

# **Záró szakmai beszámoló**

a „Magas inert tartalmú és biogázok  
tüzelési tulajdonságainak vizsgálata”

című, Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok  
(OTKA)  
K-46860 projektről

**2007**

## Bevezetés

A kutatás elsődleges célja a magas inert tartalmú gázok és biogázok tüzelési tulajdonságainak vizsgálata, a szükséges mérő rendszer kifejlesztése, valamint a főbb magyarországi és európai gáztípusok bevizsgálása, a létrehozott mérőrendszer segítségével.

### 1. A vizsgálatokhoz szükséges gáztípusok kiválasztása

A kutatási projekt első évében feltérképezésre kerül a magyar, illetve a főbb európai biogáz források összetétele. Az irodalmi adatok alapján az ipari felhasználás szempontjából fontos gáztípusokat két alapvető típusra bonthatók: az egyik a biológiai bomlással előállított, általánosan „biogáz”-nak nevezett fermentorokban megtermelt vagy deponia gázok, (tipikus összetétele 50-70% CH<sub>4</sub>, 50-30% CO<sub>2</sub>, és egyéb komponensek: O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>), jelenleg Magyarországon ez képezi az alapját a biogáz felhasználásnak. A másik, Európában és a világon most terjedő, a jövőbeli magyarországi felhasználás szempontjából fontos típus a különböző termikus bontással előállított úgynevezett pirolízis gázok, amit gyakran „fagázok”-nak nevezünk. A pirolízis gázok minősége alapvetően az előállítási technológiától függ. A biomasszát elgázosíthatjuk anaerob úton, és aerob úton levegővel (producer gáz) vagy tiszta oxigénnel (szintézis gáz). Irodalmi források szerint a fenti technológiákra jellemző fagázok összetétele a következő:

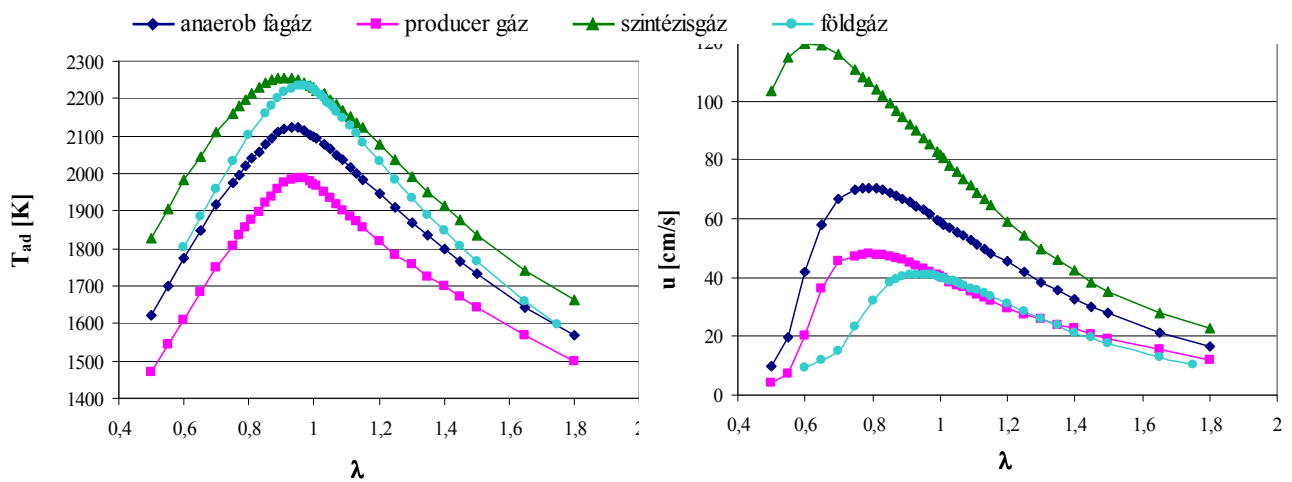
Komponens	anaerob fagáz	producer gáz	szintézis gáz
CH <sub>4</sub> (%)	8	5	3
CO <sub>2</sub> (%)	20	5	17
CO (%)	20	20	40
H <sub>2</sub> (%)	38	20	40
N <sub>2</sub> (%)	14	50	0

