

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



# Konvencionális és biodízel tüzelőanyagok térfogati tüzelésének vizsgálata egy új, nem-MILD típusú tüzelési koncepcióban

Tézisfüzet

írta: Tóthpálné Hidegh Gyöngyvér

Témavezető  
Dr. Józsa Viktor

Budapest, 2024



# 1. A téma ismertetése, célkitűzés

Folyékony, gáz halmazállapotú, konvencionális és biodízel tüzelőanyagok égését vizsgáltam egy új, alacsony károsanyag-kibocsátású égőben. Bár világszerte vannak erőfeszítések a tüzelés alternatíváinak keresésére, bizonyos iparágak és a közlekedés még több évtizedig a tüzeléstől fog függeni.

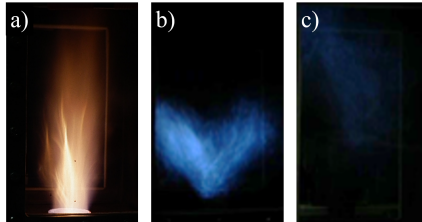
2022-ben a Nemzetközi Energiaügynökség elemezte a megújulóenergia-szektor, előrejelezte a különböző közlekedési, hő- és villamosenergia-technológiák alkalmazását, és azonosította az ipar előtt álló kihívásokat [1]. 2027-től várhatóan a megújulóenergiaforrások dominálnak majd a globális energiamixben, a fosszilis tüzelőanyagok felhasználása pedig stagnálni fog a következő évtizedekben [2]. Emellett a világ energiaigénye is növekszik, összegében a megújuló-energiaforrások csak a kereslet növekedését fogják fedezni az előrejelzések szerint.

Az Európai Bizottság a 2022 májusában kiadott REPowerEU tervében azt javasolja, hogy 2027-ig vessünk véget az orosz fosszilis tüzelőanyagoktól való függésünknek [3]. A fosszilis tüzelőanyagok drágulása és az alkalmazhatóságukra vonatkozó szigorodó szabályozás felfoldja az alternatív tüzelőanyagok kutatását. A megfelelő tüzelőanyag kiválasztása a rendelkezésre állástól, a költségektől, a könnyű kezelhetőségtől és az előírásoktól függ, és kompatibilisnek kell lennie a meglévő berendezésekkel és azok tüzelőanyag-rendszereinek követelményeivel.

Kutatócsoportunk, a BME Tüzeléstechnikai Kutatócsoport, új tüzelési koncepciót fejlesztett ki Keverékhőmérséklet-Szabályozott, KHSz, tüzelés néven, amit 2019-ben mutattuk be [P1 – P3], elérhetővé téve az ultraalacsony NO<sub>x</sub> kibocsátású térfogati tüzelést kazánok, kemencék és gázturbinák számára. A kutatásom három célja: 1. a KHSz rendszer működésének vizsgálata konvencionális és alternatív tüzelőanyagokon keresztül; 2. lángemissziós spektroszkópia alkalmazása a robusztussága és az iparban való kiterjedt alkalmazása miatt [4, 5]; 3. a vizsgált tüzelőanyagok károsanyag-kibocsátásának értékelése.

## 2. Alacsony károsanyag-kibocsátású tüzelés

Folyékony vagy gáznemű tüzelóanyaggal üzemelő gázturbinák, kazánok és kemencék három jellemző turbulens lángképe látható az 1. ábrán. Az 1a ábra egy egyenes lángot mutat, amely viszonylag könnyen szabályozható, de a jelenlegi károsanyag-kibocsátási határértékeket nem teljesíti. Az 1b ábra egy előkevert V-alakú lángot mutat be, amely lényegesen alacsonyabb károsanyag-kibocsátású működést tesz lehetővé az egyenes lángokhoz képest, mely jelentősen a hatértékek alatti üzemet tesz lehetővé. [6]. Végül az 1c ábrán egy térfogati láng látható, amely nagyobb égésteret igényel, mint az előző két láng, a V-alakú lángok károsanyag-kibocsátásának fele jellemző rá, és lényegesen alacsonyabb akusztikai terhelést okoz. Következésképpen a térfogati lángok manapság nagy érdeklődésre tartanak számot a tüzeléstechnikai körökben, potenciálisan a tüzelés jövőjét jelentik minden állandósult üzemű tüzeléses alkalmazásban.



1. ábra. Gázturbinák, kazánok és kemencék tipikus lángjai. a) Egyenes, b) V-alakú és c) térfogati láng.

Az irodalomban jól ismert MILD (Moderate or Intense Low-oxygen Dilution) tüzelés [7] térfogati lánggal működik, magas tüzelési hatásfokot képes fenntartani, miközben szinte nulla károsanyag-kibocsátást ér el, beleértve a  $\text{NO}_x$ -et, ami miatt ígéretes koncepció lehet jövőbeni felhasználásra az állandósult üzemű tüzelőberendezésekben [8]. A meglévő gázturbinatechnológiákban, különösen a sugárhajtóművekben és általában az ipari gázturbinákban való megvalósítása azonban megle-

hetősen összetett műszaki problémákat hordoz, például füstgáz-visszavezetés vagy inert gázellátó rendszer kiépítését. Az utóbbi ipari méretekben gazdaságtalan.

