



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék

FOLYÉKONY BIO-TÜZELŐANYAGOK FELHASZNÁLÁSA HŐERŐGÉPEKBEN

PhD értekezés

Készítette:

Laza Tamás

okleveles gépészmérnök

Témavezető: Prof. Dr. Penninger Antal
egyetemi tanár

Budapest
2010

Köszönetnyilvánítás

A munka elvégzésében nagy segítséget jelentett a következő projektekben való kutató-fejlesztő munka:

- "Bioenergetikai Innovációs Klaszter létrehozása és K+F programok megvalósítása a biomassza hasznosítás területén" projekt: 2.3. feladat: Az olajnövény préseles (napraforgó-repce) és az olajészterezés hatásvizsgálata
- "Bioenergetikai Innovációs Klaszter létrehozása és K+F programok megvalósítása a biomassza hasznosítás területén" projekt: 5.3. feladat: Használt étolaj komplex vizsgálata, a biodízel előállítás lehetősége és a minőségi jellemzők betartása szempontjából
- Magyar-portugál kormányközi Tét együttműködés (Port-17/03): "Motiváció a közös kutatás és az oktatás irányába (Moving Towards Investigation and Education Studie, MOTIVES)" 2004/2005
- Nemzeti Technológiai és Kutatási Hivatal (NKTH) által TECH_08-A4/2-2008-0144 szerződésszámmal támogatott "Bioenergetikai rendszerszabványok kidolgozása"
- Nemzeti Technológiai és Kutatási Hivatal (NKTH) által ZA-17/2009 szerződésszámmal támogatott "Magasabb alkoholok és nem étkezési olajok keverékeinek gazdasági, üzemi és emisszió vizsgálata Diesel üzemanyagként történő felhasználásához".

A munka létrejöttéhez külföldön végzett kutatások is hozzájárultak. Ebben jelentős segítséget nyújtott Dr. Rainer Koch, a Karlsruhei Műszaki Egyetem Institut für Thermische Strömungsmaschinen docense, Dr. Isabel Simoes de Carvalho, az Instituto Superior Técnico Departamento de Engenharia Mecânica adjunktusa, Prof. Dr. rer. nat. habil. Ulrich Maas, a Karlsruhei Műszaki Egyetem Institut für Technische Thermodynamik intézetvezetője.

A magyarországi mérések elvégzésében nyújtott segítségéért külön köszönetet szeretnék mondani Dr. Sztatisz Janisznak, a BME Szervetlen és Analitikai Kémia Tanszék docensének, Dr. Kerekes Zsuzsának, a SZIE YBL MMF Tűzvédelmi és Biztonságtechnikai Intézet docensének, Tóvári Péternek, a Földművelésügyi és Vidékfejlesztési Minisztérium Mezőgazdasági Gépesítési Intézet energetikai osztályvezetőjének, valamint a BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék munkatársainak: Dr. Meggyes Attila egyetemi tanárnak és Dr. Bereczky Ákos docensnek a belső égésű motorok és tüzelőanyag-elpárolgás témakörökben nyújtott segítségükért, a tanszék valamennyi dolgozójának, doktoranduszának és hallgatójának a munka elkészítéséhez nyújtott segítségért.

Külön köszönet illeti Prof. Dr. Penninger Antal egyetemi tanárt a témavezetésért, a mérések elvégzéséhez szükséges körülmények megteremtéséért.

Alulírott Laza Tamás kijelentem, hogy ezt a doktori értekezést magam készítettem, és abban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalommal, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2010. június 07.

Tartalomjegyzék

Ábrák jegyzéke	iii
Táblázatok jegyzéke	vi
Szimbólumok jegyzéke	vii
1. Bevezetés	1
2. Irodalomkutatás, irodalom elemzése	3
2.1. Repceolaj, magasabb rendű alkoholok és a kerozin jet-A tulajdonságai	3
2.2. Növényi olaj felhasználásának könnyítése	11
2.3. Növényi olaj felhasználásának tapasztalatai	13
2.4. Gyakorlati problémák	17
2.4.1. Cseppek párolgása	17
2.4.2. Porlasztás	21
2.4.3. Akusztikusan öngerjesztett instabil lángok vizsgálata	23
3. Mérési berendezések, összeállítások	28
3.1. Porlasztótípusok	28
3.2. Porlasztási és égési vizsgálatoknál alkalmazott mérőhelyek	33
3.2.1. Repceolaj porlaszthatóságának vizsgálata	33
3.2.2. Kerozin és repceolaj porlasztásának vizsgálata	34
3.2.3. Akusztikusan öngerjesztő lángok összehasonlító vizsgálata	35
3.3. Cseppek párolgását vizsgáló berendezés	38
3.4. További mérések	39
4. Mérési eredmények	40
4.1. Repceolaj porlaszthatóságának vizsgálata	40
4.1.1. Porlasztás láthatóvá tétele	40
4.1.2. PDA mérések	42
4.2. Akusztikusan öngerjesztő lángok vizsgálata	47
4.2.1. Kerozin és repceolaj porlasztásának összehasonlítása	47
4.2.2. Porlasztmány terjedésének vizsgálata lézersík módszerrel	49

4.2.3. Porlasztmány terjedésének vizsgálata PIV-vel	51
4.2.4. Porlasztmány terjedésének vizsgálata PDA-val	53
4.3. Repceolaj és magasabb rendű alkoholok elegyének vizsgálata	64
4.3.1. Elegyek égéshője	64
4.3.2. Elegyek sűrűsége	65
4.3.3. Elegyek viszkozitása	65
4.3.4. Elegyek párolgási tulajdonsága	67
4.3.5. Elegyek motorikus felhasználásának vizsgálata	73
4.3.6. Elegyek lobbanáspontja	78
4.3.7. Elegyek hidegszűrhetőségi határhőmérséklete	80
4.3.8. Elegyek oxidációs stabilitása	80
5. Tézisek	82
Függelék	93
A. Irodalomkutatás	93
A.1. Repceolaj és kerozin jet-A tulajdonságai	93
B. Kísérleti berendezések	98
B.1. PDA	98
B.2. Planer Mie Scattery (PMS)	99
B.3. Lézersík-módszer	100
B.4. PIV	100
B.5. Égéshő-meghatározó berendezés	100
B.6. Lobbanáspontmérő készülék	101
B.7. Sűrűségmérés	101
B.8. Viskoziméter	101
B.9. Termogravimetria – termomérleg	101
B.10. Cetánszámmérés	102
B.11. Cetánszámmérő motor	102
B.12. Emisszió	102
B.12.1. Határértékek	103

Ábrák jegyzéke

2.1. Kerozin, repceolaj, RME, dízelolaj felületi feszültsége és viszkozitása	8
2.2. Cseppátmérő négyzetének változása az idő függvényében. a.) ideális eset, b.) van melegedés, és maradvány is	18
2.3. Porlasztási folyamat osztályozása	22
2.4. Örvénykialakulás az égőszájnál	25
2.5. Büchner szerinti visszacsatolás	26
3.1. Perdítőelemes nyomásporlasztó	28
3.2. Belső keverésű segédközegezes nyomásporlasztó	30
3.3. Külső keverésű segédközegezes porlasztó	31
3.4. Repceolaj porlaszthatóságának vizsgálatához felépített berendezés	33
3.5. PMS méréseknél használt berendezés felépítése	34
3.6. PMS mérésnél a mérési térfogat elhelyezkedése	35
3.7. Lézersík, PIV és PDA méréseknél használt berendezés felépítése	36
3.8. PDA mérések nullpontja	36
3.9. Akusztikusan öngerjesztő lángok vizsgálatakor fellépő frekvencia, különböző mérési összeállításoknál	37
3.10. Árnyékgráfia felépítése	38
4.1. Repceolaj-porlasztás a segédközegezes porlasztóval. Porlasztási nyomás: 5 bar. N ₂ segédközeg nyomása 2,5, 5 és 10 bar	40
4.2. Repceolaj-porlasztás a perdítőelemes nyomásporlasztóval. Olajnyomás: 10 bar	41
4.3. Repceolaj-porlasztás a perdítőelemes nyomásporlasztóval. Porlasztási nyomás: 16 bar	42
4.4. Axiális (U) és radiális (V) sebességek 10 (bal oldalon) és 20 mm (jobb oldalon) távolságban a segédközegezes porlasztó szájától	43
4.5. Sauter középátmérő (SMD) 10 (bal oldalon) és 20 mm (jobb oldalon) távolságban a segédközegezes porlasztó szájától	43
4.6. Axiális (U) és radiális (V) sebességek 10 (bal oldalon) és 20 mm (jobb oldalon) távolságban a nyomásporlasztó szájától	44
4.7. Sauter középátmérő (SMD) 10 mm (bal oldalon) és 20 mm (jobb oldalon) távolságban a nyomásporlasztó szájától	45

4.8. 16 bar 78 °C-nál (bal oldalon) és 10 bar 90 °C (jobb oldalon) mért axiális (U) és radiális (V) sebességek és a Sauter középátmérő 10 mm távolságban a nyomásporlasztó szájától	46
4.9. PMS mérések eredményei kerozin (jobb oldalon) és repceolaj (bal oldalon) helyettesítő anyagaival, 12 mm-re a porlasztótól, 0,5 g/s tüzelőanyag-árammal .	48
4.10. PMS mérések eredményei kerozin (jobb oldalon) és repceolaj (bal oldalon) helyettesítő anyagaival, 12 és 32 mm-re a porlasztótól, 0,8 g/s tüzelőanyag-árammal	48
4.11. Porlasztmány fejlődése az oszcillálás három különböző pillanatában	49
4.12. Lézersík módszerrel felvett gyakoriságábrák a 3. (bal oszlop) és az 1. (jobb oszlop) mérési beállításnál, különböző fázisoknál (a-e)	50
4.13. PIV méréssel felvett sebességmező a 3. (bal oszlop) és az 1. (jobb oszlop) mérési beállításnál, különböző fázisoknál (a-e)	52
4.14. Detektált repceolajcseppek száma az első mérési síkban, $r=10$ mm-nél	53
4.15. Detektált cseppek száma az első mérési síkban	54
4.16. Detektált cseppek száma az első (balra) és a harmadik (jobbra) mérési síkban, a fő sugarban	54
4.17. Közepes cseppátmérő az első (balra) és a harmadik (jobbra) mérési síkban, a fő sugarban	55
4.18. Közepes cseppátmérő és a detektált cseppek száma a negyedik mérési síkban, a fő sugarban, repceolajüzem esetén	56
4.19. CO és NO _x emisszió akusztikusan öngerjesztő lángok esetén, a légfelesleg-tényező függvényében	58
4.20. CO és NO _x emisszió akusztikusan öngerjesztő lángok esetén, a termikus teljesítmény [kW] függvényében	59
4.21. PDA mérés során detektált cseppek száma a 3. (bal oszlop) és az 1. (jobb oszlop) mérési beállításnál, különböző fázisoknál (a-e)	60
4.22. PDA méréssel megállapított középátmérő a 3. (bal oszlop) és az 1. (jobb oszlop) mérési beállításnál, különböző fázisoknál (a-e)	61
4.23. PDA méréssel megállapított axiális sebesség a 3. (bal oszlop) és az 1. (jobb oszlop) mérési beállításnál, különböző fázisoknál (a-e)	62
4.24. PDA méréssel megállapított tangenciális sebesség a 3. (bal oszlop) és az 1. (jobb oszlop) mérési beállításnál, különböző fázisoknál (a-e)	63
4.25. Repceolaj és magasabb rendű alkoholok elegyének sűrűsége	65
4.26. 1-propanol és 1-butanol hatása az elegy kinematikai viszkozitására	67
4.27. Hőmérséklet hatása az elegy viszkozitására 1-propanol és 1-butanol példájával .	67

4.28. Fajlagos átmérő változásának négyzete az idő függvényében tiszta repceolaj, valamint repceolaj + 1-butanol elegye esetében, 500 és 700 °C-on.	67
4.29. Repceolaj (felső sor), repceolaj + alkohol elegyek árnyékgráfiával felvett képei	70
4.30. Repceolaj TGA görbéi inert atmoszférában	71
4.31. Repceolaj–2-propanol elegyek TGA görbéi inert atmoszférában	72
4.32. Repceolaj–1-butanol elegyek TGA görbéi inert atmoszférában	72
4.33. Repceolaj, valamint repceolaj–butanol elegyek oxidáló atmoszférában felvett TGA görbéi	72
4.34. Alkoholtartalom hatása a repceolaj cetánszámára	74
4.35. Mért nyomáslefutás a hengertérben repceolaj, repceolaj-alkohol elegyek és dízelolaj üzem esetén	75
4.36. Alkoholtartalom hatása a repceolaj égéstörvényére állandó kompresszióviszonynál	75
4.37. Alkoholtartalom hatása a füstölésre	76
4.38. Alkoholtartalom hatása az NO _x emisszióra	77
4.39. Alkoholtartalom hatása a füstgáz elégetlen szénhidrogén tartalmára	78
4.40. Alkoholtartalom hatása a füstgáz CO tartalmára	78
4.41. Repceolaj és különböző alkoholok nyílt és zárt téri lobbanáspontja	79
A.1. Repceolaj és kerozin deszcillációs görbéje	94

Táblázatok jegyzéke

2.1. Repceolaj tulajdonságai különböző betakarítási évek, termesztési helyek és fajták esetén	4
2.2. 1-propanol, 2-propanol, 1-butanol, 2-butanol, izobutanol tulajdonságai	4
2.3. Kerozin helye a nyersolajleparlás folyamán	5
2.4. Kerozin elemi összetétele	5
2.5. A vizsgált anyagok elméleti levegőszükséglete (l_0)	6
2.6. Repceolaj elemi összetétele	6
2.7. Repceolaj zsírsaveloszlása	6
2.8. Repceolaj, kerozin jet-A és a magasabb rendű alkoholok fűtőértéke, valamint égéshője	7
2.9. Heptán, dekán és dodekán párolgási konstansa	18
3.1. Gyakrabban használt középátmérő-kitevők jelentése	32
3.2. Akusztikusan öngerjesztő lángok vizsgálatának üzemállapotai	37
3.3. Repceolajcseppek hőmérséklete az első és az utolsó mérési síkban	39
4.1. Repceolaj és alkoholok elegyének mért égéshője és számolt fűtőértéke	64
4.2. Repceolaj és alkoholok elegyének viszkozitása. Mértékegység: mm^2/s	66
4.3. Repceolaj, valamint repceolaj + 2-butanol elegyének a párolgási konstansának meghatározása. A *-gal jelölt eredmények nagy relatív hibával terheltek.	69
4.4. Tűzveszélyességi osztályba sorolás határértékei	80
4.5. Repceolaj-alkohol elegyek hidegszűrhetőségi határhőmérséklete	81
A.1. Kerozin desztillációs görbéjének néhány pontja	93
A.2. Kerozin adiabatikus égési hőmérséklete	96
B.1. Gázturbinára vonatkozó határértékek	103
B.2. Dízelmotorra vonatkozó határértékek	103

Szimbólumok jegyzéke

Jel	Mértékegység	Jelentés
<i>Latin betűk</i>		
a	m/s	Hangsebesség
b	%	Keverékanyag térfogataránya
c	%	Dízel-üzelőanyag térfogataránya
d	m	Átmérő
l	$m^3/kg_{t.a.}$	Égéslevegő-szükséglet
m	kg	Tömeg
\dot{m}	kg/s	Tömegáram
n	%	Nedvességtartalom
p	Pa	Nyomás
\dot{q}	W/m^2	Hőáramsűrűség
r	kJ/kg	Párolgáshő
t	s	Idő
v	m/s	Sebesség
CSZ	–	Cetánszám
D	m	Átmérő
E	MJ/kg	Égéshő
F	MJ/kg	Fűtőérték
H	%	Hidrogéntartalom
K	m^2/s	Párolgási konstans
L	m	Hosszúság
R	m	Sugár
Oh	–	Ohnesorge-szám
T	K	Hőmérséklet
T	s	Periódusidő
U	m/s	Axiális sebesség
V	m/s	Tangenciális sebesség
V	m^3	Térfogat
We	–	Weber-szám

Görög betűk

ϵ	–	Kompresszióviszony
η	–	Hatásfok, hatásosság
η	<i>Pa·s</i>	Dinamikai viszkozitás
λ	–	Légfelesleg-tényező
ν	<i>mm²/s</i>	Kinematikai viszkozitás
σ	<i>N/m</i>	Felületi feszültség
ρ	<i>kg/m³</i>	Sűrűség
φ	°	Fázisszög
Δ	–	Különbség
Φ	–	Sztöchiometrikus levegő – tüzelőanyag arány

Indexek

<i>ad.</i>	Adiabatikus
<i>aero</i>	Aerodinamikai
<i>be</i>	Belépő
<i>cs</i>	Csepp
<i>f</i>	Felületi
<i>f</i>	Folyadék
<i>kev</i>	Keveredés
<i>lev.</i>	Levegő
0	Kiinduló állapot
<i>t</i>	Tüzelés
<i>t.a.</i>	Tüzelőanyag
<i>p</i>	Párolgás
<i>reak</i>	Reakció
<i>Szt</i>	Sztöchiometrikus

Gyakori rövidítések

<i>CFPP</i>	Hidegszűrési határhőmérséklet
<i>CH</i>	Szénhidrogén
<i>DTG</i>	Differenciál termogravimetria
<i>LDA</i>	Laser-Doppler Anemometer
<i>NOME</i>	Növényolaj-metilészter
<i>PDA</i>	Phasen-Doppler Anemometer
<i>PIV</i>	Particle Image Velocimetry

PMS

Planer Mie Scattery

RME

Repcemetilészter

SMD

Sauter Mean Diameter - Sauter középátmérő

TGA

Termogravimetriás analízis

1. fejezet

Bevezetés

A világ villamosenergia-igénye, és ezzel együtt az üvegházhatást okozó gázok kibocsátása is egyre nő. A növekedés üteme megújuló energiaforrások használatával csökkenthető.

Magyarországi körülmények között az egyik legjelentősebb megújuló energia a biomassza. Az ebből nyerhető két legfontosabb folyékony tüzelőanyag az alkohol és a növényi olaj, illetve az utóbbi észterezett változata. A világon Jamieson 1943-ban több mint 350 olajosnövényt azonosított, amelyekből a kivonható olaj tüzelőanyagként hasznosítható belső égésű motorokban. Később Duke és Bagby ezt a listát 70-re csökkentette, legfőbb szempontként a termésátlagot véve figyelembe (minimálisan 200 kg/ha). Manapság a biodieszel-iparág nyersanyagforrása Európában a repce és a napraforgó, az USA-ban a szója és a napraforgó, Kanadában a repce és a fenyőgyanta (tall-oil) [1]. Magyarországon a napraforgó mellett a repce a legelterjedtebb olajosnövény. Munkámban a hidegen sajtolt repceolajjal foglalkozom.

Lehetséges alkalmazási terület a repceolaj számára mezőgazdasági területeken traktorok meghajtásán kívül a decentralizált energiatermelés. Ennek egyik lehetséges megvalósítása a fixen telepített, generátorral ellátott dízelmotor vagy mikrogázturbina.

Új tüzelőanyagok felhasználásakor két út kínálkozik: vagy a tüzelőanyagot módosítjuk úgy, hogy a régi berendezésben is felhasználható legyen, vagy a berendezést tesszük alkalmassá az új tüzelőanyag felhasználására.

Modern gázturbinák NO_x -kibocsátásának csökkenését megnövelt légfelesleg-tényezőjű üzemmel érik el. Ennek a módszernek azonban vannak korlátai, mert a nagy légfelesleggel megvalósuló lángok égési instabilitásra hajlamosak. Ez jelenthet termoakusztikus lengést (akusztikusan öngerjesztő lángok kialakulását), instabil gyújtást, vagy helyi lángkialvást is. Az aktuális gázturbina-kutatás egyik nagy feladata a termoakusztikus lengések vizsgálata.

Nyers repceolaj viszkozitása, párolgási, égési tulajdonsága nagymértékben eltér a dízelolajétól, felhasználása során a motor égésterében a repceolaj lerakódásokat okoz, ezért szükséges a tüzelőanyag módosítása. A módosított tüzelőanyag pedig a repce-metilészter (RME). Az RME előállítása azonban költséges, gyártása során keletkező melléktermékek pedig külön problémák forrása.

Célkitűzés

A fentiek alapján a disszertációban célul tűzöm ki a repceolaj különböző porlasztókkal kapott porlasztási képének, a szegény üzemben fellépő termoakusztikus lengésének, továbbá a belső égésű motorban történő alkalmazásának vizsgálatát.

Munkám során egy külső keverésű segédközeges porlasztóval ellátott modell gázturbina-égőtérben, a hagyományos (a kerozin jet-A), és a megújuló (repceolaj) gázturbina-tüzelőanyag felhasználása során, szegény üzemben kialakuló termoakusztikus lengéseket kívánom megvizsgálni. A két tüzelőanyagnál fellépő oszcillálás összehasonlítása során különös figyelmet szentelek a porlasztásuk során keletkező cseppek számának, nagyságának és sebességének a lengés fáziszögeire felbontott meghatározására.

A növényi olaj motorikus felhasználásának vizsgálata folyamán külön figyelmet fordítok a növényi olaj égésének gyorsítására. Ezért különböző, magasabb rendű alkoholokat elegyíték hozzá. Az így kapott tüzelőanyagok motorikus felhasználhatóságán kívül megvizsgálom a tárolás, szállíthatóság szempontjából fontos tulajdonságait is, mint például a nyílt és zárttéri lobbánáspontot, a viszkozitást, a sűrűséget, a hidegszűrési határhőmérsékletet.

2. fejezet

Irodalomkutatás, irodalom elemzése

2.1. Repceolaj, magasabb rendű alkoholok és a kerozin jet-A tulajdonságai

A tüzelőanyagok fizikai és kémiai tulajdonságai meghatározzák azok felhasználhatóságát, kezelését. A következőkben röviden bemutatom a munkám során felhasznált anyagok porlasztathatóság, felhasználás, égés, tárolás szempontjából fontos tulajdonságait. Alapvetően három fajta tüzelőanyaggal dolgoztam: kerozin jet-A-val, repceolajjal és magasabb rendű alkohollal.

A növényi olajokat különböző olajsnövényekből – általában – préssel állítják elő. A préselésnél keletkezett ún. repcedarából pelletet készítenek és takarmányként hasznosítják. A kinyert olaj általában tartalmaz telített és (többszörösen) telítetlen zsírsavakat, jelentős oxigéntartalma van.

Mivel a repceolajat különböző fajtájú és klimatikus viszonyok közt termesztett repceből állítják elő, ezért a kész olaj tulajdonságai is függhetnek ezen paramétereiktől. Amint az a 2.1. táblázatból is látható [2] a sűrűség esetében van a legkisebb szórás ($0,92-0,921 \text{ kg/dm}^3$), a legnagyobb pedig a víztartalomnál (61-850 ppm). A növényi olaj sűrűsége genetikailag meghatározott, ezért ennek az egyéb tényezőktől való függősége kicsiny [3]. Egyelőre nem létezik egy nemzetközileg is használt szabvány a repceolaj tulajdonságaira [4], a repceolaj motorikus tulajdonságaira már létezik szabványjavaslat ([5] [6]).

A növényi olajok tüzelési tulajdonságainak módosítására magasabb rendű alkoholt használtam. A méréseimhez 2 fajta magasabb rendű alkohol összesen 5 izomerét választottam ki. Ezek: 1-propanol, 2-propanol vagy izopropanol, 1-butanol, 2-butanol, izobutanol. A felhasznált alkoholok tulajdonságait táblázatban foglaltam össze (lásd 2.2. táblázat).

1-propanol. Magasabb rendű alkohol. Szobahőmérsékleten alkohol szagú, átlátszó, tiszta folyadék. Sokkal kevesebb vizet képes felvenni, mint az alacsonyabb rendű alkoholok. Alkalmazzák festékiparban, tisztításhoz, fertőtlenítésre, gyógyszeriparban.

2-propanol (izopropanol). A legkisebb másodrendű alkohol. Enyhén édes, kellemes szaga van. Alkalmazzák fagyállóként ablakmosó folyadékokban, kozmetikaiparban stb.

Helyszín	Mérőszám	Fajta	Arabella		Ceres		Lirabon	
			1988	1989	1988	1989	1988	1989
Almesbach	Sűrűség (15 °C)	[kg/dm ³]	0,920	0,920	0,921	0,921	0,921	0,921
	Viszkozitás (20 °C)	[mm ² /s]	73,1	75,2	74,6	76,2	76,6	76,2
	Lobbanáspont	[°C]	-	319	-	328	-	322
	Víztartalom	[ppm]	65	720	61	720	72	790
	Cetánszám		-	42,3	-	36,8	-	40,5
Hohenroth	Sűrűség (15 °C)	[kg/dm ³]	0,921	0,921	0,921	0,921	0,921	0,921
	Viszkozitás (20 °C)	[mm ² /s]	71,1	75,6	74,7	76,0	75,9	76,0
	Lobbanáspont	[°C]	-	320	-	324	-	322
	Víztartalom	[ppm]	65	800	64	760	66	790
	Cetánszám		-	39,6	-	38,9	-	39,2
Oberhaunstadt	Sűrűség (15 °C)	[kg/dm ³]	0,921	-	0,921	-	0,921	-
	Viszkozitás (20 °C)	[mm ² /s]	72,7	-	73,2	-	75,5	-
	Lobbanáspont	[°C]	-	-	-	-	-	-
	Víztartalom	[ppm]	63	-	69	-	65	-
	Cetánszám		-	-	-	-	-	-
Osterseeon	Sűrűség (15 °C)	[kg/dm ³]	0,921	0,921	0,921	0,921	0,921	0,921
	Viszkozitás (20 °C)	[mm ² /s]	72,6	75,7	73,8	76,2	76,0	76,1
	Lobbanáspont	[°C]	-	320	-	320	-	316
	Víztartalom	[ppm]	62	810	68	790	71	850
	Cetánszám		-	36,6	-	39,6	-	39,9

2.1. táblázat. Repceolaj tulajdonságai különböző betakarítási évek, termesztési helyek és fajták esetén

Tulajdonság	Mértékegység	1-propanol	2-propanol	1-butanol	2-butanol	Izobutanol	
Összegképlet		C ₃ H ₇ OH	C ₃ H ₇ OH	C ₄ H ₉ OH	C ₄ H ₉ OH	C ₄ H ₉ OH	
Móltömeg	[g/mol]	60,1	60,1	74,1	74,1	74,1	
Sűrűség (15 °C)	[g/cm ³]	0,8035	0,785	0,8027	0,8098	0,8065	
Forráspont	[°C]	97,4	82	117,7	98	108	
Lobbanáspont	[°C]	15	11,7	25	29	24	
Öngyulladás	[°C]	371	456	415	345	406	
Tömegarányok:	C	[%]	60	60	64,8	64,8	64,8
	H	[%]	13,3	13,3	13,5	13,5	13,5
	O	[%]	26,7	26,7	21,6	21,6	21,6

2.2. táblázat. 1-propanol, 2-propanol, 1-butanol, 2-butanol, izobutanol tulajdonságai

Butanol. Magasabb rendű alkohol négy szénatommal. A butanolnak négy izomere van. Jellegzetes szagú, színtelen folyadék.

A magasabb rendű alkoholok előállítása is történhet biológiai úton, cukrok, keményítők erjesztésével (butanol), szintetikus úton szén-monoxidból és hidrogénből (2-butanol) indirekt hidratizálással, szénhidrogén-lepárlással.

A vizsgált tulajdonságok egy része a gázturbinai másik része pedig a motorikus felhasználás szempontjából bír nagy jelentőséggel, és természetesen e két csoport között van átfedés is.

Összetétel, elméleti levegőszükséglet

Kőolajból való lepárlás szempontjából a kerozin jet-A a 2.3. táblázat szerint sorolható be [7].

Termék	Lepárlási hőmérséklet
Nafta	35–1550 °C
Kerozin jet-A	150–300 °C
Dízelolaj	180–350 °C
Tüzelőolaj	maradék

2.3. táblázat. Kerozin helye a nyersolajlepárlás folyamán

Az irodalomban található adatok szerint a kerozin leginkább a C_xH_y képletben az $X=12$, $Y=23$ adatokkal írható le. A szénhidrogénkötések 99,2 tömeg%-ában 9-17 szénatom található, leggyakrabban a 12 szénatomszámú lánc található (19,5 tömeg%), a kerozin móltömege 166 kg/kmol. A 2.4. táblázatban [8] a kerozin jet-A összetétele látható.

Elem	Mértékegység	Eredmény [8]
Szén	[tömeg%]	85,4
Hidrogén	[tömeg%]	13,94
Oxigén	[tömeg%]	0
Kén	[mg/kg]	6 alatt
Nitrogén	[tömeg%]	1,11 alatt

2.4. táblázat. Kerozin elemi összetétele

Repceolaj elemi összetétele a 2.6. táblázatban látható. A repceolaj és az alkoholok kisebb levegőszükségletének az oka azok oxigéntartalma. A vizsgált anyagok elméleti levegőszükséglete a 2.5 táblázatban látható.

A repceolaj kén- és nitrogéntartalma alacsony, ami kisebb károsanyag-kibocsátást eredményez, kiküszöbölve a kén alapú lerakódásokat is [11]. Egyes mintákban viszont nem elhanyagolható kéntartalmat sikerült kimutatni.

A foszfor csökkenti a növényi olajok eltarthatóságát, és növeli azok korrozív hatását. A nagy foszfortartalom mindamellett nagyobb mennyiségű kokszt és egyéb maradék képződését okozza.

Anyag	l_0 $\frac{kg_{lev.}}{kg_{t.a.}}$
Kerozin	14,7
Repceolaj	12,51
Propanol	10,28
Butanol	11,12

2.5. táblázat. A vizsgált anyagok elméleti levegőszükséglete (l_0)

Elem	Eredmény	1. mérés [9]	2. mérés [10]	3. mérés [11]	Szabvány [5]
Szén	[tömeg%]	76,8	77,8	78,15	-
Hidrogén	[tömeg%]	11,9	11,4	11,84	-
Oxigén	[tömeg%]	11,3	10,8	10,01	-
Kén	[mg/kg]	3	16	0	<20
Nitrogén	[mg/kg]	52	-	-	1000
Foszfor	[mg/kg]	-	7	-	<15

2.6. táblázat. Repceolaj elemi összetétele

A repceolaj gazdag többszörösen telítetlen zsírsavakban. Főbb zsírsavösszetevőit a 2.7. táblázat tartalmazza. Ebből kitűnik, hogy a repceolaj főleg olajsavból és linolsavból áll.

A repceolaj hajlamos a polimerizációra. A rövidebb szénláncú molekulák az idő folyamán egyesülnek, és hosszú szénláncú, gyakran elágazó molekulák képződnek. Ezek a különböző felhasználás során használt fűvókákat eltömíthetik, valamint az olaj elpárolgását is megnehezítik. A sok háromszorosan telítetlen zsírsavat tartalmazó olaj polimerizáció-hajlama nagy [12].

Megnevezés	Szénatom- szám	Mennyiség [tömeg%]
Alacsony zsírsavak	<C-14	<0,7
Palmitinsav	C-16/0	0,2
Palmitoleinsav	C-16/1	<0,1
Sztearinsav	C-18/0	1,2
Olajsav	C-18/1	68,8
Linolsav	C-18/2	23,1
Linolensav	C-18/3	6,5
Arachinsav	C-20/0	0,1
Gadoleinsav	C-20/0	0,1
Magasabb zsírsavak	>C-20	<0,1

2.7. táblázat. Repceolaj zsírsaveloszlása

Égéshő (E), fűtőérték (F)

Az égéshő a tüzelőanyag egységnyi tömegű, illetve térfogatú mennyiségének égése során felszabaduló hő, amennyiben az égéstermék a kiindulási hőmérsékletre (20 °C) lehűtjük, és az égéstermékben található H₂O folyékony állapotban van jelen. Fűtőérték esetén az égéstermék víztartalma gőz halmazállapotú, tehát a kondenzációs hő nem hasznosul.

A repceolaj fűtőértéke a repce termesztési helyétől, évjáratától függően ingadozik. A fűtőérték függ az olaj zsírsavösszetételétől is. Növekszik, ha nő a zsírsavmolekulák hossza; csökken, ha nő a kettős kötések száma; valamint erős növekedés figyelhető meg, ha csökken az olaj oxigéntartalma [13].

Az irodalomban [7] a kerozin fűtőértékének a középértéke 43,26 MJ/kg. A szabványban előírtak szerint a repceolaj fűtőértékének minimum F=35 MJ/kg-nak kell lennie. Az irodalomban több mérésből származó, különböző eredményeket találni (pl. [4], [10], [11], [14], [15]); a megvizsgált próbák átlaga 38 MJ/kg, ami a szabványban előírt minimum fölött van.

A mellékletben (A.1. melléklet) bemutatott számítási módok szerint meghatározott fűtőérték és égéshő értékek 2.8. táblázatban láthatók.

Tüzelőanyag	Égéshő [MJ/kg]		Fűtőérték [MJ/kg]	
	Demirbas A.1 egyenlet	Demirbas A.4 egyenlet	Gardner A.2 egyenlet	Boie A.3 egyenlet
Kerozin jet-A	48,4	X	43,26	42,87
Repceolaj	40,9	39,73	X	37
Propanol	34,9	X	29,9	30,5
Butanol	37,6	X	31,8	3,95

2.8. táblázat. Repceolaj, kerozin jet-A és a magasabb rendű alkoholok fűtőértéke, valamint égéshője

Viszkozitás, felületi feszültség, sűrűség

A tüzelőanyagok további fontos tulajdonsága a viszkozitás, ami a belső folyadékrétegek egymáshoz viszonyított elcsúszása során fellépő súrlódást jellemzi. Megkülönböztetünk dinamikai és kinematikai viszkozitást. A dinamikai viszkozitás a folyadék áramlási ellenállásának mértéke, mértékegysége a Pa·s (Pascal-secundum). Mivel ez az érték túl nagy, a gyakorlatban legtöbbször az ezredrészét, a mPa·s-t használják. A desztillált víz dinamikai viszkozitása 20,2 °C-on 1 mPa·s.

A kinematikai viszkozitás a dinamikai viszkozitásnak és az ugyanazon a hőmérsékleten mért folyadéksűrűségnek a hányadosa. Mértékegysége a m²·s⁻¹, a kőolajtermékek viszkozitását általában mm²·s⁻¹-ben adják meg.

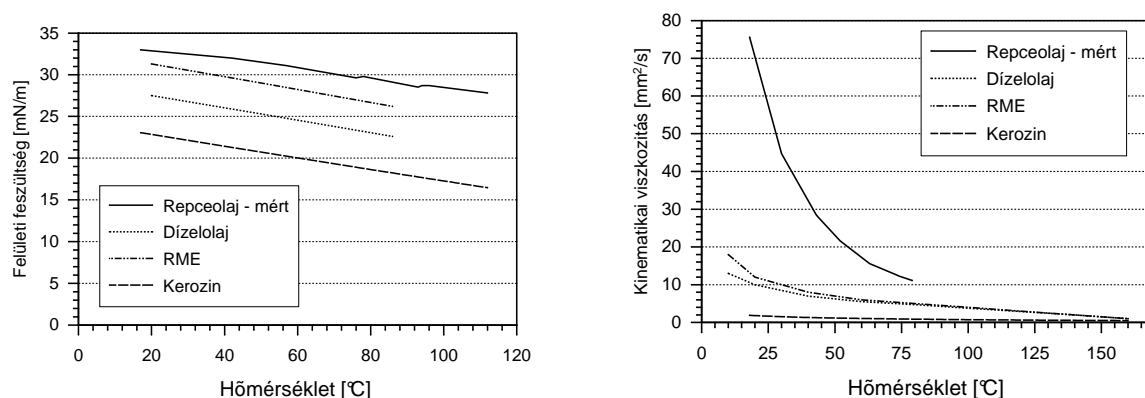
Mivel a kinematikai viszkozitás kapilláris viszkoziméterekkel egyszerűen meghatározható, ezért általában ezzel jellemzik a kőolajtermékeket.

A porlasztás minősége nagymértékben függ a viszkozitástól és a felületi feszültségtől. A felületi feszültség a deformáció ellen hat, ezzel egyfajta stabilizáló hatást fejt ki. A viszkozitás emelkedése pedig az anyag belső csillapítását növeli. Mindkét jellemző hőmérsékletfüggő. A hőmérséklet emelésével a viszkozitás jelentősen, míg a felületi feszültség kisebb mértékben csökken. Dízel-befecskendezővel elvégzett mérések alapján [16] RME-vel kétszer, repceolajjal 3,5-szer akkora cseppeket kapunk, mint dízelolajjal.

Macmillan [17] tapasztalatai szerint a hidegindíthatóság függ a tüzelőanyag viszkozitásától (lásd 2.3. fejezet.) Minél nagyobb a tüzelőanyag viszkozitása, annál nehezebb a hidegindítás a rosszabb porlaszthatóság miatt.

Zöldy munkájában [18] [19] a biodízel, a dízelolaj és az etanol keverékének a viszkozitását vizsgálta meg. Megállapítása szerint a megfelelő arányú hármas keverék viszkozitása megközelíti a dízelolajét. Demirbas [20] megállapítja, hogy a repceolaj viszkozitása 20-szorosa az ASTM szabványban a dízelolajra előírtaknak.