*1. táblázat: különböző eredetű pirolízis gázok összetétele*

A gázfajták áttekintése után meghatároztuk, hogy a kísérleteket a fenti gázkeverékekkel, valamint 40 % CO<sub>2</sub> és 60 % CH<sub>4</sub> „biogáz” gázkeverékkel végezzük el a kutatást. Ezekről a kiválasztott gázkeverékektől az irodalmi adatok alapján nem találtunk jelentős eltérést. Például a nem megújuló gáznak számító IGCC-ben is alkalmazott szintézis gázok maximum 5%-kal nagyobb a CO tartalma (45%). Így a kiválasztott öt gázkeverékektől eltérő keverékek vizsgálatát kutatás szempontjából és beszerzési okokból nem láttuk szükségesnek. A

vizsgálatok során referenciaként földgázzal hasonlítottuk össze az égési tulajdonságokat. A későbbi vizsgálatokba bevontuk a tiszta metánt is.

Előzetes vizsgálatokat végeztünk a fenti gázok tüzelési tulajdonságairól a szükséges kísérleti égők kialakításához, valamint az alap égési tulajdonságok vizsgálatára. Chemkin 4.0 program csomag és a GRI 3.0 mechanizmus segítségével modelleztük a kiválasztott gázok égése során kialakuló lángterjedési sebességeket és az adiabatikus lánghőmérsékleteket.



1. ábra. A kiválasztott gázok égése során kialakuló lángterjedési sebességeket és adiabatikus lánghőmérsékletek a légfeslesleg függvényében (Chemkin 4.0 segítségével számolva)

A számítások szerint az adiabatikus lánghőmérséklet a referencia földgáz és a szintézis gáz esetén különösen  $\lambda \geq 1$  tartományban közel megegyezik. Az anaerob és producer gáz esetén pedig csökken. A lángterjedési sebesség a szintézis gáz esetén a legmagasabb, háromszorosa a földgáznak, maximuma viszont léghiányos tartományban 0,6-os légfeslesleg esetén jön létre. Az anaerob pirolízis gáz maximális lángterjedési sebessége is több mint 1,5 szerese a földgáznak. Az eredményekből számos publikáció [1,4,9] készült el.

## 2. Mérő rendszer kifejlesztése

A kutatási projekt fontos eleme a kiválasztott gázok vizsgálatához szükséges mérőrendszer kialakítása. A vizsgálatokhoz három új, vagy már meglévő rendszert alakítottunk át, illetve a mérésekhez több már meglévő rendszert integráltunk be. Kialakításra kerültek a szükséges kísérleti égők és azok ellátó rendszerei.

## **2.1. A „Schlieren” berendezés**

A Schlieren módszer lényege az átlátszó közegek optikai törésmutató eloszlásának meghatározása résoptikai módszerrel. A optikai törésmutatót alapvetően a közeg sűrűsége befolyásolja. A sűrűséget azonban számos fizikai paraméter alakítja: pl. összetétel, nyomás, hőmérséklet. A Schlieren berendezéssel készített képen az adott képrésznek az elsötétedése utal a fény eltérülés mértékére, azaz az elsötétedés mértékéből számítható a vizsgált térfogat részben fellépett eltérülés, az eltérülés mértékéből a törésmutató és végül a pedig, a törésmutató változás okainak elemzésével nyerjük a számunkra szükséges mérési információt. (A fényforrás útjába rés, illetve egy kitakarás kerül, így egy rés-fényforrás sugárnyalábja haladhat tovább. Az eltérült fény a későbbi képen a rés élére merőleges (egy tengely) eltéréseket teszi láthatóvá. Értékelhető kép csak akkor keletkezik, amikor a rés és Schlieren blende párhuzamos.)

