseppek átlagos átmérője a numerikus szimuláció alapján $10 \mu\text{m}$, a tartózkodási idő $0,5 \text{ ms}$. A hőmérséklet szerinti eloszlás pedig mutatja, hogy a 300 K -es kiindulási hőmérsékletről hogyan melegsznek fel a cseppek.

A vizsgálat során egy kézi hangnyomásszint mérővel mértük a fúvóka áramlási eredetű, illetve az égés és az áramlás együttes zaját. A műszert a fúvókával egyforma magasságban tartottuk, a kifúvási keresztmetszettől 1 m távolságra. A 6. táblázat tartalmazza a mért eredményeinket.

Porlasztónyomás [bar]	L _A [dB] (égés+áramlás)	L _C [dB] (égés+áramlás)	L _A [dB] (áramlás)	L _C [dB] (áramlás)
1,5 bar (levegő)	96.8	98.3	79.8	80
1 bar (levegő)	95.1	97	75.8	76.5
0,5 bar (levegő)	93.7	94.8	51.5	74
0,25 bar (levegő)	89.1	91.6	69.2	74
1,5 bar (vízgőz)	94.8	97.1	79.3	79.7
1 bar (vízgőz)	94.4	96.6	77.3	78.4

6. táblázat: Az akusztikai mérés eredménye

A mérést az emberi fül karakterisztikáját figyelembevevő A hangnyomásszinten és egy minden frekvenciát azonos súllyal kezelő C hangnyomásszinten is elvégeztük. Látható, hogy az áramlási eredetű zaj eltörpül az égés beindulása után mért zajhoz képest, mivel a skála logaritmikus. Tehát +3 dB értéket kapunk akkor, ha ugyanabból a zajforrásból 2-t összegzünk. A mért értékek a jelenlegi formájukban elég durva közelítések, mivel a zaj spektrális elemzése során sokkal látványosabban kirajzolódnak a változások. Azonban a mért értékek közti eltérés viszont egy objektív eredmény. Tehát égéssel 1,5 és 1 bar porlasztónyomás esetén a 2 dB(A) és a 0,7 dB(A), valamint az 1,2 dB(C) és 0,4 dB(C) hangnyomásszintek egyáltalán nem elhanyagolható eredmények. A C hangnyomásszintben kapott magasabb eredmények utalnak a turbulens zajra, mivel a fülünk 500-5000 Hz-ig hall a legélesebben, a turbulencia pedig rendszerint magasabb frekvenciatartományokban jelentkezik elkenődve. A műszer hibája 0,1 dB. A jövőben érdemes lenne a jelenséget spektrálisan értékelni, valamint egy mikrofontömbös mérést is elvégezni. Utóbbi segíthet a nyírórétegek detektálásában, ugyanis mindig nyírásból származik a léghang. A kapott eredmények várható következményei voltak a homogénebb és tisztább égésnek.

6. Összefoglalás

A dolgozat elején bemutatottuk a gázturbina égőterével és a porlasztókkal, valamint a porlasztás folyamatával kapcsolatos irodalmat. Láthattuk, hogy a légporklasztók esetén a kiáramlási sebesség nagyban befolyásolja az égés minőségét. Ezt a valóságban a porlasztási segédközeg nyomásának vezérlésével változtattuk. A másik fontos paraméter az üzemanyagcsepp tartózkodási idejének növelése. Ennek a paraméternek a javításához viszont kisebb porlasztási sebesség szükséges, így tovább tart a tüzelőanyag cseppeknek kijutni a fúvókából. Ezek ismeretében egy optimumkeresést hajthatunk végre. Mivel a rendszerünk viszonylag nehezen modellezhető, ezért a mérési eredmények segítenek a jelenség tanulmányozása szempontjából.

Az ehhez készített tesztpadot, valamint az emissziómérő rendszert bemutattuk az ide vonatkozó hatályos gázturbinák kibocsátására vonatkozó magyar szabvánnyal együtt. A lángképek elemzése első lépésként nagy segítséget nyújtott a későbbi vizsgálati beállítások kitűzésében. Így az égés minősége szempontjából kiemelkedően fontos porlasztónyomás hatása már az első kísérletek alkalmával egyértelműen megmutatkozott. A későbbi mérések során ezt a paramétert változtattuk elsődlegesen és figyeltük a többi üzemi jellemző alakulását.