Lang és munkatársai kimutatták, hogy a növényi olaj viszkozitása a telített zsírsavak mennyiségével van összefüggésben [15]. Megvizsgálták néhány növényi olaj viszkozitását, és 4-100 °C tartományban egyenletet állítottak fel a változására. Widmann munkatársaival [21] kimutatta, hogy a hidegen sajtolt repceolaj viszkozitását a kénsavas nyálkátlanítás lényegesen megnöveli.



2.1. ábra. Kerozin, repceolaj, RME, dízelolaj felületi feszültsége és viszkozitása

A 2.1. ábrán látható, hogy mind a felületi feszültség, mind a viszkozitás esetében a kerozin mutatja a legkisebb, a repceolaj pedig a legnagyobb értékeket. Ez repceolaj esetében a szivattyúzásnál többletenergiát, porlasztásnál nagyobb cseppeket, égésnél nehezebb elpárolgást jelent (lásd 2.4.1. fejezet).

Perdítőelemes nyomásporlasztó üzemvitelére a viszkozitás, a külső keverésű segédközeges porlasztóóra pedig a felületi feszültség van nagy hatással. Mivel a kísérleteim során külső keverésű segédközeges porlasztót alkalmaztam, amiben egy perdítőelemes nyomásporlasztó volt a segédporlasztó, így az üzemvitelre mindkét jellemző hatással van.

A repceolaj növényi eredete miatt az olaj sűrűsége forrástól függően változó. Ackman [22] 1977-es munkájában az olaj két zsírsavát, illetve azok arányát (C20:1 és C18 - többszörösen telítetlen zsírsav) nevezte meg, mint az olaj sűrűségét leginkább befolyásoló összetevőt.

Thuncke [16] szerint növekvő széntartalommal és nagyobb számú kettős kötésekkel nő a repceolaj sűrűsége. A repceolaj sűrűsége genetikailag meghatározott. A növényi olajok sűrűsége is függ a hőmérséklettől, csökken, ha a hőmérséklet növekszik. A repceolaj sűrűsége 921 kg/m^3 [2], [23], a keroziné 780 kg/m^3 [7], [24].

Lobbanáspont

Lobbanásponton azt a hőmérsékletet értjük 1013 mbar nyomáson, amelynél a meghatározott módon melegített folyadék gőze idegen gyújtóforrás használatával az anyag egész felületére kiterjedve ellobban. Ekkor az égés sebessége nagyobb a párolgás sebességénél.

A lobbanásponttól függ a tüzelőanyag tűzveszélyességi osztályba sorolása, ami meghatározza annak tárolási és szállítási módját. Azonkívül információt szolgáltat a tüzelőanyag más anyagokkal való szennyezettségéről, mert már kismértékű alacsony lobbanáspontú tüzelőanyag repceolajhoz való elegyítése jelentősen csökkenti a lobbanáspontot [16]. Pl. 1 tömeg% benzín hozzákeverése esetén a lobbanáspont $100 \text{ }^\circ\text{C}$ alá süllyed [6]. Widmann [21] mérései alapján elmondható, hogy dízelolajhoz akár 50%-ban elegyített repceolaj nem változtatta meg lényegesen a lobbanáspontot.

A kerozin jet-A lobbanáspontja $37,8 \text{ }^\circ\text{C}$ (metanol: $11 \text{ }^\circ\text{C}$, dízelolaj: $60 \text{ }^\circ\text{C}$) [24], [25]. A szabványjavaslat [6] a repceolaj lobbanáspontját minimum $220 \text{ }^\circ\text{C}$ -ban határozza meg. Repceolaj esetén az irodalomban széles szórással található ezen értékek ($180\text{-}330 \text{ }^\circ\text{C}$) [2], [10], [16], [26]. Ennek oka, hogy a repceolaj tulajdonsága termőterület-, időjárás-, fajtafüggő, így általában csak egy tól-ig határ adható meg. A lobbanáspont növekvő szabad zsírsavtartalommal csökken.

Cetánszám

A cetánszám a kompressziógyújtású motorok tüzelőanyagának (gázolaj) gyulladási késedelmére szolgáló mérőszám, amely a dízelolajok vegyi összetétele mellett a legfontosabb égésminőségi mutatószám. Minél nagyobb a tüzelőanyag cetánszáma, annál jobb gyulladási hajlammal rendelkezik ($45\text{-}60$ közötti érték az optimális).

Eredetileg Boerlage és Broeze elméletére alapozva, a dízel-tüzelőanyagok gyulladási hajlámának számszerű minősítésére kezdetben a cetén és az α -metilnaphtalin keverési arányát alkalmazták. A cetént a gyakorlatban felcserélték a megbízhatóbb gyulladási tulajdonságú, stabil és könnyebben gyártható cetánnal ($\text{C}_{16}\text{H}_{34}$; normál hexadekán), amelynek cetánszáma 100-ban lett megállapítva. Az α -methilnaphtalin ($\text{C}_{11}\text{H}_{10}$) rossz gyulladási tulajdonságú aromás szénhidrogén, melynek cetánszáma 0. A két anyagból készített tüzelőanyag-keverék cetánszámát a keverékben lévő cetán térfogatszázalékával fejezhetjük ki.

A cetánszám a tüzelőanyag kémiai összetételétől függ. A legjobb gyulladási hajlama az egyenes szénláncú szénhidrogéneknek van, leggyengébbel az aromások rendelkeznek, mivel ellenállóbbak a hőbomlással szemben, és így nehezebben gyulladnak meg. Található utalás arra is, hogy a cetánszám függ a viszkozitástól és a növényi olaj tárolási körülményeitől is [16].

A cetánszámot vagy BASF, vagy CFR vizsgálómotorral határozzák meg. A dízelolajra optimalizált vizsgálómotorban a repceolaj porlasztása annak magas viszkozitása miatt rossz minőségű, ami rossz, tökéletlen égést eredményez. Ez már rövid idő után a befecskendezők elkoksosodásához vezethet, mindamellett az eredmények is megkérdőjelezhetők. Ez megmagyarázza azt, hogy az eddigi mérések szerint a repceolaj cetánszáma a dízelolajénál alacsonyabb (ezeket a méréseket vizsgálómotorokkal végezték), ennek ellenére az átalakított motorokon végzett vizsgálatok tapasztalata kedvező, a dízelolaj és a repceolaj gyulladási késedelme között nincs akkora különbség, mint azt az eltérő cetánszámból sejteni lehet [6] [27].

Birkner [3] rámutat, hogy a repceolaj cetánszámának meghatározása csak a beszívott levegő és a repceolaj előmelegítésével lehetséges. Widmann [21] a befecskendezési nyomást 125 bar-ról 160 bar-ra emelte, és a repceolajat 45-50 °C-ra előmelegítette, de a vizsgálatok után így is talált a befecskendezőn és az égőtérben lerakódásokat. Megállapította továbbá, hogy a repceolaj cetánszáma az olaj öregedésével nő, mert nő az olaj oxigéntartalma.

A repceolaj cetánszáma 36–41 között van (lásd 2.1. táblázat), míg a dízelolaj cetánszáma nagyobb 51-nél; a kerozin cetánszáma a Mol Nyrt. mérései alapján $45 \pm 1,5$, a magasabb rendű alkoholoké pedig 15 alatt van [28].

Hidegszűrhetőségi határhőmérséklet

A hidegszűrhetőségi határhőmérséklet általánosan használt angol neve a Cold Filter Plugging Point (innen ered az elterjedt rövidítése is: CFPP). A CFPP-t gázolajok jellemzésére használják. Minél alacsonyabb egy gázolaj CFPP-je, annál hidegebb körülmények közötti üzemelést tesz lehetővé dízelmotorokban. A magas CFPP a motor hidegindíthatóságát csökkenti.

A CFPP meghatározása: fokozatosan hűtött mintát egy meghatározott szűrőn szivattyúznak át. A gázolajból kiváló paraffinok a szűrőt fokozatosan eltömik. Azt a hőmérsékletet nevezik határhőmérsékletnek, amikor egy megadott értéknél kevesebb gázolaj áramlik csak át a szűrőn.

Magyarország a mérséklet égővbe tartozik, ezért a CFPP-re vonatkozó követelmények a következők: nyáron +5 °C, télen -20 °C. Átállási időszak tavasszal március 1-től április 30-ig, ősszel október 1-től november 14-ig tart (MSZ EN 116).

A nyers repceolaj CFPP-je 16-18 °C körül van (évjárattól függően)[29].

Az elegyített alkohol várhatóan csökkenti a repceolaj hidegszűrhetőségi határhőmérsékletét.

Oxidációs stabilitás

A repceolajat a levegő oxigéntartalma elkezdi oxidálni, ezért annak összetétele a tárolás folyamán módosul. Ezért az oxidációs stabilitás a biodízelek fontos minőségi követelménye. Az oxidációs stabilitás vizsgálatának célja a NOME 110 °C-on történő oxidációs stabilitásának meghatározása. Az oxidációs stabilitás mértékegysége [óra].

Az oxidációs stabilitás nagymértékben a zsírsavösszetételtől függ [30].

2.2. Növényi olaj felhasználásának könnyítése

A repceolaj fosszilis tüzelőanyagtól eltérő tulajdonságából adódó felhasználási problémákat kétféleképpen lehet megoldani. Vagy a berendezéseket (motorokat, gázturbinákat) alakítjuk át, vagy a repceolajat tesszük a meglévő berendezésekben felhasználhatóvá.

A növényi olajok motor-tüzelőanyaggá való átalakításának különféle módszerei ismeretesek:

- Melegítés
- Növényi olaj – alkohol elegyítés
- Észterezés
- Növényi olaj (és észterei) – dízelolaj keverés
- Egyéb megoldások

Méréseim folyamán a melegítést és a növényi olaj – alkohol elegyítését vizsgáltam meg, így azokat mutatom be részletesebben.

Melegítés

A növényi olajok viszkozitása és a felületi feszültsége melegítés hatására csökken (lásd 2.1. fejezet). A repceolaj 90 °C fölé történő melegítése lecsökkenti annak viszkozitását a dízelolaj szintjére, ez megkönnyíti a tüzelőanyag szivattyúzását, porlasztását.

Egyhengeres, léghűtéses közvetlen befecskendezésű dízelmotoron nyers pálmaolajjal végzett kísérletek alapján a teljesítményt és a nyomatékot nem növeli az olaj melegítése, viszont 60 °C-ra elő kell melegíteni a szivattyúzhatóság miatt [31].

Nwafor kifejezetten a repceolaj melegítésének hatását vizsgálta meg, egyhengeres léghűtéses dízelmotorban. Mérése alapján elmondható, hogy részterhelésen és alacsony fordulatszámon nőtt a hengerben a csúcsnyomás. Az előmelegítés csökkenti a gyulladási késedelmet, viszont csökkenti a hatásfokot, igaz, a csökkenés pár %-on belüli [32]. Melegebb repceolajjal magasabb füstgáz hőmérsékletet, alacsonyabb CO emissziót mért. Mérései alapján megállapította, hogy a repceolaj 70 °C-ra történő előmelegítése kis terhelésen és alacsony fordulatszámon előnyös [33].

Agarwal és munkatársai [34] a növényi olaj nagy viszkozitását melegítéssel és dízelolajhoz történő keveréssel csökkentették, és így vizsgálták egy egyhengeres, négyütemű dízelmotor teljesítményét, füstölését, károsanyag-emisszióját. Jelentős különbséget tapasztaltak a CH₄ kibocsátásnál. Kis teljesítményen az előmelegítésnek nincs hatása, míg nagy teljesítmény esetén az előmelegített tüzelőanyaggal kisebb a kibocsátás. Dízelolaj hozzákeverésével hasonló eredményeket értek el.

Labeckasék [35] is vizsgálták a növényi olaj hőmérsékletének hatását a belső égésű motor üzemére. Méréseik alapján az előmelegítés hatása a fogyasztásra nem egyértelmű. Kis terhelésen és fordulatszámon 60 °C-os olajjal mérték a legkisebb fogyasztást (35, 60 és 90 °C-os olajjal mérték), míg nagyobb fordulatszámon ez már nem volt igaz.

Növényi olaj és alkohol keveréke

Belső égésű motorok meghajtására két egyszerű alkoholfajta terjedt el: a metanol és az etanol.

Az alkohol szénből, hidrogénből és oxigénből áll (pl. CH_3OH , $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$), tüzelőanyagként való felhasználása esetén a dízelnél/benzinnél környezetkímélőbb módon ég el. A diffúz metanolláng különlegessége, hogy az égés folyamán korom nem képződik. Ez megmagyarázza, hogy metanollal hajtott motorok esetében koromemisszió nem volt, illetve metanolkeverékek esetében csökkent.

Az alkohol szikragyújtású motorokban probléma nélkül felhasználható, jó kopogástűrése (oktánszáma 98) miatt a kompresszióviszony akár $\epsilon = 15$ -ig felmehet, ami javítja a hatásfokot. Az alkohol fűtőértéke körülbelül fele a benzinének, így azonos teljesítmény eléréséhez kétszer annyi tüzelőanyag szükséges. Viszont az alkohol oxigéntartalma miatt a levegőszükséglete kevesebb, így egy töltet fűtőértéke körülbelül megegyezik a benzinüzem töltetének fűtőértékével. Viszont a nagyobb tüzelőanyag-mennyiségek miatt a motor tüzelőanyag-ellátórendszerét át kell alakítani.

Plassmann mérései alapján a metanol benzinnel és vízzel jól elegyedik, dízelolajjal rosszul, növényi olajjal még rosszabbul. A metanol oldhatósága szénhidrogénekben (telített, telítetlen) növekvő szénszámmal csökken, aromásokban jobb, mint paraffinokban. Az elegy víztartalma elősegíti a fázisok szétválását. Ez a hatás gyorsul a hőmérséklet csökkenésével. Előfordulhat az is, hogy a tüzelőanyagtank légzése során annyi víz kerül az elegybe, amely már fázisszétválást okoz. Benzin esetében tercierbutilalkohol (TBA) hozzáadásával (40-60% arányú keverék TBA-metanol esetén) jó eredményeket lehet elérni. Dízelolaj esetén 1-2%-nyi emulgeálószerrel (benzol, chloroform) nem sikerült kielégítő elegyedést elérni, nagyobb mennyiséggel az elegyíthetőség nagymértékben javítható [36]. Bíztható eredményeket etilacetát hozzákeverésével értek el. Egyéb alkoholok viszont annál jobban elegyednek dízelolajjal/benzinnel, minél nagyobb a szénatomszámuk. Meg kell említeni, hogy a fázisszétválást gyorsan meg lehet szüntetni az elegy újbóli összekeverésével, valamint a hőmérséklet növelésével.

Houghton szerint [37] a dízelolaj és metanol elegyének felhasználása megkönnyíthető, ha a két anyagot közvetlenül a befecskendezés előtt elegyítik, cetánszámnövelőt adagolnak hozzá, szétválasztott befecskendezést vagy szikragyújtást alkalmaznak. Cerri és munkatársai emulgeálóberendezés létesítése mellett érvelnek [38]. Ők repceolajhoz elegyítettek etanolt és vizet 10 és 20%-os arányban. Vizsgálták az emulzió stabilitását, megállapították, hogy az emulzióban a szétválás körülbelül 200 s után eléri a 10%-ot. Az elkészített emulziókat modell gázturbina-égőtérben elégették és megállapították, hogy az emulzióval minden esetben rövidebb volt a lánghossz, a porlasztóból kilépő cseppek mérete csökkent, metanolos emulziónál kisebb lett a

koromkibocsátás, amit az alkohol korom nélküli égésének lehet betudni. A víz csökkentette a keletkező NO_x mennyiségét.

Saját kísérleteim szerint [39] a metanol repceolajjal normál körülmények között nem elegyedik, hanem emulziót képez. Ezt vagy azonnal az elegyítés után fel kell használni, vagy folyamatosan folytatni kell a keverést. A hőmérséklet emelésével a metanol elegyíthetősége javítható, azonban ezzel a módszerrel óvatosan kell bánni, mert a metanol $64\text{ }^\circ\text{C}$ -on forr. Körülbelül 10% metanoltartalmat $60\text{ }^\circ\text{C}$ -on a repceolaj oldja, azonban az elegy hűtése folyamán szétválás figyelhető meg.

Karabektas [28] izobutanolt elegyített dízelolajhoz (5, 10, 15 és 20 V/V%-ban), ennek hatását vizsgálta a teljesítményre és az emisszióra, egyhengeres, közvetlen befecskendezésű dízelmotorban. Az NO_x és a CO emissziók csökkenését, a CH emissziók növekedését tapasztalta. Végkövetkeztetése szerint az izobutanol jól, szétválás nélkül elegyedik a dízelolajjal, felhasználásához a motoron nem szükséges átalakításokat végezni.

Zöldy és társai [40] 5 V/V% butanolt elegyítettek dízelolajhoz. Az így kapott elegyet fékpadon és személygépjárművel (Opel Astra) is kipróbálták. Tapasztalatuk szerint az új tüzelőanyag felhasználható belső égésű motorban, a cetánszám nem csökken jelentősen, viszont a lobbanáspont csökkenéséből adódó szállítási problémát meg kell oldani.

A magasabb rendű alkoholt felhasználó kutatók eddigi munkájuk során nem jutottak el addig, hogy a kísérleteket repceolajjal elegyített alkohollal is elvégezzék.

Alasfour [41] 30% butanolt elegyített benzinnel, így vizsgálta meg az egyhengeres szikragyújtású motor teljesítményét. Mérései alapján a motor teljesítménye az új elegy alacsonyabb fűtőértéke miatt 5%-kal csökken. Nem vizsgálta az új tüzelőanyag tulajdonságait, nem nézte a mérés során az emissziókat.

2.3. Növényi olaj felhasználásának tapasztalatai

Belső égésű motorokban

Belső égésű motorokban sokan és sokféleképpen használtak növényi olajat (nyersen, észtezetten, alkohollal, benzinnel keverve, közvetlen befecskendezésű, előkamrás motorban, állandó/változó terhelésen és fordulatszámokon stb.).

A NOME hatásfok, teljesítmény, fogyasztás tekintetében a mérések a gázolajüzemhez képest csak kisebb, $\pm 10\%$ -as eltérést mutatnak [42].

A motor üzemére és a mérési eredményekre a felhasznált növényi olaj minősége (évjárat stb.) is hatással van. Éppen ezért az irodalomban található eredményeket nehéz, ha nem lehetetlen egységesíteni, mert a vizsgálatok nem azonos körülmények között készültek. Az alábbiakban a teljesség igénye nélkül néhány kutatási eredményt ismertetek.

Rövid idejű méréseknél tiszta repceolajjal 91 és 109%-os teljesítményt értek el (dízelüzemhez hasonlítva) a kísérletek folyamán. A motor termikus hatásfoka kismértékben javult, a tüzelőanyag-fogyasztás a repceolaj kisebb fűtőértéke miatt megnőtt. Hosszabb kísérleteknél már a problémák

is előjöttek. Ezek nagy része a tökéletlen égésre vezethető vissza, mint például a lerakódások az injektorcsúcson, a dugattyúgyűrű-beszorulás, a kenőolaj-felhígulás, a sűrűbb szűrőcsere stb. Ezen problémák okai a repceolaj nagy viszkozitása, valamint polimerizációja. A polimerizáció csökkenthető linolén-savban szegény olajok alkalmazásával. A befecskendezőkön a lerakódások főleg alacsony fordulatszámon és terhelésen jelenhetnek meg. Ha a terhelés és ezáltal a hengerben az égés során a hőmérséklet megnő, a lerakódások mérete, mennyisége csökken [35], [43], [44], [45].

Egyes munkák az előnyöket is megemlítik: lassabb, elhúzódó égés kisebb mechanikus igénybevételt, halkabb üzemet eredményez [27], [46].

A CH és CO emissziók 100 és 290%-ban nőttek a dízelüzemhez viszonyítva, de ennek a mértékét kissé lehet csökkenteni a befecskendezés állításával. Az NO_x emissziók 15%-os csökkenését figyelték meg. A korom- és részecskeemisszió is csökkent, de közvetlen befecskendezésű motor esetében a részecskeemisszió 140%-kal nőtt [47].

Batchelor társaival [48] megállapította, hogy a nyers repceolaj csak indirekt befecskendezésű dízelmotorokban használható fel, mert ha direkt befecskendezésű berendezést kívánunk használni, problémát okoz a növényi olaj nagy viszkozitása, a rossz porlasztás (nagy cseppek) miatt elégtelen az égés.

Altin és munkatársai [49] egyhengeres kompressziógyújtású motorban vizsgálták meg a dízel és 9 növényi olaj, mint tüzelőanyag használata esetén a motor teljesítményét, nyomatékát és károsanyag-kibocsátását. Az eredmények mutatják, hogy az összes vizsgált növényi tüzelőanyag esetén csökkent a teljesítmény és a nyomaték, a fajlagos fogyasztás, valamint a füstölés nőtt. A CO-kibocsátás maximuma függ a fordulatszámtól és az alkalmazott tüzelőanyagtól, viszont minden esetben jelentősen meghaladja a dízelüzemnél létrejövő kibocsátást. Az NO_x emisszió a nyers olaj esetében alacsonyabb, mint a dízelolaj és az észterezett olaj esetében. Ennek oka az alacsonyabb égési hőmérséklet.

Kumar és munkatársai [50] méréseik során egyhengeres motorban, állandó fordulatszámon vizsgálták meg a károsanyag-emissziókat növényi olajjal (ricinus), növényi olaj + metanol elegyével, dízelolajjal, valamint növényolajészterrel. Az alkohol csökkentette a füstölést. Az NO_x -kibocsátás alacsonyabb volt növényi olajjal, mint dízelolajjal (ez az alacsonyabb égési hőmérsékletnek tudható be). Növényi olaj és észterei keverékének égése hosszabb diffúziós szakaszt mutatott fel, mint a standard dízelolaj. Méréseik alapján a gyulladási késedelem a növényi olajjal nagyobb, mint dízelolajjal, a csúcsnyomás, valamint a nyomásnövekedés a növényi olajjal végzett méréseknél volt a legkisebb.

Pramarik [51] jatrophaolaj és dízelolaj keverékét vizsgálta meg egy egyhengeres Kirloskar dízelmotorban. A jatrophaolaj mérgező; palmitin, szterain, linol, linolén, arachin savakból áll, viszkozitása, sűrűsége, fűtőértéke hasonlít a repceolajéhoz. Keverékek esetében alacsonyabb hőmérsékleten is kedvező viszkozitást mértek. A fajlagos fogyasztás a növekvő növényolaj-tartalommal nőtt, csakúgy, mint a kipufogógáz hőmérséklete.

Spessert és Schelicher [52] 3 egyhengeres dízelmotort vizsgált meg repce-, napraforgó-, dízelolaj- és RME-üzemben. A vizsgálat folyamán mérték a teljesítményt, a nyomatékot, az emissziót, a befecskendezőrendszerben felépülő nyomást, a szag- és zajkibocsátást. A biológiai eredetű

tüzelőanyagok nagyobb viszkozitása miatt alacsony terhelésen és fordulatszámokon a befecskendezés kezdete későbbre tolódik, nagy terhelésen viszont korábban jön. Ez a hatás alacsony terhelésen lágy, halkabb égést, nagy terhelésen durvább, hangosabb égést eredményez. A lágy égés folyamán kisebb az NO_x -, viszont nagyobb a CO- és a részecskekibocsátás. Nagy terhelésen a CO és a részecskekibocsátás csökken, a NO_x viszont nő. Elégtelen szénhidrogén kibocsátása dízel esetében alacsonyabb volt, mint a növényi olajjal történt mérésnél. A szagkibocsátás növényolaj-üzem esetében nagyon nagy volt.

Hemmerlein munkatársaival [27] 6 különböző dízelmotort vizsgált meg repceolajjal és dízelolajjal, az eredményeket az utóbbival mért eredményekhez hasonlította. Vizsgálatai során megállapította, hogy a nyomaték, a teljesítmény és az NO_x -kibocsátás 5 esetben javult, a CH pedig ugyanennyi esetben romlott, a CO-emisszió minden esetben romlott. A tüzelőanyag-felhasználás az összes motornál hasonló volt a dízelüzemhez.

Gázturbinában

Wardle megvizsgálta [53], hogy a légi közlekedésben, hol és milyen körülmények között lehetne biodízel alkalmazni. Vizsgálata szerint 5-10%-nyi NOME-t lehetne a kerozinhez keverni, erre fizetőképes kereslet is lenne.

Több vizsgálat található arra is, hogy kerozin és NOME keverékkel repülőgép-gázturbinát üzemeltettek [54] [55] [56]. A Purdue Egyetemen szója-metilésztert keverték a kerozinhez 2 és 20 V/V% arányban. A turbinán nem végeztek változtatásokat, tehát a turbina kerozinüzemre volt beállítva; keverékkel üzemelve vizsgálták az emissziókat, a teljesítményt, a fogyasztást. A hőmérsékletek és térfogatáramok nem tértek el a megszokottaktól.

A Baylor Egyetemen különböző (növényi és állati eredetű) NOME-t vizsgáltak meg gázturbinában, üzem közben. A NOME térfogataránya max 30% volt. A kutatók még fel is szálltak egy 20% NOME, 80% kerozin meghajtású Beachcraft King Air A90 géppel. A turbinák nem lettek módosítva, az üzem közben probléma nem lépett fel.

Ardy és munkatársai [57] pirolízisből származó olajat tüzelt el egy 40 kW_e teljesítményű gázturbina égőterében. A használt olaj viszkozitása 35 °C-on 77,4 mm²/s, ami a repceolajével egy nagyságrendben van. Sajnos az olaj felületi feszültségéről nem közölnek a szerzők adatokat, pedig annak ismerete elengedhetetlen lenne az eredmények összehasonlíthatóságának szempontjából. 200 °C-ra előmelegített levegővel és 90 °C-ra felmelegített olajjal, belső keverésű segédközeges nyomásporlasztóval támasztóláng nélkül stabil lángot értek el. Az eredetileg beépített perdítőelemes nyomásporlasztót ki kellett cserélni, mert azzal elégtelen minőségű porlasztmányt kaptak, és a tüzelőanyag alacsonyabb égési sebessége miatt a tüzelőanyag-cseppek felkenődtek a tüzelőtér falára. Az égés (a porlasztás) minőségére nagy hatással van az olaj hőmérséklete, a porlasztó kialakítása, a porlasztmány kúpszöge. Vizsgálataik szerint a kis cseppek a porlasztás tengelyéhez közel helyezkednek el, nagy az axiális sebességük. Tökéletesebb égést értek el, amikor a porlasztási nyomást 4-5 barra emelték 1,8-2,2 barról, illetve a porlasztó szájának átmérőjét csökkentették. Sajnos a szerzők nem közölnek adatot a cseppek méretéről.

Juste munkatársával [58] fa (eukaliptusz) pirolízisével előállított olajat, illetve annak etanolos

elegye gázturbinai felhasználhatóságát vizsgálta meg. A vizsgált tüzelőanyag felületi feszültsége és viszkozitása a repceolajéhoz hasonló, a sűrűsége nagyobb. Méréseit perdítőelemes nyomásporlasztóval végezte. A nyers olajat 115 °C-ra melegítette elő. A porlasztó elé 60 µm-es szűrőt épített be, ami 2-3 óránként eltömődött. A hideg olaj nagy viszkozitása miatt ott nem alkalmazott finom szűrőt. A porlasztóból kilépő porlasztmány kúpszöge bioolaj esetén csak 20 ° volt a várt 60 ° helyett. Hogy elérje a várt értéket, módosítani kellett volna a befecskendezőrendszeren. 20% etanol bekeverése esetén csak 60 °C-ra melegítette fel a tüzelőanyagot. Ekkor a porlasztmány szöge alig maradt el a 60 °-tól. A keverék tüzeléséhez hagyományos tüzelőanyaggal indította be az égést, majd átkapcsolt bio-tüzelőanyagra. Vizsgálatai szerint bio-tüzelőanyaggal beszűkül az üzemeltethetőségi tartomány. A terhelés változtatásával hamar elérte azt a határt, ahol a kibocsátott CO nagyon megnőtt. Bio-tüzelőanyag felhasználása esetén a tüzelőtérben gyakrabban alakult ki akusztikusan öngerjesztő láng, mint hagyományos tüzelőanyagnál.

Gökalp és munkatársai [59] megvizsgálták, hogy mely bio-tüzelőanyagokkal lehet ipari gázturbinát üzemeltetni. Vizsgálataik folyamán figyelmet fordítottak az alternatív tüzelőanyag rendelkezésre állására, energiamérlegére és a berendezés teljesítményére. Többek közt megvizsgálták az etanol, metanol, különböző helyről származó biogázok, a növényi olajok és észterei felhasználásának a lehetőségét. Megállapításaik szerint a növényi olajok nagy széntartalma az égőtérben lerakódásokat okozhat. Nem vizsgálták a cseppek terjedését, a füstgázok lapátok élet-tartamára gyakorolt hatását.

A Rostocki Műszaki Egyetemen Wendig és munkatársai [60] Deutz T216-os mikrogázturbinában vizsgáltak meg különböző tüzelőanyagokat, köztük repceolajat, repcemetilésztert, pirolízis-olajat, dízelolajat. Az olaj magas viszkozitása miatt a tüzelőanyag-tartályt 70 °C-ra melegítették elő, a porlasztó előtt nagy finomságú szűrőt (< 50 µm) alkalmaztak. Javaslatuk szerint tartós használat esetén azonban a szűrő lyukméretét még finomabbra kell választani. A füstgázösszetétel elemzésekor, részterhelésen, repceolajüzem esetén találtak etént és formaldehidet. Meg kell még említeni, hogy részterhelésen a TA-Luft emissziós határértékeket repceolajjal nem tudták betartani. A megvizsgált gázturbinákat helyi energiaellátásra, teljes terhelésen kívánták alkalmazni, így mérések alapján megállapítható volt, hogy a bio-tüzelőanyagok gázturbinában felhasználhatók. Méréseik során a pirolízisolaj extrém méretű lerakódásokat okozott az égőtérben.

Dielmann [61] munkatársaival egytengelyű Capstone mikrogázturbinát üzemeltetett növényi olajjal. Kísérleteik folyamán két káreset történt. Sajnos a szerzők ezekről nem adnak részletesebb információt. A hibák elemzésével megállapították, hogy a dízelüzemre kifejlesztett turbina tiszta repceolajjal – átalakítás nélkül – nem üzemeltethető. Az átalakításoknak ki kell terjedniük a befecskendező- és gyújtórendszerre, valamint az égéstérre.

Méréseik alapján a turbina emissziója jobb a dízelmotorénál. Dízelüzemhez viszonyítva itt is megfigyelhető a növekvő NO_x-kibocsátás. Ez a nagyobb közepes cseppátmérőnek tudható be (sajnos konkrét adatokat nem közölnek a szerzők). A nagyobb átmérőjű cseppek külön lángfrontot képeznek, ami lokálisan olyan sztöchiometrikus viszonyokat teremt, amely magas hőmérsékletet és nagyobb NO_x-kibocsátást eredményez.

Ebbinghaus és Wiesen [62] munkájukban a repülőgép-gázturbinák megújuló tüzelőanyaggal

történő üzemeltetésének a lehetőségét illetve a keletkező károsanyag-emissziókat elemezte, különös tekintettel a NOME-re és bioalkoholra. A kerozinhoz képest alacsonyabb fűtőérték miatt több tüzelőanyag kell. A részecskekibocsátás csökkenése, a CO és a CH emisszió növekedése várható. Elemzéseiket általuk is hiányosnak ítélt irodalmi adatokra támasztották, méréseket nem végeztek a témában.

Mash [63] megújuló légi-tüzelőanyagokat elemző munkájában arra a következtetésre jut, hogy repceolaj, illetve NOME elegyíthető kerozinnal, hátrányt jelent viszont a megújuló tüzelőanyagok túl magas dermedéspontja és túl alacsony fűtőértéke. Snecma cég sikeresen tesztelt egy CFM56 gázturbinát 30% RME-t tartalmazó tüzelőanyaggal. A vizsgálat folyamán csak az üzemet, megbízhatóságot vizsgálták, a porlasztás minőségét nem, valamint az alkalmazott tüzelőanyag sem tiszta repceolaj volt.

2.4. Gyakorlati problémák

A repceolaj gázturbinában és belső égésű motorban történő felhasználása során az egyik nagy problémát a növényi olaj fosszilis tüzelőanyagtól való eltérő égési tulajdonsága okozza. A folyékony tüzelőanyagokat a jó égéshez gáz fázisba kell vinni. Ez párolgással történik. A párolgás függ a felülettől, így gyakorlatban kis átmérőjű tüzelőanyag-cseppeket hozunk létre porlasztóval. Az égés során – különösen tüzelőanyagban szegény körülmények között – instabil égés léphet fel.

A következőkben bemutatom a párolgás, a porlasztás és az akusztikusan öngerjesztő égés során lejátszódó folyamatokat, az azokat tárgyaló irodalmat.

2.4.1. Cseppek párolgása

A tüzelőanyag égése szempontjából nagy szerepe van a cseppek párolgásának. A gyakorlatban a párolgást bonyolultabb, összetettebb anyagokra ma még csak kísérleti módszerekkel lehet kielégítően vizsgálni, azonban egy és kétkomponensű anyagok vizsgálatára már pontos numerikus módszerek állnak rendelkezésre.

A tudományos munkák legelső megállapítása az volt, hogy az egykomponensű anyagoknál a cseppek átmérőjének a négyzete a párolgási idővel arányosan csökken. Ez a D^2 -törvény (2.1 egyenlet, 2.2. a. ábra) [64].

$$D^2(t) = D_0^2 - Kt \quad (2.1)$$

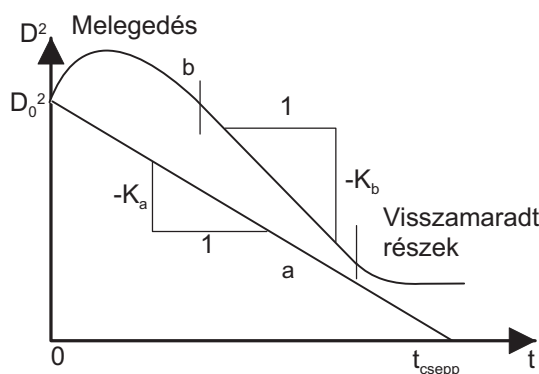
Kísérleti munkáknál az átmérő és az idő mérésével lehet a párolgási állandót meghatározni (2.2 egyenlet).

$$K = \frac{dD^2}{dt} \quad (2.2)$$

Előfordul, hogy a mérések folyamán egykomponensű anyagoknál is 3 szakaszt különböztethetünk meg. Ezek:

- melegedés – térfogatnövekedéssel jár,
- párolgás – csökken a térfogat, a cseppátmérő,
- lerakódások – nincs átmérőváltozás, kokszosodik a minta.

Ilyenkor a párolgási állandót a valós párolgási részre számolják ki (2.2. ábra).



2.2. ábra. Cseppátmérő négyzetének változása az idő függvényében. a.) ideális eset, b.) van melegedés, és maradvány is

A párolgási állandó független az időtől, függ viszont a csepp felületi hőmérsékletétől, a hőátadási viszonyoktól (áramlás sebessége stb.) (példák a 2.9. táblázatban [64], [65]).

Környezeti hőmérséklet:	300 K	450 K	800 K
Áramlási sebesség:	0 [m/s]	1,25 [m/s]	2 [m/s]
Heptán	0,018	0,048	0,39
Dekán	0,0012	0,0033	0,28
Dodekán $t_{cs}=480$ K	X	X	X
$t_{cs}=470$ K	X	X	X
			0,256

2.9. táblázat. Heptán, dekán és dodekán párolgási konstansa

Munkám során minden esetben atmoszférikus nyomáson végeztem a méréseket, így az irodalomkutatásban is ezt a területet mutatom be.

Többkomponensű folyadékoknál, emulzióknál, melegítés hatására a nehezen párolgó rész koncentrációja a csepp felszíne közelében megnövekszik, a belső részekről nem tud a felszínre kerülni az illékony alkotó. Ennek a következménye a csepp gyors felhasadása, felrobbanása (mikrorobbanás). Többkomponensű folyadékoknál a cseppek belüli hő- és anyagáramot nagymértékben befolyásolja az alkotók viszkozitása. Kis viszkozitású folyadékok esetén a cseppek belül létrejövő áramlással megy végbe a hő- és az anyagtranszport is, míg viszkózus anyagoknál (pl. repceolaj) mindez csak diffúzióval történik [66].

Alacsony hőmérsékleten történő párolgásnál az idő is lényeges faktor, mert diffúzióval jutnak el a csepp felszínére az alkotók. Az illékony részek hamar elpárolognak a felszínről, ami ezen alkotók koncentrációkülönbségét hozza létre a felszín és a folyadék belseje között. Ekkor az illók igyekeznek a felszín felé, míg a nehezebben párologók azokkal ellentétes irányba, a folyadék belseje felé mozognak. Ez a párolgási mód a hőerőgépek területén ritka, viszont nagy szerepet játszik a termogravimetriás méréseknél (B.9. fejezet).

Gökalp munkatársaival [65] meleg levegőáramba helyezték el n-heptánt és n-dekánt, valamint keveréküket. A tiszta anyagok vizsgálatakor az átmérő lineárisan függött az időtől, keverékek esetében a görbében törés tapasztalható. Vizsgálták a csepp körüli áramlás hatását is a párolgás sebességére. Alacsony párolgási sebességű zónában a turbulencia nagymértékben növeli annak sebességét, tehát a turbulenciának a kevésbé illékony anyagokra nagyobb a hatása. Megállapításuk szerint a turbulenciának kisebb a hatása a többkomponensű, mint a tiszta anyagokra.