A Tanszéknek a tulajdonában van egy Zeiss-80 típusú Schlieren berendezés, amely eszközt megközelítőleg 20 éve nem használtak. A rendszer pozicionáló és kezelő mechanizmusa az állás során nem ment tönkre, de a benne található kenőanyagok kiszáradtak. Mozdíthatatlanná váltak az optikai elemek, így a berendezés használhatatlanná vált. Ezért szükséges volt a teljes szétszedés és tisztítás. Az összeszerelés során az optikai elemeket újra be kellett állítani, és a pozicionáló rendszert kalibrálni.

A berendezés felhasználása több irányban indult el. Az egyik lehetőség az volt, hogy a különböző gázok égéséről Schlieren felvételeket készítünk. A képek segítségével az eltérülési szög hely szerinti eloszlásából megfelelő matematikai transzformációk segítségével meghatározható a hőmérséklet eloszlás.

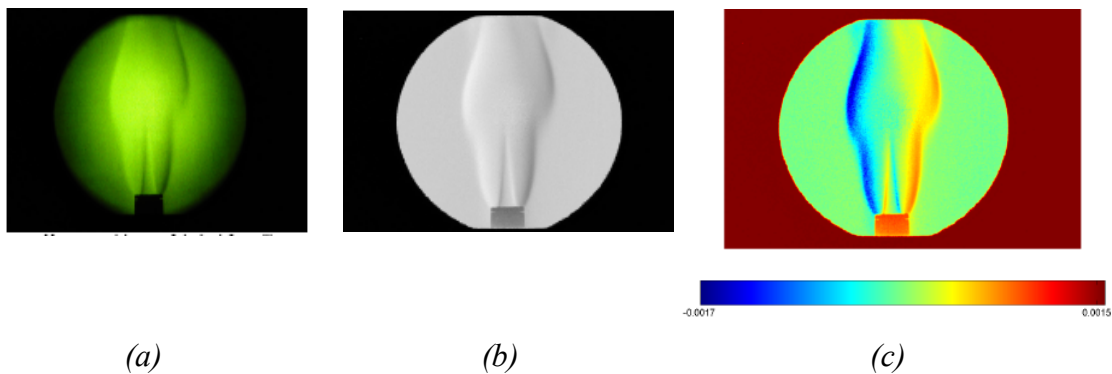
Ennek a meglehetősen bonyolult feladat kidolgozásakor számos akadályba ütköztünk. A leképzés egy mattüveg ernyőre történik. A mattüveget a berendezés kialakítása miatt csak szemből lehet fotózni, ezért a fényforrás - a lencserendszeren keresztül - a képen is fényforrásként jelenik meg. Hatására a kép közepe kivilágosodik, a széle elsötétül. A mattüveg egyenetlen felülete a kép szürkeségi érték eloszlásának egyenletességét rontja, a kép szemcsés lesz és nyilvánvalóan hibás színű pixelek is megjelennek.

Ezt a hibát a digitális képfeldolgozás során szűrés segítségével lehet megoldani. A szűrés alap gondolata az volt, hogy egy olyan felvételen, amin nincs vizsgált tárgy, a látómezőnek egyenletes szürkeségűnek kell lennie. Ez a valóságban nincs így, ezért létrehoztunk egy konverziós képet, amelynek minden pixelére az eredeti (tárgy nélküli) kép szürkeségi értékeinek egy referencia szürkeségi értéktől való eltérését mértük föl. A műveletet, mint

mátrix műveletet lehet a két kép pixelein végrehajtani. A referencia szűrkeségi értéket a kép legnagyobb szűrkeségi értékénél nagyobbra vettük fel.

A Schlieren képek szűrkeségi érték eloszlása a konverziós szűrés után még nem mondható egyenletesnek, ezért egy további szűrés volt szükséges. Erre a célra a digitális fotózásban gyakran használt Gauss szűrést alkalmaztuk.