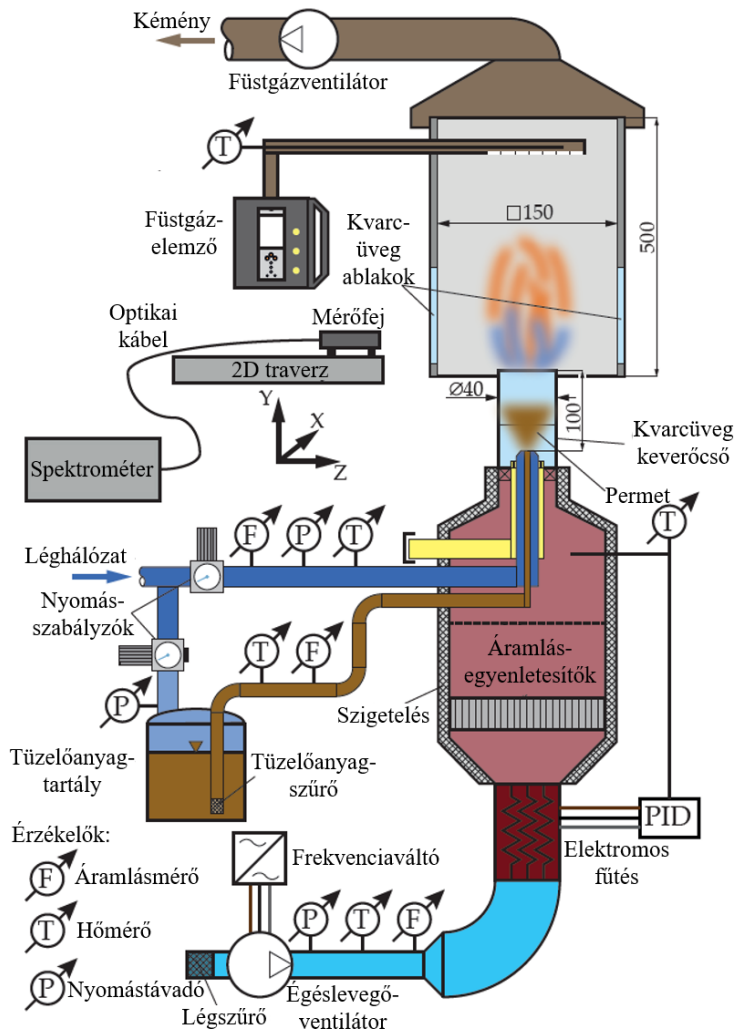
A KHSz tüzelés fő jellemzője, hogy nincs szükség külső füstgáz-visszavezetésre vagy az égéslevegő hígítására, miközben alacsony CO és NO<sub>x</sub> kibocsátású, térfogati lángot állít elő. A keverék kellően homogén ahhoz, hogy tüzelés közben kevésbé intenzív hőleadása legyen, így minőségileg nagyon hasonló a MILD tüzeléshez.

### 3. Vizsgálati módszerek

A vizsgált tüzelőanyagokat az 1. táblázat tartalmazza, a KHSz tesztberendezést pedig a 2. ábra mutatja be. Két mérési sorozatot végeztünk, melyek üzemi beállításait a 2. táblázat tartalmazza. A kemilumineszcens mérések célja a különböző lángalakok optikai feltérképezése volt. Ennek megfelelően az üzemi paraméterek úgy lettek meghatározva, hogy referenciaként egyenes és V-alakú lángokat állítsunk be, amelyekkel a térfogati lángok összevethetők.

1. táblázat. A vizsgált tüzelőanyagok.

Kategória	Tüzelőanyag	Rövidítés
	Földgáz	FG
Fosszilis	Katonai repülőgép-tüzelőanyag	JP-8
	Dízél	D
	Kókuszolaj metil-észter	KME-B100
Biodízél	Pálmaolaj metil-észter	PME-B100
	30/40% használt sütőolaj és 70/60% repceolaj elegye	H <sub>2</sub> SO <sub>30/40</sub> -B100
Elegyek	25/50/75 V/V% biodízél, 75/50/25 V/V% dízel	B25/B50/B75

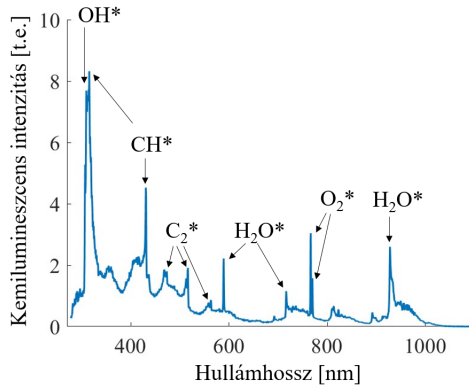


2. ábra. A tesztberendezés.

2. táblázat. Az üzemi paraméterek.

Változó	Érték/tartomány	
Mérési sorozat száma	1	2
Tüzelési teljesítmény [kW]	13,3	13,3
Tüzelőanyag-felesleg tényező, $\phi$ [1]	0,8	0,57 – 0,86
Égéslevegő-hőmérséklet, $T_{el}$ [°C]	$T_{körny} - 350$	225
Porlasztási túlnyomás, $p_t$ [bar]	0,3 – 0,9	0,3 – 0,9

A szénhidrogén lángok jellemző spektrumát egy földgáz lángon keresztül mutatja be a 3. ábra, 187-1100 nm hullámhossz-tartományban. A vizsgált gyököket, illetve a szakirodalom és a méréseink szerint azok legnagyobb intenzitású csúcsait a 3. táblázat tartalmazza.