Későbbi munkájukban [67] RME párolgását vizsgálták meg, atmoszférikus nyomáson, 473 és 1020 K közötti hőmérsékleteken. Tapasztalataik szerint az RME-nek az egykomponensű anyagokhoz hasonlóan csökken az átmérője, mikrorobbanást nem figyeltek meg. Az eredményeket összehasonlították egykomponensű anyagok (pl. n-heptán, n-dodekán) párolgási tulajdonságaival is. A növényolajészter lassabban párologott, ennek oka a magasabb forráspontja, a nagyobb párolgáshője. Az RME-nek igen jelentős melegedési fázisát sikerült kimutatni. Az 1,45 mm átmérőjű csepp párolgása 773 K hőmérsékleten 3,16 s-ig tartott.

A cseppek párolgási sebességének számításához a folyadék fizikai paraméterein túl az áramlás pontos ismerete is szükséges. Birouk és Gökalp munkájában [68] turbulens áramlásban, kvarcszálra felfüggesztett cseppek párolgását vizsgálta meg. Munkájuk során azt tapasztalták, hogy az egykomponensű anyagok párolgási sebessége nő a kinetikus energia növekedésével, a kis illékonyágú anyagok nagyobb relatív növekedést mutattak. A kétkomponensű keverékek ezzel megegyező viselkedést mutattak. A kinetikus energia növelése csak egy bizonyos határig növeli a párolgás sebességét. Ennek oka az lehet, hogy egy bizonyos turbulens áramlás elérésekor az a gőzöket abban a pillanatban elviszi a csepp felszínétől, amikor azok keletkeznek, így a mozgási energia további növelésével ez a hatás nem fokozható.

Klausman vizet és etanolt vizsgált meg 650 K-re felfűtött kísérleti berendezésében [69]. A folyadékot külső keverésű segédközeges porlasztóval juttatta a égőtérbe, majd különböző távolságokra PMS-sel (B.2. fejezet) megmérte a keletkezett porlasztmány aritmetikai és Sauter középátmérőjét. Tapasztalatai szerint etanollal kisebb cseppeket sikerült előállítani, amiknél a kisebb fajhő és alacsonyabb forrási hőmérséklet miatt hamarabb befejeződik a felmelegedési fázis, ezután a méretük a kisebb párolgáshő miatt gyorsabban csökken. Megfigyelései szerint a középátmérő a porlasztótól távolodva először nő, aztán csökken. Ennek oka nem a cseppek felmelegedésekor fellépő hőtágulásban keresendő, hanem abban, hogy a kis cseppek gyorsan elpárolognak, így a középátmérőben nagyobb súlyt kapnak a nagy cseppek. Megvizsgálta az egyes mérettartományokba eső cseppek viselkedését is. Azt találta, hogy a kis cseppek átmérője nő a legtovább, ott tart a leghosszabb ideig a melegedés. Ennek oka, hogy a nagyobb osztályba tartozó cseppek is folyamatosan párolognak, veszítenek méretükből, és egy idő múlva eléri a legkisebb osztályhoz tartozó felső méretet. Ezért van az is, hogy a legnagyobb cseppméretnél ér véget legelőször a melegedési szakasz. Módszere csepphalmaz párolgásának vizsgálatára

alkalmas, az egyes cseppek alakulását nem veszi figyelembe.

Lavieille munkatársaival [70] párolgás közben lézeres fluoreszcenciával mérte a metanolcseppek hőmérsékletét. A magasabb hőmérsékletű cseppek körül nagyobb a telítési nyomás, így nagyobb az aktuális és a telítési nyomás közötti különbség is, ami fokozza a párolgást. Vizsgálatait felmelegített folyadékkal végezte úgy, hogy azt alacsonyabb hőmérsékletű levegőbe porlasztotta. A csepp lehűlése során a párolgás két lépcsőben játszódott le: kezdetben gyorsabban, a fent említett indokok miatt, majd lassabban. A párolgás lassulásához hozzájárult az is, hogy a csepp környezetében levő levegő telítődött.

Prommersberger [71] reagáló közegben vizsgálta a kerozincseppek párolgását. PDA-val csak elfogadhatatlanul nagy hibával tudta a párolgást mérni. A porlasztmány lassabban párolog, mint egy önmagában mért csepp, mert az első cseppekből elpárolgó részek növelik a környezetben a folyadék parciális nyomását, ezzel csökkentik a párolgás sebességét. Természetesen a friss levegő, a turbulens áramlás gyengíti ezt a hatást. Álló csepp esetében Ochs sikerrel alkalmazta a PDA-t [72]; fűtőolajcseppeket vizsgált turbulens áramlásban, atmoszférikus nyomáson.

A melegedés folyamán a folyadék tulajdonságai (sűrűség, törésmutató) nagymértékben változhatnak [73]. A törésmutató változása a PDA-mérés eredményét befolyásolja. A hiba nagysága az átmérő meghatározásában a legkedvezőtlenebb esetben Schneider [74] szerint 20% körül van.

Az irodalomban található elpárolgászámításokhoz különböző modelleket használnak. Egy dologban azonban az összes irodalmi forrás megegyezik. A régebbi források csak egykomponensű anyagok párolgását vizsgálták, a frissebbek pedig már a kétkomponensűeket is képesek jó közelítéssel számolni. Az első használható modellek szerint az anyag párolgás nélkül felmelegszik a forráspontjáig, majd azon a hőmérsékleten elpárolog [75]. Az összetettebb modellek már figyelembe veszik azt is, hogy a felemelegedés közben is történik párolgás. Ezek a modellek a cseppen belüli hőtranszporttal is számolnak [76] – bár meg kell jegyezni, hogy van olyan modell, amelyik a csepp hővezetési tényezőjét végtelennek, és olyan is, amelyik nullának veszi fel.

A gázturbinában felhasznált tüzelőanyagok általában keverékek, egyes alkotóinak különböző hőmérsékleten van a forráspontjuk. Landis [77] munkájában szerepel először egy kétkomponensű csepp diffúzióirányított elpárolgása, ahol különleges figyelmet szenteltek a cseppen belül fellépő hőmérséklet- és koncentrációeloszlásnak.

A cseppek élettartama sok tényező függvénye. Ilyenek pl.: kiinduló méret, környezeti nyomás és hőmérséklet, gáz/folyadék közötti relatív sebesség, konvekció, sugárzás, hővezetés, anyagdiffúzió. Aggarwal [78] munkájában gázturбина-specifikus körülményeket feltételezve vizsgálta egy- és kétkomponensű folyadékok párolgását. Megállapította, hogy a tipikus cseppméretet feltételezve 10 bar nyomás alatt a cseppek párolgásának a sebessége a cseppen belüli hővezetéstől és az anyagdiffúziótól függ.

A számítások egy- és kétkomponensű közegre ma már igen pontos eredményt adnak, vannak munkák, amelyek a kerozin párolgását igyekeznek modellezni. Gyakran alkalmazott megoldás az, hogy a kerozin lepárlási görbét több részre osztják, és ezeket a részeket az adott tartományban elpárolgó alkán-keverékkel helyettesítik. Ennek az az előnye, hogy a tiszta anyagok

tulajdonságai a hőmérséklet és a nyomás függvényében mind gőz, mind folyadék fázisban ismertek, míg a valós keroziné csak 1-2 kiválasztott nyomás–hőmérséklet párira ismert, és azok is bizonytalansággal terheltek, hiszen a kerozin tulajdonságai függenek a nyersolajétól is. Pillanatnyilag a legígéretesebb számítási módszer (kerozinra) a lepárlási görbe modell [71] [79]. Ezen számítási módszer alkalmazása repceolajra egyelőre nem lehetséges, mert a repceolaj polimerizációja, észterkötéseinek felbomlása stb. során az anyag tulajdonságai változnak. Másrésről viszont nem található meg az irodalomban az összes, számításokhoz szükséges paraméter (kritikus nyomás, kritikus hőmérséklet stb.).

2.4.2. Porlasztás

A tüzelőanyag jó keveredése, párolgása érdekében apró cseppeket kell létrehozni, mert a párolgás sebessége függ a cseppátmérőtől, amely pedig függ a tüzelőanyag fizikai tulajdonságain túl a porlasztó kialakításától.

A porlasztó kialakítása az égés stabilitását, az égés során keletkező károsanyag-mennyiséget is befolyásolja.

Gyakorlati szempontból fontos, hogy mérni tudjuk a cseppek méretét és eloszlását. A cseppméret eloszlása a porlasztótól távolodva változik, mert az átmérőtől függően különböző mértékben gyorsulnak, esetleg ütköznek egymással, illetve továbbaprózódnak.

A porlasztó által létrehozott cseppek méretét levegőoldalról a viszkozitás és a sűrűség befolyásolja. A levegő viszkozitása $p=30$ bar-ig közel független a nyomástól, csak a hőmérséklettől függ, a sűrűség azonban mindkét paramétertől nagymértékben függ [80]. Aigner [81] elméleti és Lefebvre [76] kísérleti munkája alapján a gázturbina-égőterekben tipikus körülményeknél levegőoldalról a levegő sűrűsége határozza meg a keletkezett cseppek méretét.

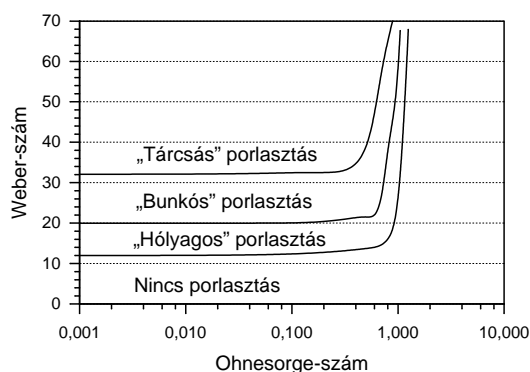
Folyadékoldalról a felületi feszültség, a viszkozitás és a sűrűség van hatással a keletkező cseppek méretére. A felületi feszültség és a viszkozitás hatását a 2.1. fejezetben bemutattam. A sűrűség hatásáról a következő mondható el: nagyobb sűrűség és azonos térfogatáram esetén a folyadéknak nagyobb a mozgási energiája, ami kisebb cseppek képződéséhez vezethet. A gyakorlatban viszont a porlasztást a folyadék és a gázfázis sűrűségkülönbsége befolyásolja, azonban az egyes folyadékok (tüzelőanyagok) sűrűsége nagyságrendileg megegyezik, így ennek a paraméternek a vizsgálatától el lehet tekinteni [82].

Elsődleges porlasztás

A cseppek stabilitásának a leírásához a nemzetközi irodalom a dimenziótlan Weber-számot és az Ohnesorge-számot használja. A Weber-szám a csepre ható aerodinamikai erő és a csepp felületi összetartó erejének hányadosaként számolható ki, az Ohnesorge-szám pedig a cseppen belüli, viszkozitásból adódó csillapítás és a stabilizáló felületi feszültség viszonyát fejezi ki.

$$We = \frac{F_{aero}}{F_f} = \frac{d \cdot \rho \cdot v_{rel}^2}{\sigma_f} \quad ; \quad Oh = \frac{\eta_f}{\sqrt{\rho_f \cdot d \cdot \sigma_f}} \quad (2.3)$$

Ha a porlasztás során a cseppekre igaz, hogy $We < We_{krit}$, akkor a cseppek aprózódása befejeződött, az egyes cseppeknek csak oszcilláló mozgásuk van [83].



2.3. ábra. Porlasztási folyamat osztályozása

Samenfink [84] kísérleti eredményei a Weber-szám és az Ohnesorge-szám függvényében a 2.3. ábrán látható. A szerző megállapította, hogy kis Weber-számok esetén a keletkezett cseppek stabilak, másodlagos porlasztás (eltekintve a cseppek sajátlengésük miatti aprózódásától) nincs. A Weber-szám növelésével először „hólyagos” porlasztás lép föl. Ekkor a csepp először tárcsa alakú lesz, aminek a közepe az aerodinamikai erők hatására kidudorodik. Az így keletkezett vékony buborék apró cseppekre szétesik. A Weber-szám további növelésével a „bunkós” porlasztás következik, ami az előzőhöz nagyon hasonló, csak a buborék szétesése után visszamaradó folyadék-részek „bunkó” formában egyesülnek. A Weber-szám további növelésekor a cseppek felületéről vékony folyadékfilmet nyírnak le az aerodinamikai erők.

Ohnesorge [85] az Ohnesorge- és a Reynolds-szám függvényében határozza meg a porlasztási módokat. 3 féle porlasztási módot különböztet meg, ezek növekvő Reynolds-számmal a következők: csepp-, filmaprózódás és porlasztás.

Aigner [81] a munkájában 3 féle porlasztási módot különböztet meg. Ezek a csepp-, a sugár- és a filmaprózódás.

Filmaprózódás folyamán kis zavarások miatt a film hullámozása figyelhető meg, amely addig folytatódik, amíg a film el nem szakad, és félhullámok nem keletkeznek. Ezek pedig folyadék-rudakká húzódnak össze, majd a belső turbulencia miatt cseppekké esnek szét. Hasonló jelenség figyelhető meg a perdítőelemes nyomásporlasztó esetében is [86].

Másodlagos porlasztás

A porlasztót elhagyó cseppek kialakulásával a porlasztási folyamat még nem ér véget. A porlasztó szája után található cseppek a környezettel továbbra is kölcsönhatásban vannak. A cseppekre ható aerodinamikai erők deformálják azt. Mindaddig, amíg a felületi feszültségből eredő erő a külső erőknek ellen tud tartani, a cseppben a nyomás stabil, további cseppaprózódás nem lép fel.

Amint a külső aerodinamikai erők nagysága meghaladja a felületi feszültségből származó erő nagyságát, a csepp felszakad, kisebb cseppek keletkeznek. Ez az aprózódás addig tart, amíg a külső és a belső erők újból egyensúlyba nem kerülnek. A másodlagos porlasztás matematikai ismertetése megtalálható pl. [87]-ben.

2.4.3. Akusztikusan öngerjesztett instabil lángok vizsgálata

Manapság szabványok írják elő az egyes berendezések maximális károsanyag-kibocsátását. Ennek teljesítésére a tudomány új berendezéseket, új módszereket alakít ki. Az egyik megoldás pl. az NO_x csökkentésére az alacsony hőmérsékletű égés, amit nagy légfelesleggel lehet elérni. Sajnos az égési határ közelében a lángok instabillá válnak, és ez az instabilitás a tüzelőtér akusztikájával az égés instabilitásához vezethet, ekkor erős zaj is keletkezhet. Ez a zaj a berendezésben 50-500 Hz frekvenciájú longitudinális hullámok formájában jelenik meg.

Az akusztikusan öngerjesztő instabil égés folyamán fellépő nyomáslengések fizikailag károsíthatják a berendezést (nyomáslengések, rezgések), a tüzelőtér falát (magnövekedett hőátadási tényező, magasabb tüzelőtér-fal-hőmérséklet), és a nem egyenletes levegő-tüzelőanyag keveredés miatt magnövekszik a károsanyag-emisszió is.

A termoakusztikusan öngerjesztő lángoknál meg kell említeni, hogy nem csak káros hatása van a pulzációnak. A lüktető gázáramban tapasztalt hőátadási tényező növekedése jelentős mértékben csökkentheti a szükséges hőátadó felületek nagyságát, ami kisebb berendezések kialakítását teszi lehetővé. Emellett léteznek olyan berendezések, amelyek hasznosítják ezt a lengést. Ilyen pl. a nehézolajak eltüzelésére kifejlesztett lüktető tüzelőberendezés, vagy bizonyos motor-előmelegítők [88], [89].

Általánosan nézve akkor lép fel a tüzelőtérben öngerjesztő lengés, amikor az energiefelszabadulás folyamatában egyenetlenség van, ami a rendszer nyomásváltozását vonja maga után. Ez a folyamat csak akkor tudja magát nagy rezonancia-amplitudóra felkorbácsolni, ha létezik egy visszacsatolás, amely az égésben a további célzott ingadozást előidézi. A folyamat matematikai megjelenítésére a Rayleigh-kritérium alkalmas [90]. Ez alapján ha egy dugattyú által bezárt levegőhöz periodikusan hőt vezetünk és elvonunk, akkor a hőátadás fázisától függ, hogy keletkezik-e lengés. Ha a hőenergiát a legnagyobb kompresszió (legnagyobb nyomás) pillanatában vezetjük be, vagy a legnagyobb expanzió (legkisebb nyomás) pillanatában vonjuk el, akkor a lengést gerjesztjük. Ha a hőbevezetést és -elvonást 180° -kal eltoljuk, akkor a lengést csillapítjuk. A két szélső érték közötti hőbevezetés és -elvonás esetén a csillapítás és a gerjesztés egyaránt jelen van, ha a gerjesztés dominál, akkor nő a lengés amplitúdója és fordítva. Matematikai formában a kritérium alakja:

$$\int_0^T q p dt > 0 \quad (2.4)$$

Mivel a hőfelszabadulás és a nyomás fázisazonosság nem kitétel, így a lengés fenntartásához egy bizonyos fáziseltolás megengedett. Ha q és p azonos frekvenciájú harmonikus rezgések és a

fáziskülönbségük $\Delta\varphi$, akkor a Rayleigh-kritérium szerint akkor beszélhetünk gerjesztésről, ha $-\frac{\pi}{2} \leq \Delta\varphi \leq \frac{\pi}{2}$

Akusztikus visszacsatolású lengéseknél a visszacsatoló tag egy, az áramlási iránnyal szemben mozgó nyomáshullám, ami az ellátó vagy a lángstabilizáló egységekben lengéseket idéz elő. Mivel a műszaki gyakorlatban a termikus energiát tüzelőtérben állítják elő, ami – mint a lángot körülvevő tér – egy diszkrét sajátfrekvenciával ellátott akusztikus rezonátort képez, így ez a visszacsatolási lehetőség mindig jelen van.

Baade munkája során [91] megfigyelte a nyomáshullám és a láng kölcsönhatását a tüzelőtérben. Megfigyelései szerint az akusztikusan öngerjesztő égés a következőképpen játszódik le: a láng, miután eléri a legnagyobb térfogatát, leszakad az égőről, és összeesik. Ezután a láng újból növekedni kezd, az égő szájától kiindulva. A láng nagysága viszont a reagensek térfogatáramától függ. A térfogatváltozás nyomásváltozással jár. Ez a nyomásváltozás az égő száján keresztül visszahat a reagensek áramára. Ha nő a nyomás az égőtérben, kevesebb reagens érkezik, ezáltal csökken a nyomás. Ennek hatására viszont ismét nő a reagensek térfogatárama. Ha ennek a változásnak (gerjesztésnek) a frekvenciája megegyezik vagy megközelíti a lengőrendszer sajátfrekvenciáját, létrejön az öngerjesztő akusztikus lengés.

Herman perdítőelemes nyomásporlasztóval juttatta be a tüzelőanyagot a modell-tüzelőtérbe [92]. Mérései során a levegőáramhoz nyomkövető részecskéket adott, így LDA-val mérte a levegő és a folyadék áramlását. Megállapította, hogy az oszcillálás esetén a tüzelőanyag egyenetlenül jut a tüzelőtérbe, így a hőfelszabadulás is egyenetlenné válik, valamint a lángfront helye is periodikusan változik. Javaslatá szerint az egyik lehetséges megoldás az oszcilláció elkerülésére más reakciókinetikával rendelkező tüzelőanyag alkalmazása.

Hehle külső keverésű segédközeges nyomásporlasztó sík filmterítője által létrehozott cseppek sebességét, átmérőjét vizsgálta meg, oszcilláló égés esetén [93]. A filmterítő két oldalán azonos értelmű és nagyságú áramlás volt. Megállapította, hogy a porlasztótól örvénylő felhők formájában távolodnak a cseppek. Ezekben elhelyezkedő kisebb átmérőjű cseppek gyakran az áramlás tengelye felé csoportosulnak, ami inhomogén cseppeloszláshoz vezet. Ez viszont az esetlegesen kialakuló oszcilláció fenntartását, erősödését segíti.

Müller munkájában [94] külső keverésű segédközeges porlasztó filmterítőjén kialakuló porlasztást vizsgálta meg, a létrejövő lengést a primer és szekunder levegő sinusszerű gerjesztésével szimulálta. A viszkozitás felezésével az átlagos Sauter középátmérő csak mintegy 6%-kal változott, azonban a felületi feszültség háromszorozásával 51%-kal nőtt. A pulzáció amplitúdójának felezésekor, majd negyedeléskor nem változott a cseppátmérő. Müller munkája alapján várhatóan nagyobb cseppeket kapunk repceolajnál, mert annak mind a viszkozitása, mind a felületi feszültsége is nagyobb, a frekvencia pedig közel azonos.

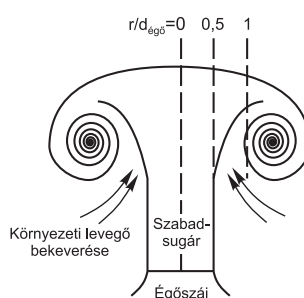
Meier munkatársaival stabil és pulzáló lángot vizsgált meg, gázturbinában használatos injektorral [95]. Vizsgálta a hőfelszabadulást, a reakciózóna alakulását, a sebességeket. Mérései szerint pulzáló lángnál az összes mért tulajdonság az oszcillálás frekvenciájával periodikusan változik. A hőfelszabadulás 16% és 100% közt változik, méghozzá a tüzelőtér nyomáslengésével megegyező fázisban. Az oszcillációt a tüzelőanyag-ellátórendszerben fellépő lengés tartja fenn, ami az általam használt berendezésnél ki volt zárva.

Az irodalmi elemzés alapján eddigi munkák során gázturbinába épített, ellentétes perdületű, külső keverésű segédkezes porlasztó által instabil üzemben előállított cseppeket még nem vizsgáltak meg részletesen.

Kelvin–Helmholtz instabilitás

A perdületes lángoknál a nyírózónában fellépő instabilitások különösen fontosak [96]. A keveredési zónában megjelenő kétdimenziós, illetve hengerszimmetrikus instabilitás (Kelvin–Helmholtz instabilitás) a torlóelem után, vagy a szabadsugar-áramlás kezdeti szakaszában alakul ki.

A legtöbb égési folyamat, amelynél recirkuláció is fellép, függetlenül attól, hogy diffúz vagy előkevert lángról van szó, ebben a zónában stabilizálódik, és az égés szempontjából fontos reakciók is itt játszódnak le. A Kelvin–Helmholtz instabilitás által az égési folyamatot alapjában befolyásoló struktúrák alakulhatnak ki. A 2.4. ábrán az égő szájánál, a kiáramló gáz és a környezeti levegő közötti nyírózónában kialakuló örvénylés látható.



2.4. ábra. Örvénykialakulás az égőszájánál

Az ilyen áramlási szerkezetek erősen hatnak a láng viselkedésére, alakjára:

- Recirkulációs zónával rendelkező diffúz lángoknál ezek a szerkezetek határozzák meg a keveredési zónába beszívott levegő sebességét, a friss, a recirkuláltatott levegő, valamint a tüzelőanyag keveredését, és ezáltal a láng stabilitását.
- Előkevert lángoknál a légfelesleg-tényező lokális csökkenése jöhet létre, valamint segíti a reagensek és a forró füstgázok keveredését.
- Zárt térben történő égésnél az instabilitásokból eredő, periodikusan ingadozó energiafelszabadulás könnyen nyomáslengéseket okozhat, ami tüzelőtér-lengéshez vezethet.

Kelvin–Helmholtz instabilitás mindig létrejön akkor, ha két különböző áramlás érintkezik, és kölcsönhatásba lép egymással. A műszaki gyakorlatban sokszor az energiafelszabadulás helye és a láng kiterjedése egy bizonyos térrészre korlátozódik. Ha ebben a térben Kelvin–Helmholtz instabilitás fellép, akkor ez a teljes égési folyamatot meghatározza. Ennek az esélye nagy, ha a lángstabilizációt perdületes áramlással éri el a berendezés.

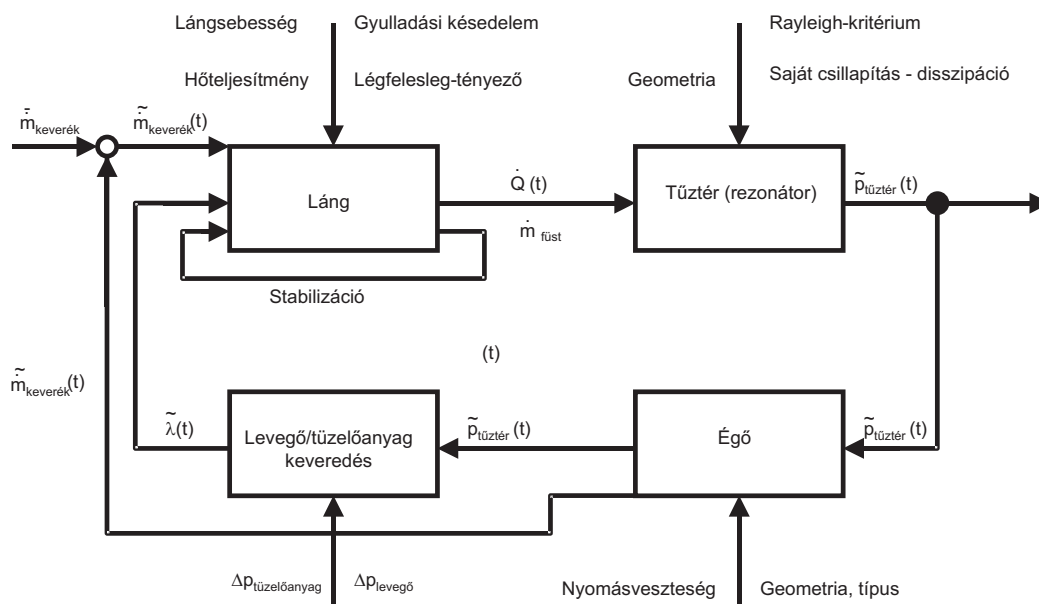
Gerjesztő mechanizmusok

A természetes csillapítással rendelkező tüzelőtérrendszerben megjelenő lengés fenntartásához elengedhetetlen a fázishelyes energiafelszabadulás. A gerjesztő mechanizmusokat az energia-szükségletük fedezése alapján a következőképpen lehet megkülönböztetni [97]:

- Ha a lengést a lángban felszabaduló hőenergia és a nyomásingadozás közötti visszacsatolás tartja fenn, akkor öngerjesztő oszcillációról beszélünk.
- Akusztikus gerjesztés is vezethet tüzelőtérlengéshez. Nemcsak maga a tüzelőtér, hanem attól áramlással megegyező és ellentétes irányban elhelyezkedő berendezések, elemek is fontosak. Az oszcilláció frekvenciáját az égő-láng-tüzelőtér-rendszer valamint az oda- és eláramlás együttese határozza meg.
- A lengés akusztikus visszacsatolása mellett létre jöhet a visszacsatolás a tüzelőtérrendszeren keresztül is. A tüzelőanyagellátó-rendszerben létrejövő lengések okozhatnak periodikus instabilitást a tüzelőanyag tüzelőtérbe kerülésében, ami az energiafelszabadulás ingadozását vonja maga után. Az ebből eredő pulzáció gerjeszti a tüzelőtérrendszert. Ez a mechanizmus csak ritkán játszik szerepet.

Munkám során fellépő oszcilláció az első csoportba tartozik, így azzal foglalkozom részletesebben.

Büchner szerint [97] a tüzelőtérlengést befolyásoló tényezőket a következő folyamatábrán lehet szemléltetni (lásd 2.5. ábra).



2.5. ábra. Büchner szerinti visszacsatolás

A lengés frekvenciáját a periodikus zavarás és a lánghoz történő visszacsatolás időbeni eltérése határozza meg. Egyszerű lángpulzációnál a periodikus zavar és a visszacsatolás a lángon, illetve

a stabilizációs területen belül jelentkezik. A rövid visszacsatolási útból eredően magas frekvenciájú lengések (800 Hz) keletkezhetnek. A folyamatábrában ez a fajta instabilitás a „Stabilizáció” felirattal ellátott visszacsatolási úton jelentkezik.

Ha viszont a gerjesztőmechanizmus nem korlátozódik a lángra, hanem részt vesz benne a tüzelőtér és az égő is, akkor a hosszú visszacsatolási utak miatt alacsonyabb frekvenciájú lengés (10-től néhány 100 Hz-ig) keletkezik. A periodikus nyomás- és energiaingadozás teljesíti a Rayleigh-kritériumot, nagyságát a láng gyulladási késedelme és a berendezés akusztikája határozza meg. A nagyméretű ipari berendezésekben leggyakrabban ez a mechanizmus lép fel.

Összefoglalás

A repceolaj kötött oxigént tartalmaz, ezért hagyományos tüzelőanyagokénál kisebb az égéslevegő-szükséglete. Szintén kisebb a fűtőértéke és a cetánszáma. A viszkozitása, felületi feszültsége, sűrűsége, lobbanáspontja viszont nagyobb. Ezen tulajdonságok egy része függ a hőmérséklettől. Kutatások foglalkoztak előmelegített repceolajjal dízelmotorban. Az emissziókra, teljesítményre, fogyasztásra egymásnak ellentmondó eredményeket közölnek a szerzők (a vizsgálati berendezéstől, a felhasznált növényi olaj minőségétől függően).

Irodalmi adatok alapján a hagyományos motor-tüzelőanyag biológiailag is előállítható magasabb rendű alkohollal elegyíthető, azonban a kutatók még nem elegyítették azokat repceolajjal, nem vizsgálták azoknak a repceolajüzemre gyakorolt hatását.

Eddigi adatok alapján gázturbinában is főleg NOME-t használtak. Nyers növényi olajjal történő vizsgálatoknál a berendezés egészének üzemét elemezték, nem fordítottak külön figyelmet a porlasztásra, és a károsanyag-kibocsátás csökkentését célzó alacsony légfelesleggel történő üzemre.

A repceolaj a hagyományos tüzelőanyagoknál nehezebben párolog, ami a tüzeléses felhasználását nehezíti. Irodalmi adatok alapján elegendő pontosságú számítási modellek csak a kevés komponensből álló tiszta anyagok párologási sebességére léteznek. Kísérleti módszerrel RME-cseppek párologási tulajdonságai is meg lettek már határozva, azonban a repceolaj és annak alkoholos elegye még nem.

Turbinák károsanyag-kibocsátásának egyik csökkentési módszere a tüzelőanyagban szegény körülmények között történő tüzelés. Ekkor gyakran termoakusztikus lengés lép fel. A termoakusztikus lengések vizsgálata a mérés technikával új lendületet kapott, azonban megújuló tüzelőanyaggal kialakuló lengés viselkedését még nem vizsgálták. A hagyományos tüzelőanyagokkal végzett vizsgálatok alapján elmondható, hogy az égőtérben elhelyezkedő cseppek inhomogén eloszlásúak, a kisebbek az áramlás tengelye felé csoportosulnak. A cseppméret függ a felületi feszültségtől, a viszkozitástól, nem függ azonban a pulzáció erősségétől.

3. fejezet

Mérési berendezések, összeállítások

Az előzőekben elmondottak alapján a gázturbinai felhasználás szempontjából repceolaj porlasztását, motorikus felhasználás szempontjából pedig a repceolaj és a magasabb rendű alkoholok elegyének tüzeléstechnikai szempontból lényeges tulajdonságait kell részletesen megvizsgálni.

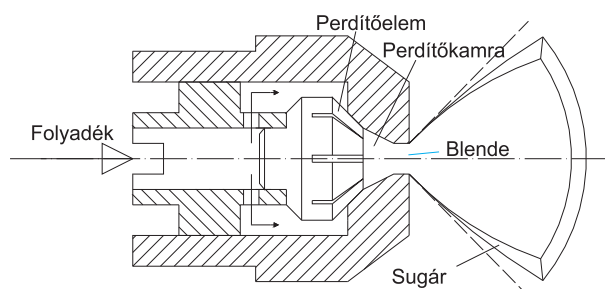
A mérések során alkalmazott gépek ismertetése a mellékletben található, azonban szükségesnek tartom a felépített mérőhelyek ismertetését.

3.1. Porlasztótípusok

A vizsgálataim folyamán a következő típusú porlasztókkal dolgoztam.

Perdítőelemes nyomásporlasztó

A perdítőelemes nyomásporlasztónál az olaj nagy nyomással, tangenciálisan érkezik a perdítőkamrába, ahonnan a fúvóka száján, a legszűkebb keresztmetszeten át axiálisan távozik (lásd 3.1. ábra). Súrlódásmentes áramlásnál a kilépő kúpszög csak a geometriai méretek függvénye, valós esetben függ még a közeg viszkozitásától és nyomásától is.



3.1. ábra. Perdítőelemes nyomásporlasztó

Alacsony térfogatáramnál a perdítőkamra megtelik folyadékkal, majd az onnét kis perdülettel kilép. Ha nő a térfogatáram, akkor a kamrában perdületes áramlás alakul ki, a folyadékokra jellemző sebességprofilal.

Perdületes áramlásnál a hengeres nyílásból kilépő folyadék mennyisége a viszkozitás növekedésével egy darabig nő, majd csökken. A maximum a nyomás növelésével a nagyobb viszkozitásértékek felé tolódik el. Ennek oka, hogy a viszkozitás növekedésével egyre vastagabb perdületes olajfilm alakul ki, változatlan axiális sebesség mellett. Mindez csak egy maximális viszkozitásig igaz, amikor a perdületes mozgás a nagy viszkozitás miatt átalakul szilárd test forgó mozgásába, és ilyenkor az axiális sebesség csökken, ezzel csökken a porlasztott olaj mennyisége is.

A porlasztóból kilépő porlasztmány kúpszögét üzemi körülmények között a perdület nagysága határozza meg.

A porlasztóból kilépő folyadék axiális sebessége lineárisan növekszik a porlasztott térfogatárammal. Fordított arányosság áll fenn viszont a porlasztott közeg kinematikai viszkozitása és az axiális sebesség között. Ennek oka, hogy a viszkózus folyadékokat a belső csillapítás a perdítőkamrában jobban fékezi, ez csökkenti a perdületet, ami kisebb axiális sebességet eredményez. Ez magyarázza azt is, hogy a viszkózus folyadékoknál ugyanazon tömegáram eléréséhez kisebb porlasztási nyomás szükséges [82]. Viszont a viszkozitás csökkenésével már kisebb térfogatáram esetén felnyílik a kilépő folyadéksugár, és létrejön a porlasztás.

A porlasztóval létrehozott spray Sauter középátmérője (SMD) függ a gáz és a folyadék sűrűségének arányától, a porlasztó szájának átmérőjétől, a perdülettől és a folyadék relatív nyomásától.

Az ilyen porlasztók nagy hátránya szűk üzemi tartományuk, vagyis a rajtuk átfolyó közeg mennyiségétől nagymértékben függ a keletkezett cseppek nagysága. Ez a hátrány a külső keverésű segédközeges porlasztóknál nincs. A cseppek méretének kiszámításának módszerét több szerző is publikálta, pl. [76], [98].

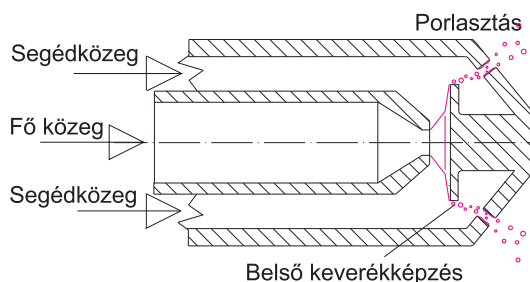
Belső keverésű segédközeges nyomásporlasztó

A segédközeges porlasztók előnye a perdítőelemes nyomásporlasztókkal szemben, hogy szélesebb tartományban üzemeltethető, és kisebb cseppeket állít elő. Ha segédközegként levegőt használnak, akkor jobb tüzelőanyag–levegő keveredést lehet elérni, viszont a levegőellátó-rendszer bonyolultabb, mert a levegőt külön el kell vezetni a porlasztóhoz [98].

Ennél a porlasztónál a lassan áramló folyadékot a gyorsan áramló gáz segítségével porlasztjuk (3.2. ábra). Gyakran alkalmazott módszer, hogy a gáz (levegő) a folyadékkal egy előkamrában összekeveredik, majd egy lyukporlasztón át történik a porlasztás. Javítja a porlasztás minőségét, hogy a külső (kisebb) nyomáson a cseppek mintegy szétrobbannak a kitáguló gáz miatt.

A porlasztók gázfelhasználása alacsony ($\dot{m}_{lev.}/\dot{m}_{t.a.} = 0,05$), a folyadék nyomását a perdítőelemes nyomásporlasztóhoz képest akár a felére is lehet csökkenteni, és a keletkezett cseppek mérete nem lesz nagyobb [81].

A kilépő porlasztmány kúpszöge a porlasztó geometriai kialakításának függvénye.



3.2. ábra. Belső keverésű segédközeges nyomásporlasztó

Külső keverésű segédközeges porlasztó

Ennél a porlasztótípusnál gázáram ragadja el egy filmterítő ajakról a folyadékot. Gyakorlati kialakításnál a filmterítő ajak két oldalán ellentétes irányú perdületes áramlás van, a filmterítő ajakra a folyadékot vagy belső csatornákon keresztül, vagy egy külön porlasztóval hordják fel.

A porlasztó éle a folyadék részére egyfajta tartályt jelent, ahonnan időről időre a levegőáramlás nagyobb folyadékszegmenseket szakít le, amelyek a levegőben aztán továbbaprózódnak. A porlasztás szempontjából azonban ezeknek a szegmenseknek nincs jelentőségük mindaddig, amíg nincs visszahatásuk az áramlásra. Akusztikusan öngerjesztő lángoknál ez a jelenség lehet az oszcilláció kiindulása (lásd 2.4.3. fejezet).