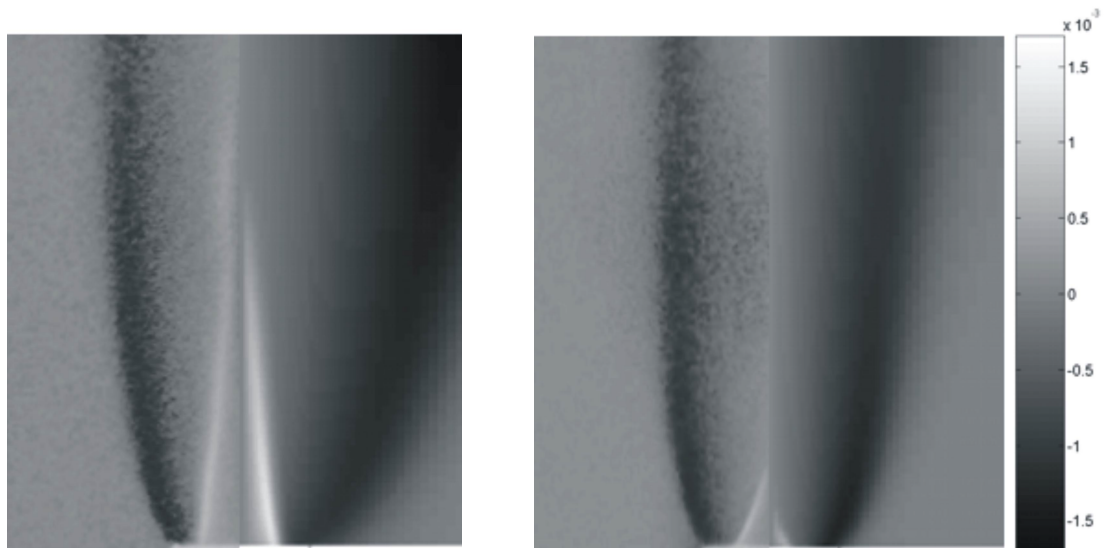
A szűrkeségi érték és eltérülési szög kapcsolatának meghatározását az üres vizsgalótérről különböző késállások mellett készített és feldolgozott felvételek segítségével tudtuk meghatározni. A szűrt képek szűrkeségi értékét egy kiválasztott terület elemeinek átlagolásával számoltuk ki. Az átlagoláshoz felhasznált terület az összes képen ugyanaz volt. A szűrkeségi értékeket feljegyezve minden szűrkeségi értékhez hozzárendeltük a késállást, aminél a kép készült (2.ábra).



2. ábra. Eredeti Schlieren kép (a), szűrt Schlieren kép (b), számolt eltérülési szög (c)

A szűrkeségi érték és eltérülési szög kapcsolatának ismeretében lehetséges minden egyes pixel szűrkeségi értékéhez az eltérülési szöget visszakeresni. Segítségével és további összetett matematikai összefüggések felhasználásával lehetővé vált a környezeti zavartalan tér hőmérsékletének meghatározása. Ez az eredmény tendenciájában megegyezett a referencia-mérési és CFD számítási eredményekkel, de értékeiben jelentős eltérést mutattak. Ennek számos oka van. Legjelentősebb, hogy a hőmérsékletek növekedésével az eltérülési szög változás egyre csökken, így a Schlieren módszer érzékenysége is a kiértékelhetőség határa alá csökken. A kiértékelési eljárást, amely segítségével a Schlieren képekből meghatároztuk az eltérülési szögeket, „megfordítva”, sikerült kidolgozni egy másik módszert a CFD számítások ellenőrzésére. A módszer lényege, hogy a CFD számítások eredményeiből elkészítünk egy „mesterséges” Schlieren képet és ezt hasonlítjuk össze a szimuláció peremfeltételeinek megfelelő fizikai jelenségről készült valódi Schlieren felvétellel. Ezzel a módszerrel számos összehasonlító vizsgálatot végeztünk. Bizonyos kereskedelmi CFD programokhoz alap

értelmezett reakciómechanizmusról megállapítottuk, hogy a kutatás során vizsgált gázok égését igen rosszul közelítik meg. A bonyolultabb reakciómechanizmusok jobb leírását adják az égési folyamatnak. A hengersizmetrikus lángok esetén a fél-fél kép egymás mellé szerkesztését alkalmazzuk az eredmények megjelenítésére, azaz a kép balkéz felőli oldala mérésből, a jobb kéz felőli oldala számolásból származik, amint a 3. ábra mutatja.