3. ábra. Földgáz láng kemilumineszcens spektruma.

3. táblázat. A vizsgált gyökök.

Gyök	Hullámhossz Gaydon szerint [9] [nm]	Legnagyobb intenzitású csúcsok hullámhossza a méréseinkben [nm]
OH*	309,04	310,66
CH*	431,42	430,35
C <sub>2</sub> *	516,52	515,62
H <sub>2</sub> O*	588,02; 590,02; 927,7	589,23; 927,97
O <sub>2</sub> *	768,38	766,53

## 4. A kutatás eredményei és a tézisek

A tüzeléses vizsgálatok során egyenes, V-alakú és térfogati lángalakokat figyeltünk meg. Mivel a tüzelés turbulens volt, a láng alakja néhány beállításnál váltakozott, jellemzően 0,5-3 Hz-es frekvenciával. A lángalakokat az összes vizsgált üzemi pontban a 4. táblázat ismerteti. Az 1. és 2. tézispontok a KHSz égő térfogati égésének tüzelőanyag-érzékenységét emelik ki, és céljuk a koncepció elterjedésének elősegítése az ipari alkalmazásokban.

4. táblázat. Lángalakok az egyes üzemi pontokban. a-b)  $\phi = 0,8$ , c)  $T_{\acute{e}l} = 225$  °C. A lángalakokra utaló rövidítések és színek: e (sárga) – egyenes, t (kék) – térfogati, v (piros) – V-alakú, átmeneti állapotok: (zöld) – egyenes és térfogati, (narancs) – egyenes és V-alakú, (lila) – térfogati és V-alakú, (barna) – egyenes, térfogati és V-alakú. (szürke) – nincs stabil égés.

a)

Tüzelőanyag	$T_{\acute{e}l}$ [°C]	$p_t$ [bar]				
		0,3	0,45	0,6	0,75	0,9
FG	350	e	e	e	e	e
	300	e	e	e	e	e
	250	e	e	e	e	e
	200	e	e	e	e	e
	150	e	e	e	e	e
JP-8	350	e	e	e	e	e
	300	e	e	e	e	e
	250	e	e	e	e	e-t
	200		t	t	t	t
	150	t	t	t	t	t
D	350	e	e	e	e	e
	300	e	e	e	e	e
	250	e	e	e-t	t	t
	200	e	e	t	t	t
	150	e	e	t	t	t

b)

Tüzelőanyag	KME					PME					HSO <sub>40</sub>					
	$T_{el}$ [°C]	$p_t$ [bar]					$p_t$ [bar]					$p_t$ [bar]				
	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9	
B25	350	e	e	e	e	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t
	300	e	e	e	e	e	e-t	e-t	e-t	e-t	e-v	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t
	250	e	e	e	e	e	e	e-t	e-t	t	e-v	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t
	200	e	e	e	t	t	e	e-t	t	t	e	e	e	t	t	t
	150	e	e	e	e	t	e	e-t	e-t	t	e	e	e	t	t	t
B50	350	e	e	e	e	e	e	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t
	300	e	e	e-t	t	t	e	e-t	e-t	e-t	e-v	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t
	250	e	e-t	t	t	t	e	e-t	e-t	e-t	e-v	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t
	200	e	e	e	t	t	e	e	e	e	e-v	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t
	150	e	e	e	t	t	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e
B75	350	e	e	e-t	t	t	e	e	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t
	300	e	e-t	t	t	t	e	e	e	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t
	250	e-t	t	t	t	t	e	e	e	e	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t
	200	e	t	t	t	t	e	e	e	e	e	e	e-t	e-t	e-t	e-t
	150	e	e	e	e	t	e	e	e	e	e	e	e-t	e-t	e-t	e-t
B100	350	e	e	e	e	e	e	e-t	e-t	e-t	e-v	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t
	300	e	e-t	t	t	t	e	e-t	e-t	e-t	e-v	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t
	250	e	t	t	t	t	e	e	e	e	e-v	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t
	200	e	e-t	t	t	t	e	e	e	e	e	e-t	e-t	e-t	e-t	e-t
	150	e	e	e	e	t	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e

c)

Tüzelőanyag	$\phi$ [l]	$p_t$ [bar]				
		0,3	0,45	0,6	0,75	0,9
D	0,86	e	e	e	e	e
	0,76	e	e-t	t	t	t
	0,67	e-v	e-t	t	t	t
	0,57	v	t	t	t	t
HSO <sub>30</sub> -B25	0,86	e	e	e	e	e
	0,76	e	e	e	e	e
	0,67	v	e-t	t	t	t
	0,57	e-v	v-t	t	t	t
HSO <sub>30</sub> -B50	0,86	e	e	e	e	e
	0,76	e	e	e-t	e-t	e-t
	0,67	v	e-v-t	e-t	t	t
	0,57	e-v	v	t	t	t
HSO <sub>30</sub> -B75	0,86	e	e	e	e	e
	0,76	e-v	e	e	e-t	e-t
	0,67	v	e-t	t	t	t
	0,57	e-v	v	t	t	t
HSO <sub>30</sub> -B100	0,86	e	e	e	e	e
	0,76	e-v	e-t	e-t	e-t	e-t
	0,67	v	e-t	e-t	e-t	e-t
	0,57	v	v	t	t	t

### 1. Tézis:

A térfogati tüzelés a Keverékhőmérséklet-Szabályozott tüzelési koncepcióban megvalósítható a következő tüzelőanyagokkal: JP-8 szabványos katonai repülőgép-tüzelőanyag (MIL-DTL-83133, British Defence Standard 91-87), szabványos dízel (EN 590), kókusz- és pálmaolaj metil-észter, 40 és 30% használt sütőolaj tartalmú használt sütőolaj – repceolaj elegyek, valamint ezen biodízelek dízellel való elegyei 25, 50 és 75 V/V%-os biodízel tartalommal. [P4 – P10]

A térfogati tüzelés üzemi paramétereit az I. táblázat tartalmazza. Minden beállítást esetén a tüzelési teljesítmény 13,3 kW volt.