A primer és a szekunder levegőáram egy-egy perdítőelemen keresztül jut el a porlasztási helyhez. A perdítőelemek ellentétes irányú perdületet adnak a levegőnek, a mérések szerint így apróbb cseppek jönnek létre, valamint ez növeli a szegény tartomány határát [99]. A perdületes áramlás ezen felül még a láng stabilizációját is szolgálja.

A porlasztmány kúpszöge a levegőáram függvénye, ami pedig függ a porlasztó geometriájától, perdítőelemektől, valamint a nyomáskülönbségtől. Ennél a porlasztótípusnál a folyadék – segédközeg arány széles tartományban mozoghat. A külső keverésű segédközeges porlasztónál nagyobb levegőáram szükséges ugyanazon porlasztási kép (cseppméret) eléréséhez, mint a belső keverésűnél, ezért ennek nagyobb a fajlagos energiafelhasználása.

A mérés technika az 1980-as évek közepére tette lehetővé azt, hogy a porlasztást az áramlás megzavarása nélkül kellő pontossággal vizsgáljuk meg. Aigner [81] a Karlsruhei Műszaki Egyetemen végezte a külső keverésű segédközeges porlasztóban lejátszódó folyamatokat érintő alapvizsgálatait. Vizsgálta a geometria (filmterítő ajak vastagsága, átmérője, a légcatorna vastagsága), a légáram (perdület nélküli, egyirányú és ellenirányú, sebesség, sűrűség), a folyadékáram (tömegáram, viszkozitás, felületi feszültség) hatását a porlasztásra. Az általam alkalmazott porlasztóban a kísérletek során lényeges eltérés csak a tüzelőanyagban volt, így most csak a folyadékáram hatását mutatom be részletesebben.

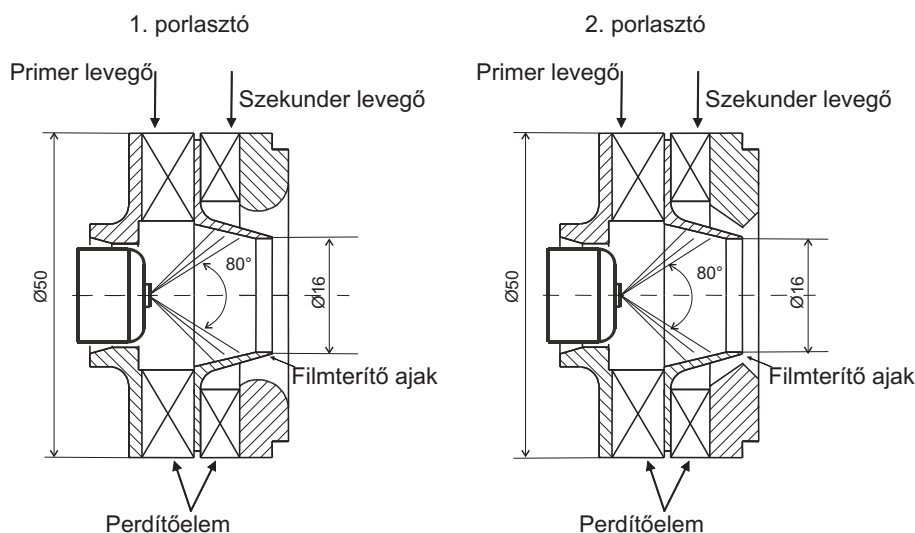
Külső keverésű segédközeges porlasztónál a keletkezett cseppek átmérője gyakorlatilag független a folyadék térfogatáramától, kivéve ha a kialakuló folyadékfilm észrevehetően csökkenti a levegőcsatorna méretét, így az visszahat a levegőáramlásra is [76], [81].

A folyadék viszkozitásának hatása kettős. Egyrészt a nagyobb viszkozitás a filmterítő ajakon vastagabb folyadékfilmet eredményez, ami bizonyos konstrukciók esetén nagyobb cseppeket is

jelent, másrészt a filmterítő ajkáról történő leszakadáskor hosszabb folyadékszegmensek keletkeznek, tovább tart a primer porlasztás [94]. Aigner mérései alapján a nagyobb viszkozitású folyadékkal nem kapott egyértelműen nagyobb cseppeket, csak az átmérő szórása nőtt meg. Meier szerint viszont [100] a gyakorlatban előforduló körülmények között a folyadék viszkozitásának hatása elhanyagolható.

A folyadék felületi feszültségének nincs visszahatása az áramlásra, nem növeli a folyadékfilm vastagságát sem, így ezen paraméter hatása az irodalomban egységes: növekvő felületi feszültség nagyobb cseppeket eredményez.

Hadef megállapította [101], hogy a levegő hőmérsékletének a növelése kisebb cseppeket eredményez, mert ilyenkor a porlasztón a levegő nagyobb sebességgel halad át. Kisebb a porlasztmány behatolási mélysége is, nagyobb a láng hőmérséklete, és több NO_x keletkezik. Mérései szerint a porlasztmány csak közvetlenül a tüzelőtérbe kerüléskor követi a levegő áramlását, mert ott még nagy számban vannak jelen a kis cseppek. A porlasztótól távolodva a cseppek és a gáz sebessége is csökken, de a cseppeké kevésbé.



3.3. ábra. Külső keverésű segédközegees porlasztó

A 3.3. ábrán a vizsgálataim folyamán alkalmazott külső keverésű segédközegees porlasztók láthatók. Bal oldalon van az eredeti porlasztó, jobb oldalon pedig a továbbfejlesztett változat. A különbség a két konstrukció között a legszűkebb keresztmetszet helyében van: az első esetben ez a hely nem a filmterítő ajak végénél helyezkedik el, így ott a szekunder levegőáram áramlási keresztmetszete már bővül, a filmterítő ajak végénél a folyadékot kisebb sebességgel éri el. Előfordulhat az is, hogy a filmterítő belső részéről a folyadék átjut annak külső részére is, ott a felgyülemlett tüzelőanyag lerakódásokat képez. A szűkebb keresztmetszet helyének megváltoztatása magával vonja azt is, hogy nagyobb lesz a levegő axiláris sebessége. A perdítőelemes nyomásporlasztó csak az olajfilm felvitelét végzi a terítőajkakra, így az ott tárgyalt hátrányok általában nem jelennek meg. Az, hogy a primer levegőáram elragad cseppeket, mielőtt azok elérik a filmterítő ajkat, gyakorlatilag nem fordul elő, mert a levegőáramlás perdületes, ha el is ragad cseppeket, azok nem bírják követni az áramlást, és felkenődnek a filmterítőre.

A porlasztót az Institut für Thermische Strömungsmaschinenen atmoszférikus és nagy nyomású (max. 8 bar) üzemben, stabil lánggal vizsgálták meg, kerozin tüzelőanyaggal [100]. Az 1. jelű porlasztóval a méréseket nehezítette a filmterítőn időről időre felgyülemelő, majd onnan leszakadó folyadék. Az olajfilmet terítő nyomásporlasztó hatását a porlasztásra nem sikerült kimutatni.

A munkám során felhasznált külső keverésű segédközeges porlasztók pontos mérete, perdület-száma, primer és szekunder levegő aránya stb. általam nem publikálható.

Porlasztmány osztályozása

A porlasztóból kilépő cseppek a másodlagos porlasztás lezárulta után sem tartják meg méretüket, mert az áramló közegben megtett útjuk során melegednek (térfogat-növekedés), párolognak, kondenzálódik rajtuk a már elpárologott folyadék, másik cseppel ütköznek, azzal egyesülnek, vagy épp ellenkezőleg, az ütközés miatt tovább aprózódnak. A porlasztás során keletkező nagyszámú cseppet nem lehet egyenként figyelemmel kíséreni, ezért különböző cseppátmérspektrumokat és átlagértékeket használunk a porlasztmány jellemzéséhez.

A mért cseppátmérőket osztályokba sorolják. A besorolás segítségével különböző jellemző átmérők határozhatók meg. Ezek kiszámításának módját a következő képlet adja meg (3.1) [69].

$$D_{pq} = \left[\frac{\sum_{i=1}^x n_c(d_i) d_i^p}{\sum_{i=1}^x n_c(d_i) d_i^q} \right]^{\frac{1}{(p-q)}} \quad (3.1)$$

ahol

$n_c(d_i)$: a cseppátmérsztályba tartozó cseppek száma
 p, q : a 3.1 táblázat szerinti kitevők

Átmérő	p	q	Leírás
D_{10}	1	0	Összes csepp aritmetikus középátmérője
D_{20}	2	0	Összes csepp felülete alapján számított középátmérő
D_{30}	3	0	Összes csepp térfogata alapján számított középátmérő
D_{32}	3	2	Sauter középátmérő, Sauter mean diameter, SMD

3.1. táblázat. Gyakrabban használt középátmérő-kitevők jelentése

A Sauter középátmérő egy olyan képzeletbeli csepp átmérője, mely térfogatának és felületének aránya megegyezik a porlasztmányban található cseppek össztérfogatának és összfelületének arányával.

A cseppek (Sauter) átmérőjét nem lehet kellő pontossággal számítással meghatározni. Az irodalomban számos eljárás található különböző porlasztótípusokra, azonban ezek a számítások mérések alapján felállított empirikus képleteket tartalmaznak, így érvényességük a mérések során fennálló körülményekre korlátozódik [82].

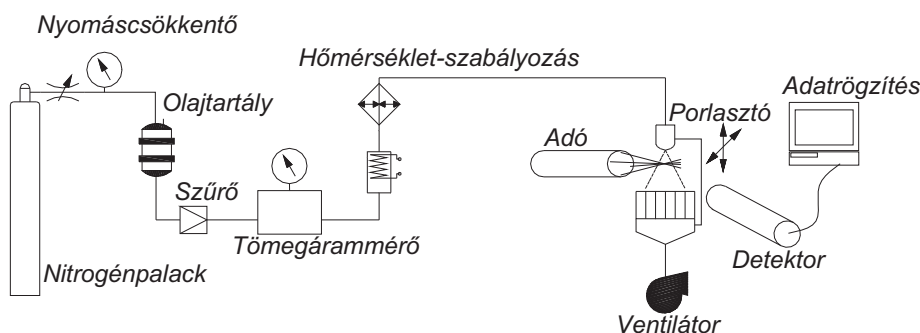
3.2. Porlasztási és égési vizsgálatoknál alkalmazott mérőhelyek

A porlasztási és égési vizsgálatokhoz három mérőhelyet építettem fel. Az első a repceolaj porlaszthatóságának elemi vizsgálatát, a második a repceolaj és a kerozin porlasztmány összehasonlítását, a harmadik az akusztikusan öngerjesztő lángok vizsgálatát szolgálta.

3.2.1. Repceolaj porlaszthatóságának vizsgálata

Munkám során az első lépés a repceolaj porlaszthatóságának vizsgálata volt. Ehhez két porlasztót választottam ki: egy perdítőelemes nyomásporlasztót (Delevan, 2 gal/h, 80 ° kúpszög), és egy belső keverésű segédközeges porlasztót (Fluidics, 1,9 gal/h, 100 ° kúpszög, 5 kiömlőnyílás) (3.1. fejezet).

A porlasztó olajellátása nyomás alá helyezett tartályból történt. Az átáramlott mennyiséget Coriolis tömegárammérő mérte, a repceolaj fűtése, hőmérsékletének szabályozása közvetlenül a porlasztó előtt egy fűtőelemmel és egy termoelemmel történt. A porlasztó alatt 100 mm-rel cseppeválasztóval egybeépített örvénymentes elszívás működött (3.4. ábra). Segédközeges porlasztó esetében a segédközeget egy nitrogén palack szolgáltatta.



3.4. ábra. Repceolaj porlaszthatóságának vizsgálatához felépített berendezés

PDA-val vizsgáltam meg (B.1. fejezet) a cseppek Sauter középátmérőjét, valamint a cseppek radiális és axiális sebességét. A méréseket 2 mérési síkban (10 és 20 mm-re a porlasztó szájától) végeztem el, a porlasztó tengelyétől kiindulva, 1 mm-es lépésközzel, sugár irányban kifelé haladva. Egy pont mérése 20.000 detektált cseppig, vagy 30 másodpercig tartott.

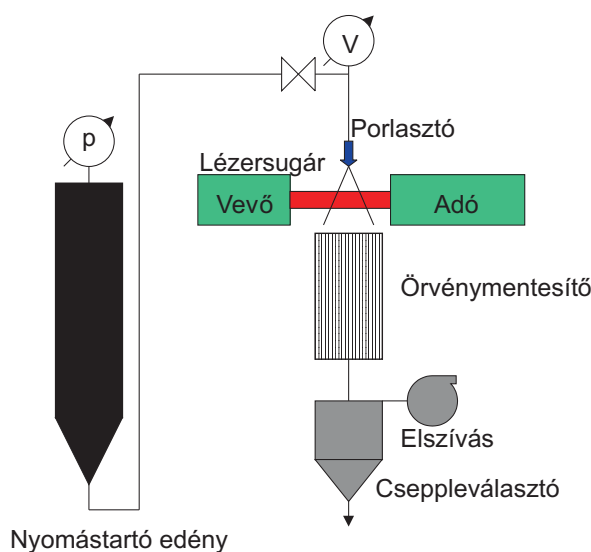
Mérési program

Vizsgálni kívántam

1. a segédközeges porlasztónál a segédközeg (N_2) nyomásának hatását (2,5, 5 és 10 bar),
2. a porlasztási nyomást. Nyomásporlasztónál 10 és 16 bar,
3. a repceolaj hőmérsékletét. Nyomásporlasztónál: 20, 40, 60, és 78 illetve 90 °C.

3.2.2. Kerozin és repceolaj porlasztásának vizsgálata

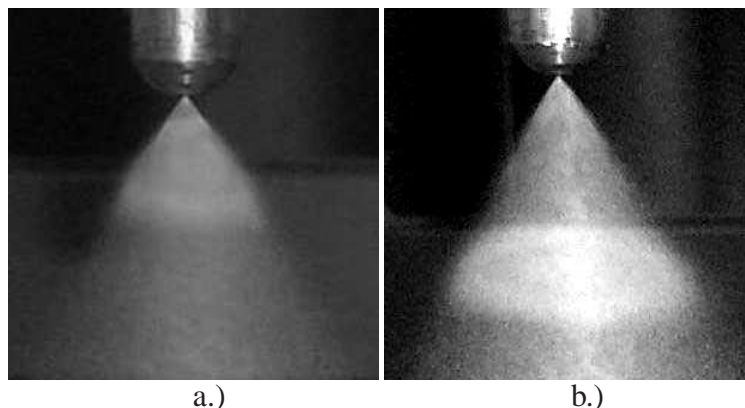
A perdítőelemes nyomásporlasztó porlasztási képét repceolaj és kerozin tüzelőanyaggal Planer Mie Scatteryvel (PMS) (B.2. fejezet) vizsgáltam meg. A méréshez a perdítőelemes nyomásporlasztót mozgatható állványra építtem, alá 100 mm távolságban pedig cseppleválasztóval ellátott örvénymentes elszívást helyeztem (lásd: 3.5. ábra).



3.5. ábra. PMS méréseknél használt berendezés felépítése

Ennél a berendezésnél a porlasztás a légkörbe történik. Mivel a kerozin illékony és könnyen gyullad, így a balesetveszély elkerülése érdekében ennél (csak ennél!) a mérésnél az eredeti tüzelőanyagok helyett olyan nehezebben gyulladó anyagot használtam, aminek a felületi feszültsége és viszkozitása nagyságrendileg megegyezett az eredeti tüzelőanyag 150 °C-on mért tulajdonságaival (21. oldal, [82]). A Catenex 908-as nevű anyag a repceolajat (40 °C-on mért viszkozitása 3,7 mm²/s), a Shell-Soll D40-es pedig a kerozin jet-A-t helyettesítette (20 °C-on mért viszkozitása 1,36 mm²/s) (<http://shellpower.de>). Meg kell említeni, hogy a Catenex 908 tulajdonságainak eltérése a repceolajétól nagyobb, mint az eltérés kerozin és helyettesítője esetében. Ez azonban nem befolyásolja az eredmények összehasonlíthatóságát, mert a vizsgált tüzelőanyagok eléggé különböznek ahhoz, hogy az eredeti és a helyettesítő anyag közötti különbségből adódó eltérést el lehessen hanyagolni.

A porlasztó szája és a 10 mm átmérőjű lézersugár tengelye között a.) 12, ill. b.) 32 mm volt (3.6. ábra). Látható, hogy a felső mérés esetében jóval nagyobb SMD-vel számolhatunk, mert porlasztás még nem játszódott le, még nagy folyadékszegmens is vannak a mérőtér fogatban.



3.6. ábra. PMS mérésnél a mérési térfogat elhelyezkedése

Mérési program

A mérések folyamán a következő tömegáramokkal mértem:

- Catenex 908 (repceolaj): 0,5; 0,7; 0,8; 1,8 g/s
- Shell-Soll (kerozin): 0,4; 0,45; 0,5; 0,8 g/s

3.2.3. Akusztikusan öngerjesztő lángok összehasonlító vizsgálata

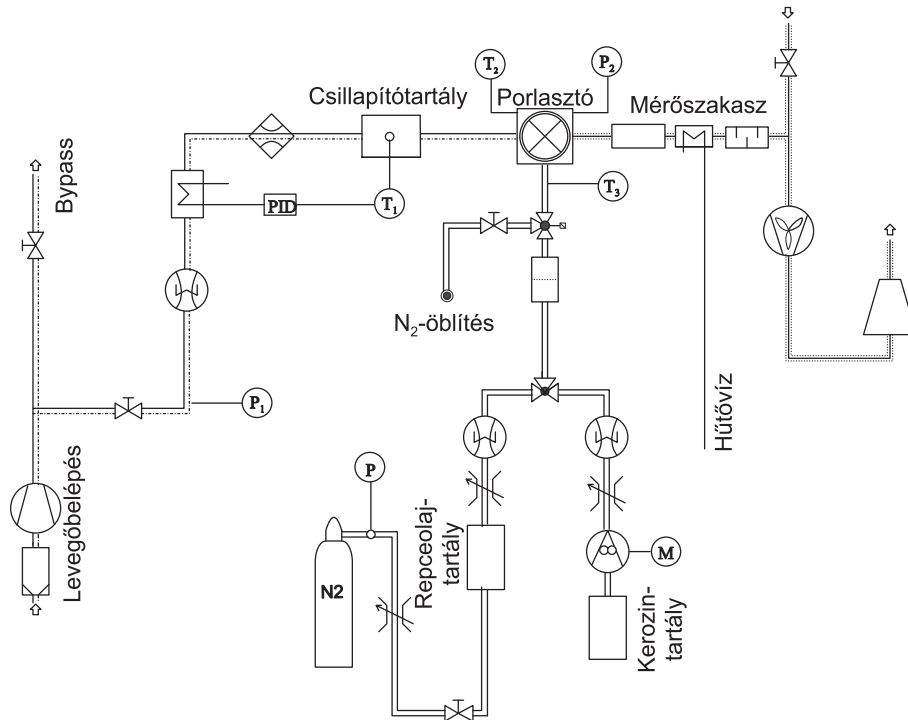
Az akusztikusan öngerjesztő lángok vizsgálata lézersíkkal (B.3. fejezet), PIV-vel (B.4. fejezet) és PDA-val (B.1. fejezet) az Institut für Thermische Strömungsmaschinen laborjában felépített kísérleti berendezésen történt (3.7. ábra).

A berendezés levegőellátása légkompresszorral, a levegőmennyiség pontos beállítása szeleppel és bypass-vezetékekkel, az áramlási egyenetlenségek kiszűrése csillapítótartállyal, az égési levegő előmelegítésére fűtőelemmel történt. A tüzelőanyagot fogaskerék-szivattyú szállította.

A tüzelőtér három részből állt. Az első rész, ami a láng, valamint a cseppek láthatóvá tételét, lézeroptikai mérését tette lehetővé, a három mérésnél két különböző kialakítást követelt meg, azonban a méretei változatlanok maradtak; hossza és átmérője egyaránt 100 mm. A második rész egy 1000 mm hosszú vízzel hűtött égőtér volt, a harmadik rész 1200 mm hosszú hűtetlen égőtér, amely a rezonátor szerepét töltötte be. A forró füstgázokat a kéménybe lépés előtt bekevert környezeti levegő hűtötte.

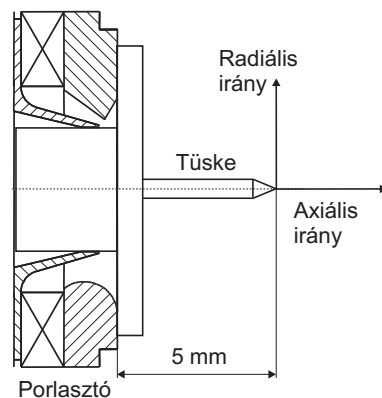
A lézersík és PIV méréseknél a hűtetlen tüzelőtér egy kvarcüveg-henger volt, ahová a sík lézer rádiálisan lépett be, ezáltal az üveg-hengeren a fénytörés és a szórás a legkisebb volt. Az érzékelő erre a síkra 90 °-ban került elhelyezésre.

PDA méréseknél már kis fénytörés is a mérési térfogat torzulását okozhatja, ezért ott egy fémhengerbe (méretei megegyeznek a kvarcüveg-hengerével) a lézersugarak beesésénél sík kvarcüveglapok kerültek beépítésre. Az egyes mérési vonalak egymástól 15 mm-re helyezkedtek el, a méréseket 4 vonalon végeztem el. A mérési vonalon az egyes mérési pontok távolsága 1 mm



3.7. ábra. Lézersík, PIV és PDA méréseknél használt berendezés felépítése

volt. A méréseket a tengelytől radiális irányban kifelé haladva végeztem el. A berendezés 0 pontja a porlasztó szájától 5 mm-re helyezkedett el (lásd 3.8. ábra), az első mérési sík 9 mm-re volt a nullponttól, mert közvetlenül a porlasztó után nagy az esélye a nagy folyadékszegmensek, nem gömb alakú cseppek előfordulásának, így ott a PDA gyakran nem valós értéket szolgáltat pl. [71], [80].



3.8. ábra. PDA mérések nullpontja

A berendezésben kétfajta külső keverésű segédközeges porlasztó került beépítésre, amiben a primer porlasztás egy perdületes nyomásporlasztóval történt (lásd 3.3. ábra). A beépített porlasztó adatai: Steinen, 0,75 gal/h, 80° kúpszög.

A mérőberendezésnél kizárható, hogy a keletkező oszcillációnak konstrukciós, és nem termoakusztikus oka van, mert a ventilátor utáni kiegyenlítő-tartály a levegőellátás esetleges lüktetését

csökkenti, megszünteti; tüzelőanyag-oldalról pedig a fogaskerék-szivattyú helyett kísérleti jelleggel nyomástartó edény lett beépítve, amivel biztosítani lehetett a kerozin, illetve a repceolaj egyenletes áramlását [102].

A berendezések fázishelyes mérését egy kondenzátormikrofon és a hozzá kapcsolt elektronika tette lehetővé.

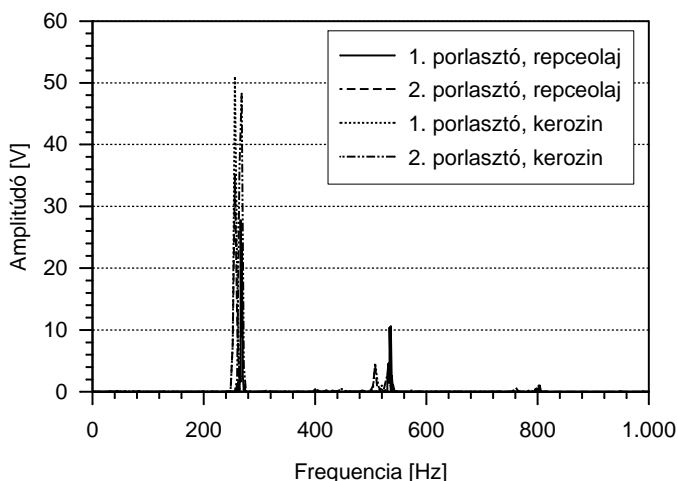
Mérési program

Az akusztikusan öngerjesztő lángokat (2.4.3. fejezet) a következő üzemiállapotokban vizsgáltam meg:

Beállítás	Porlasztó jele (3.1. fejezet)	Tüzelőanyag	Tüzelőanyag-áram [g/s]	\dot{m}_{lev} [g/s]	T_{lev} [°C]	λ [-]	Frekvencia [Hz]
1.	1	Kerozin	0,46	11,24	370	1,69	250
2.	2	Kerozin	0,46	11,28	370	1,67	260
3.	1	Repceolaj	0,50	11,11	450	1,77	265
4.	2	Repceolaj	0,50	11,14	450	1,78	252

3.2. táblázat. Akusztikusan öngerjesztő lángok vizsgálatának üzemiállapotai

A 3.2. táblázatból és a 3.9. ábrán is jól látható, hogy a láng mindkét porlasztóval és tüzelőanyaggal 260 Hz körüli frekvenciával oszcillált, a tömegáramok hasonlóak voltak. A légfelesleg-tényező is közel megegyező volt a különböző üzemiállapotokban. Nagy különbség van viszont az égési levegő hőmérsékletében. Repceolaj-üzemben a kielégítő égés és gyújtás miatt a levegőt elő kellett melegíteni 450 °C-ig.



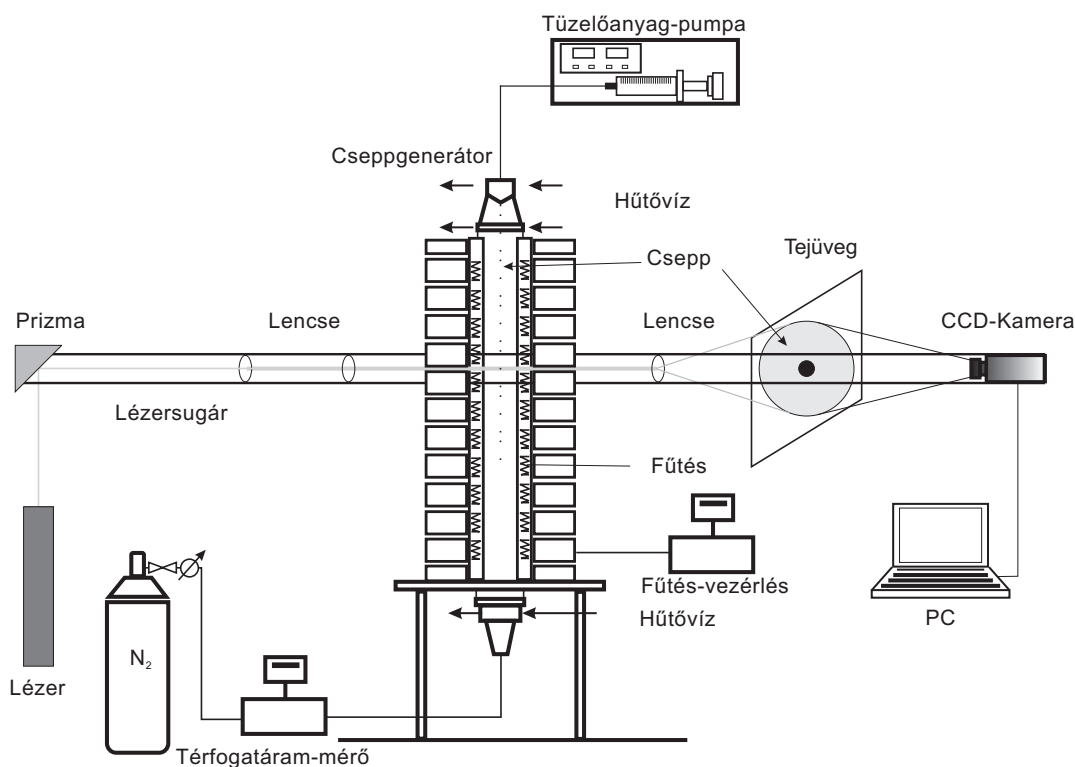
3.9. ábra. Akusztikusan öngerjesztő lángok vizsgálatokor fellépő frekvencia, különböző mérési összeállításoknál

3.3. Cseppek párolgását vizsgáló berendezés

A folyadékcseppek párolgási sebességének mérésére szolgáló kísérleti módszer az árnyékgráfia. A mérés folyamán a vizsgálni kívánt cseppeket lézersugárral megvilágítjuk, majd a kapott képet lencsék segítségével felnagyítjuk és egy tejúvegre vetítjük. Ezt veszi fel egy kamera; a felvételen a cseppek nagyságát pixelben meg lehet határozni. Ha a képek kiértékelésénél 2 pixelnyi hibát vétünk, akkor a mérés bizonytalansága a jellemző kezdeti átmérőnél 4% körüli marad.

Árnyékgráfia felépítése

Az árnyékgrafiás méréseket a Lisszaboni Műszaki Egyetem IST tanszékén végeztem. A tanszék laborjában található berendezés vázlatja a 3.10. ábrán látható.



3.10. ábra. Árnyékgráfia felépítése

A cseppek a reaktor tetején, egy furattal ellátott hűtött ernyőn át jutnak a vizsgálótérbe. Az ernyő védi a feláramló forró gázoktól a cseppgenerátort. A cseppgenerátorral monodiszperz cseppekből álló sugár hozható létre, amelyben a cseppek mérete, sebessége és egymástól való távolságuk állandó.

A vizsgálótérben 25 mm-enként lézersugárral megvilágítjuk a cseppeket, majd egy lencserendszerrel egy tejúvegernyőre vetített képét nagysebességű CCD-kamerával rögzítjük. Az eredmények kiértékelése PC-n történik.

A vizsgálótérbe bejutó cseppekkel szemben inert gáz (nitrogén) áramlik, amelynek a térfogatárama és ezáltal a sebessége változtatható. Minden egyes mérési síkban 50 db cseppről

készül felvétel. Az egymást követő mérési síkokon nyomon követhető a csepp átmérőjének változása, amiből a párolgási állandó is kiszámítható.

A méréseket 700 °C-ra fűthető reaktorról végeztem. A cseppek előállítása olyan cseppgenerátorral történt, amely képes volt kétféle átmérőjű cseppet stabilan, egymásután előállítani; így lehetőség nyílt két kezdeti átmérőjű repceolajcsepp vizsgálatára (1,8 mm és 4 mm). A berendezésbe bevezetett folyadék kezdeti hőmérséklete 20 °C. Az első mérési sík és a cseppgenerátor között 20 cm van, amit a cseppek 0,2019 s alatt tesznek meg. A csepp létrehozása már a magasabb hőmérsékletű közegben történik.

Mérési program

A mérés során vizsgáltam az 1,8 és 4 mm átmérőjű tiszta repceolaj és repceolaj + 20 V/V% 2-butanol elegyének a párolgását, 500 és 700 °C-s környezeti hőmérsékleten.

A 3.3. táblázatban található a cseppek számolással meghatározott átlaghőmérséklete az első és utolsó mérési síkban. (A reaktor felületének hőmérséklete az itt megadott értékeknél magasabb!)

Átmérő	Környezeti hőmérséklet:	500 °C	700 °C
	Mérési sík	Számolt csepphőmérséklet	
1,8 mm	1.	87 °C	115 °C
	7.	102 °C	136 °C
4 mm	1.	42 °C	50 °C
	7.	46 °C	55 °C

3.3. táblázat. Repceolajcseppek hőmérséklete az első és az utolsó mérési síkban

3.4. További mérések

Munkám folyamán vizsgáltam még az elegyek:

- égéshőjét, fűtőértékét
- sűrűségét
- viszkozitását
- lepárlási görbét
- motorikus felhasználhatóságát (cetánszám, emisszió)
- lobbanáspontját
- hidegszűrési határhőmérsékletét
- oxidációs stabilitását

4. fejezet

Mérési eredmények

A következőkben a munkám során végzett mérések eredményeit foglalom össze.

4.1. Repceolaj porlaszthatóságának vizsgálata

Vizsgálatok céljából két, gázturbinában is használatos porlasztót (a belső keverésű segédkezes porlasztót (3.2. ábra, 30. oldal) és a perdítőelemes nyomásporlasztót (3.1. ábra 28. oldal)) választottam ki. Mivel az irodalomban a repceolaj porlasztásáról semmi információt nem találtam, így először meg kellett határozni a porlasztáshoz szükséges paramétereket.

4.1.1. Porlasztás láthatóvá tétele

A kiválasztott segédkezes és nyomásporlasztóval különböző repceolaj és nitrogénnyomással kapott porlasztást vizsgáltam meg. A porlasztás minőségének alakulása a segédkezes és a nyomásporlasztó esetén a 4.1, 4.2. és a 4.3. ábrákon látható.



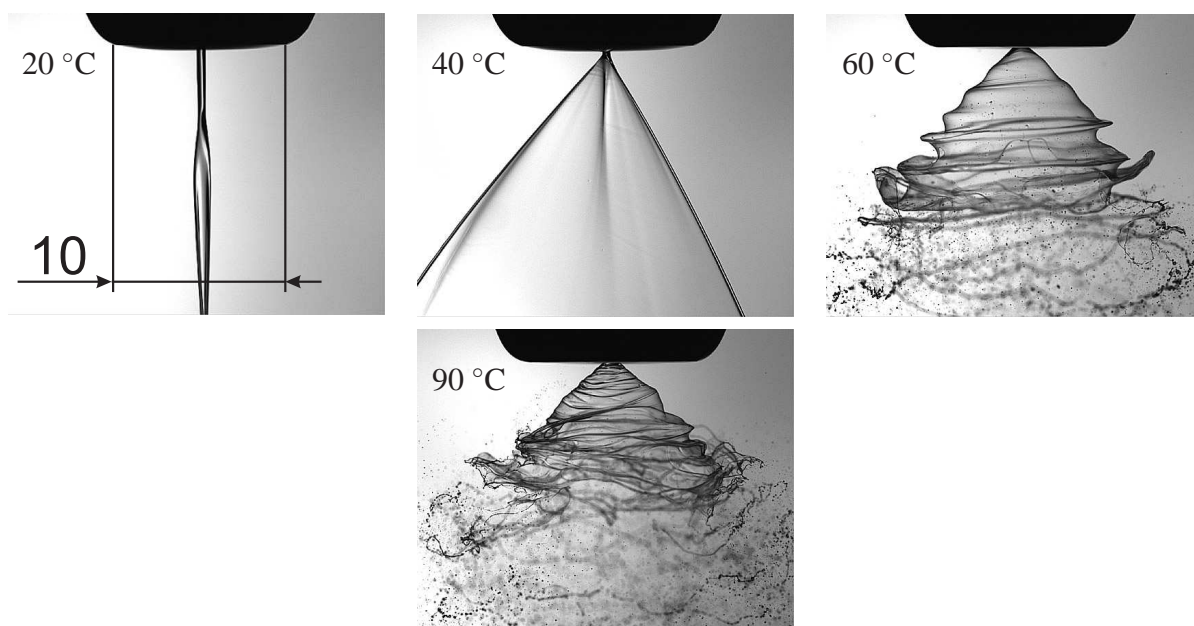
4.1. ábra. Repceolaj-porlasztás a segédkezes porlasztóval. Porlasztási nyomás: 5 bar. N₂ segédkezes nyomása 2,5, 5 és 10 bar

A segédkezes porlasztónál készült képeken az olaj nyomása minden esetben 5 bar, a segédkezes (N₂) nyomása viszont balról jobbra nő 2,5-ről 10 barra. Az olaj hőmérséklete minden esetben 18 °C. A 4.1. ábrán látható a porlasztó alja, amelynek átmérője 2 mm.

2,5 baros segédközeg-nyomás esetén a porlasztás a vizsgált tartományban (képkivágásban) még nem játszódott le teljesen. A porlasztó nyílásából a nagyon finom olajködön kívül még nagy folyadékszegmensek is távoznak, amelyek másodlagos porlasztás folyamán esnek szét kisebb cseppekké. A folyamat jól látható a képen.

5 baros segédközeg-nyomás esetén a porlasztás a vizsgált tartományban már teljesen lejátszódott. A porlasztóhoz közeli területeken megfigyelhetők még nagyobb folyadékszegmensek is, azonban ezek a vizsgált tartományon belül felaprózódnak. Látható, hogy a másodlagos porlasztással létrehozott cseppek mérete meghaladja a porlasztó száját olajködként elhagyó cseppek méretét.

10 baros segédközeg-nyomás esetén jó minőségű porlasztás látható. A porlasztmány nagy része olajködként hagyja el a porlasztót, a másodlagos porlasztás is lejátszódik a porlasztó közvetlen közelében, 1-2 mm alatt. Megfigyelhető, hogy kevesebb nagyobb csepp van jelen, mint az előző esetekben. Ardy megállapításának megfelelően a másodlagos porlasztás során létrejövő nagyobb csepp iránya nem követi a fősugár, az olajköd irányát (15. oldal).