*Biogáz égése*

*Anaerob gáz égése*

*3. ábra. Biogáz és az anaerob gáz égésének valódi és a CFD számításból származó szögeltérülései (balkéz felőli rész: mérésből, a jobb kéz felőli rész: számolásból)*

A kutatási projekt alapvető célkitűzésének megfelelően elkészítettük valamennyi vizsgált gáz – különböző légfeszleg tényezők esetén kialakuló – láng Schlieren képét és az ebből számolt eltérülési szög képét. Segítségével a szakterületen dolgozó kutatómunkatársak ellenőrizni tudják számításaikat. A képek az interneten elérhetők a következő címen:

<http://www.energia.bme.hu/elterul.html>

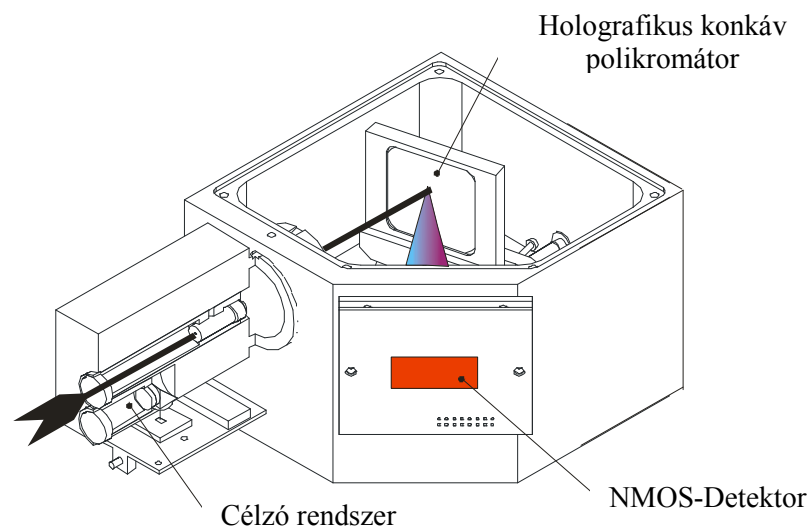
A honlap folyamatosan frissül, jelenleg készül az angol változat és fel fog kerülni az alkalmazott számítás leírása is, amely a felhasználáshoz szükséges. A mérési eredményekből számos publikáció [2,3,6,11,12,13,14,15,16,17,19], diplomaterv [17] és TDK [5] dolgozat készült.

## **2.2. A láng spektroszkópiai berendezés**

A lángokban lezajló reakciók, különböző rövidéletű gyökök illetve égéstermékek képződését a lángsugárzás hullámhossz szerinti (spektrális) összetételének mérésével, illetve a spektrális

eloszlás időbeli változásának követésével határozzuk meg. Meghatározható, hogy a lángnak (tűztérnek) bizonyos térfogatában milyen gyökök, égéstermékek keletkeznek. Ezzel a láng egyes részeiben lejátszódó reakciók meghatározhatók. Így lehetőség nyílik különböző összetételű tüzelőanyagok égési folyamatainak összehasonlítására. Alapvetően OH, CH, C<sub>2</sub>, HCO gyökök valamint CO, CO<sub>2</sub> és NO égéstermékek kemilumineszcens vizsgálata célszerű. A spektrofotométer cserélhető rácsainak segítségével e komponensek emissziós spektruma felvehető.