I. táblázat. A térfogati tüzelés üzemi paramétereit. A tüzelőanyagokra utaló rövidítések: D – dízel, KME – kókuszolaj metil-észter, PME – pálmaolaj metil-észter, HSO<sub>40</sub> és HSO<sub>30</sub> – használt sütőolaj és repceolaj elegyei 40, és 30 V/V% használt sütőolaj tartalommal. B25, B50 és B75 – dízellel kevert biodízel 25, 50 és 75 V/V% biodízel tartalommal.

Tüzelő- anyag	Égéslevegő hő- mérséklet [°C]	Porlasztási túlnyomás [bar]	Tüzelőanyag- felesleg tényező [1]
JP-8	150	0,3-0,9	0,8
	200	0,45-0,9	0,8
D	150-200	0,6-0,9	0,8
	250	0,75-0,9	0,8
	225	0,45-0,9	0,57
	225	0,6-0,9	0,67-0,76
KME	200, 300	0,6-0,9	0,8
	250	0,45-0,9	0,8
KME-B75	200-250	0,45-0,9	0,8
	300	0,6-0,9	0,8
	350	0,75-0,9	0,8
KME-B50	150, 250	0,6-0,9	0,8
	200, 300	0,75-0,9	0,8
KME-B25	150	0,9	0,8
	200	0,75-0,9	0,8
PME-B25	150	0,75-0,9	0,8
	200	0,6-0,9	0,8
	250	0,9	0,8
HSO <sub>40</sub> -B25	150	0,6-0,9	0,8
	200	0,75-0,9	0,8
HSO <sub>30</sub>	225	0,6-0,9	0,57
HSO <sub>30</sub> -B75	225	0,6-0,9	0,57-0,67
HSO <sub>30</sub> -B50	225	0,6-0,9	0,57
	225	0,75-0,9	0,67
HSO <sub>30</sub> -B25	225	0,6-0,9	0,57-0,67

## 2. Tézis:

**Keverékhőmérséklet-Szabályozott koncepcióban való térfogati tüzelés megvalósításakor kókuszolaj metil-észter, KME, szabványos dízel üzemanyaggal (EN 590) alkotott 75 V/V%-os KME tartalmú elegye szélesebb üzemi tartományban teszi lehetővé a térfogati tüzelést, mint a tiszta KME vagy dízel tüzelése. [P5, P7]**

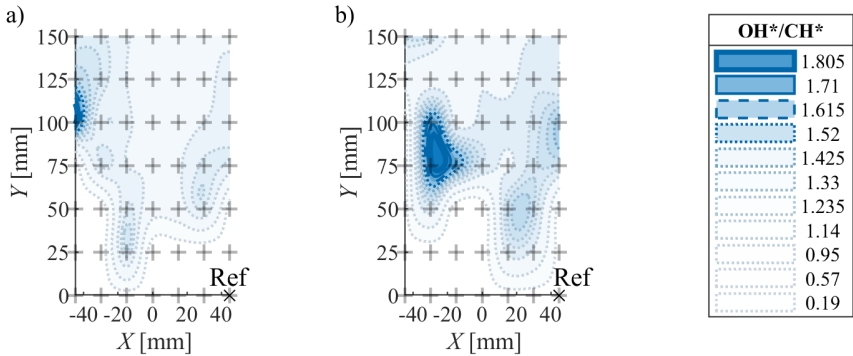
A releváns üzemi tartományokat a II. táblázat tartalmazza. Minden beállítás esetén a tüzelési teljesítmény 13,3 kW, a tüzelőanyag-felesleg tényező 0,8 volt.

II. táblázat. Dízel, D, kókuszolaj metil-észter, KME, és ezek 75 V/V%-os KME tartalmú elegyének térfogati tüzelése.

Tüzelőanyag	Égéslevegő hőmérséklet [°C]	Porlasztási túlnyomás [bar]
D	150-200	0,6-0,9
	250	0,75-0,9
KME	200, 300	0,6-0,9
	250	0,45-0,9
KME-B75	200-250	0,45-0,9
	300	0,6-0,9
	350	0,75-0,9

A térfogati lángok spektrális jellemzőit egyenes és V-alakú lángokéval vetettem össze. Az egyenes és V-alakú lángok esetén a tüzelés a vizsgált zónában ment végbe, amit a 3. táblázatban felsorolt gyökök jeleztek. Ahogy a térfogati lángok tüzelőanyagban szegényebbek lettek, az intenzitásmaximumok középpontjai az égéstérben felfelé tolódtak el a megnövekedett légáram és a keverék alacsonyabb reakcióképessége miatt. A cél a reakciózóna minőségi behatárolása volt, ehhez a vizsgált gyökök intenzitásarányainak eloszlását is értékeltem. A 4. ábra az OH\*/CH\* intenzitásarányokat mutatja a tüzelőanyagban legszegényebb és leggazdagabb vizsgált térfogati D lángok esetén. A

mintavételi pontokat a + jelek jelölik. A 3. tézispont a spektrális mérések főbb eredményeit foglalja össze.