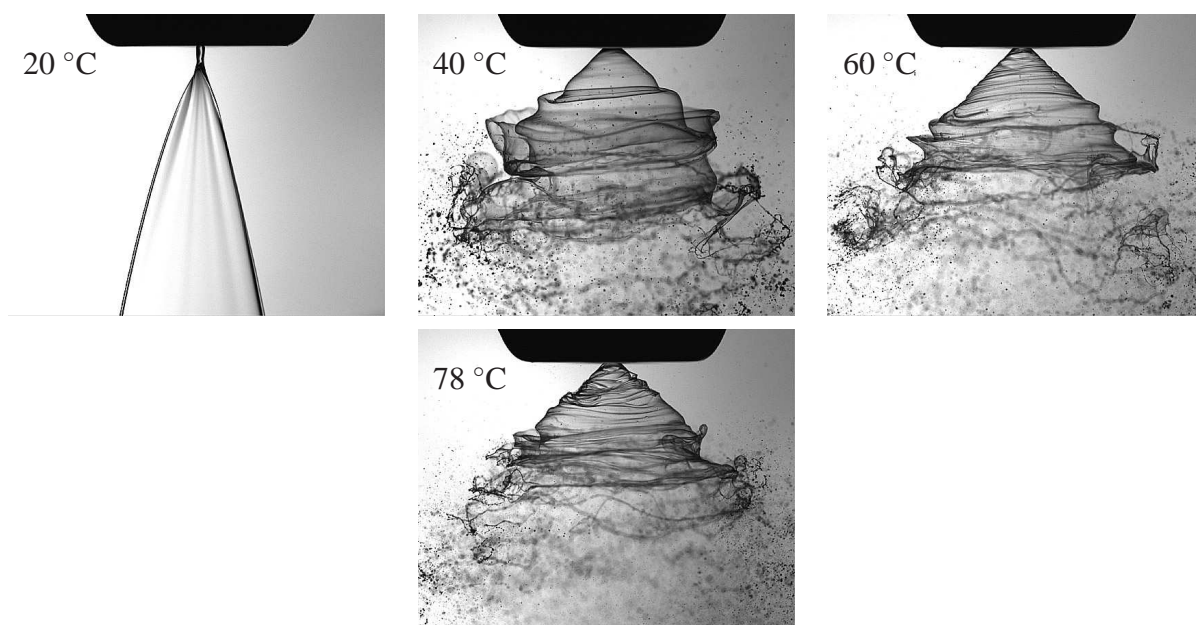
4.2. ábra. Repceolaj-porlasztás a perdítőelemes nyomásporlasztóval. Olajnyomás: 10 bar

Perdítőelemes nyomásporlasztóval 10 és 16 baros olajnyomásnál vizsgáltam meg a porlasztást (4.2., 4.3. ábra). Az olaj hőmérséklete 20, 40, 60, valamint az adott berendezéssel az adott nyomáson elérhető maximum 90, illetve 78 °C volt. A képen látható a porlasztó alja, amelynek átmérője 10 mm. A felvételeken jól megfigyelhető a porlasztás kialakulásának különböző szakaszai. Alacsony hőmérsékleten nincs porlasztás, 20 °C-on csak egy sugár látszik. 40 °C-on a sugár kinyílik, de még a kilépő folyadék összefüggő filmet képez. Ez a jelenség további, körülbelül 5 °C hőmérséklet-növekedés alatt nem változik, a felületi feszültség és a viszkozitás csökkenésével a porlasztmány 50 °C-nál már hagyma formát vesz föl. Tovább növelve a hőmérsékletet, kialakul a porlasztás. 60 °C-on készült képen jól megfigyelhető a film perdítőelem

által okozott spirálszerű hullámzása is. Ahogy tovább nő a hőmérséklet az aprózódás a porlasztó szájához közelebbre tolódik el. Természetesen a hőmérséklet növelésével nőtt a porlasztott repceolaj tömegárama is, 1,8 g/s-ról 2,5 g/s-ra.

16 baros porlasztási nyomásnál hasonló jelenségek figyelhetők meg (4.3. ábra). Lényeges különbség, hogy a 10 baros porlasztásnál említett jelenségek mintegy 10 °C-kal alacsonyabb hőmérsékleten játszódnak le. 10 bar 90 °C és 16 bar 78 °C között nem látható lényeges különbség. Ennek oka az, hogy ezeken a hőmérsékleteken a repceolaj viszkozitása mindkét esetben 10 mm²/s-nál van, a különbséget pont kiegyenlíti a magasabb nyomás. Ezen mérési beállításonál az olaj tömegárama is megegyezik. A porlasztás minőségének egyezését bizonyítják az ezen beállítások mellett elvégzett PDA mérések is.

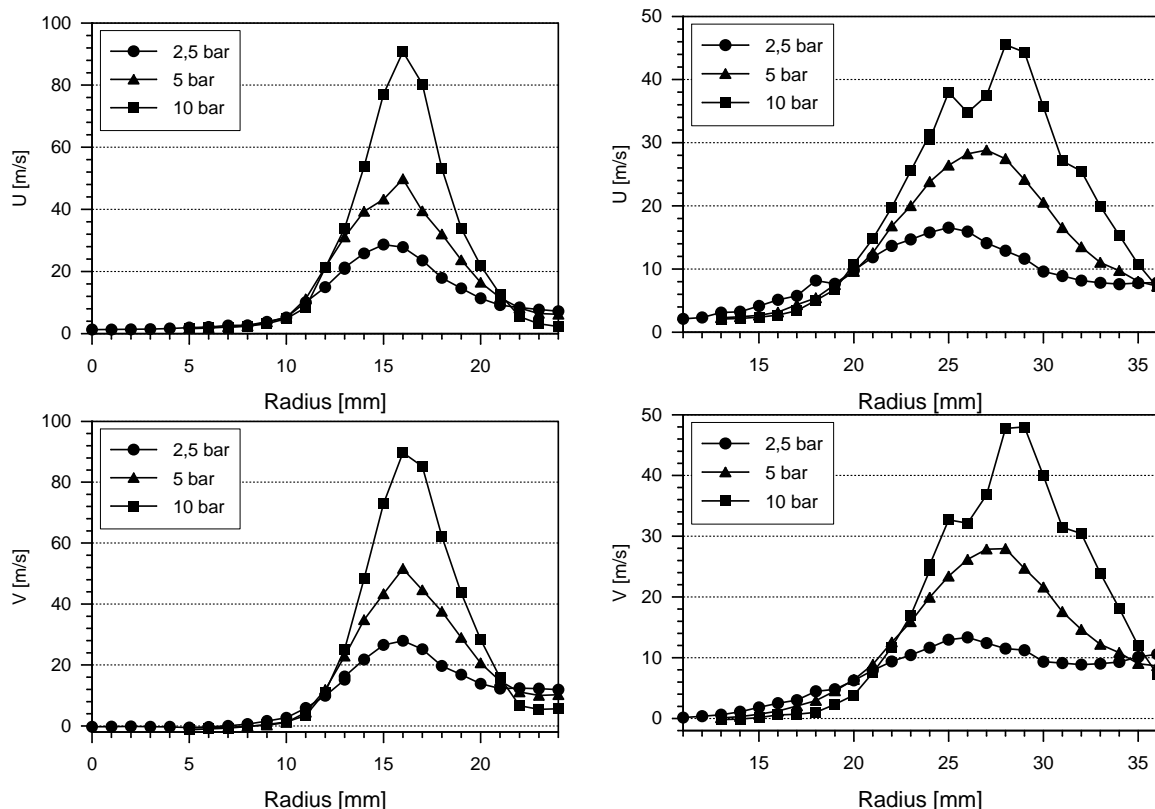
Az ábrákon jól megfigyelhető, hogy a porlasztási kúp felszakadása után a porlasztás nem zárul le, ekkor még sok, nagy folyadékszegmens keletkezik, ami tovább aprózódik. Ezt a jelenséget figyelembe kell venni a PDA mérési síkjának kiválasztásakor.



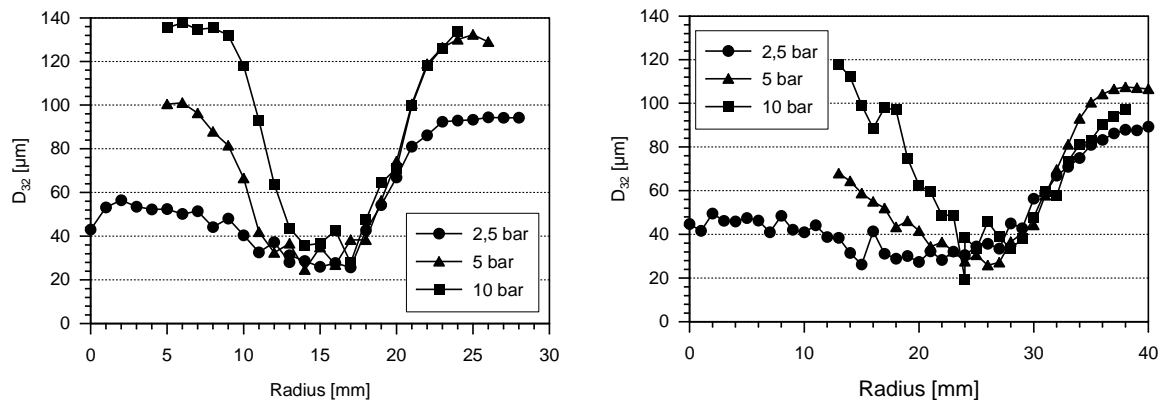
4.3. ábra. Repceolaj-porlasztás a perdítőelemes nyomásporlasztóval. Porlasztási nyomás: 16 bar

4.1.2. PDA mérések

Az előző mérések alapján a PDA méréseket a segédközeges porlasztóval mindhárom nyomáson, a perdítőelemes nyomásporlasztóval viszont 10 és 16 baron nyomáson 60, valamint 90 és 78 °C-on végeztem el. A következő ábrákon látható a cseppek axiális (U) és radiális (V) sebessége, valamint a Sauter középátmérőjük (SMD) a porlasztó szájától 10 és 20 mm távolságra. Mivel az áramlás a középtengelyre szimmetrikus, így csak a tengelytől kifelé ábrázoltam az értékeket.



4.4. ábra. Axiális (U) és radiális (V) sebességek 10 (bal oldalon) és 20 mm (jobb oldalon) távolságban a segédközegees porlasztó szájától



4.5. ábra. Sauter középátmérő (SMD) 10 (bal oldalon) és 20 mm (jobb oldalon) távolságban a segédközegees porlasztó szájától

A méréseket először a segédközegees porlasztóval végeztem el. Az ábrákból kitűnik, hogy a cseppek a nyomás növekedésével a porlasztó tengelyétől távolodnak, vagyis a porlasztási szög egyre nagyobb lesz. A fősugár sebessége is nő, viszont annak átmérője – a sebességeloszlásból ítélve – enyhén csökken (4.4. ábra). Az a térrész, ahol cseppek előfordulhatnak, a nyomás növelésével jelentősen beszűkül; a legkisebb nyomáson közvetlenül a porlasztó alatt is lehetett cseppeket detektálni. Ez leginkább a Sauter középátmérőt (SMD) ábrázoló diagramokon látszik (4.5. ábra). A fősugártól beljebb és kintebb a cseppek sebessége alacsonyabb.

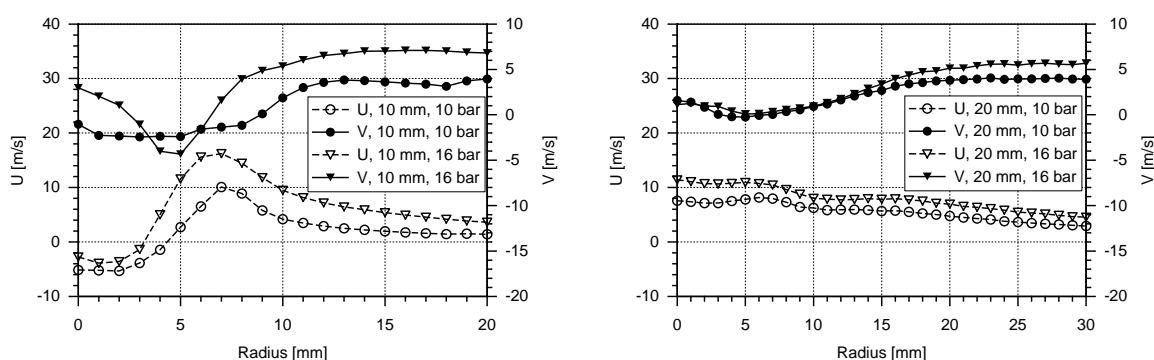
A 10 mm-es mérési síkon a fősugár $r=12$ és 22 mm között helyezkedik el. Itt az axiális és a radiális sebességek gyakorlatilag megegyeznek, nyomás növekedésével rendre 28, 50 és 90 m/s. A második mérési síkra a sugár kitágul, itt már $r=20$ és 34 mm között helyezkedik el. A sebességek is feleződnek, maximális értékük rendre: 14, 28, 48 m/s. Az axiális és a radiális sebességek nagysága továbbra is megegyezik. A porlasztó 100° -os, névleges porlasztási szögével szemben 90° -os porlasztási szög alakul ki.

A porlasztó szájától 20 mm-re a fősugárban a cseppek sebességének a változása elhanyagolható. Azon túl viszont megnő a sebesség. Ennek oka, hogy eddigre a sugár már felnyílik, és a mérés értékeléséhez megfelelő számú csepp található a külső tartományban, távolabb a sugártól.

A cseppek Sauter középátmérője (SMD) a segédközeg nyomásának emelésével csökken, a porlasztás egyre finomabbá válik. 10 mm-re a porlasztótól 2,5 baros nitrogénnyomásnál a $D_{32}=60 \mu\text{m}$ -ról a sugár közepéig lecsökken $30 \mu\text{m}$ -ig, majd innen távolodva a porlasztó tengelyétől $95 \mu\text{m}$ -ig emelkedik. A PDA mérés jól mutatja a fényképen is látható jelenséget, hogy a nagyobb cseppek a sugártól kifelé vannak jelen.

Ahogy nő a nyomás, úgy nő a fősugárban kívüli cseppek Sauter középátmérője. Ennek oka, hogy nagyobb nyomás esetén a sugár összetartóbb, csak a nagy tehetetlenséggel rendelkező nagyobb cseppek térnek el a főiránytól. A fősugártól kifelé 10 mm-es mérési síkon az 5 és a 10 baros nitrogénnyomásnál a cseppek Sauter középátmérője megegyezik. A tengelynél az átmérő $p_{N_2}=5$ bar-nál $100 \mu\text{m}$ $p_{N_2}=10$ bar-nál $135 \mu\text{m}$.

20 mm-re a porlasztótól a másodlagos porlasztás miatt már több, gömb alakú cseppet sikerült megmérni. A távolabbi mérési síkon a porlasztó tengelyétől a sugár közepéig, illetve attól kifelé a cseppátmérő csökken, a nyomástól függően különböző mértékben. A cseppek Sauter középátmérője a fősugárban viszont nem változott (4.5. ábra).



4.6. ábra. Axiális (U) és radiális (V) sebességek 10 (bal oldalon) és 20 mm (jobb oldalon) távolságban a nyomásporlasztó szájától

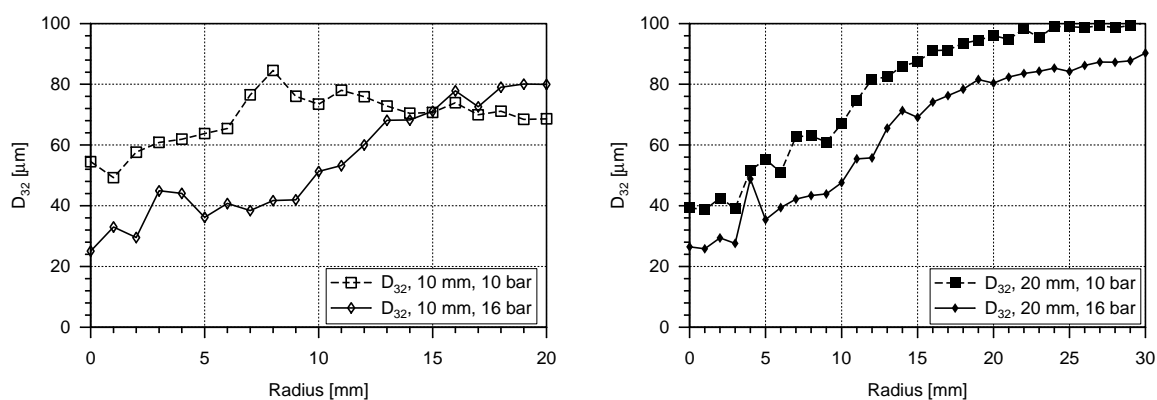
A perdítőelemes nyomásporlasztóval végzett mérések alapján a porlasztó szájától 10 mm-re a tengelyen negatív axiális sebességek is fellépnek (4.6. ábra, bal oldalt). Ez a tartomány az alacsonyabb nyomáson egészen 4,5 mm-ig, a magasabbon 3,5 mm-ig tart. A maximális axiális sebesség a sugár főtartományában található. Ennek mértéke 10 illetve 16 m/s, mindkét nyomásnál 7 mm-re a tengelytől. A maximum elérése után a cseppek sebessége a sugár tartományában

gyorsan, majd azon kívül lassan csökken. Nagyobb nyomáson a teljes tartományban magasabb az axiális sebesség. A radiális sebességek is a negatív tartományban kezdődnek, majd a fő sugárnál pozitívak lesznek. Alacsonyabb nyomáson 10 mm-re a porlasztótól még jelentős aprózódás játszódik le, a cseppek iránya ezért sokszor a tengely felé mutató.

20 mm-re a porlasztó szájától a cseppek axiális sebessége a tengelynél a legnagyobb, ettől sugárirányba távolodva monoton csökken. A folyadéksugár kitágult, az áramlás egyenletesebbé válik. Radiális sebességben ismét felfedezhető egy kicsiny negatív tartomány (-0,25 m/s).

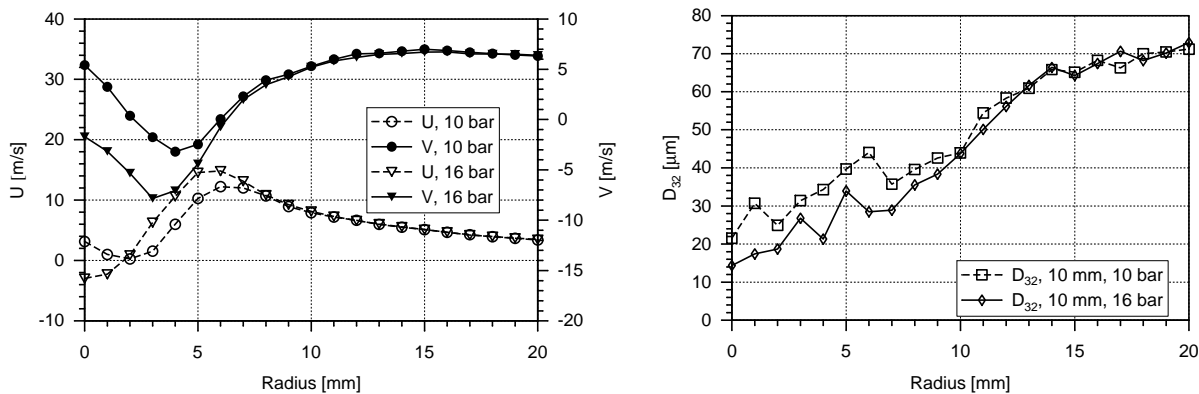
Megállapítható, hogy a visszaáramlási zóna a 20 mm-es mérési síkban már nincs jelen, hiszen az axiális sebességek mindenütt pozitívak, azaz a porlasztótól távolodnak a cseppek. A negatív radiális sebesség adódhat a cseppek irányváltásából, a visszaáramlási zóna irányába, illetve a folyadékfilm aprózódásakor is kaphatnak a tengely felé mutató sebességet.

A Sauter középátmérőket szemlélve érdekes tényre figyelhetünk fel (4.7. ábra). 10 mm-re a porlasztótól az átmérő 10 baros porlasztás esetében nagy egyenetlenséget mutat, ami a cseppképződés közelségére, még nem végbement másodlagos porlasztásra utal. Más képet mutat az ábra 16 baros porlasztási nyomásnál. Ilyenkor a cseppek átmérője sugárirányban haladva folyamatosan nő, 25-ről 80 μm -re. 20 mm-re a porlasztótól mindkét nyomás esetében folyamatosan nő az átmérő. A tengelynél az átmérő kisebb, $r=20$ mm-től nagyobb, mint a 10 mm-es mérésnél volt tapasztalható. Ennek oka, hogy a nagyon kis cseppeket az elszívás eltéríti az eredeti röppályájukról, míg a nagyok tudják azt folytatni. Így a nagyobb cseppek a porlasztmány szélén, míg a kisebbek a közepén csoportosulnak.



4.7. ábra. Sauter középátmérő (SMD) 10 mm (bal oldalon) és 20 mm (jobb oldalon) távolságban a nyomásporlasztó szájától

Ha a berendezéssel elérhető maximális hőmérséklet mellett nézzük a porlasztást (4.8. ábra), akkor azt tapasztaljuk, hogy a különböző nyomás–hőmérsékletpárokkal létrehozott cseppek átmérőjének eltérése kicsi, elhanyagolható. A főszugár helyén tapasztalható eltérés, ennek oka az lehet, hogy a cseppképződés még nem játszódott le teljesen, az áramlás még nem kialakult. Látható az is, hogy a cseppek tengelynél mért átmérője mintegy fele a 60 °C-on mérthez képest. A sebességek változása viszont elhanyagolható. Érdeemes megfigyelni, hogy 10 bar és 90 °C esetében a radiális sebességnél is látható egy kifejezett sebességcsökkenés majd növekedés.



4.8. ábra. 16 bar 78 °C-nál (bal oldalon) és 10 bar 90 °C (jobb oldalon) mért axiális (U) és radiális (V) sebességek és a Sauter középátmérő 10 mm távolságban a nyomásporlasztó szájától

Összefoglalás

A mérésekkel megállapítást nyert, hogy a repceolaj perdítőelemes nyomásporlasztóval is porlasztható. A cseppek mérete függ a porlasztási nyomástól és a hőmérséklettől; a 6 barral alacsonyabb nyomást a 12 °C-kal magasabb hőmérséklet kiegyenlíti.

Megállapítható továbbá, hogy a nyomásporlasztóval létrehozható ugyanolyan cseppméretű porlasztmány, mint a bonyolultabb felépítésű, segédközeget igénylő porlasztóval, így a továbbiakban a perdítőelemesre fordítok figyelmet.

4.2. Akusztikusan öngerjesztő lángok vizsgálata

A külső keverésű segédközeges porlasztóban a film filinterítő ajakra történő felvitelét az előző méréseknél használt perdítőelemes nyomásporlasztóval végeztem. A porlasztó szája és a filinterítő ajak távolsága 15 mm.

Mivel az oszcilláló lángok vizsgálatánál mind a repceolaj, mind a kerozinnal végzett kísérleteknél a beállított üzemiállapotok közel vannak egymáshoz, így a tüzelőtérben levő levegő nyomása, hőmérséklete, sebessége hasonló, ezáltal a viszkozitása és a sűrűsége is megegyezik, a porlasztás minőségére a levegő hatása elhanyagolható (lásd 2.4.2. fejezet).

A méréseket atmoszférikus körülmények között végeztem el, az így kapott eredmények numerikus módszerekkel valós körülményekre áttranszformálhatók [80].

Herman [92] megállapításának megfelelően, más reakciókinetikájú tüzelőanyag alkalmazásakor (kerozin helyett repceolaj) az oszcilláció megszűnt (kerozinüzemkor alkalmazott előmelegítési hőmérsékletek, és tömegáramok esetén nem oszcillált a repceolajláng). Azonban ha az égési levegő előmelegítésével több energiát kapott a rendszer, akkor ismét instabillá vált a láng.

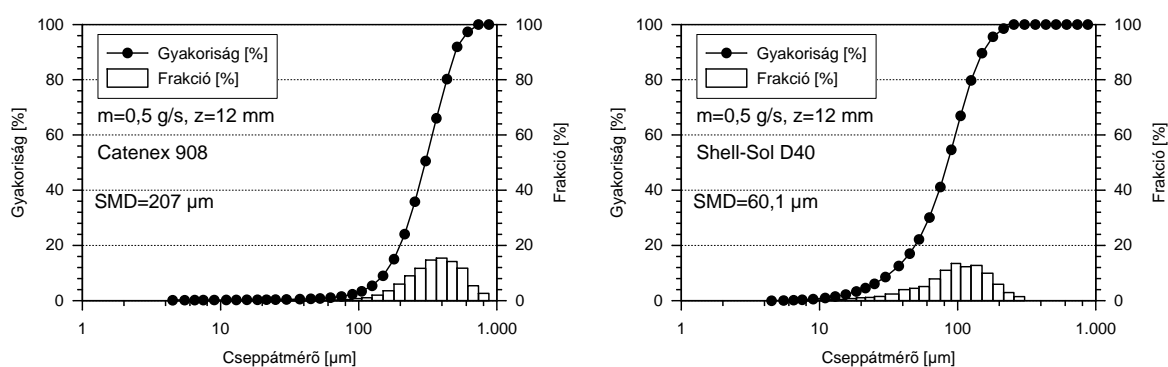
4.2.1. Kerozin és repceolaj porlasztásának összehasonlítása

Miután megállapítást nyert, hogy a repceolaj perdítőelemes nyomásporlasztóban porlasztható, összehasonlítottam a porlasztmány Sauter középátmérőjét a kerozin porlasztásakor keletkezővel. Ez azért szükséges, mert az égési levegő tüzelőanyagcseppet ragadhat el a filinterítő ajak és a perdítőelemes porlasztó közötti térben, ami az oszcillációt befolyásolja. Ehhez PMS-t alkalmaztam.

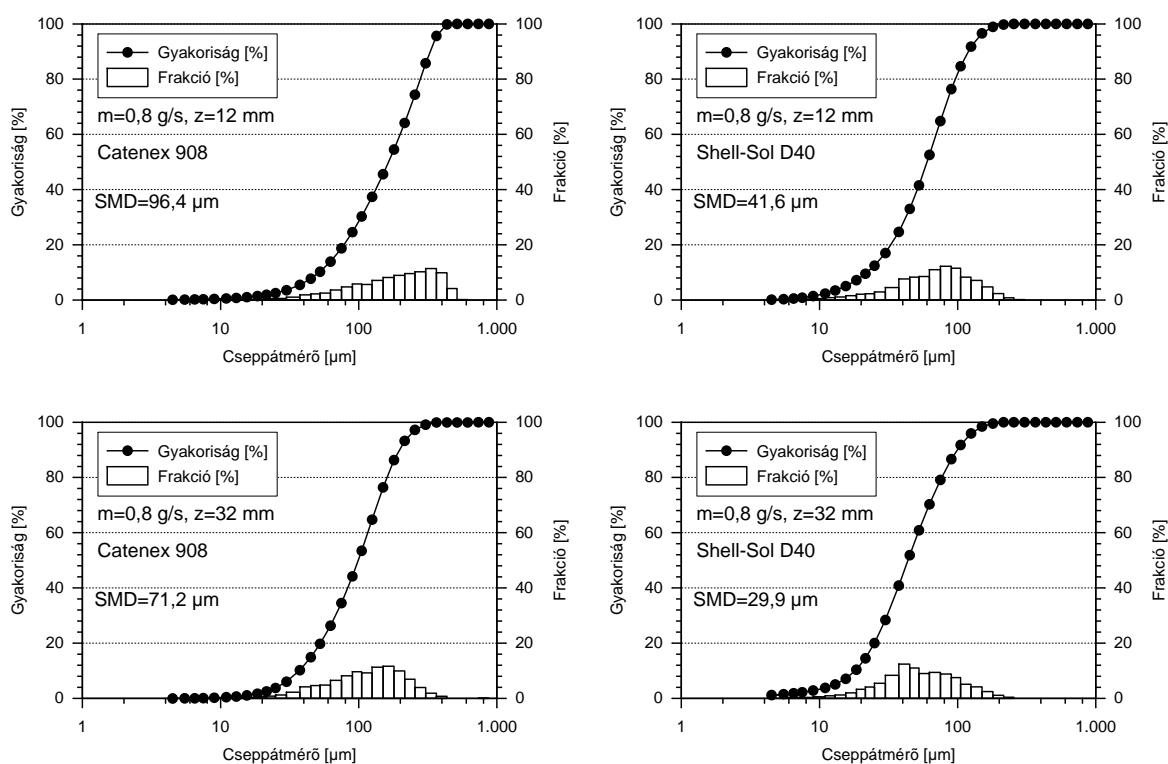
Az ábrákon látható, hogy 0,5 g/s-os tömegáram esetén (4.9. ábra) a két tüzelőanyaggal létrehozott cseppek átmérője közötti különbség majdnem négyszeres (Catenex 908 esetében az $SMD = 207 \mu\text{m}$, Shell-Sol D40-nél $SMD = 61 \mu\text{m}$). Ha növeljük a tüzelőanyag-áramot 0,8 g/s-ra (4.10. ábra), akkor megfigyelhető, hogy a repceolajcseppek körülbelül kétszer-háromszor akkora átmérőjűek, mint a kerozincseppek, tehát a különbség csökkent. Megfigyelhető az is, hogy távolabb a porlasztótól a cseppek mérete kisebb. Mivel ennél a mérésnél elhanyagolható a tüzelőanyag párolgásából adódó cseppméret-változás, így ennek oka egyértelműen a másodlagos cseppprózódás. Ennek nagysága mindkét esetben körülbelül 30%. Ennek oka, hogy a perdítőelemes nyomásporlasztóval előállított cseppek mérete függ a tömegáramtól, a viszkozitástól; a kisebb tömegáramnál jobban látszik az eltérő viszkozitásból adódó különbség.

A kisebb tömegáramú mérés esetén a porlasztási kép kevesebb frakciót tartalmaz. A legnagyobb frakció kerozin esetén 16,15% ($400 \mu\text{m}$ -nél), repceolajnál pedig 15,45% ($90 \mu\text{m}$ -nél).

Az eloszlásból látható, hogy kerozinnál a cseppek kisebb átmérő felé tolódnak el; a 12 mm-en végrehajtott mérésnél a legnagyobb frakció a cseppek 12,2%-át tartalmazza ($75 \mu\text{m}$ -nél), illetve a 32 mm-re a porlasztótól 12,45% tartozik ide ($37,5 \mu\text{m}$ -nél). Repceolajnál inkább a



4.9. ábra. PMS mérések eredményei kerozin (jobb oldalon) és repceolaj (bal oldalon) helyettesítő anyagaival, 12 mm-re a porlasztótól, 0,5 g/s tüzelőanyag-árammal



4.10. ábra. PMS mérések eredményei kerozin (jobb oldalon) és repceolaj (bal oldalon) helyettesítő anyagaival, 12 és 32 mm-re a porlasztótól, 0,8 g/s tüzelőanyag-árammal

nagyobb átmérő felé tolódik el az eloszlás: 12 mm-en $305 \mu\text{m}$ 11,4% illetve 32 mm-en $150 \mu\text{m}$ 11,6%. Ennek oka lehet a korábbi mérések során már megfigyelt jelenség, hogy a repceolajnál a másodlagos cseppaprózódás viszonylag nagy teret igényel, így előfordulhat, hogy a mérési tartományban jelenlevő nagy folyadékszegmensek megnövelik az SMD-t. Ezt támasztja alá az is, hogy a repceolaj helyettesítő anyagánál a 12 mm-es mérési síkon, a frakciók mérete lassan növekszik, majd hirtelen lecsökken. Ennek oka, hogy túl sok nagy csepp van jelen a mérési tartományban, és az érzékelő telítődik.

Ha a PMS mérési eredményeit összevetjük a PDA eredményekkel, akkor azt tapasztaljuk, hogy a teljes sugár Sauter középátmérője a porlasztóhoz közelebbi mérésnél viszonylag nagy eltérést mutat. Ennek oka, hogy 10 mm-re a kilépéstől a porlasztás még nem játszódott le teljesen, sok a nem gömb alakú csepp, amiket a PDA nem képes kiértékelni. A PMS viszont egy 1 cm átmérőjű lézersugáron áthaladó cseppek átmérőjét figyeli, így előfordulhat az is, hogy egy folyadékszegmens még a mérési tartományban gömb alakú és értékelhető lesz. Másrészt a PDA mérések nem veszik figyelembe az adott mérési ponton áthaladó cseppek időegység alatti számát (a mérés vagy 100.000 detektált cseppig, vagy 30 másodpercig tartott).

A távolabbi mérési síkon az eredmények nagyságrendileg megegyeznek.

A PMS mérés megmutatta, hogy a külső keverésű segédközeges porlasztóba (Airblast porlasztóba) beépített primer porlasztó kerozin esetében jelentősen kisebb cseppeket hoz létre, amelyeket a levegő könnyebben magával ragadhat, viszont a repceolaj nagyobb cseppeit kevésbé tudja a levegőáramlás egyenetlensége befolyásolni.

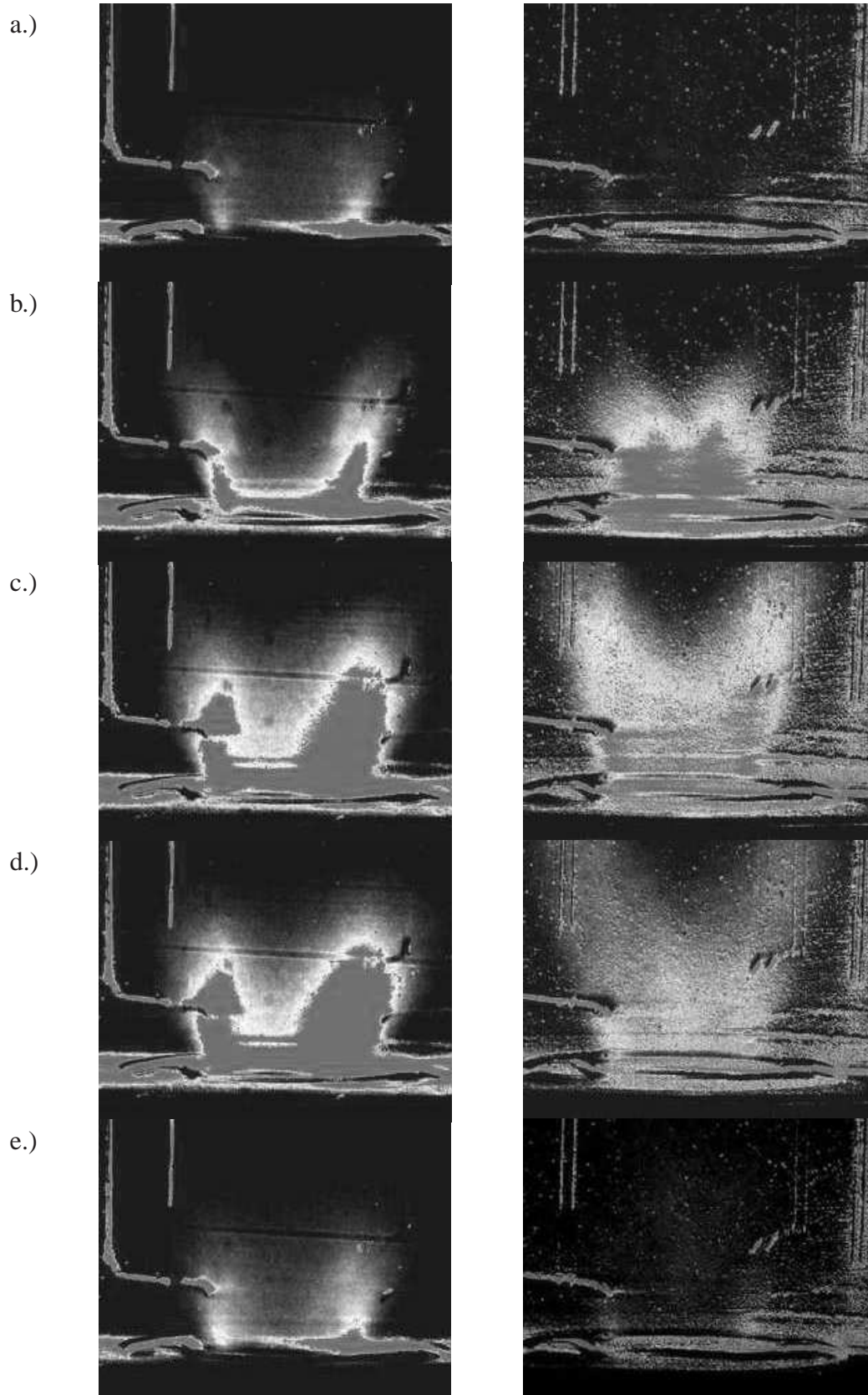
4.2.2. Porlasztmány terjedésének vizsgálata lézersík módszerrel

A lézersík módszerrel végzett vizsgálatok célja a cseppek helyzetének, mennyiségének fázis-felbontott feltérképezése. Az ábrán (4.11. ábra) lézersík módszerrel készített képek láthatók az oszcillálás különböző fázisaiban, az 1. jelű mérési beállításnál (3.2. táblázat). A képen látható kivágás 60 mm hosszú és 45 mm széles, az áramlási irány lentről felfelé van.



4.11. ábra. Porlasztmány fejlődése az oszcillálás három különböző pillanatában

Az első képen egyáltalán nem, a harmadikon maximális számú csepp látható. Az oszcillálás folyamán tehát vannak olyan időpillanatok, amikor nem érkezik folyékony tüzelőanyag a reakciózónába, míg máskor a globális légfelcsapás-tényezőktől eltérő égési feltételek jelennek meg. Jól megfigyelhető a perdületes légáramlások által megadott sugárirány, azonban néhány csepp ezen vonulaton kívül is látható.