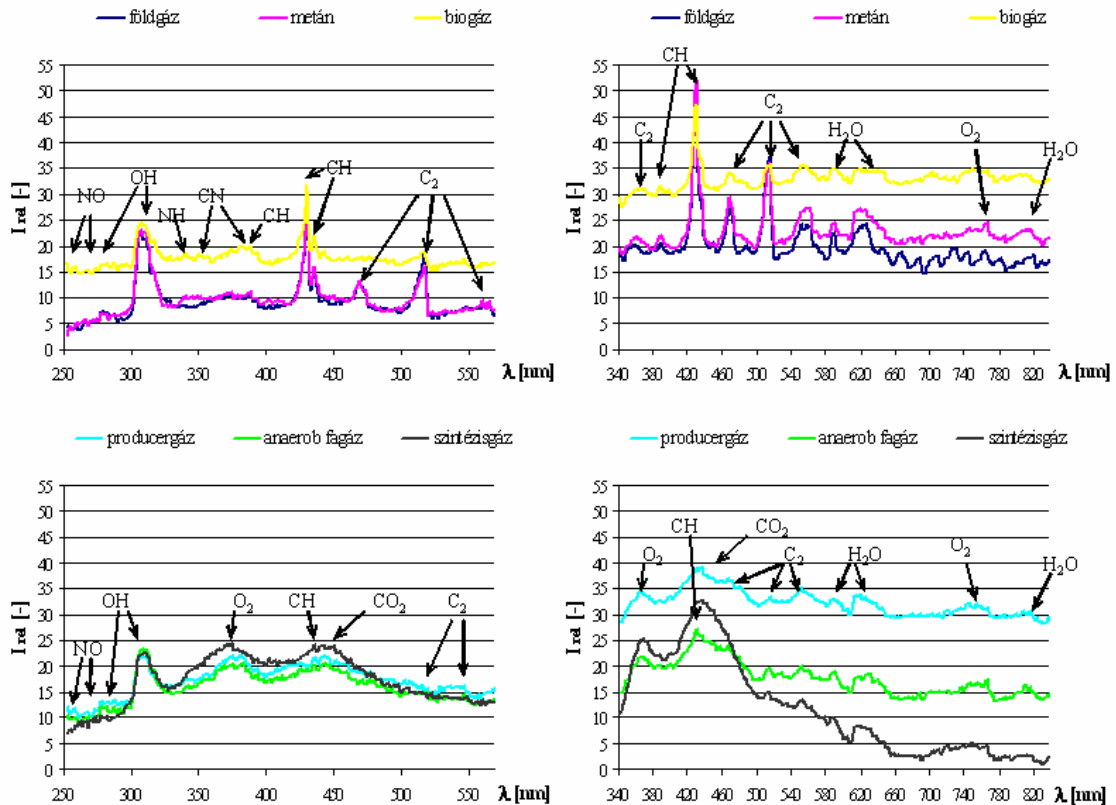
A BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék az OpLab Kft-t bízta meg a lángok spektroszkópiai analizálására alkalmas spektrofotométer megtervezésével és kivitelezésével. A berendezés felépítése a 4. ábrán látható.



4. ábra. Spektrofotométer elvi felépítése

A spektrofotométer egy célzó rendszerből és egy mérő optikai rendszerből áll. A mérő kvarc optika és a forgatható leképző optika együttesen alkotja a kamera objektívet, amely 0,5 méter távolságból a láng 5 mm átmérőjű felületét képezi le a kvarc száloptika 0,5 mm átmérőjű bemenő felületére. A száloptika másik vége úgy van kialakítva, hogy az egy vonalba rendezett 50 µm átmérőjű szálak egyúttal a polikromátor belépő részét képezik. A holografikus konkáv lencse képezi le az 50 µm széles rést a 25,4 mm hosszúságú 1024 pixeles NMOS diódasorra. Az alkalmazható rácsok: 270-570 nm és 340-840 nm. A diódasor analóg jelét kondicionálás után 16 bites AD átalakító digitalizálja. A mérési adatok átmeneti tárolás után USB-n keresztül továbbíthatók a PC-be.