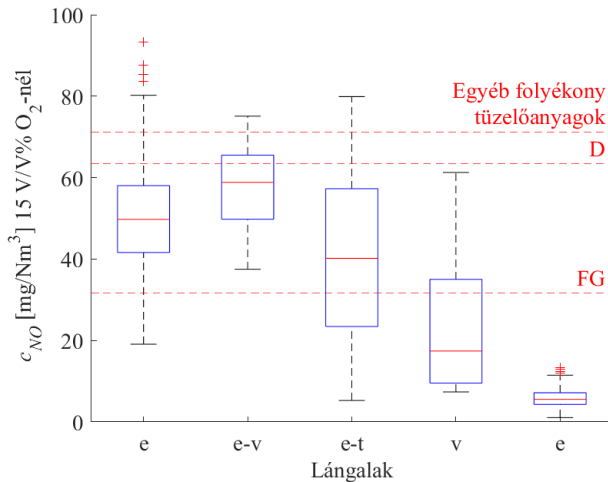
4. ábra. Térfogati D lángok OH\*/CH\* intenzitásarányai a)  $\phi = 0.76$ , és b)  $\phi = 0.57$  esetén.

### 3. Tézis:

**A Keverékhőmérséklet-Szabályozott tüzelési koncepció szabványos dízel üzemanyaggal (EN 590) létrehozott térfogati lángjai spektrálisan nagy térfogatot foglalnak el az égéstérben anélkül, hogy jellegzetes lángalakjuk lenne, vagy érzékenyek lennének a tüzelőanyag-felesleg tényezőre 0,57-0,76 között. [P11]**

A vizsgált gyökök térbeli eloszlása azt mutatja, hogy az égés kémiai folyamatai több intenzitáscsúccsal, nagy térfogatban mennek végbe. Ha a reakciózóna határait ellenőrizzük, a térfogati lángok körvonalai széles területeket ölelnek fel az egyenes és V-alakú lángokra jellemző jól meghatározható formák helyett. A nagy intenzitású  $\text{H}_2\text{O}^*$  588,02 és 590,02 nm-es emissziós csúcsok egyetlen, egyesített intenzitáscsúcsként jelentek meg 589 nm-nél a mért spektrumban; ezért erre a kettős csúcsra 589 nm hullámhosszú csúcsként hivatkozom. Hat gyök térbeli eloszlását vizsgáltam:  $\text{OH}^*$  311 nm-en,  $\text{CH}^*$  430 nm-en,  $\text{CH}^*$  516 nm-en,  $\text{O}_2^*$  767 nm-en, valamint  $\text{H}_2\text{O}^*$  589 és 928 nm-en.

A vizsgált tüzelőanyagok NO és CO kibocsátását értékeltem a lángalakokra vonatkozóan, és összevetettem a 2015/2193-as EU irányelv [10] és a Földművelésügyi Minisztérium 53/2017-es rendelet [11] legszigorúbb határértékeivel. A legtöbb mérési beállításnál a CO kibocsátás  $5 \text{ mg/Nm}^3$  alatt maradt 15 V/V%  $\text{O}_2$  füstgáz  $\text{O}_2$  szinten, ami egy nagyságrenddel alacsonyabb érték legszigorúbb határértéknél. A térfogati lángok NO kibocsátása  $10 \text{ mg/Nm}^3$  alatt maradt, amint az 5. ábra mutatja.



5. ábra. Határértékek, és a lángalakok szerinti NO kibocsátás boxplot ábrázolással. e – egyenes, e-v – átmeneti egyenes és V-alakú, e-t – átmeneti egyenes és térfogati, v – V-alakú, t – térfogati lángok.

#### 4. Tézis:

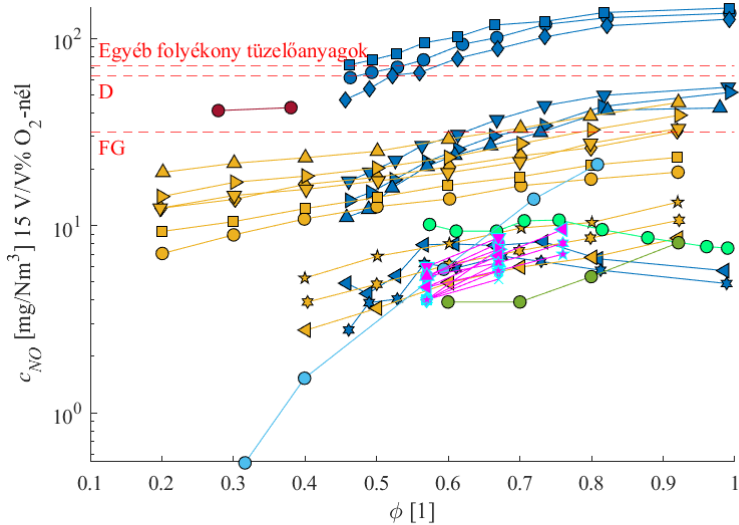
A Keverékhőmérséklet-Szabályozott koncepció térfogati lángjainak NO kibocsátása átlagosan a 2015/2193-as EU-irányelvben gázolajtüzelésre, közepes méretű tüzelőberendezésekre (1-50 MW névleges tüzelési teljesítmény) megadott NO kibocsátási határérték 8,8%-a. A Keverékhőmérséklet-Szabályozott koncepcióban az NO kibocsátást elsősorban a lángalak határozza meg,