4.12. ábra. Lézersík módszerrel felvett gyakoriságábrák a 3. (bal oszlop) és az 1. (jobb oszlop) mérési beállításnál, különböző fázisoknál (a-e)

Ahhoz, hogy a repceolaj és a kerozin porlasztását valóban össze lehessen hasonlítani, nem elég néhány felvételt készíteni. A lézersík mérési módszerről szóló fejezetnek megfelelően (B.3. fejezet) fázisonként 100 darab kép készült, ezekből pedig a cseppek gyakoriságát lehet meghatározni (lásd 4.12. ábra). Az ábrák alján jól kivehető a porlasztó szája. A háttérben látható függőleges csíkozás az égőtér faláról származó reflexió.

A két tüzelőanyagnál a fázisszögek különbözőek, két egymást követő ábra közötti eltérés mindkét esetben 72° .

100 kép átlagolásából látható, hogy kerozin esetében van olyan része a periódusnak, amikor nincsen jelen csepp (4.12. a. és e. ábrák). Az átlagolt ábrákon jól megfigyelhető, hogy a periódikus porlasztás lassan felépül, majd gyorsan abbamarad. A felépülés folyamán a porlasztóhoz közel sok csepp található a szimmetriatengelyen is (c. és d. ábrák).

Repceolaj esetén a cseppek gyakoriságának eloszlása más. Ott nincs olyan része a periódusnak, amikor nem láthatók cseppek. A porlasztmány a tengelyre enyhén asszimmetrikusan helyezkedik el, de iránya a filmterítő ajak által egyértelműen meghatározott. A porlasztás folyamán a sugárban az átlagot adó képek 90%-án volt csepp, így ott a kiértékelésnél telítődés mutatkozik, ennek hatása elnyomja azokat a helyeket, ahol kevesebb csepp van jelen. Ez az oka annak is, hogy a repceolaj mérésnél a háttér tükröződése kevésbé látható.

4.2.3. Porlasztmány terjedésének vizsgálata PIV-vel

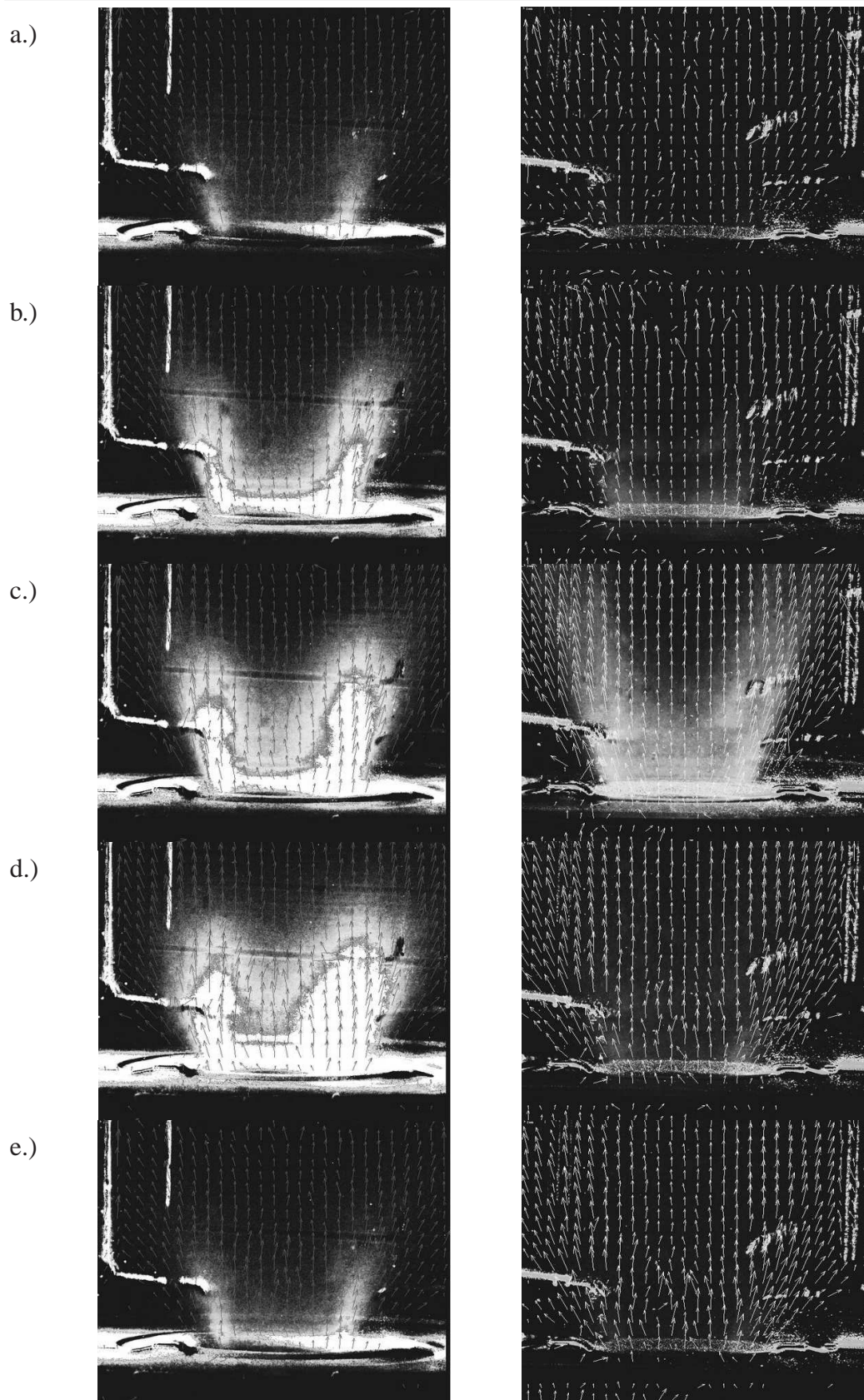
A PIV mérés eredményei az alábbi (4.13. ábra) ábrán láthatók. A kiválasztott képek fázisszögei megegyeznek a lézersík módszerrel végzett vizsgálatoknál bemutatottakkal.

Az ábrákon a nyilak a cseppek sebességének az irányát, a fehérség pedig a 100 képből számolt gyakoriságot jelenti. Az áramlási irány letről felfele van. A képeken bal illetve jobb oldalon az égéstérről érkező reflexiók, alul pedig a porlasztó szája látható.

A nyilak mutatják, hogy az oszcillálás kezdeti fázisában a cseppek áramlási iránya nem definiált, nem egységes. Az áramlási irány a porlasztó tengelyénél nagyjából tengelyirányú, szélénél a perdületes áramlás által definiált irányban attól eltérő. A porlasztótól távolodva azonban az áramlás egyre inkább sugárirányú lesz. Ahogy a spray felépül, úgy lesz egyre rendezettebb az áramlás, egyre nagyobb a cseppek sebessége. Kerozin esetében a cseppek maximális sebessége 70 m/s körül van, repceolajnál viszont 90 m/s ez az érték. A maximális cseppszám után a csökkenés fázisában ismét rendezetlenebbé válik az áramlás, csökken a cseppek sebessége. Megfigyelhető az is, hogy a cseppek sebességének iránya egyre inkább axiálissá válik, ahogy leépül a spray.

Kerozin esetén a porlasztó tengelyén több csepp helyezkedik el, hiszen a kisebb kerozincseppek jobban képesek követni a levegő áramlását, és az oszcillálás kiáramló fázisában egyszerre több csepp van jelen.

Összességében viszont kevesebb csepp látható kerozinüzem esetén. Ennek oka a kerozin jobb párolgási tulajdonságaiban keresendő. Mivel a felvételeken nem sikerült visszaáramlási zónát azonosítani, így részletesebb vizsgálatokat végeztem, valamint a repceolaj párolgási tulajdonságait is megvizsgáltam.

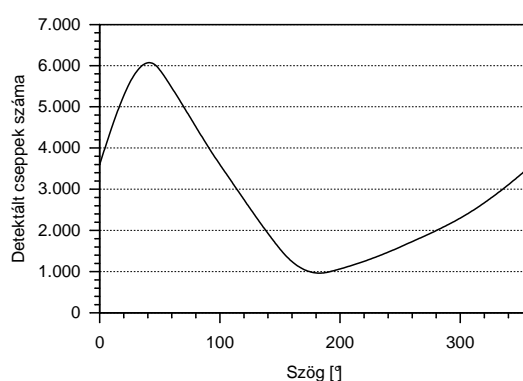


4.13. ábra. PIV méréssel felvett sebességmező a 3. (bal oszlop) és az 1. (jobb oszlop) mérési beállításnál, különböző fázisoknál (a-e)

4.2.4. Porlasztmány terjedésének vizsgálata PDA-val

A porlasztmány terjedésének a vizsgálata során a másodpercenként detektált cseppek száma maximálisan elérte a 20000-et (adatráta: 2 kHz). Értékelhető mérést csak azokban a tartományokban lehet végezni, ahol ez az érték meghaladja a 0,1 kHz-et. Ez főleg az égőtér szélén jelentett gondot, illetve a porlasztótól legtávolabb eső negyedik mérési síknál.

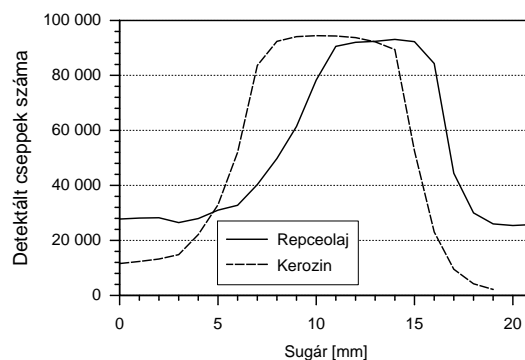
Az egyes pontok távolsága 1 mm, az egyes mérési síkok távolsága pedig 15 mm volt. Az első síkot a porlasztó szájától 9 mm-re vettem fel, ezzel biztosítható volt, hogy a mérési térfogatba már lejátszódott primer porlasztású cseppek kerüljenek. A mérés folyamán az oszcilláció 20 db 18 °-os tartományra (fázisra) osztottam fel. A 4.14. ábra mutatja az oszcilláció során a detektált cseppek számát, repceolaj esetén, az első mérési síkban, $r=10$ mm-nél.



4.14. ábra. Detektált repceolajcseppek száma az első mérési síkban, $r=10$ mm-nél

A mérés folyamán az 1. jelű porlasztóval (3.3. ábra, 31. oldal), kerozin tüzelőanyaggal csak három síkban lehetett mérni, mert a 4.-ben az adatráta már nem érte el a 0,1 kHz-et, így nem lehetett reprezentatív eredményt várni. A 2. jelű porlasztónál viszont ez a probléma nem lépett fel, ott a láng a porlasztó száján lévő szűkület jobb elhelyezkedése miatt hosszabb volt, így az utolsó mérési síkban is megfelelő mennyiségű csepp volt detektálható. Repceolajjal ez a probléma nem jelentkezett, mert az a kerozinhoz képest sokkal lassabban párolog, még akkor is, ha figyelembe vesszük repceolaj esetén az égési levegő 100-200 °C-kal magasabb hőmérsékletét is. Radiális irányban a mérhető terület a két tüzelőanyagnál gyakorlatilag megegyezik. Kerozin-nál 30 mm-nél, míg repceolajnál 31 mm-nél csökkent az adatráta 0,1 kHz alá (a tüzelőtér sugara 50 mm volt), ez hibahatáron belül van (4.15. ábra). A mérés 100000 detektált cseppig, vagy 30 másodpercig tart.

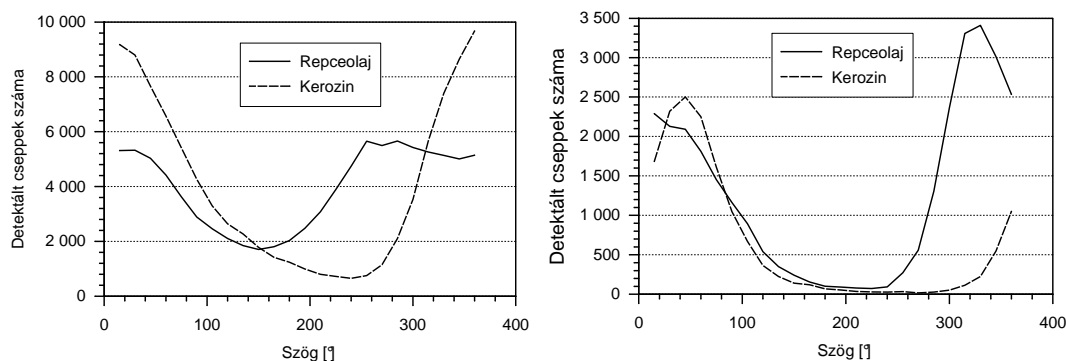
A következőkben a 3. és 1. mérési beállítással (3.2. táblázat a 37. oldalon) kapott eredményeket ismertetem. Az ábrákon az áramlási irány jobbról balra van, a vízszintes tengely megegyezik a porlasztó tengelyével. A következőkben bemutatott ábrák ugyanabban a fázisban készültek, mint a lézersík módszernél és a PIV-nél már látottak.



4.15. ábra. Detektált cseppek száma az első mérési síkban

Porlasztmány sűrűsége

A 4.21. ábrán (60. oldalon) a PDA-mérés során detektált cseppek száma látható, fázisfelbontva. Ugyanúgy, mint az előző mérési módszereknél, kerozin esetében az oszcillálás leggyengébb fázisában szinte nincsenek jelen cseppek (ekkor a minimálisan észlelt cseppek száma 500 alatt van), míg repceolajnál két kis kiterjedésű sugár látszik (minimálisan észlelt cseppek száma 1500 alatt van). A legerőteljesebb fázisban (4.21. e. ábra) viszont a cseppek száma 11-12 ezret is eléri.



4.16. ábra. Detektált cseppek száma az első (balra) és a harmadik (jobbra) mérési síkban, a főszögben

Kerozin esetében a porlasztó szájától távolodva egyre kevesebb csepp látható, míg repceolajnál a porlasztó szájától mintegy 25 mm-re van a detektált cseppek számának a maximuma. Ez a repceolajcseppek másodlagos aprózódásának, illetve annak tudható be, hogy a porlasztó szájánál a mérés nem tartott 100000 detektált cseppig, mert a műszer nem tudta ezt az adatmennyiséget a szükséges sebességgel feldolgozni, telítődött a memóriája, így körülbelül 60000 értékelhető csepp után leállt a mérés (lásd 4.16. ábra). Amint ez az ábrán is látszik, kerozin esetében a detektált cseppek száma a főszögben – bizonyos fázisszögben – eléri a 10000-et, míg repceolajnál ez az érték 6000 alatt marad. Feltűnő viszont, hogy 240 °-tól a következő periódus elejéig az érték számottevően nem változik. Ez azt jelenti, hogy a repceolajüzem első és második mérési síkjában a mérési eredmények nem ugyanakkora statisztikai adatmennyiségből kerülnek meghatározásra, mint a többi mérés esetén. Ezért van az, hogy repceolaj esetén PDA

mérés detektált csepp eredményeit tekintve más porlasztási képet látunk, mint a lézersík és PIV méréseknél (4.21., valamint 4.12. és 4.13. ábrák).

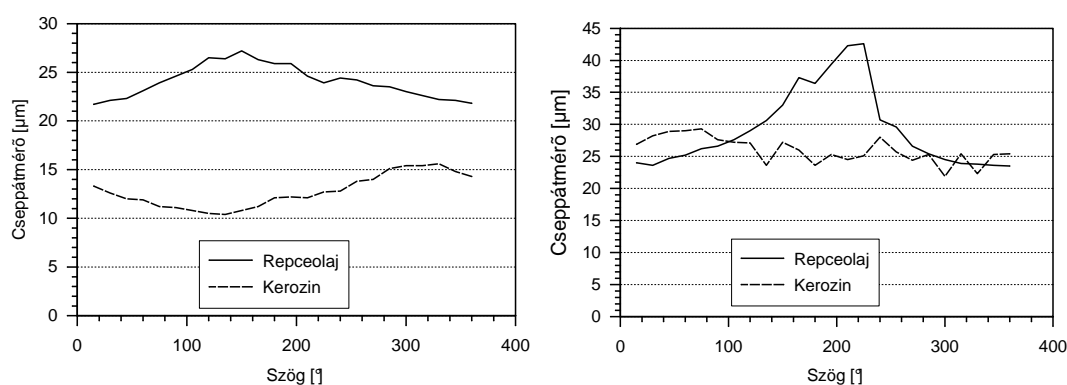
A harmadik mérési síkban, szintén a fősugárban végzett méréseknél azonban már jól látszik, hogy a repceolaj-cseppek vannak többségben, majdnem a teljes perióduson át. Megfigyelhető az is, hogy ekkorra a kerozin esetén a periódus nagy részén (120° és 320° között) alig van jelen csepp.

Amikor kerozinüzem esetén nincs csepp, akkor a filmterítő ajkon megszakad az áramlás. Ez a nagyobb felületi feszültséggel és viszkozitással rendelkező repceolajnál már nem történik meg.

Porlasztmány közepes átmérője

Az ábrákon látszik (4.17., 4.18., illetve 4.22. ábra a 61. oldalon), hogy a cseppméretek átlaga a porlasztóhoz közel kisebb, mint attól távolodva, valamint az égőtér tengelyvonalában is a kisebb cseppek helyezkednek el. Ennek az az oka, hogy a porlasztó sok kicsi és kevés nagy cseppeket hoz létre, a kicsik az égőtér elején az átlagos cseppméretet csökkentik, majd az útjuk folyamán elpárolognak, elégnak. A nagyok is veszítenek átmérőjükből, de miután az átlagot a kis cseppek már nem csökkentik, így az átlagos cseppméret megnő. Ez különösen jól látszik repceolajüzem esetén, amikor a porlasztótól távol $40\ \mu\text{m}$ átmérőjű cseppek is találhatóak.

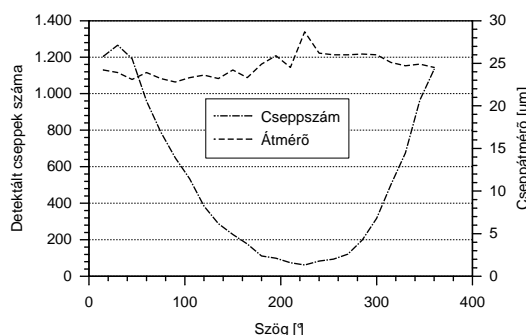
Az első síkban végzett mérések alapján Müller megállapításával [94] összehangban elmondható, hogy a keletkezett cseppek mérete kerozin- és repceolajüzem esetén is $10\text{-}16$ illetve $22\text{-}26\ \mu\text{m}$, a fázis függvényében (4.17. ábra – a detektált cseppek száma korábban volt látható – 4.16. ábra). Mivel a repceolaj a jobban előmelegített levegő miatt magasabb hőmérsékletű filmterítő ajakra érkezik, így jobban fel is melegszik, ezáltal a viszkozitása és a felületi feszültsége megközelíti a kerozinét. A beporlasztáskor a repceolaj hőmérséklete mintegy $10\ ^\circ\text{C}$ -kal volt magasabb a kerozinénál.



4.17. ábra. Közepes cseppátmérő az első (balra) és a harmadik (jobbra) mérési síkban, a fősugárban

A cseppméret jelentős növekedése csak a minimális cseppszámú fázisban figyelhető meg a hátsó régióban, repceolajüzem esetén.

Megállapítható, hogy az átlagos cseppméret kerozinüzem esetén, az utolsó mérési síkban nem függ a fázisbeli helyzettől. Addigra a kis cseppek már elégnek, csak a kezdetben is nagy cseppek vannak jelen. Ezt a tényt támasztja alá az is, hogy a 4. mérési síkban, repceolajüzem esetén sem sikerült kimutatni a cseppméret fázisfüggését (4.18. ábra).



4.18. ábra. Közepes cseppátmérő és a detektált cseppek száma a negyedik mérési síkban, a fősugárban, repceolajüzem esetén

Megállapítható továbbá, hogy a kisebb cseppek a tengely vonalában helyezkednek el, behatolási mélységük repceolajüzem esetén nagyobb.

Porlasztmány axiális sebessége

Az axiális sebességi ábrák (4.23. ábra a 62. oldalon) üzemállapota, fázisa, ábrázolás módja és sorrendje megegyezik a cseppszámot bemutatott ábráknál említettekkel.

A PIV méréssel ellentétben a várt visszaáramlás PDA-val kimutatható. Repceolaj esetében a tengely környékén egy állandó visszaáramlási zóna látható, bár kevés csepp jelenlétében a sebesség és a kiterjedés is a 0-hoz közelít (4.23. a. és e. ábra). Ahogy nő a cseppek száma, úgy nő a visszaáramlási zóna erőssége és mélysége is. A cseppek számának a növekedésével szélesedik a nagysebességű áramlás tartománya (4.23. d. ábra). A nagyobb sebességű (50 m/s) sugár 30-40 mm-ig behatol. A kisebb, de gyors cseppek eddigre elpárolognak, elégnek. A PIV méréseknél és a PDA-cseppgyakoróság-kiértékelésnél megfigyelt totalitás közelében levő nagy csepthalmaznak az axiális sebesség alakulására csekély a hatása. Annyi látható, hogy a maximális cseppmennyiségnél felvett képnél a sebességeloszlás enyhe kiszélesedést mutat, valamint ennek a közepén egy kis felhő található, amiben a sebesség a 60 m/s-ot is meghaladja. Ugyanakkor látható, hogy a porlasztó felől érkező cseppek is ezzel a sebességgel haladnak. Ennél az állapotnál a legnagyobb a visszaáramlási zóna sebessége és kiterjedése is (4.23. d. ábra).

Kerozin esetében az első és utolsó képeken is szépen kialakult, irányított áramlást láthatunk, holott abban a fázisban a detektált cseppek száma nem éri el az 500-at; tehát a levegőáramlás ebben a fázisban is elegendő erősségű ahhoz, hogy a beporlasztott cseppek áramlási irányát meghatározza. Megfigyelhető, hogy itt a maximális axiális sebesség 45 m/s körül van. Ahogy nő a cseppek száma, úgy nő az áramlás sebessége, valamint a sugár kiterjedése is. Az áramlás maximális sebessége 60 m/s körül van, ami megegyezik a repceolajnál látott értékkel. A

tengelynél itt is megfigyelhető a visszaáramlási zóna, aminek nagysága valamivel kisebb, mint repceolajüzemnél volt.

Porlasztmány tangenciális sebessége

A tangenciális sebességi ábrák (4.24. ábra a 63. oldalon) üzemállapota, fázisa, ábrázolás módja és sorrendje megegyezik a cseppszám elemzésénél említettekkel. PDA mérésekkel a radiális sebesség nem volt elemezhető, az áramlás irányára merőleges síkban nem végeztem mérést azzal a módszerrel.

Mivel a porlasztók perdítőelemei ellentétes irányú perdületet adnak az áramlásnak, így várható, hogy a cseppek a filmterítő ajaktól kiindulva ellentétes irányú tangenciális sebességgel rendelkeznek. Várhatóan ez az ellentétes irányú áramlás annál tovább kimutatható, minél erőteljesebb az axiális áramlás, és minél egyenletlenebb a cseppek kezdeti iránya, vagyis minél nagyobb a filmterítő ajakról leszakadó cseppek szóródása.

Kerozin esetében a két gyenge fázisban (4.24. a. és e. ábra) a nyíróréteg a porlasztó szája közelében alakul ki. A cseppek minimális tangenciális sebessége az első esetben a -20, az utolsóban a -24 m/s-nál is kisebb. A maximális sebesség ugyanakkora, csak ellentétes irányú. Kevés csepp jelenlétében az áramlás csak a kép tengelyénél válik ellentétes irányúvá, aminek az oka az, hogy ott a mérés elérte a porlasztó tengelyét, és ott a cseppek természetesen ellentétes tangenciális iránnyal rendelkeznek. A cseppek számának a növekedésével a pozitív és a negatív sebességtartomány folyamatosan növekszik. A negatív tartomány maximális behatolási mélysége -24 mm-nél van.

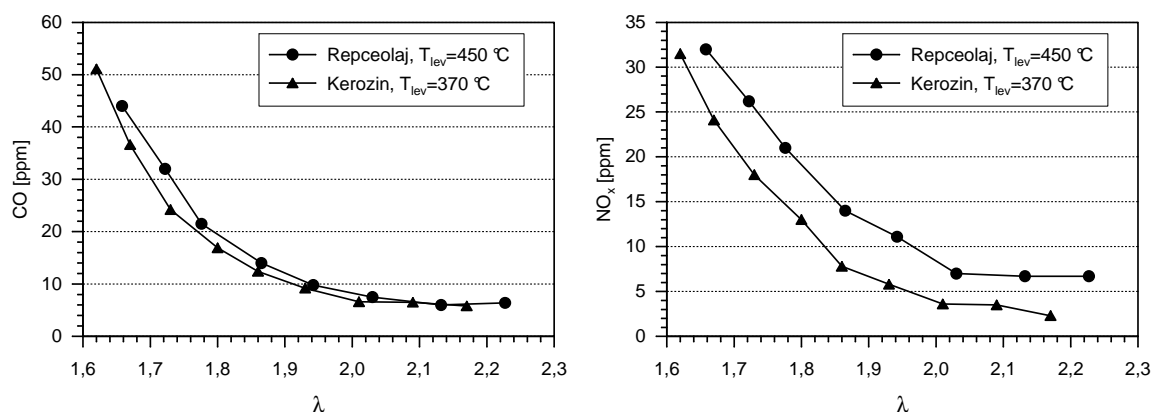
A folyadékot a perdítőelemes porlasztó a filmterítő ajak tengely felőli oldalára viszi föl, így várható lehetne, hogy a negatív tangenciális sebességű zóna lesz túlsúlyban. Azonban a perdület a cseppeket kifelé viszi, azok egyből a külső perdítőelemeken keresztül érkező levegőárammal találkoznak, csak néhány csepp marad a belső zónában.

Repceolaj esetén a mérési eredmények a kerozinéhoz hasonló oszcillációt, tangenciális sebességet mutatnak. A belső területeken elhelyezkedő negatív sebességű áramlási zóna behatolása kisebb, mint kerozin esetén volt. A maximális cseppszámú fázisban ismét megtalálható a nagysebességű tér, azonban a tangenciális sebesség esetén a különbség a legnagyobb és a legkisebb sebesség között kisebb, mint axiális sebességnél.

Repceolaj és kerozin axiális és tangenciális sebességének összehasonlításából kitűnik, hogy a nagyobb és nehezebb repceolajcseppek nem képesek annyira felvenni a levegő sebességét, mint a kerozincseppek.

Károsanyag-emisszió akusztikusan öngerjesztő lángok esetén

A két tüzelőanyaggal az emisszió összehasonlítását széles légfelesleg-tartományban elvégeztem. A mérés során a tüzelőanyag-áramot, ezáltal a légfelesleg-tényezőt változtattam, a levegőáram állandó értéken tartása mellett.



4.19. ábra. CO és NO_x emisszió akusztikusan öngerjesztő lángok esetén, a légfeslesleg-tényező függvényében

Az ábrákból látszik (4.19. ábra), hogy a kibocsátott CO mennyisége – az adott beállítások mellett – gyakorlatilag független a tüzelőanyagtól. $\lambda = 1,6$ -tól a $\lambda=2$ -ig a kibocsátott CO mennyisége folyamatosan, 0,2 g/kg_{t.a.}-ig csökken, majd a légfeslesleg további növelésével ez az érték nem változik. A kezdeti magas CO-kibocsátás oka az lehet, hogy bár a légfeslesleg-tényező globálisan nézve nagyobb egynél, a lokálisan (a porlasztás minőségéből és az oszcillálásból adódóan) akár egynél kisebb is lehet. Több levegő hozzáadásával a lokálisan dús helyeken is nő a légfeslesleg-tényező.

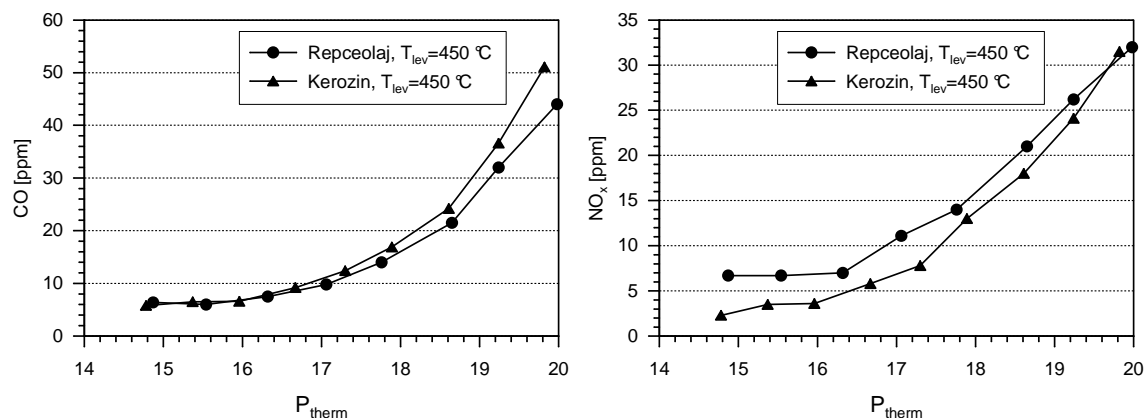
Nitrogénoxidok esetében jellegre együtt futnak a görbék. Itt is látható a csökkenés, ami – ugyanúgy, mint CO esetében – $\lambda=2$ -ig tart, majd a kibocsátott nitrogénoxidok mennyisége nagyságrendileg állandó marad. Mind a két vizsgált károsanyag esetében a repceolaj-tüzelésnél magasabb értékeket kapunk.

Ha azonban az eredményeket a bevezetett termikus teljesítmény függvényében szemléljük (4.20. ábra), akkor feltűnik, hogy ugyanazon teljesítmény esetén a repceolajnak kisebb a CO kibocsátása. Ennek oka a két tüzelőanyag eltérő fűtőértéke és levegőszükséglete, valamint az, hogy az égéshez szükséges oxigén egy része a repceolajban kötött formában jelen van. A légfeslesleg-tényező növekedése a termikus teljesítmény csökkenését vonja magával, azonban ugyanazon teljesítményhez kerozin esetében kisebb légfeslesleg-tényező tartozik.

NO_x esetén is kisebb a különbség a két tüzelőanyag emissziója között az egyes teljesítményértékeknél, de még mindig a repceolaj kibocsátása a kedvezőtlenebb.

A keletkezett CO és NO_x mennyisége minden esetben alatta marad a 7/1999. (VII 21.) KöM rendelet „Gázturbinák technológiai kibocsátási határértékei” melléklete alapján meghatározott határértékeknek (lásd a B.1. táblázat).

Az akusztikusan öngerjesztő lángok vizsgálatánál megállapítottam azt is, hogy a repceolaj gázturbina-porlasztóval felhasználható, azonban figyelembe kell venni a növényi olaj nehezebb párolgását. A nehezen párolgó folyadék égése sok esetben javítható könnyen párolgó folyadékkal való elegyítéssel. A repceolaj nem elegyíthető alacsony rendű alkoholokkal (etanol, metanol), viszont magasabb rendűekkel (propanol, butanol) igen. Ennek oka, hogy a repceolaj enyhén, az



4.20. ábra. CO és NO_x emisszió akusztikusan öngerjesztő lángok esetén, a termikus teljesítmény [kW] függvényében

egyszerű alkohol erősen poláros folyadék, így a repceolaj csak kis mértékben képes azt felvenni, szobahőmérsékleten ennek a nagysága mindössze 1-2 százalék, ami a hőmérséklet növelésével 8 tömegszázalékig növelhető. Az elegyedési hajlam hőmérséklettel való növekedésének határt szab az alkohol alacsony forráspontja. Alacsony hőmérsékleten a két anyag emulziót képez, a szétválás gyorsasága nagymértékben függ a repceolajban lévő alkohol cseppek nagyságától; az emulzió stabilitását nagymértékben csökkenti a jelenlevő víz.

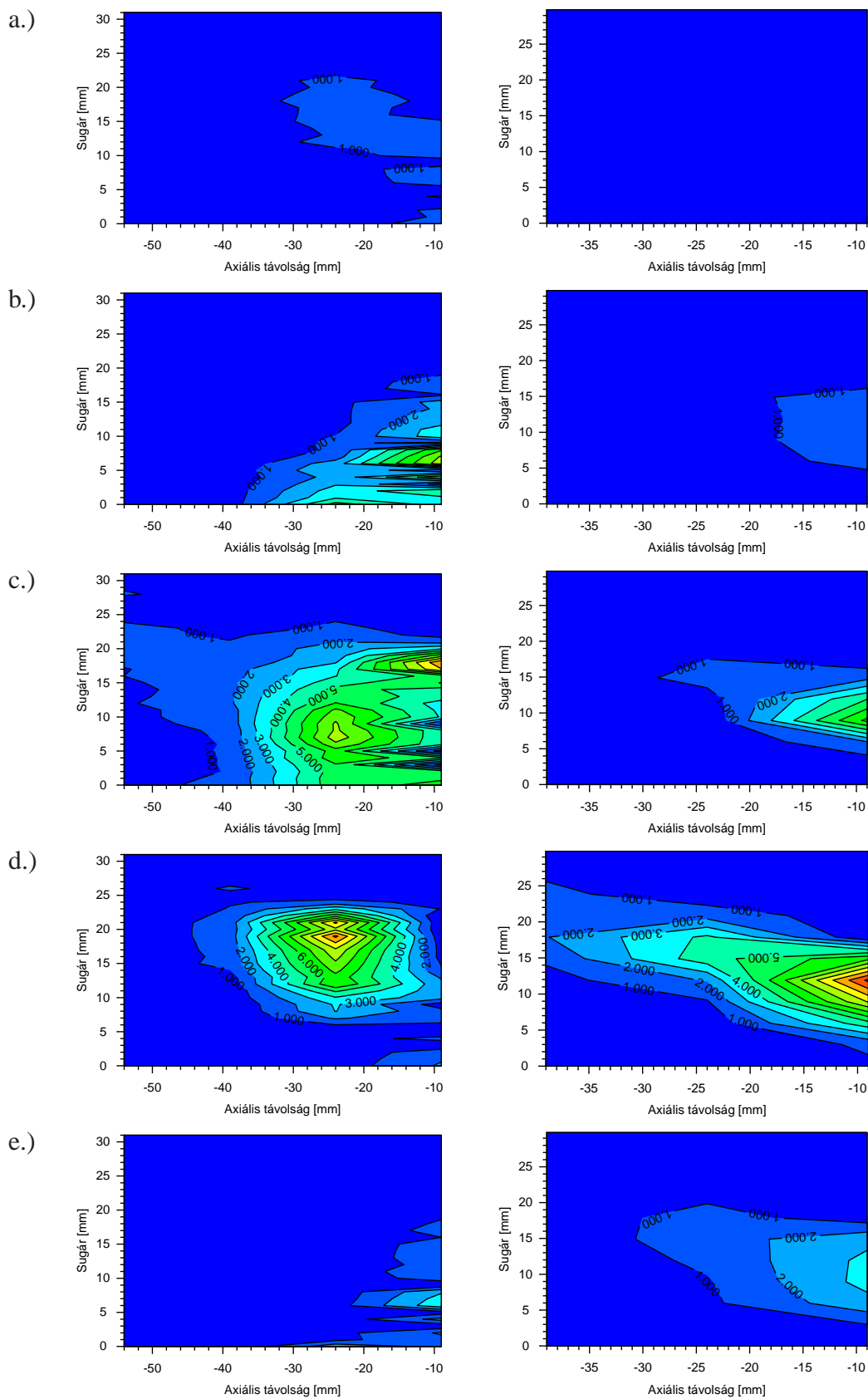
Összefoglalás

Lézersík módszerrel és PDA-val kimutattam, hogy az oszcillálás folyamán kerozinüzem esetén van olyan időintervallum, amikor a porlasztót nem hagyja el tüzelőanyag, míg repceolajüzem esetén a tüzelőanyag mennyisége két véges érték között változik. Mindemellett a repceolajjal a porlasztótól nagyobb távolságban is a méréshez elegendő számú csepp volt jelen, ami a kerozin gyorsabb égésével és párolgásával magyarázható.