A méréseket változtatható résszélességű réségőn 0,9 x 100 mm-es résméretnél végeztük. A mért kísérleti gázkeverékek összetétele megegyezett az elméleti számításoknál vizsgáltakkal. A spektrumok felvételét különböző beállításoknál végeztük. Az előkevert lángok spektrumait 250-570 nm – UV-VIS, illetve 340-840 nm – VIS-IR tartományokban vettük fel (5. ábra). Minden egyes gázkeverékkel 10 spektrumot regisztráltunk.



5. ábra. 250-570 nm-es illetve 340-840 nm-es ráccsal felvett előkevert lángok spektrumai, illetve a detektálható gyökök

A kutatási projekt alapvető célkitűzésének megfelelően elkészítettük az összes vizsgált gázra vonatkozó, különböző légfeszültség tényezők mellett mért mind UV-VIS, mind VIS-IR spektrumot. A mérések eredményei megtalálhatók a következő honlapokon:

<http://www.energia.bme.hu/uvvis.html>

<http://www.energia.bme.hu/visir.html>

A vizsgálati eredményekről számos publikáció készült [7,8,9,10,20].

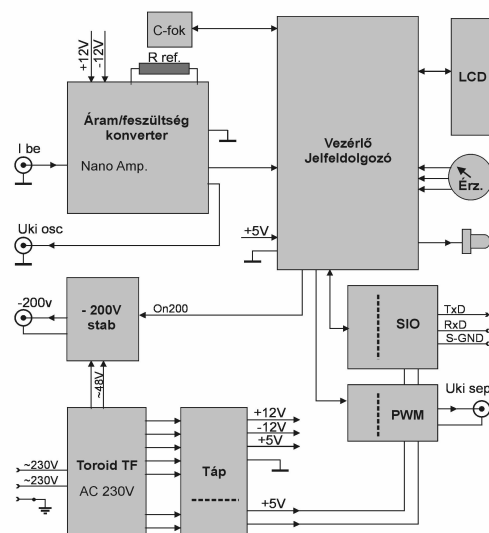


## 2.3. A láng ionizációs mérőrendszer

A láng ionizáció egy adott térfogatban a vezetőképesség mérésével követhető, amely az égés során létrejövő rövidéletű gyökökre vezethető vissza. Ennek a lángon belüli vizsgálatára alakítottuk ki a mérőberendezésünket (6. ábra).

A láng ionizációs mérésekre két adott távolságra elhelyezkedő elektródát helyezünk be a lángfrontba. Ennek horizontális, vagy vertikális mozgatásával lehet feltérképezni a különböző gyökök koncentrációját a lángban. A két elektróda között az előzetes vizsgálatok alapján meghatározott 200 V a feszültség, és a közöttük fellépő áramot mérjük.

Az egyik elektróda -200 V-os, a másik 0 V-os, ez utóbbi elektródán keresztül érkező 0,1...1000 nA nagyságrendű áramot egy speciális (rendkívül kis offset-áramú) erősítő egység alakítja feszültséggé. Referencia ellenállásnak 1M $\Omega$ ...10G $\Omega$  értékű ellenállás használható, a kívánt érzékenységi tartománynak megfelelően. Kiválasztott referencia ellenállás mellett, az x1 x10 x100 értéktartományt választhatjuk egy háromállású kapcsoló segítségével. Megfelelő értékű visszacsatoló kapacitás választásával a kívánt frekvenciatartomány is beállítható a mérési feladathoz. Így a lángon belüli ion-eloszlás méréséhez kisebb, míg lángdinamika méréséhez nagyobb sáv szélesség állítható.



6. ábra. A láng ionizációs mérőrendszer blokkvázlata

Az áram-feszültség átalakító kimeneti jele közvetlenül ki van vezetve. Az itt megjelenő jel segítségével megfelelő adatgyűjtő rendszerhez csatlakozva lehet mérni az ionáram időbeli változásának intenzitását. Az áram-feszültség átalakító kimeneti jelét a jelfeldolgozó és a vezérlő egység digitalizálja. A beépített átalakító 10 bites, 100kdat/s sebességű. Az

átalakítóhoz a referencia feszültséget egy kis hőmérsékleti tényezőjű feszültség referencia adja. A mérés felbontását nagy sebességek mellett (>40kHz) a 10bit korlátozza.