**míg a tüzelőanyag fajtájának csekély a befolyása. Az NO kibocsátás mellett a CO és UHC kibocsátás is alacsony.**  
[P4 – P10]

A térfogati lángok vizsgálata során a tüzelési teljesítmény 13,3 kW volt, a tüzelőanyag-felesleg tényező 0,57-0,86, a porlasztólevegő túlnyomása 0,3-0,9 bar, valamint az égéslevegő-előmelegítési hőmérsékletet környezeti hőmérséklettől 350 °C-ig változtattuk. Térfogati égés a következő vizsgált tüzelőanyagokkal állt fent. JP-8 szabványos katonai repülőgéptüzelőanyag (MIL-DTL-83133, British Defence Standard 91-87); szabványos dízel üzemanyag (EN 590), D; kókuszolaj metil-észter, KME, – tisztán és dízellel elegyítve 25, 50 és 75 V/V%-os KME részarányban; pálmaolaj metil-észter, PME, dízellel elegyítve 25 V/V% PME részarányban; használt sütőolaj és repceolaj elegye 40%-os használt sütőolaj tartalommal, HSO<sub>40</sub>, dízellel elegyítve 25 V/V%-os HSO<sub>40</sub> részarányban; valamint használt sütőolaj és repceolaj elegye 30%-os használt sütőolaj tartalommal, HSO<sub>30</sub>, dízellel elegyítve 25, 50 és 75 V/V%-os HSO<sub>30</sub> tartalommal.

Összehasonlítottam a KHSz égő térfogati lángjainak CO és NO kibocsátását a MILD tüzelés szakirodalmi adataival. A 6. ábra azt mutatja, hogy Sharma és munkatársai [12,13], Reddy és munkatársai [14, 15], valamint Ye és munkatársai [16] hasonlóan alacsony NO kibocsátást mértek ugyanabban a  $\phi$  tartományban D, kerozin és etanol tüzelés során, mint a KHSz égő térfogati lángjainak NO kibocsátása. Alacsonyabb  $\phi$ -knél,  $\phi=0,2-0,3$ , a Sharma és munkatársai által vizsgált [12], két alacsonyabb tüzelési teljesítményű biodízel, BD, láng bocsátott ki a KHSz térfogati lángjaihoz hasonlóan 10 mg/Nm<sup>3</sup> alatti NO-t. További BD-ek és napraforgóolaj metil-észter, NME, MILD tüzelése – tisztán, illetve dízellel 50 V/V%-os elegyet képezve magasabb NO kibocsátást eredményezett, mint a KHSz égő térfogati lángjai. Yetter és munkatársai [17] MILD tüzelésű CH<sub>4</sub> lángok NO kibocsátásáról számoltak be. Mindkét vizsgált üzemi pontban az NO kibocsátás meghaladta a földgáz-tüzelésre vonatkozó

határértéket, és több mint négyszerese a KHSz égő térfogati lángjainak NO kibocsátásának.



KHSz égő térfogati lángjai	MILD, Sharma [12]	MILD, Reddy [14]
● HSO <sub>30</sub> -B75, 0,6 bar	● BD, 6,4 MW/m <sup>3</sup> , 527 °C	● NME-B100, 350 °C
■ HSO <sub>30</sub> -B75, 0,75 bar	■ BD, 8,1 MW/m <sup>3</sup> , 527 °C	■ NME-B100, 400 °C
◆ HSO <sub>30</sub> -B75, 0,9 bar	◆ BD, 11,2 MW/m <sup>3</sup> , 527 °C	◆ NME-B100, 430 °C
✱ HSO <sub>30</sub> -B50, 0,75 bar	▼ Kero, 6,4 MW/m <sup>3</sup> , 527 °C	▼ NME-B50, 350 °C
✱ HSO <sub>30</sub> -B50, 0,9 bar	▶ Kero, 8,1 MW/m <sup>3</sup> , 527 °C	▶ NME-B50, 400 °C
▼ HSO <sub>30</sub> -B25, 0,6 bar	▲ Kero, 11,2 MW/m <sup>3</sup> , 527 °C	▲ NME-B50, 430 °C
▶ HSO <sub>30</sub> -B25, 0,75 bar	▲ Kero, 6,4 MW/m <sup>3</sup>	● D, 430 °C
▲ HSO <sub>30</sub> -B25, 0,9 bar	★ Kero, 8,1 MW/m <sup>3</sup>	★ Kero, 430 °C
▲ D, 0,6 bar	★ Kero, 11,2 MW/m <sup>3</sup>	
★ D, 0,7 bar		<b>MILD, Reddy [15]</b>
★ D, 0,9 bar	<b>MILD, Sharma [13]</b>	● Kero, 27 °C
	● Kero, 6,4 MW/m <sup>3</sup> , 27 °C	<b>MILD, Ye [16]</b>
		● Ethanol
		<b>MILD, Yetter [17]</b>
		● CH <sub>4</sub> , 27 °C

6. ábra. A KHSz égő térfogati lángjainak és a szakirodalom MILD lángjainak NO kibocsátása.