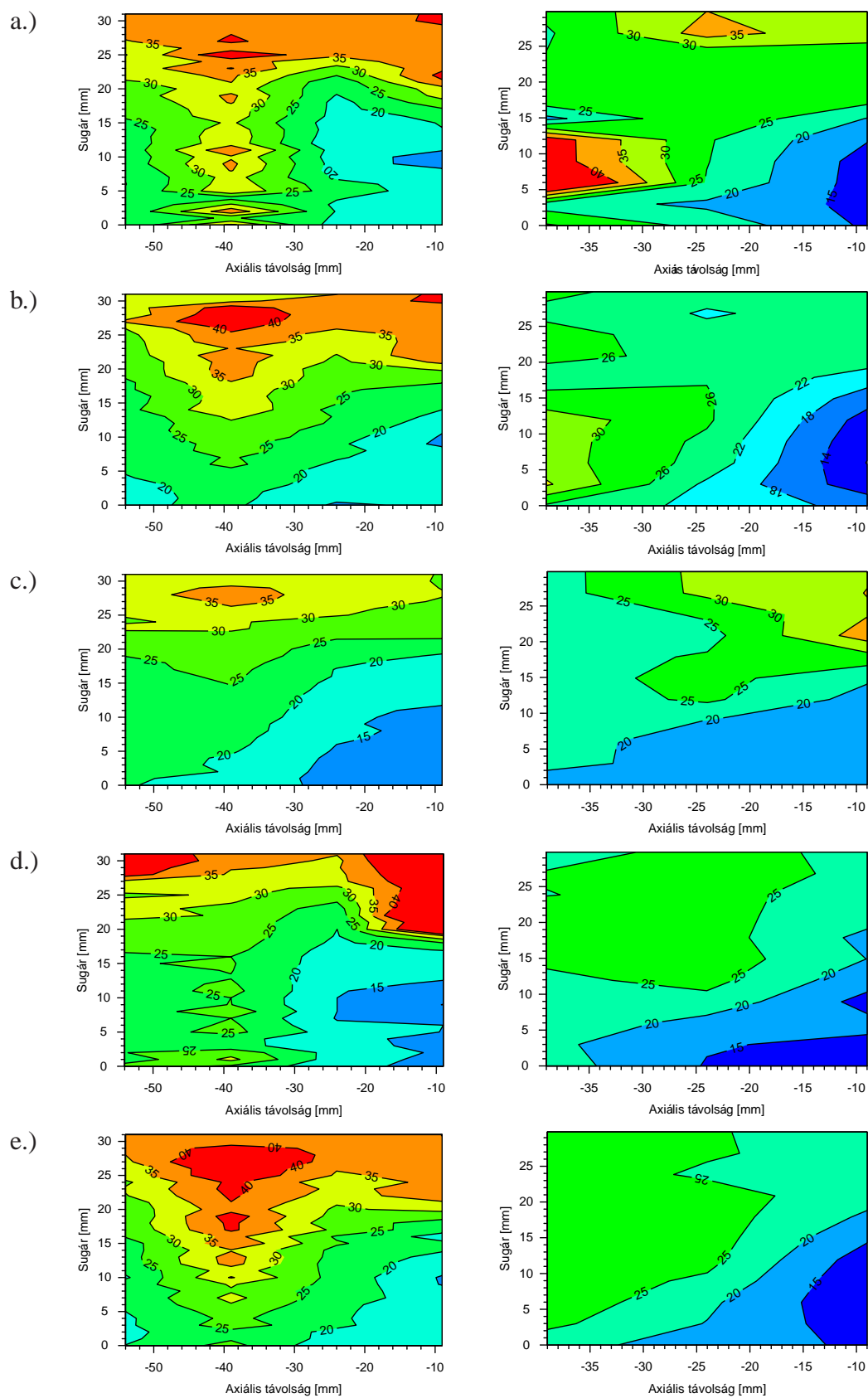
A repceolaj nagyobb viszkozitásának és felületi feszültségének köszönhetően a növényi olajjal nagyobb cseppeket lehet létrehozni – a különbség a kisebb cseppek égésével a porlasztótól távolodva csökken. A cseppek mérete függ az oszcilláció fázisszögétől, de ez a hatás a porlasztó szájától távolodva csökken.

A két tüzelőanyag esetében az axiális és tangenciális sebességek egy nagyságrendben vannak; a sebességek nagysága az oszcilláció fázisszögének függvényében változik. A cseppek irányára nincs hatással az oszcilláció.

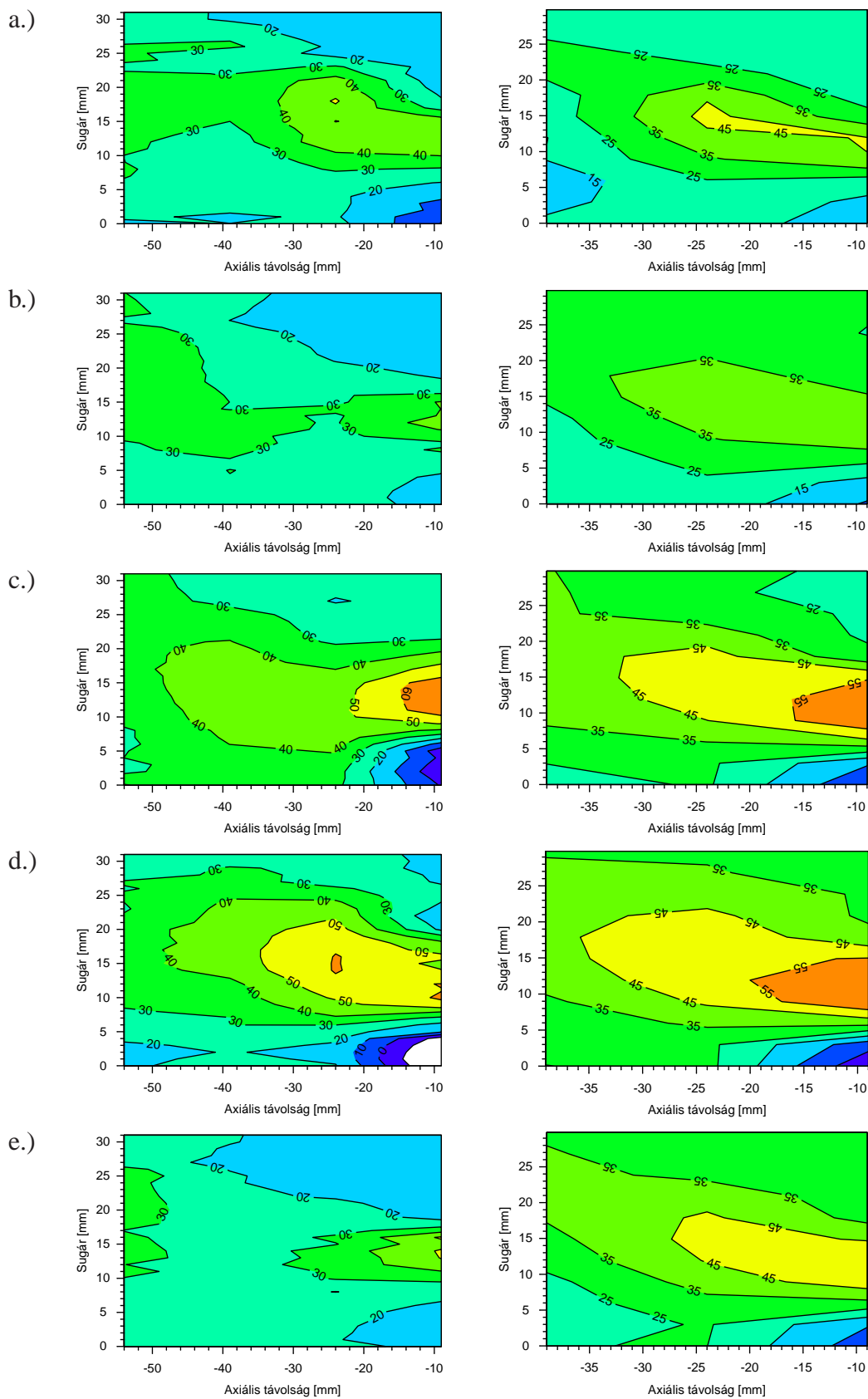
A kétfajta tüzelőanyaggal történő tüzelés során keletkezett CO és NO_x tendenciája egymással megegyező.



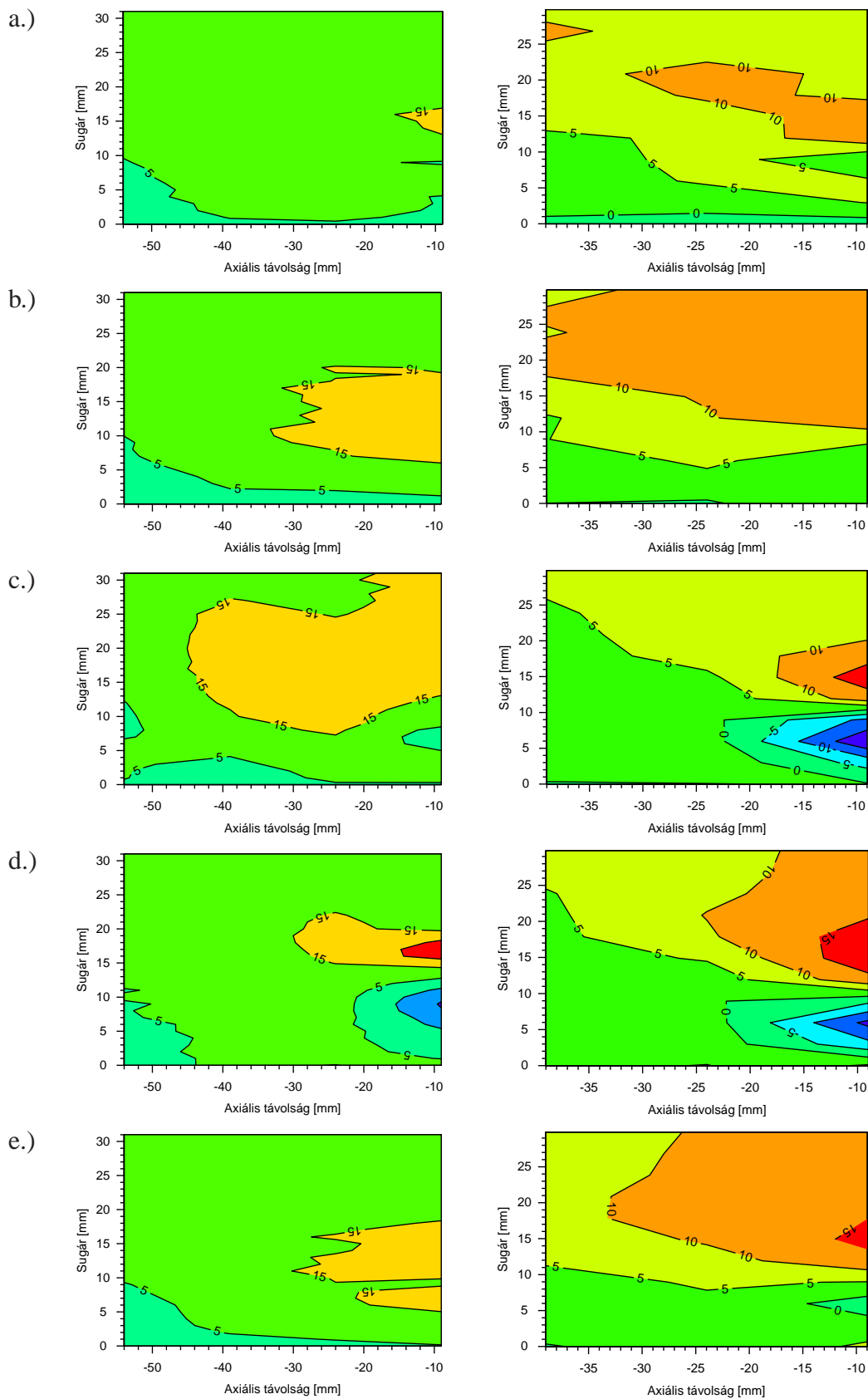
4.21. ábra. PDA mérés során detektált cseppek száma a 3. (bal oszlop) és az 1. (jobb oszlop) mérési beállításnál, különböző fázisoknál (a-e)



4.22. ábra. PDA méréssel megállapított középátmérő a 3. (bal oszlop) és az 1. (jobb oszlop) mérési beállításnál, különböző fázisoknál (a-e)



4.23. ábra. PDA méréssel megállapított axiális sebesség a 3. (bal oszlop) és az 1. (jobb oszlop) mérési beállításnál, különböző fázisoknál (a-e)



4.24. ábra. PDA méréssel megállapított tangenciális sebesség a 3. (bal oszlop) és az 1. (jobb oszlop) mérési beállításnál, különböző fázisoknál (a-e)

4.3. Repceolaj és magasabb rendű alkoholok elegyének vizsgálata

A gázturbina-porlasztónál kimutatott rossz párologási tulajdonságokon a repceolaj magasabb rendű alkohollal történő elegyítésével lehet segíteni. A korábban bemutatott alkoholokat (2.2. táblázat) 10 és 20 V/V% arányban elegyítettem repceolajhoz, és az így kapott elegyek tüzeléstechnikai és motorikus felhasználás szempontjából fontos tulajdonságait megvizsgáltam.

4.3.1. Elegyek égéshője

Méréseim folyamán a Földművelésügyi és Vidékfejlesztési Minisztérium Mezőgazdasági Gépesítési Intézetének tulajdonában levő, akkreditált IKA C2000 basic automata kalorimétert használtam. A mérés CEN/TS 14918:2005, továbbá az ISO 1928, ASTM 240 D, DIN 51900, ASTM D240-87 szabványok iránymutatása alapján történik.

A mérési eredmények és a belőlük a B.1 egyenlettel számolt fűtőértékek a 4.1. táblázatban láthatóak. Az irodalomban található értékkel egyedül a repceolaj hasonlítható össze, ez nagyságrendileg megegyezik az ott publikáltakkal. Fontos, hogy teljes egyezést nem lehet elvárni, hiszen a növényi olajnak a tulajdonságai nagymértékben függenek a termés minőségétől, a repce fajtájától stb. Az általam használt repceolaj méréssel meghatározott fűtőértéke megegyezik a Boie képlete (A.3 egyenlet) szerinti számolással kapott eredménnyel.

Anyag	Égéshő [MJ/kg]	Fűtőérték [MJ/kg]
Repceolaj	39,4	36,7
Repceolaj+10% isobutanol	39,1	36,3
Repceolaj+20% isobutanol	38,8	35,9
Repceolaj+10% 1-butanol	39,1	36,3
Repceolaj+20% 1-butanol	38,8	35,9
Repceolaj+10% 2-butanol	39,0	36,3
Repceolaj+20% 2-butanol	38,7	35,9
Repceolaj+10% 1-propanol	38,9	36,1
Repceolaj+20% 1-propanol	38,5	35,5
Repceolaj+10% 2-propanol	38,9	36,1
Repceolaj+20% 2-propanol	38,4	35,5

4.1. táblázat. Repceolaj és alkoholok elegyének mért égéshője és számolt fűtőértéke

Mint az várható volt, az alkohollal elegyített repceolaj égéshője csökken, hiszen az alkoholok égéshője kisebb a repceolajénál. Boie képletét használva (A.3 egyenlet) a propanol és a butanol fűtőértéke rendre 30,5 és 32,9 MJ/kg.

Az eredmények mutatják, hogy az alacsonyabb fűtőértékű propanol-izomerek jobban csökkentik a repceolaj-elegy fűtőértékét, mint a butanol-izomerek; a csökkenés az alkoholtartalomtól lineárisan függ (a mérés hibáját 0,5%).

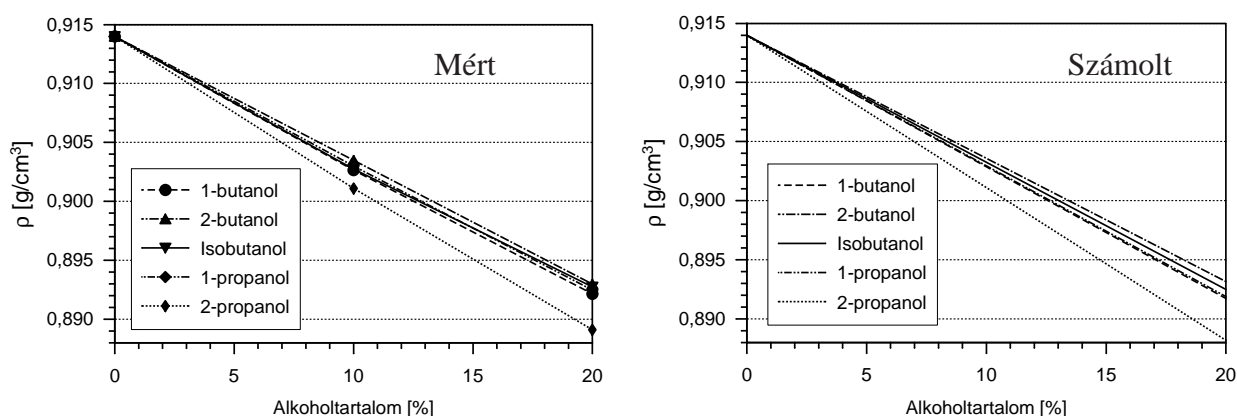
4.3.2. Elegyek sűrűsége

A méréseket az MSZ EN ISO 3675:2000 szerint végeztem el.

A mérési eredményekből látható (4.25. ábra), hogy az alkohol sűrűsége gyakorolt hatása az elegyített mennyiségtől függ, és gyakorlatilag független a hozzákevert alkohol fajtájától, hiszen mindegyik használt alkohol sűrűsége $0,801 \pm 0,016 \text{ g/cm}^3$. Az átlagtól legjobban a 2-propanol tér el, mintegy 2,1%-kal, az összes többi esetben ez 1% alatt van (2.2. táblázat, 4. oldal), így az egyes alkoholfajták sűrűsége közötti különbség kicsi. Mivel a vizsgált alkoholfajták közül a 2-propanol sűrűsége a legkisebb, repceolajjal történt elegyítés után is az ilyen alkoholt tartalmazó mintáé lett a legkisebb. Az elegyek sűrűsége lineárisan csökken az alkoholtartalom növekedésével.

Az általam használt repceolaj sűrűsége ($0,914 \text{ g/cm}^3$) kisebb, mint az irodalomban található átlag, mely $0,92 \text{ g/cm}^3$.

A mérési eredmények 0,1%-on belüli eltéréssel megegyeznek a számolással kapottakkal, így megállapítható, hogy a repceolajjal a vizsgált magasabb rendű alkoholok 20 V/V% arányig kontrakció nélkül elegyednek.



4.25. ábra. Repceolaj és magasabb rendű alkoholok elegyének sűrűsége

4.3.3. Elegyek viszkozitása

A méréseket az MSZ EN ISO 3104:1996 szerint végeztem el. A mérések folyamán 6 egymás utáni mérés eredményeit átlagoltam akkor, ha a mért idő (B.8. fejezet) 0,5 másodpercen belül voltak.

A mérési eredmények a 4.2. táblázatban megtalálhatók. Mivel a mérési eredmények jellegetre nagyon hasonlóak, így csak néhány kiválasztott elegy viszkozitása kerül grafikusan is bemutatásra.

Az eredményekből kitűnik, hogy az elegyek viszkozitása mind az alkoholtartalom, mind a hőmérséklet növelésével csökken. A csökkenés mértéke alkoholfajtánként különböző, azonban egyik alkoholnál sem mutat kirívóan eltérő értéket.

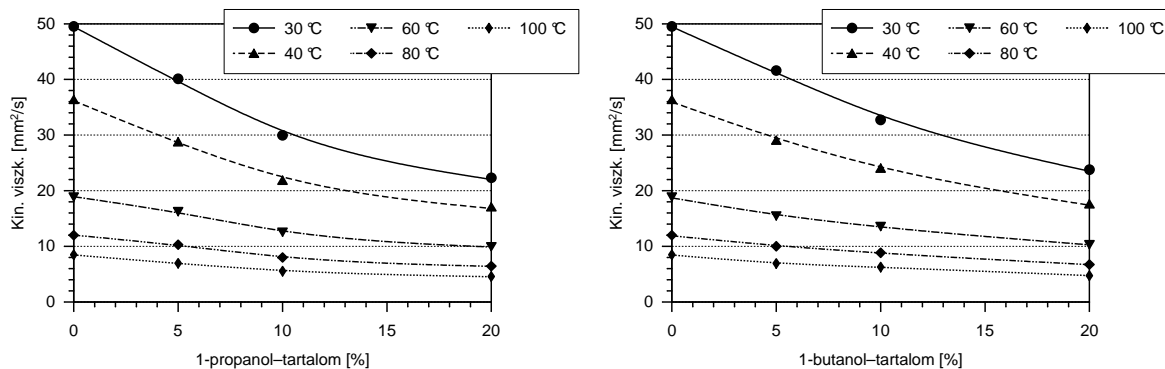
Anyag	Alkohol-tartalom	Hőmérséklet [°C]				
		30	40	60	80	100
1-propanol	5%	40,1	28,77	16,2	10,3	6,98
	10%	29,9	21,8	12,6	8	5,5
	20%	22,32	17	9,9	6,4	4,6
2-propanol	5%	40,6	29,3	16,2	10,4	7,6
	10%	32,8	24	13,6	8,85	6,86
	20%	31	22	11,9	8	5,81
Izobutanol	5%	38,6	28,5	15,7	9,9	6,8
	10%	34,1	24,9	14,2	8,9	6,2
	20%	23,1	17,2	9,7	6,4	4,4
1-butanol	5%	43,75	29,1	15,5	10	6,9
	10%	32,7	24	13,6	8,8	6,3
	20%	23,8	18,6	10,3	6,7	4,7
2-butanol	5%	41,1	27,6	14,6	9,7	6,7
	10%	31,8	23,2	13,1	8,5	6,1
	20%	26,2	19,4	11,5	7,7	5,7

4.2. táblázat. Repceolaj és alkoholok elegyének viszkozitása. Mértékegység: mm²/s

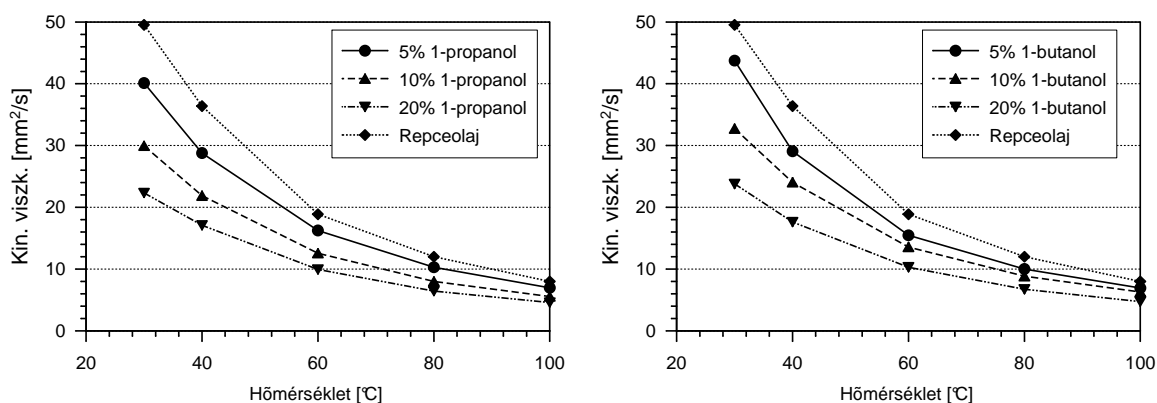
Az eredményeket összehasonlítva (4.26. ábra) elmondható, hogy az alkohol már kis mennyiségben elegyítve is jelentősen csökkenti a repceolaj viszkozitását. A csökkentés mértéke minden vizsgált alkoholfajtánál 30 °C-nál a legnagyobb, a hőmérséklet emelésével a repceolaj viszkozitása is csökken, így az alkohol csökkentő hatása már nem érvényesül akkora mértékben, sőt, 15%-os alkoholtartalom körül a csökkenés mértéke a nullához közelít. Ez a határ a hőmérséklet emelésével kitolható.

A 4.27. ábra az 1-propanol repceolaj viszkozítására gyakorolt hatását mutatja különböző hőmérsékleteken. Ezen az ábrán is jól megfigyelhető, hogy a hőmérséklet emelése milyen mértékben csökkenti a viszkozitást, ennek a hatása alacsony alkoholtartalom esetében a legnagyobb. Ennek oka, hogy a repceolaj viszkozitása nagymértékben csökken a hőmérséklet emelésével - magas hőmérsékleten már nincs akkora különbség az alkotók között, így az egymásra gyakorolt hatásuk is kisebb.

A kétféle ábrázálásmódból jól látható, hogy a viszkozitás csökkentése érdekében a két módszer kiegészíti egymást (alkohol elegyítése és a hőmérséklet növelése), azonban mindkettőt nem célszerű egyszerre, nagymértékben alkalmazni, mert magas (pl. 100 °C-on) hőmérsékleten az alkohol viszkozitáscsökkentő hatása nem jelentős. Ennek oka az is, hogy az 1- és a 2-propanol, valamint a 2-butanol 100 °C alatt forr, így annak egy része repceolajból már elpárolog. Amint az a későbbiek folyamán a TGA mérésekből is kitűnik, 100 °C-on a repceolaj tartalmaz még alkoholt, azonban egy része már elpárolog belőle, így az a viszkozításra nem fejthet ki hatást (4.3.4. fejezet, 4.31., 4.32. ábrák).



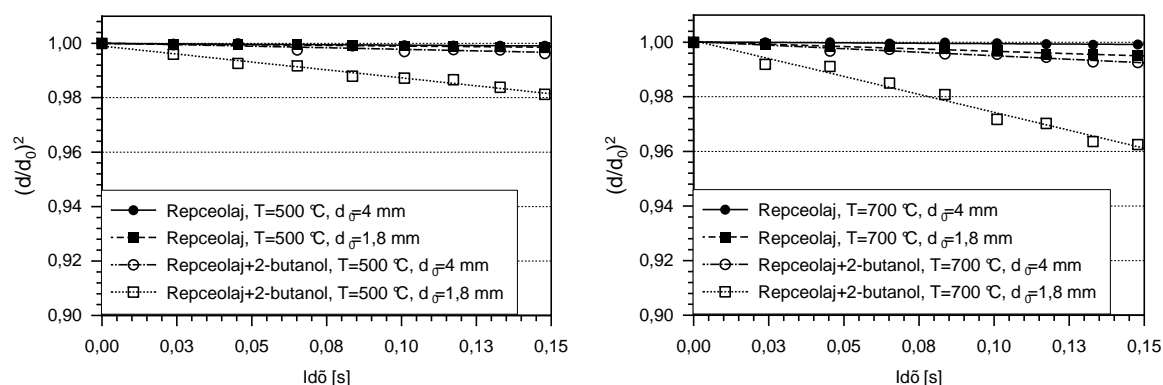
4.26. ábra. 1-propanol és 1-butanol hatása az elegy kinematikai viszkozitására



4.27. ábra. Hőmérséklet hatása az elegy viszkozitására 1-propanol és 1-butanol példájával

4.3.4. Elegyek párolgási tulajdonsága

Az elegyek párolgási tulajdonságát először árnyékgráfiával (3.3. fejezet), majd TGA-val (B.9. fejezet) vizsgáltam meg.



4.28. ábra. Fajlagos átmérő változásának négyzete az idő függvényében tiszta repceolaj, valamint repceolaj + 1-butanol elegye esetében, 500 és 700 °C-on.

Az árnyékgráfiás méréssel kisebb és nagyobb kezdeti átmérővel (1,8 és 4 mm) 500 °C-on felvett görbékéből kitűnik (4.28. ábra), hogy a tiszta növényi olaj esetén ezen a hőmérsékleten a rendelkezésre álló idő (szabadesésben megtett út) alatt számottevő átmérőváltozást okozó párolgás nem lép fel, csak a kisebb csepp esetén figyelhető meg egy kis csökkenés. A nagyobb cseppek lassabban melegsznek fel, ezért ott még ekkora anyagvesztés sem mutatható ki (az olaj 20 °C-osan lép be az ejtőcsőbe). (Gökalpék mérésekor [67] 500 °C-on 1,45 mm átmérőjű RME csepp elpárolgása 3,16 s-ig tartott, így a nehezebben párolgó, és nagyobb repceolajcsepp esetén 0,147 s alatt csak a párolgás kezdeti szakasza figyelhető meg.)

Látható, hogy a görbék meredeksége függ a kezdeti átmérőtől; a nagyobb cseppeké kisebb meredekségű, azonban ezen cseppek élettartama nagyobb is, így a párolgási konstansuk megegyezik a kisebbekével.

Repceolaj és 2-butanol elegyének vizsgálatakor már ezen a mérési hőmérsékleten is kimutatható átmérőcsökkenés történik. A cseppek folyamatosan, állandó sebességgel párolognak el, tehát a mérési tartományban nem ér véget a 2-butanol kipárolgása, ehhez túl nagy az átmérő. A mérési tartományban a kisebb csepp kezdeti térfogatának 4,5%-a párolog el ($(d/d_0)^2=0,97$).

Nagyobb cseppnél az alacsony hőmérsékleten sok időbe kerül a teljes térfogat felmelegedése, az alkohol felületre történő diffúziója, és a párolgása. Megfigyelhető még, hogy a görbék az elméletitől eltérően nem teljesen egyenesek. Ennek oka az is, hogy a csepp melegedésből adódó térfogatnövekedés, és az ebből adódó párolgás sebességének a növekedése a mérés során egymás ellen hat, valamint a mérési pontatlanság.

200 °C-kal magasabb hőmérsékleten már a tiszta repceolajnak is mérhető a párolgása. Ezen a hőmérsékleten és a rendelkezésre álló idő alatt a nagyobb csepp kezdeti térfogatának mintegy 0,75%-a párolgott el ($(d/d_0)^2=0,995$). A görbe meredeksége a teljes mérési tartományban – kisebb ingadozásoktól eltekintve – állandó.

2-butanolt tartalmazó repceolaj esetén a relatív átmérőcsökkenés négyzete gyorsabb, az azonban a teljes mérési tartományban állandó, a mérési szakasz nem elég, hogy a cseppben levő összes alkohol elpárologjon. Ennek kimutatásához ezen a hőmérsékleten is túl nagy a kezdeti átmérő. Nagyobb cseppnél jobban látszik, hogy időbe kerül az alkohol felszínre történő diffúziója, ennyi idő eltelte után is tartalmaz az elegy alkoholt. Megfigyelhető az is, hogy 700 °C-on a mérési tartomány végén kisebb az átmérő, mint az 500 °C-on végzett méréseknél. Ez azért van, mert a magasabb hőmérsékleten már nem csak az alkohol, hanem a repceolaj is párolog.

A kapott eredményekből kiszámítható a repceolaj különböző hőmérsékleten felvett párolgási konstansa (2.1, 2.2 egyenlet, 2.2. ábra). A mérési eredmények táblázatban foglalva láthatók (4.3. táblázat). A $d_0^2-d^2$ meghatározásához azt a szakaszt vettem figyelembe, amíg a $(d/d_0)^2$ az idő függvényében lineárisan változik.

Az eredményekből kitűnik, hogy a kis és nagy cseppek párolgási konstansa között kicsi a különbség. Tiszta repceolaj párolgási konstansa egy nagyságrenddel kisebb, mint az elegyé. Megfigyelhető az is, hogy repceolaj esetén 500 °C-on a $(d/d_0)^2$ nagyon közel van az 1-hez, így ez esetekben a párolgási konstans ezzel a berendezéssel meghatározhatatlan. Ennek oka a mérési pontatlanságban keresendő. Ezen a hőmérsékleten előfordult, hogy az ejtőcső végén 1-2 pixellel

Hőmérséklet [°C]	d_0 [mm]	$(d/d_0)^2$	Idő [s]	K [mm ² /s]	$(d/d_0)^2$	Idő [s]	K [mm ² /s]
		Repceolaj			Elegy		
500	1,8	0,998*	0,147	0,06*	0,97	0,147	0,56
500	4	0,999*	0,147	0,08*	0,995	0,147	0,54
700	1,8	0,999	0,147	0,108	0,962	0,147	0,82
700	4	0,995	0,147	0,109	0,992	0,147	0,81

4.3. táblázat. Repceolaj, valamint repceolaj + 2-butanol elegyének a párolgási konstansának meghatározása. A *-gal jelölt eredmények nagy relatív hibával terheltek.

nagyobb átmérőt mértem, mint az elején, de a mérések átlagára is elmondható, hogy a párolgás mértéke csak néhány pixelnyi volt, így a mérés nagy relatív hibával terhelt.

Ez magyarázza azt, hogy az akusztikusan öngerjesztő lángok vizsgálatokor (3.2.3. fejezet, 3.2. táblázat) a kerozinnál alkalmazott 370 °C-os levegő-előmelegítéssel nem lehetett a repceolajat meggyújtani, mert túl kevés folyékony olaj ment át gőz fázisba. 450 °C-os levegő esetében azonban a turbulens áramlás, filmterítő ajkon létrejövő szilárd-folyékony hőátadás, valamint az ott az árnyékgráfiánál alkalmazotthoz képest nagyságrendekkel kisebb cseppek jobban felmelegednek, és a gyulladáshoz elegendő repceolaj megy át gőz fázisba.

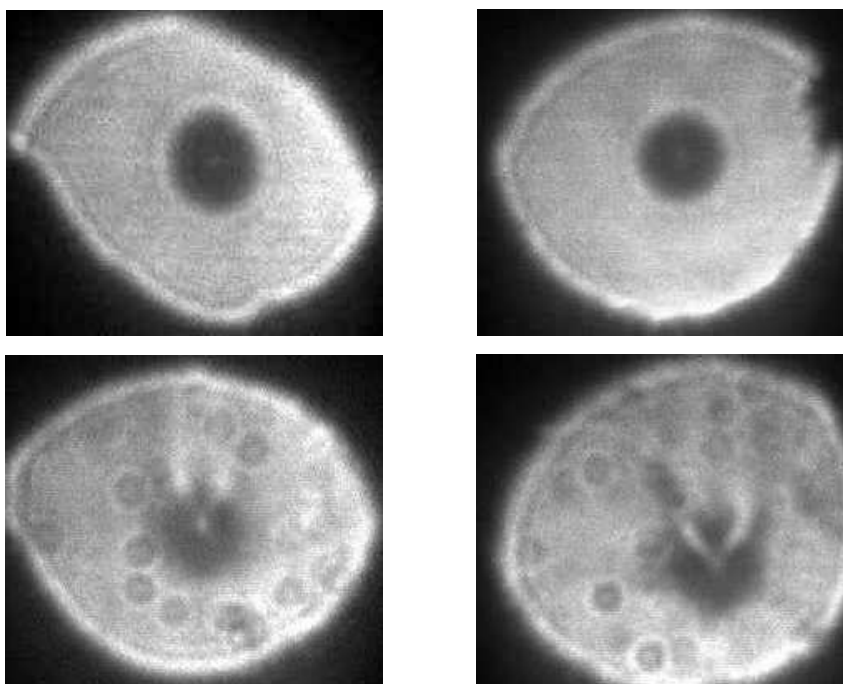
Az eredményeket az irodalomban találhatóakkal összevetve (2.9. táblázat) feltűnik, hogy a repceolaj párolgási konstansa 700 °C-on nagyobb, mint a Gökalp és munkatársai által vizsgált tüzelőanyagoké. Ennek oka, hogy ők vizsgálatukat mintegy 300 K-nel alacsonyabb hőmérsékleten végezték. Ugyanez az oka annak, hogy az elegyek párolgási konstansa is magasabb.

Szabadesésben a cseppek gyorsan áthaladnak az ejtőcsövön anélkül, hogy az alkohol kipárologna belőlük. Ennyi idő alatt a teljes térfogatuk nem képes felmelegedni. Figyelembe kell venni azt is, hogy a repceolaj különböző zsírsav-észterek (trigliceridek) elegye, egyes alkotói különböző párolgási tulajdonsággal bírnak stb. Ezért a párolgási folyamat pontosabb meghatározásához TGA (termogravimetriás) méréseket végeztem el.

A kiértékeléshez használt ábrákon jól látszik (4.29. ábra), amint az alkohol párolog ki a repceolajból. A bal oldali ábrákon az ejtőcső elején, a jobb oldalin a végén készített kép látható.

A TGA méréseket inert és oxidáló (levegő) atmoszférában végeztem el, Universal V2.3C TA Instruments készülékkel. A mérések során alkalmazott hevítési sebesség 10 °C/perc volt.

Első lépésben a tiszta repceolaj párolgását határoztam meg. A görbéből látszik (4.30. ábra 71. oldal), hogy viszonylag magas (200 °C) hőmérsékletig nincs tömegvesztés. A DTG görbe 200 °C-nál kezd emelkedni, 200-330 °C között a repceolajban levő könnyen illó komponensek távozása figyelhető meg. Mennyiségük 1-2%. 330 °C fölött indul meg a főkomponensek (különböző trigliceridek) párolgása. A párolgás sebessége a hőmérséklet emelkedésével fokozatosan nő. 420 °C fölött is nő a párolgás sebessége, de a minta méretének megváltozása miatt



4.29. ábra. Repceolaj (felső sor), repceolaj + alkohol elegyek árnyékgráfiával felvett képei

(felülete csökkent) csökken a DTG görbe, így csökken az időegység alatt elpárolgott anyagmennyiség. Ezen a hőmérsékleten már kokszolódhat az olaj, ezért 500 °C körül már csak lassú tömegvesztés észlelhető.

Ha a mért minta könnyen párolgó részt tartalmaz, akkor az elvárásoknak megfelelően megváltozik a görbe. Ha alkoholt elegyítünk az olajhoz, akkor a könnyen párolgó alkotó egy része a melegítés kezdeti szakaszában kipárolog. Ha több az illó, akkor a mérhető kipárolgás hamarabb, alacsonyabb hőmérsékleten észlelhető. 20%-ot tartalmazó elegyeknél a kezdeti párolgás sebessége nagyobb, mint a szegényebb elegyeknél (4.31., 4.32. ábra 72. oldal). Körülbelül 180 °C-ig az összes alkohol kipárolog az elegyből. Megfigyelhető, hogy bár az alkoholok forráspontja 100 °C körül van (2.2. táblázat 4. oldal), jóval 100 °C fölött is folytatódik azok kipárolgása, mert a tégely (csepp) belsejéből időbe kerül az alkohol diffúziója (irodalom alapján a nagy viszkozitású folyadékokban a konvekció nem játszik szerepet [66]).

200 °C fölött (az alkohol elpárolgása után) a TGA (és DTG) görbék lefutása megegyezik a repceolajével. Az ábrákból kitűnik, hogy a könnyen párolgó részek tömegaránya kisebb, mint az alkohol százalékos részaránya. Ennek egyik oka az, hogy az elegyeket térfogatszázalékban mértem, míg a TGA tömegszázalékkal számol (20 V/V% körülbelül 17 m/m%, az alkohol fajtájától függően). További ok még, hogy az induló tömeg lemerése után, de a valós mérés megkezdése előtt, már a környezeti hőmérsékleten megindul az illók kipárolgása.