A mérőrendszerrel elkészültek a láng hosszanti ionáram vizsgálatok. A mérési eredmények feldolgozása folyamatban van, várhatólag több publikáció készül el, és felkerülnek az eredmények a kutatás honlapjára. A berendezés számos további az OTKA kutatáson túlmenő vizsgálatra ad lehetőséget, a meglévő akusztikus és a kemiluminescens vizsgáló mérőrendszerrel összekapcsolva lehetőség nyílik a nem lamináris lángok zajkibocsátás vizsgálataira is. Erre a célra beszerzésre került egy nagyteljesítményű adatgyűjtő rendszer. Továbbá égés szabályzási vizsgálatokra nyílik lehetőség, például a változó CH<sub>4</sub> tartalmú biogázok hasznosításánál. A mérési eredmények a következő honlapon találhatóak meg:

<http://www.energia.bme.hu/bereczkykut1.html#>

### **3. További vizsgálatok, eredmények**

A kutatási tervben szereplő zárt tüztér elkészült, de a célkitűzésben szereplő Schlieren és kemiluminescens berendezés illesztése nem volt megoldható. A Schlieren berendezés felhasználásához két optikailag kiegyenlített planparalel kvarcüveg felhasználásával nyílt volna lehetőség, de ezek beszerzése és az állító rendszer kialakítása nem volt megoldható, továbbá a kemiluminescens berendezéssel végzett vizsgálatokhoz az intenzitás növeléséhez réségön végeztük a méréseket, így ennél a vizsgálatnál az elkészült hengeres tüztér sem volt megfelelő. Ezért a zárt tüztéren méréseket elvégezni nem tudtunk. Ezzel kapcsolatos, hogy a hőátadási viszonyok mérésére szolgáló hőáram mérő tervét át kellett dolgozni. Erre egy „Peltier” elemmel hűtött ismert hővezetésű, két oldalán hőmérsékletet mérő szonda került kialakításra. Az ehhez szükséges mérőrendszer beszerzése csak az utolsó kutatási évben sikerült, így az ezzel kapcsolatos mérések folyamatban vannak.

A kutatás segítségével számos nemzetközi konferencián vettünk részt. Számos helyen találkoztunk a kutatás során alkalmazott gázok belsőégésű motoros felhasználásának irányába mutató kezdeti kutatásokkal. Az eredeti kutatási tervben is szerepeltek az esetleges gázmotoros vizsgálatok. A dologi kereten szereplő szabad költségek áttekintése után döntöttünk úgy, hogy egy aerob gáz töltetű tartály köteg (bundel) beszerzésével, a gázmotoros vizsgálatokhoz közel minden lehetőség adott. A mérések során az aerob- és földgáz keverékek égési tulajdonságait vizsgáljuk gázmotoros felhasználás során. A vizsgálatoknál mérjük a különböző keverési arányok és légfelcsapó tényezők mellett a gázmotor teljesítményét,

károsanyag kibocsátást, valamint indikálás segítségével meghatározzuk az égéslefutást a motor égésterében. Segítségével itt is megfigyelhető az aerob gáz bekeverésének hatása az égési sebességre, így a lángoknál szerzett tapasztalatok tovább fejleszthetők nagynyomású égésterekre is. A mérési eredményeket 2008-ban publikáljuk.

A kutatás utolsó évében kialakításra került egy nagyobb teljesítményű levegő ellátó rendszer korszerű frekvenciaváltós szabályzással.

A kialakított mérőrendszer annyira megbízható és jól hasznosítható, hogy az oktatásba is bevontuk, így biztosítva a folyamatos működést:

(<http://www.energia.bme.hu/docs/notes/bsc/Schlieren-langcso-v7.pdf>) .

Budapest, 2008. január