## 5. Tézis:

A Keverékhőmérséklet-Szabályozott tüzelési koncepció térfogati lángjai kétszer alacsonyabb NO kibocsátást tesznek lehetővé ugyanabban a tüzelőanyag-felesleg tényező tartományban, 0,57-0,76 között, mint a szakirodalom legalacsonyabb NO kibocsátású, MILD tüzelésű biodízel lángjai, Sharma és munkatársai [R1] mérései szerint; és hasonlóan alacsony NO kibocsátást ugyanebben a tüzelőanyag-felesleg tényező tartományban, mint a szakirodalomban közölt MILD tüzelésű gázolaj és ke-rozin lángok. [R1 – R6]. [P4 – P10]

Térfogati égés a következő vizsgált tüzelőanyagokkal állt fent. JP-8 szabványos katonai repülőgép-tüzelőanyag (MIL-DTL-83133, British Defence Standard 91-87); szabványos dízel üzemanyag (EN 590), D; kókuszolaj metil-észter, KME, – tisztán és dízellel elegyítve 25, 50 és 75 V/V%-os KME részarányal; pálmaolaj metil-észter, PME, dízellel elegyítve 25 V/V% PME részarányban; használt sütőolaj és repceolaj elegye 40%-os használt sütőolaj tartalommal, HSO<sub>40</sub>, dízellel elegyítve 25 V/V%-os HSO<sub>40</sub> részarányban; valamint használt sütőolaj és repceolaj elegye 30%-os használt sütőolaj tartalommal, HSO<sub>30</sub>, dízellel elegyítve 25, 50 és 75 V/V%-os HSO<sub>30</sub> tartalommal.

[R1]: S. Sharma, H. Pingulkar, és munkatársaik. *Combustion and Flame*, 193:61-75, Jul 2018.

[R2]: S. Sharma, R. Kumar, és munkatársaik. *Fuel*, 199:229-238, 2017.

[R3]: V.M. Reddy, P. Biswas, és munkatársaik. *Fuel Processing Technology*, 118:310-317, 2014.

[R4]: V M. Reddy, D. Sawant, és munkatársaik. *Proceedings of the Combustion Institute*, 34(2):3319-3326, 2013.

[R5]: R.A. Yetter, I. Glassman, és munkatársaik. *Proceedings of the Combustion Institute*, 28(1):1265-1272, 2000.

[R6]: J. Ye, P.R. Medwell, és munkatársaik. *Applied Energy*, 151:93-101, 2015.

## Hivatkozások

- [1] IEA - International Energy Agency. Renewables 2022. Analysis forecast to 2027. Technical report, 2022.
- [2] International Energy Agency. Installed power generation capacity by source in the Stated Policies Scenario, 2000-2040. In <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/installed-power-generation-capacity-by-source-in-the-stated-policies-scenario-2000-2040>. Date accessed: 17.04.2023.
- [3] European Commission. REPowerEU: affordable, secure and sustainable energy for Europe. In [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repower-eu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe\\_en#documents](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repower-eu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en#documents). Date accessed: 28.08.2023.
- [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*, 29(1):139–145, 2002.
- [5] Karim Emara, Ahmed Mahfouz, H. A. Moneib, Ahmed El-Fatih, and Ahmed Emara. Flame spectroscopy of waste tire oils and waste cooking oils blends using coaxial burner. *Journal of the Energy Institute*, 93(3):977–990, 2020.
- [6] Arthur H. Lefebvre and Dilip R. Ballal. *Gas turbine combustion: alternative fuels and emissions*. 3rd editio edition, 2010.
- [7] Antonio Cavaliere and Mara De Joannon. Mild combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(4):329–366, jan 2004.

- [8] E. V. Jithin, G. K.S. Raghuram, T. V. Keshavamurthy, Ratna Kishore Velamati, Chockalingam Prathap, and Robin John Varghese. A review on fundamental combustion characteristics of syngas mixtures and feasibility in combustion devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146(April 2020):111178, 2021.
- [9] A. G. Gaydon. *The Spectroscopy of Flames*. Chapman and Hall Ltd, London, 2 edition, 1974.
- [10] European Parliament. Directive (EU) 2015/2193 of the European Parliament and of the Council of 25 November 2015 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants. In *Off J Eur Union*, page 313. 2015.
- [11] Földművelésügyi Minisztérium. 53/2017. (X. 18.) FM rendelet a 140 kWth és annál nagyobb, de 50 MWth-nál kisebb teljes névleges bemenő hőteljesítményű tüzelőberendezések működési feltételeiről és légszennyező anyagainak kibocsátási határértékeiről. pages 1–15, 2017.
- [12] Saurabh Sharma, Hrishikesh Pingulkar, Arindrajit Chowdhury, and Sudarshan Kumar. A new emission reduction approach in MILD combustion through asymmetric fuel injection. *Combustion and Flame*, 193:61–75, jul 2018.
- [13] Saurabh Sharma, Rohit Kumar, Arindrajit Chowdhury, YOUNGBIN YOON, and Sudarshan Kumar. On the effect of spray parameters on CO and NOx emissions in a liquid fuel fired flameless combustor. *Fuel*, 199:229–238, 2017.
- [14] V. Mahendra Reddy, Pratim Biswas, Prateek Garg, and Sudarshan Kumar. Combustion characteristics of biodiesel fuel in high recirculation conditions. *Fuel Processing Technology*, 118:310–317, 2014.