A választott porlasztási segédközegeink a következők voltak: levegő, víz, víz-etanol 50 tömegszázalékos elegye. Az utóbbi egy szimulált tüzelőanyag. Ez reprezentálja a valóságban veszélyes hulladéknak minősülő elő- illetve utópárlatokat, amivel a porlasztást a későbbiekben szintén ki fogjuk próbálni.

Az emissziós adatok elemzése alapján kijelenthetjük, hogy a levegő segédközegű megoldásnál jobban teljesít a vízgőzös megoldás. Ettől néhol kedvezőbb konfiguráció a víz-etanol 50 tömegszázalékos elegyének a gőze, azonban a vízgőzös esethez képest már viszonylag kevés az előrelépés a THC és az NO_x kibocsátások szempontjából. Viszont a CO kibocsátás esetén láthatjuk, hogy az etanol kedvezően hat erre, így volt olyan beállítás, ahol a levegő segédközeget porlasztáshoz képest a kibocsátást $1/8$ -ára csökkentettük.

Az NO_x kibocsátás esetén az alkoholgőz és a vízgőz jellege nagymértékű egyezést mutatott. A levegő segédközegű porlasztáshoz képest a 0,5 bar-nál nagyobb porlasztónyomás esetén minden esetben ezt a szennyezőanyag típust harmadára tudtuk csökkenteni.

A CO kibocsátás 0,25 bar-os porlasztónyomás vízgőz esetén a levegős porlasztáshoz képest közel $1/4$ -ére csökkent. 0,5 bar esetén $1/3$ -ára szorítottuk vissza az eredeti konfigurációhoz képest a szénmonoxid kibocsátását. A nyomás növelésével ez az arány folyamatosan csökken, de 1,5 bar esetén is még az eredeti közel felére tudtuk redukálni a füstgáz CO tartalmát. A legnagyobb csökkenést az etanolgőzös porlasztás esetén értük el 1 bar-os porlasztónyomás esetén. Itt a levegős megoldáshoz képest $1/8$ -ára tudtuk redukálni a szénmonoxid kibocsátásunkat, ahogy ezt korábban említettük. Ez az arány 1,5 bar porlasztónyomásig folyamatosan csökkent, de még itt is az eredeti kibocsátásnak csupán a felét mértük.

Az kedvezőbb konfigurációk a THC kibocsátás esetében 1 bar-os porlasztónyomás esetén adta a legnagyobb mértékű javulást, ami 40% volt. Ennél nagyobb nyomás esetén a kibocsátás újra növekedésnek indult, ami a fúvókában kialakuló áramlási viszonyokkal magyarázható.

A numerikus szimuláció segített megérteni a fúvóka belső áramlási viszonyait, így magyarázatot tudtunk ezen keresztül adni a kapott emissziós eredmények alakulására. Mivel a porlasztó szabadsugár mérete a porlasztónyomás növekedésével nő, ezért a benne tartózkodó folyadékcseppek hamarabb távoznak a rendszerből. Bár a nagyobb nyomás apróbb cseppek keletkezését segíti elő, a gyorsabb áramlás miatt a fúvóka kilépésénél összegében kedvezőtlenebb tüzelőanyag eloszlást tapasztalhatunk.

A numerikus vizsgálatok eredményeként számszerűsíthettük az etanol és a víz, valamint a kettő 50 tömegszázalékos elegyének fizikai tulajdonságaiból adódó eltérést. Mivel az etanol azonos porlasztónyomás mellett a szabadsugárban lassabb áramlást alakít ki, ezért a szimuláció magyarázattal szolgál arra, hogy az NO_x és a THC diagramok esetében miért tűnik úgy, mintha az etanol-víz elegy gőzének adatsora el lenne tolva jobbra a vízgőzös konfigurációhoz képest. Tehát miért jelentkezik a keverék esetében ugyanaz a kibocsátási érték magasabb porlasztónyomáson.