- [15] V. Mahendra Reddy, Darshan Sawant, Darshan Trivedi, and Sudarshan Kumar. Studies on a liquid fuel based two stage flameless combustor. *Proceedings of the Combustion Institute*, 34(2):3319–3326, 2013.
- [16] Jingjing Ye, Paul R. Medwell, Emilien Varea, Stephan Kruse, Bassam B. Dally, and Heinz G. Pitsch. An experimental study on MILD combustion of prevaporised liquid fuels. *Applied Energy*, 151:93–101, 2015.
- [17] Richard A. Yetter, Irvin Glassman, and H. Clay Gabler. Asymmetric whirl combustion: A new low NO<sub>x</sub> approach. *Proceedings of the Combustion Institute*, 28(1):1265–1272, 2000.

## Saját publikációk

- [P1] Hidegh Gyöngyvér és Józsa Viktor. Correlation analysis of chemiluminescent and pollutant emissions of a liquid-fueled turbulent swirl burner. *Journal of the Energy Institute*, 93(4):1390-1398, 2020.
- [P2] Hidegh Gyöngyvér és Józsa Viktor. Folyadéktüzelés károsanyag és kemilumineszcens emissziójának elemzése változó porlasztónyomás és levegő-előmelegítés mellett. Árpád Palotás, szerk., 5. *MÉB Égéstudományi Konferencia*, 8 oldal, Miskolc, 2019.
- [P3] Hidegh Gyöngyvér és Józsa Viktor. Correlation of chemiluminescent signal and pollutant emission of a liquid-fueled turbulent swirl burner. Mara De Joannon, George Skevis, és Lucia Forzi, szerk., *Proceedings of the First International Conference on Smart Energy Carriers*, PVI-2, 4 oldal, Nápoly, 2019.
- [P4] Józsa Viktor, Tóthpálné Hidegh Gyöngyvér, Csemány Dávid, Kardos Réka Anna és Cheng Tung Chong. Dyna-

- mics and emission of nearly flameless combustion of waste cooking oil biodiesel in an ultra-low emission non-MILD swirl burner. *Fuel*, 319(december 2021):123743, 2022.
- [P5] Tóthpálné Hidegh Gyöngyvér, Csemány Dávid, Osama DarAli, Syed Ali Hamza Rizvi, Jo-Han Ng, Cheng Tung Chong és Józsa Viktor. Comparison of thermophysical properties and combustion characteristics of various biodiesels in a non-MILD ultra-low emission swirl burner. *Fuel*, 334(augusztus 2022):126583, 2023.
- [P6] Hidegh Gyöngyvér, Csemány Dávid, Vámos János, Kavas László és Józsa Viktor. Mixture Temperature-Controlled combustion of different biodiesels and conventional fuels. *Energy*, 234:121219, 2021.
- [P7] Józsa Viktor, Hidegh Gyöngyvér, Kun-Balog Attila and Jo-Han Ng és Cheng Tung Chong. Ultra-low emission combustion of diesel-coconut biodiesel fuels by a mixture temperature-controlled combustion mode. *Energy Conversion and Management*, 214(február 2020):112908, 2020.
- [P8] Józsa Viktor, Tóthpálné Hidegh Gyöngyvér, Csemány Dávid, Kardos Réka Anna és Cheng Tung Chong. Waste cooking oil biodiesel combustion in a novel low emission swirl burner. *16th SDEWES Conference*, 12 oldal, Dubrovnik, 2021.
- [P9] Hidegh Gyöngyvér, Csemány Dávid, Kun-Balog Attila, Józsa Viktor és Cheng Tung Chong. Experimental investigation of waste cooking oil combustion in a novel turbulent swirl burner. Fabrizio Scala és munkatársai, szerk., *10th European Combustion Meeting Proceedings Volume*, 1414–1419 oldal, Nápoly, 2021.
- [P10] Hidegh Gyöngyvér, Csemány Dávid, Vámos János, Tóth József és Józsa Viktor. Mixture Temperature-Controlled

- Combustion of Various Conventional and Renewable Fuels. *Chemical Engineering Transactions*, 83(X):415–420, 2021.
- [P11] Tóthpálné Hidegh Gyöngyvér, Pizág Bertalan, Urbin Ágnes, Rácz Erika és Józsa Viktor. Flame emission spectroscopy analysis of distributed liquid fuel combustion. *Fuel*, 353(április 2023):129193, 2023.
- [P12] Mohammad Darwish, Hidegh Gyöngyvér, Csemány Dávid és Józsa Viktor. Distributed combustion of diesel–butanol fuel blends in a mixture temperature-controlled burner. *Fuel*, 307(szeptember 2021):121840, 2022.
- [P13] Hidegh Gyöngyvér és Józsa Viktor. Diffúzor alkalmazása perdületes égő lángfűvési stabilitásának növelésére. *Energiagazdálkodás*, 57(6):17–20, 2016.
- [P14] Hidegh Gyöngyvér és Józsa Viktor. Diffúzoros kialakítású előkeveréses perdületes égő károsanyag kibocsátása lángcsőben tüzelés esetén. *Energiagazdálkodás*, 59(3):30-33, 2018.