A zajmérés során a vízgőz segédközeges porlasztás a levegőshöz képest az emberi fül karakterisztikáját figyelembevéve A hangnyomásszint szerint 1,5 bar porlasztónyomás esetén 2 dB(A) és 1 bar porlasztónyomás esetén 0,7 dB(A) csökkenést eredményezett. Mivel a skála logaritmikus, ezért a mért értékek figyelemre méltóak.

Továbbfejlesztési lehetőségek:

- Több víz-alkohol keverék vizsgálata, az optimális kiválasztása
- Integrálás a C330 mikro-gázturbinába, a segédközeg cseréjének hatása a teljes üzemre
- Elméleti modell fejlesztése minél általánosabb légporlasztó esetére
- CFD modell az eredeti geometriára
- A fúvóka áramlási viszonyainak és az égésnek a mérése
- Spektrális, illetve mikrofontömbös zajmérés a zajforrások feltérképezésére

Irodalomjegyzék

- [1] http://www.nasa.gov/topics/aeronautics/features/aafex_biofuels.html (a NASA tanulmány az állati zsiradékok repülésben hasznosításáról)
- [2] <http://www.nasa.gov/centers/dryden/multimedia/imagegallery/SR-71/index.html> (SR-71 Blackbird repülő képe)
- [3] Andreas Poullikkas: An overview of current and future sustainable gas turbine technologies, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2005, vol. 9, pp 409-443.
- [4] Arthur H. Lefebvre, Dilip R. Ballal: Gas Turbine Combustion, Third Edition, CRC Press, 2010
- [5] <http://www.wired.com/autopia/2012/03/boeing-freezes-design-with-liquid-natural-gas-powerd-airliner/> (a Boeing tanulmánya a földgáz alkalmazásáról a jövő repülőgépeiben)
- [6] www.bwf-group.de/en/dms/bwf-group/envirotec/img/english_web_pages/applications/header_bio_mass_heating_plant/Application%3A%20Bio%20Mass%20Power%20Station.jpg (megújuló tüzelőanyaggal működő hőerőmű képe)
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/File:Bunsen_burner_flame_types_.jpg (Bunsen-égő különböző előkeverési beállításokkal)
- [8] Arthur M. Sterling, C. A. Sleicher: The instability of capillary jets, Journal of Fluid Mechanics, 1975, vol. 68, pp. 477-495.
- [9] The scientific papers of sir Geoffrey Ingram Taylor, vol. 3, pp. 244-254., Cambridge University Press, 1963
- [10] Hyun Kyu Suh, Chang Sik Lee: Effect of cavitation in nozzle orifice on the diesel fuel atomization characteristics, International Journal of Heat and Fluid Flow 29, pp. 1001-1009, 2008
- [11] Münz Péter, Józsa Viktor: Gázturbinák hatásfoknövelő eljárása megújuló energiaforrás segítségével, TDK dolgozat, Budapest, 2010, Szekció: Energetika
- [12] Dr. Bereczky Ákos, Sztankó Krisztián, Papp József: Capstone C30 típusú gázturbina alkalmazása a decentralizált energiatermelésben (Magyar Energetika 2004/1)
- [13] Capstone C330 System Manual
- [14] Kun-Balog Attila: Nem elegyedő folyékony tüzelőanyagok adagolása gázturbina tűzterébe – TDK dolgozat, Budapest, 2008
- [15] <http://remotelab.energia.bme.hu/index.php?page=capstone1&lang=hu> (Capstone C330 bemutatása)
- [16] Münz Péter: Folyadéküzemű gázturbina fúvókájának vizsgálata, Szakdolgozat, Budapest 2011
- [17] Lajos Tamás: Az áramlástan alapjai, 4. kiadás, Budapest, 2008

- [18] http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/aerothermal_dvd_only/aero/fprops/cvanalysis/sudden.gif (Borda-Carnot átmenet képe)
- [19] Józsa Viktor: Application of bioethanol in gas turbines, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 55/2 pp. 91-94.
- [20] Horiba mexa felhasználói kézikönyv
- [21] 23/2001. (XI. 13.) KöM rendelet az emissziós határértékekre vonatkozóan
- [22] Józsa Viktor: Gázturbina léghorlasztó CFD analízise, TDK dolgozat, Budapest, 2012, Szekció: Áramlástan
- [23] FLUENT 14.0 User's Manual