Ha a méréseket oxidáló atmoszférában végezzük el (4.33. ábra 72. oldal), akkor a párolgás mellett egyéb kémiai (oxidációs) folyamat is lejátszódhat. Ezek rendszerint exotermek. Az oxigén hatására tiszta repceolaj esetében már 200 °C alatt oxidációs, bomlási folyamat indul be. További két nagyobb sebességű párolgási/bomlási szakasz figyelhető meg, ezek az egyes zsírsavcsoportok párolgását/oxidációját jelölik. A minta – csakúgy, mint inert atmoszférában – 520 °C-ra teljesen elpárolog.

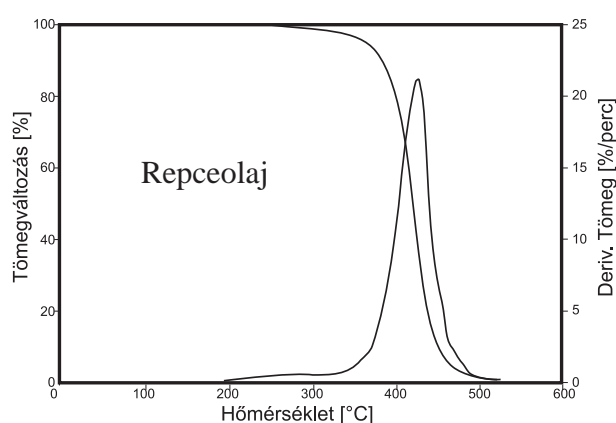
Alkoholt is tartalmazó minta esetében alacsony hőmérsékleten ugyancsak elkezdődik a kipárolgás. Azonban 180 °C körül nem áll le, mint inert atmoszférában, hanem most ott megkezdődik a repceolaj bomlása. Innen kezdve a görbék lefutása megegyezik a tiszta repceolajnál tapasztalattal.

A TGA mérések alapján elmondható, hogy az árnyékgráfiával végrehajtott mérések során a cseppből szinte csak az alkohol párologt ki, mert a csepp nem melegedett fel 200 °C fölé (3.3. táblázat 39. oldal). Az is megállapítható, hogy a teljes alkoholmennyiség sem párologt el, mert nem állt rendelkezésre a diffúzióhoz szükséges idő. TGA mérésekkel sikerült kimutatni azt is, hogy a repceolaj bomlása 3 lépcsőben történik.

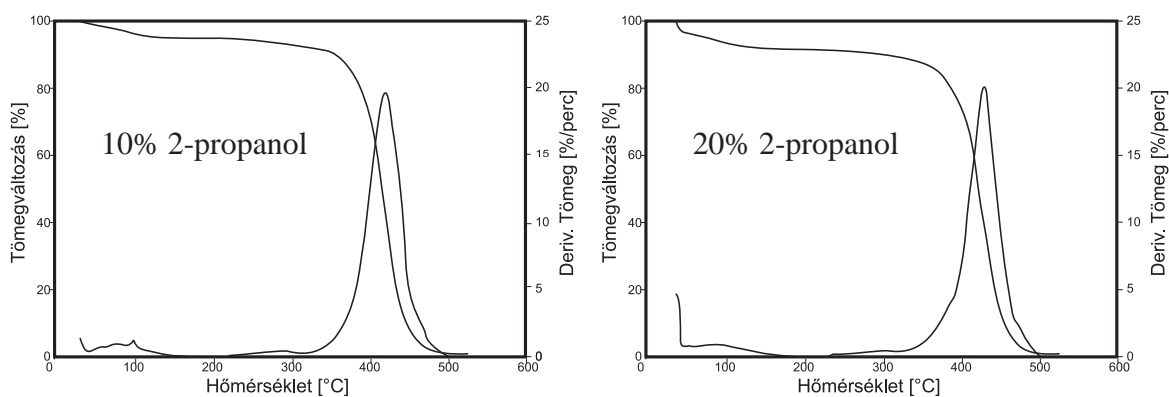
Összefoglalás

Az alkohol csökkenti a repceolaj fűtőértékét, égéshőjét, sűrűségét viszkozitását. Az alkohol sűrűsége gyakorolt hatása független az alkohol fajtájától.

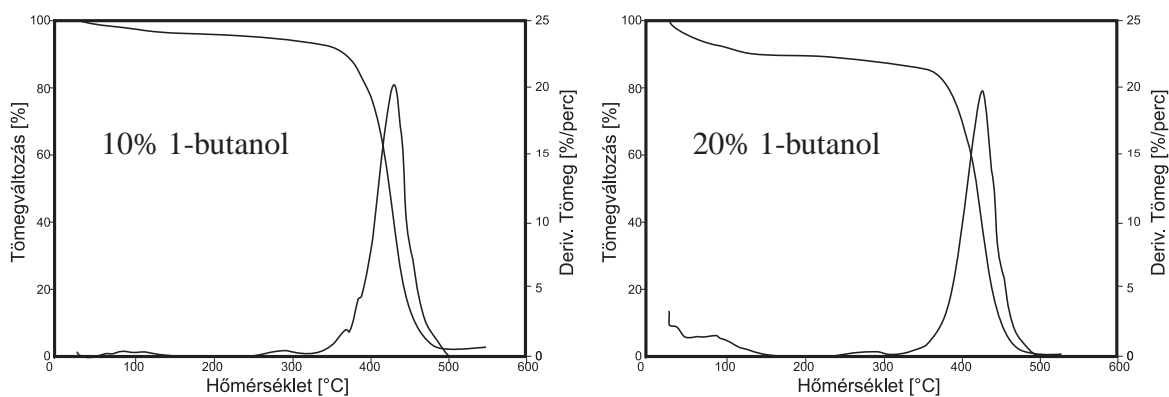
A repceolaj lassan párolog el, ami a gyulladást nehezíti. Magasabb rendű alkohol hozzákeverésével viszont a csepp egy része (az alkoholtartalom) gyorsan elpárolog, a visszamaradó repce saját párologási sebességének megfelelően fogy el. Az alkohol párologása a forráspontjánál magasabb hőmérsékletig kimutatható, mert a csepp belsejében levő könnyen párologó résznek időre van szüksége, hogy elérje a felszínt.



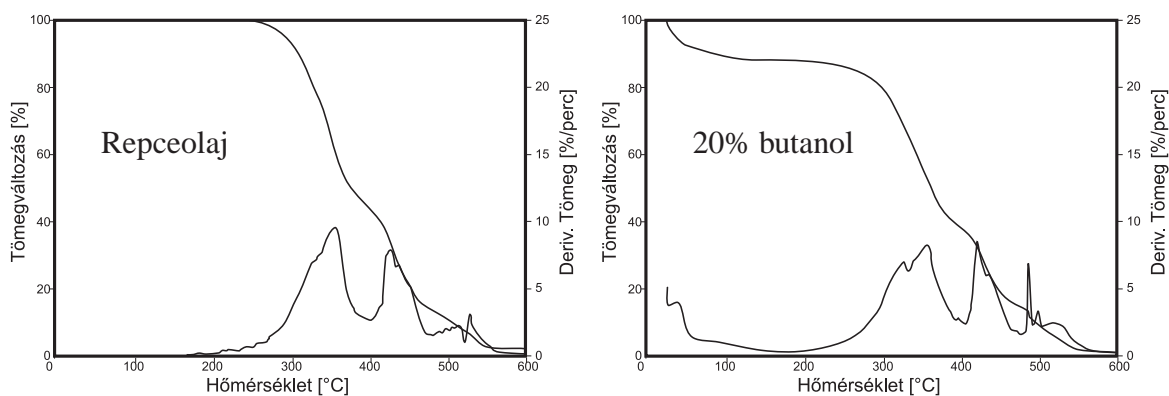
4.30. ábra. Repceolaj TGA görbéi inert atmoszférában



4.31. ábra. Repceolaj–2-propanol elegyek TGA görbéi inert atmoszférában



4.32. ábra. Repceolaj–1-butanol elegyek TGA görbéi inert atmoszférában



4.33. ábra. Repceolaj, valamint repceolaj–butanol elegyek oxidáló atmoszférában felvett TGA görbéi

4.3.5. Elegyek motorikus felhasználásának vizsgálata

A következőkben mutatom be az alkohol hatását a belső égésű motorban lejátszódó égésére és a károsanyag-emissziókra.

Amikor alkoholt elegyítünk az olajhoz, akkor a tiszta repceolajétól eltérő tüzeléstechnikai paraméterekkel bíró új tüzelőanyagot kapunk. Korábbi vizsgálatok megállapították, hogy a különböző alkoholokkal elegyített repceolaj égésekor [103] feltételezhetően a beporlasztott tüzelőanyagból először az alkohol párolog el, és azt gyújtja meg a kisebb kompressziótűrésű repceolaj lángja.

Az alkohol növeli a lángterjedési sebességet, ami növeli a hengerben a csúcsnyomást, ennek ismét égésgyorsító hatása van. Csökkenti viszont a fűtőértéket, ami kisebb nyomásnövekedést és alacsonyabb adiabatikus lánghőmérsékletet is jelent – az alkohol nagy párologáshője tovább csökkenti az égés hőmérsékletét.

Változik a tüzelőanyag összetétele is. Az esetlegesen nitrogént is tartalmazó repceolaj (2.6. táblázat) mennyisége csökken, helyét a nitrogénmentes alkohol veszi át, mindamelllett a hengerbe bejuttatott tüzelőanyag mennyisége állandó (és az égési levegő továbbra is bőségesen tartalmaz nitrogént). Várhatóan csökken a koromkibocsátás is, mert az alkohol szinte kormozás nélkül ég.

A nagy nyomáson lejátszódó égés magas égési hőmérsékletet jelent. Ez kedvez, a gyors égés viszont nem kedvez a nitrogénoxidok kialakulásának.

Nagy alkoholtartalom esetében hűl a keverék, így a CH és a korom-emisszió is megnőhet, mert befagynak a reakciók, az NO_x-kibocsátás viszont csökkenhet, mert alacsonyabb az égési hőmérséklet is.

Látható, hogy az alkohol elegyítése egymással ellentétes folyamatokat eredményez. Annak megállapítására, hogy melyik hatás az erősebb, méréseket végeztem. A méréseket egy tüzelőanyaggal mindig háromszor végeztem el, és a kapott eredményeket átlagoltam.

Elegyek cetánszáma

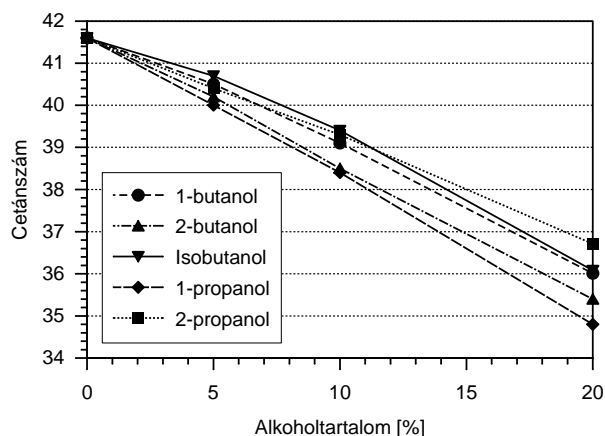
A méréseket MESZ EN ISO 5165:1999 szabvány szerint, CFR-5-ös motoron végeztem el.

A 4.34. ábrán látható a mért alkoholok hatása az elegy cetánszámára.

Az eredmények jobb értékelhetősége kedvéért megmértem két különböző időben, különböző MOL kútból származó dízelolaj cetánszámát is. Ezek 55,67 és 55,55 lettek. Mivel az ASTM szerint a mérés pontatlansága maximum $\pm 1,5$ lehet, így a két gázolajminta cetánszáma azonosnak tekinthető.

A nyers, hidegen sajtolt repceolaj cetánszáma méréseim szerint 41,6, ami az irodalomban megtalálható adatokkal (36-42) (2.1. táblázat [2]) megegyezik.

A mérések a várható eredményt mutatják, vagyis alkohol hozzáadásával csökken a repceolaj cetánszáma (alkoholok cetánszáma nagyon alacsony, 15 alatt van). A csökkenés mértéke



4.34. ábra. Alkoholtartalom hatása a repceolaj cetánszámára

mindegyik esetben arányos a hozzáadott alkohol-térfogatszázalékkal. A csökkenés mértéke 1-propanol esetében a legnagyobb, de ha a szabványban a mérési pontosságra meghatározott másfél cetánszámot figyelembe vesszük, akkor az eltérés a többi alkohol által okozott változáshoz képest nem jelentős, elhanyagolható.

Összefoglalólag megállapítható, hogy a vizsgált alkoholok térfogatszázalékukkal lineárisan, és egyforma mértékben csökkentik a cetánszámot (a $\pm 1,5$ CSZ pontosságot figyelembe véve).

Alkoholok hatása az égésre

Ennél a mérésnél a CFR vizsgálómotort a dízelolaj cetánszámának méréséhez szükséges beállításokkal üzemeltettem, tehát a kompresszióviszony úgy volt beállítva, hogy a dízelolaj a felső holtpontban gyulladjon, a dízelolaj előbefecskendezése 13 főtengelyfok legyen. A minták mérése során ezeket a paramétereket nem állítottam utána, így az eltérő viszkozitás, gyulladási késedelem és cetánszám más-más égési körülményeket eredményezett minden elegy számára. A mérések folyamán egyedül a fogyasztáson állítottam, melynek mértéke így végig 13 ml/perc volt. A mérési eredményeket két kiválasztott alkoholra (2-propanol és 1-butanol) ismertetem.

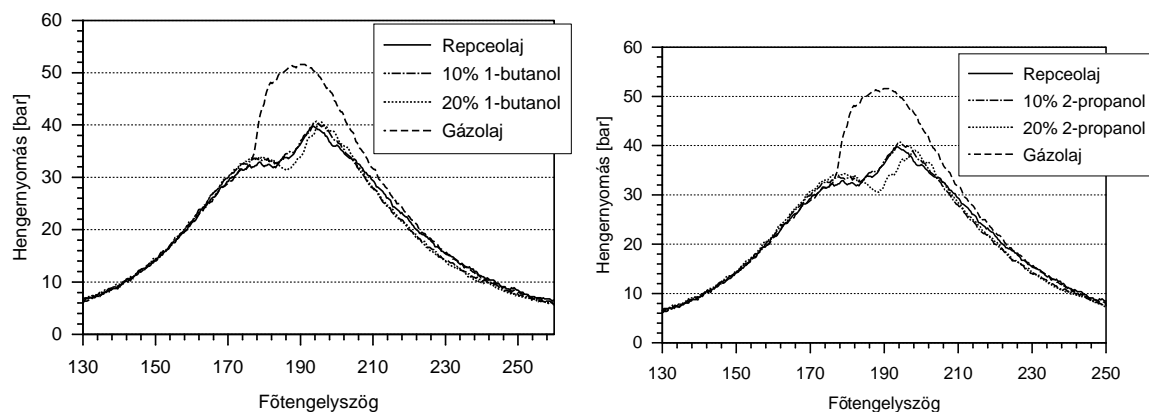
Belső égésű motorok égésterében lejátszódó folyamatokat az indikátordiagram szemlélteti. A diagramok vízszintes tengelyén a főtengelyszög, a függőlegesen pedig a hengernyomás látható.

A 4.35. ábrán a repceolaj és az 1-butanol elegyek, a 2-propanol elegyek, valamint összehasonlításképpen a dízelolaj felhasználása során fellépő nyomáslefutás látható. Az ábrákon látható, hogy 360° -nál dízelolaj-üzem esetén a nyomás nagymértékben, meredeken megnő. Ennek oka, hogy a cetánszámmérő beállításából adódóan az égés a felső holtpontban indul meg.

A többi esetben a tüzelőanyag eltérő tulajdonságainak köszönhetően az égés nem a felső holtpontban, hanem annál később indul be (az előbefecskendezés időpontja a mérés során azért változott, mert az dízelolajra volt beállítva).

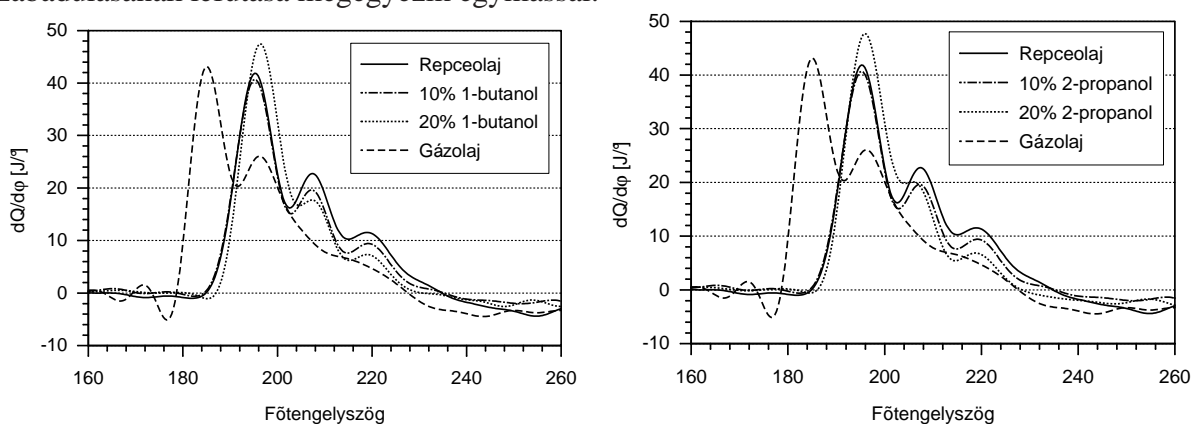
A nyomásnövekedésből jól látható, hogy tiszta repceolaj esetén előbb kezd el nőni a nyomás, mint az alkohol keverékek estén. Ennek oka, hogy az alkohol elpárolgása során hőt von el az

égéstérből, ami a gyulladási késedelmet növeli, lángterjedési sebességet csökkenti. Megfigyelhető az is, hogy az elegyek esetén a csúcnyomás helye későbbre tolódott. Ez is az alkohol párolgásának és alacsony cetánszámának tudható be.



4.35. ábra. Mért nyomáslefutás a hengertérben repceolaj, repceolaj-alkohol elegyek és dízelolaj üzem esetén

A 4.36. ábrán a dízelolaj, a repceolaj és az alkohol elegyek égéstörvényei láthatóak (égéstörvény: az égés során felszabaduló összes hőmennyiség). Az ábrákon jól megfigyelhető, hogy a hőfelszabadulás dízelolaj esetében a felső holtpontnál van, hiszen a cetánszámmérő motor erre a tüzelőanyagra volt beállítva. A többi esetben a hőfelszabadulás kezdete későbbre tolódik. Az alkohol növeli a hőfelszabadulás sebességét, viszont az égés kezdetét ha kismértékben is- de módosítja. Látható, hogy a 20% alkoholt tartalmazó görbék még az égés kezdetekor a nyers repceolaj alatt vannak, később kezdődik az emelkedésük. A kinetikus szakaszban a hőfelszabadulás intenzívebb, ugyanakkora főtengelyfok-változáshoz (11 fok) nagyobb $dQ/d\phi$ tartozik (vagyis meredekebb a görbe). A két alkohol hatása között különbség nem látható. A diffúz szakasz minden esetben elhúzódo égést jelent, ami nagymértékben megegyezik a repceolaj égésével. Ebből látható, hogy eddigre az elegyből az alkohol kiégett, az összes elegy hőfelszabadulásának lefutása megegyezik egymással.



4.36. ábra. Alkoholtartalom hatása a repceolaj égéstörvényére állandó kompresszióviszonynál

Emisszió

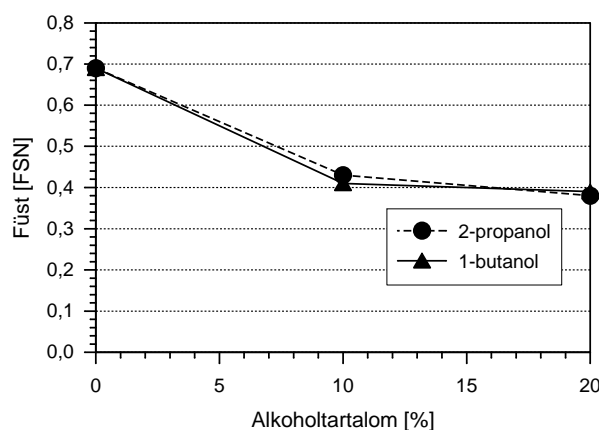
Az emisszió kiértékelésnél meg kell jegyezni, hogy a nyomáslefutás és az emisszió mérésére használt kis turbulenciájú előkamrás CFR tesztmotor a modern dízelmotorokhoz képest alacsony befecskendezési nyomással rendelkezik. Mindebből következően az emissziós értékek csak tájékoztató jellegűek, jelentőségük a kimutatott tendenciákban van.

A következőkben bemutatom a mérések során meghatározott korom-, NO_x -, össz-szénhidrogén (CH)- és CO-emisszió mennyiségét.

A mérési pontok azonosak a dízelüzemi beállítottakkal.

Korom (füst)

A 4.37. ábrán jól látszik az alkohol hatása. Mivel az alkohol égése során nem (vagy alig) keletkezik korom, így várható volt, hogy minél nagyobb mennyiségben tartalmaz a repceolaj alkoholt, annál kisebb lesz a füstölés.



4.37. ábra. Alkoholtartalom hatása a füstölésre

Megfigyelhető, hogy az keverékek koromkibocsátása minden esetben kisebb, mint a tiszta repceolajé (az alkohol közel korommentes lánggal ég). A két alkohol ugyanolyan mértékben csökkenti a füstölést, viszont a csökkenés nem lineáris az alkoholtartalommal.

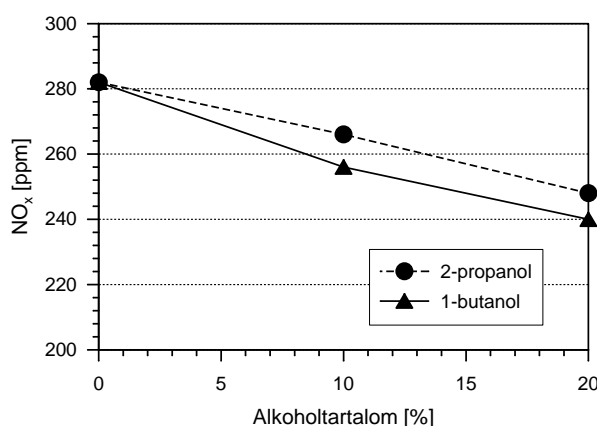
NO_x emisszió

Az NO_x keletkezéshez négy tényező egyidejű jelenléte szükséges: nitrogén, oxigén, megfelelően magas hőmérséklet és idő.

Keletkezés szerint háromféle NO_x -et különböztetünk meg: termikus NO_x , amely magas hőmérsékleten, főleg a levegő nitrogéntartalmából; prompt NO_x , amely a láng szénhidrogén gyökeinek segítségével; és tüzelőanyag NO_x , amely a tüzelőanyag kötött nitrogénjéből keletkezik.

A repceolajnak felhasználása esetén a legjelentősebb NO_x képződési mód a termikus. A repceolajnak alacsonyabb az égési hőmérséklete, mint a dízelolajé, de tartalmaz nitrogént, így a termikus mellett tüzelőanyag NO_x is keletkezhet. A dízelolajjal végzett mérések 394 ppm repceolajjal 280 ppm NO_x -tartalmat mutattak ki.

Az alkohol nagy párologáshője és alacsonyabb fűtőértéke csökkenti az égés hőmérsékletét, ami ismét az NO_x képződés ellen hat. Ezzel szemben az égés kinetikus szakasza hamar elkezdődik, tehát több idő áll az NO_x -képződés rendelkezésére. NO_x -képződés szempontjából fontos az égés lefutásának hossza, a kinetikus és diffúz szakasz aránya. Figyelembe kell venni azt is, hogy a mérések folyamán a tüzelőanyag-fogyasztás 13 ml/perc volt, azonban a fűtőérték, ezáltal a bevezetett hőmennyiség repceolajnál a legnagyobb, az alkoholtartalom növelésével folyamatosan csökken. Ez csökkenti az adiabatikus égési hőmérsékletet, ami a termikus NO_x képződés ellen hat.



4.38. ábra. Alkoholtartalom hatása az NO_x emisszióra

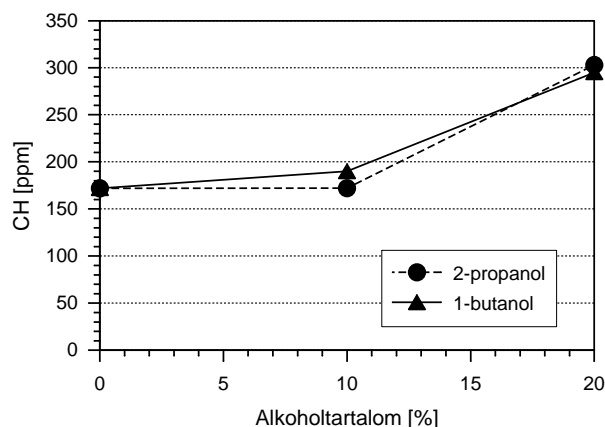
A 4.38. ábrából látható, hogy mindkét alkohol hozzákeverése esetén csökken a kibocsátott NO_x emisszió, 1-butanol esetében jobban, mint 2-propanolnál.

Elégetlen szénhidrogén-kibocsátás

Belső égésű motorokban az égés nem tökéletes, így a bevezetett tüzelőanyag egy része megjelenik a füstgázban, mint el nem égett szénhidrogén (CH).

Mivel az alkoholok nagy párologáshője és alacsonyabb fűtőértéke csökkenti az elegyek égési hőmérsékletét, így előfordulhat, hogy bizonyos reakciók befagynak, illetve annyira lecsökken a sebességük, hogy nem történik meg a teljes kiégés a hengertérben.

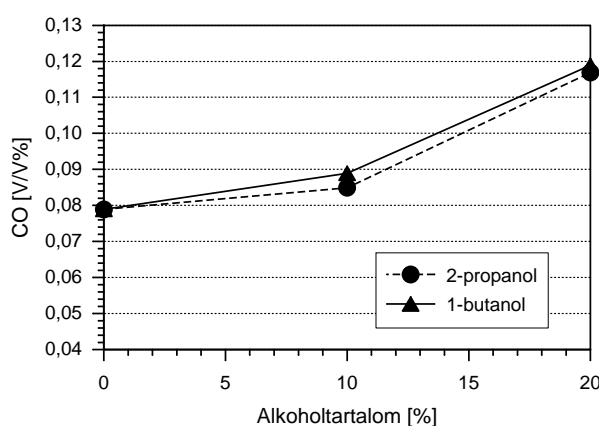
A 4.39. ábrán a repceolaj, valamint a repceolaj-alkohol elegyek elégetlen szénhidrogén kibocsátása látható. Az eredmény alapján elmondható, hogy az alkohol elegyítése dízelüzemre beállított cetánszámmérő motor esetén az alkohol növeli a CH kibocsátását, az égés elhúzódnása miatt befagynak a reakciók. Ennek oka az alacsonyabb adiabatikus égési hőmérséklet lehet. 20% alkoholtartalom esetén a mért CH kibocsátás a mért alkoholfajták között nem mutat szignifikáns eltérés.



4.39. ábra. Alkoholtartalom hatása a füstgáz elégetlen szénhidrogén tartalmára

CO-kibocsátás

A 4.40. ábrán a mért CO-emisszió látható. Az eredményekből kitűnik, hogy az alkohol növeli a CO-emissziót. Ennek oka ismételtelen a csökkenő égési hőmérsékletben keresendő (befagynak a reakciók). Ezt támasztja alá az is, hogy növekvő alkoholmennyiséggel nő a füstgázban található CO mennyisége is. Látható az is, hogy a kibocsátott CO mennyiségére az alkohol típusának hatása elhanyagolható.



4.40. ábra. Alkoholtartalom hatása a füstgáz CO tartalmára

A CO és az NO_x emisszió nagysága minden esetben alatta marad a 14/2001. (V. 9.) KÖM-EÜM-FVM együttes rendeletben meghatározott határértékeknek (lásd a B.2. táblázat).

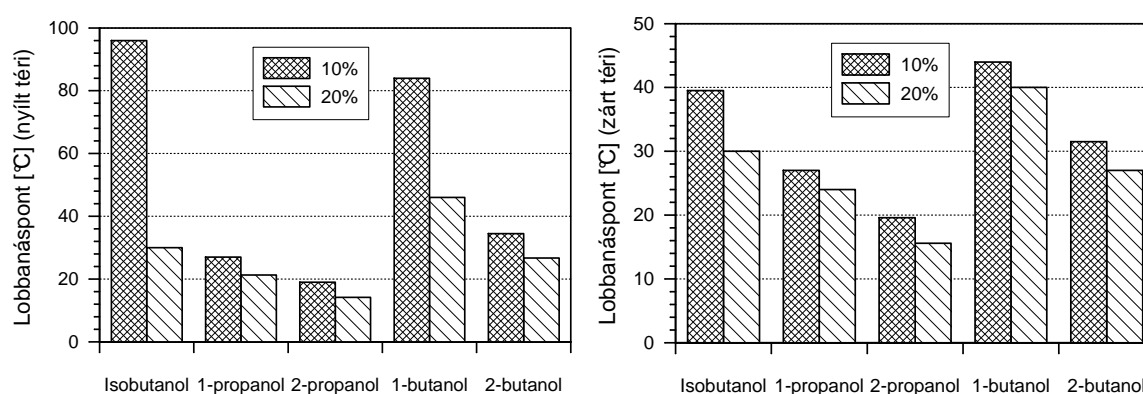
4.3.6. Elegyek lobbanáspontja

A használt elegyek lobbanáspontjának meghatározására a tárolás biztonsága, valamint a belső égésű motorokban lejátszódó gyulladás megértése szempontjából fontos.

A méréseket a nyílt téri lobbanáspont meghatározásakor az ASTM D-92 szabvány szerint, Petrotest CLA 2 automatikus lobbanáspont- meghatározó berendezéssel, zárttéri lobbanáspont

meghatározásakor pedig az ASTM D-93-A szabvány szerint, Petrotest P1P2 lobbanáspont - meghatározó berendezéssel végeztem el. Mind a nyílt mind a zárt téri lobbanáspont mérése előtt a próba 5 °C-ra le lett hűtve. A méréseket háromszor végeztem el egymás után, a mérési eredmények 0,5 °C-on belül szórtak.

A mérési eredmények a 4.41. ábrán láthatóak. Meg kell említeni, hogy az értékek csak az általam használt növényi olajra igazak, mert ezen olajok tulajdonságai függenek az évjárattól, a csapadékosságtól, valamint a gyártástól eltelt időtől is (2.1. táblázat, illetve 2.1. fejezet a 9. oldalon). Az általam használt elegyek tágabb értelemben kétkomponensűek (repceolaj-alkohol), azonban önmagában a repceolaj is egy elegy, így az abban előforduló különböző hosszúságú és telítettségű zsírsavakhoz az alkoholok másképp kötődnek. Az ábrán a repceolaj lobbanáspontja nincs ábrázolva, mert az jóval magasabb az elegyek lobbanáspontjánál. A repceolaj nyílt téri lobbanáspontja 285 °C, a zárt téri lobbanáspontja 253 °C.



4.41. ábra. Repceolaj és különböző alkoholok nyílt és zárt téri lobbanáspontja

Az eredményekből látható, hogy az alkohol mind a nyílt téri mind a zárt téri lobbanáspontot csökkenti. Általában a több alkohol jobban lecsökkenti a lobbanáspontot, illetve a nyílt téri lobbanáspont magasabb a zárt térinél. Kivétel azonban mindig van: 20%-os 1- és 2-propanolnál a lobbanáspont zárt térben magasabb. A propanol jobban lecsökkenti a repceolaj-alkohol elegy lobbanáspontját, azonban a tiszta propanol lobbanáspontja is alacsonyabb, mint a butanolé (lásd 2.2. táblázat).

Bár elméletileg a dízelmotorban a tüzelőanyag öngyulladás hőmérséklete játszik szerepet, azonban valós esetben a lobbanáspont ismerete is fontos, hiszen az égéstér belseje nem teljesen sima, egyenlő hőmérsékletű, hanem vannak benne kitüremkedő, forró részek, amik begyűjthetik az elpárolgott tüzelőanyagot. Ezen megfontolásból a cetánszámmérő motorban lejátszódó folyamathoz a zárt térű lobbanáspont mérési módszere áll közel. Mivel azonban a lobbanáspont környezeti nyomáson van mérve (illetve 101324 Pa-ra át kell számolni) a motorban pedig ennél nagyobb nyomás van, így az értékek csak iránymutatásra szolgálnak.

Ha az elegy a forró részekről belobban, akkor méréseink alapján a kipárolgott alkohol lobban be. Ha a kompresszió során megnövekedett hőmérséklet miatt gyullad meg a tüzelőanyag,

akkor viszont a repceolaj gyullad meg előbb, és az gyújtja meg az alkoholt. Látható az elegyek égéstörvényeiből (4.36. ábra), hogy a repceolaj égése két lépcsőben játszódik le (különböző frakciók égnak). Alkohol hozzáadásával a lépcső kisebb lesz, megfelelő mennyiség esetén teljesen el is tűnik. A vizsgált alkoholok viszkozitást csökkentő hatása nagyjából megegyezik, a butanol használatával viszont az elegy tárolása során alacsonyabb biztonsági követelményeket kell betartani, mivel az nem fokozottan tűz és robbanásveszélyes. Gyújtóforrással rendelkező belső égésű motorban történő felhasználás során viszont a propanol előnyösebb lehet, mert azal az égés hamarabb beindul, kisebb lesz a gyulladási késedelem.

A mérésekből megállapítható az elegyek, valamint a nyers, hidegen sajtolt repceolaj tűzveszélyességi osztályba sorolása is (lásd a 4.4. táblázatot). A mérési eredmények félrevezetőek lehetnek. Ha egy tartályban az alkohol belobban, akkor az gyorsan kiég, a visszamaradt repceolaj gyulladáspontja ismét az eredeti. Tehát az égés két lépcsőben játszódik le (lásd a TGA méréseknél megállapítottakat a 4.3.4 fejezetben). A valós körülmények között egy esetleg szegényebb elegy is képes begyulladni, ha a gyújtóforrás energiája nagyobb, nagyobb a nyomás, illetve kisebb az inert gázok mennyisége.

Osztály	Lobbanáspont [°C]	Módszer
A Fokozottan tűz és robbanásveszélyes	20 alatt	Zárt téri
B Tűz és robbanásveszélyes	20-50	Zárt téri, nyílt téri
C Tűzveszélyes	50-300	Nyílttéri
D Mérsékelt tűzveszélyes	300 felett	Nyílt téri
E Nem tűzveszélyes	-	-

4.4. táblázat. Tűzveszélyességi osztályba sorolás határértékei

4.3.7. Elegyek hidegszűrhetőségi határhőmérséklete

A CFPP meghatározása ISL, Model CPP97-2 készülékkel, az ASTM D 6371 szabvány szerint történt.

Méréseim alapján a repceolaj CFPP-je 14 °C, ami 2-4 °C-kal alacsonyabb az irodalmi adatoknál (lásd a 2.1. fejezet). Az alkohol minden esetben csökkenti a hidegszűrhetőségi határhőmérsékletet, legjobban a 20% 2-propanol (-3,7 °C-ra), legkevésbé pedig a 10% isobutanol (6,3 °C-ra) (lásd a 4.5. táblázatot).

Megállapítható, hogy 20 V/V%-os elegy esetén az összes alkohollal el lehet érni a nyárra érvényes határértéket (lásd 2.1. fejezet).

4.3.8. Elegyek oxidációs stabilitása

Az oxidációs stabilitást vizsgáltam 0 és 20% alkoholtartalom esetén. A méréseket Metrohm 873 Biodiesel Rancimat-tal, 80 °C-on végeztem el. A berendezés az EN 14 112 szabvány szerint

Megnevezés	CFPP [°C]
20% 2-propanol	-3,7
10% 2-propanol	0,2
20% isobutanol	-1,5
10% isobutanol	6,3
Repceolaj	14,0

4.5. táblázat. Repceolaj-alkohol elegyek hidegszűrhetőségi határhőmérséklete

működik. A nyers, valamint az alkoholt tartalmazó repceolaj oxidációs stabilitása egyaránt 4,3 ($\pm 0,2$) óra, tehát az alkohol nem változtatja meg ezt az értéket.

Összefoglalás

Az alkohol hatással van a hengertérben a nyomáslefutásra. A dízelmotorban eltüzelt repceolaj és repceolaj – magasabb rendű alkoholok elegyének a károsanyag kibocsátásra az alkohol hatása típustól függetlenül azonos nagyságrendben van. Az elegyek lobbanáspontja jelentősen csökken az alkoholtartalom növelésével, csakúgy mint a hidegszűrhetőségi határhőmérséklet. Az oxidációs stabilitást az elegyített alkohol nem változtatja meg.

5. fejezet

Tézisek

1. Nagy viszkozitású tüzelőanyagok esetében is ugyanolyan cseppméretű (SMD) porlasztás érhető el perdítőelemes nyomásporlasztóval, mint belső keverésű segédközegecs porlasztóval, ezért célszerűbb az energetikailag kedvezőbb nyomásporlasztó használata. Perdítőelemes nyomásporlasztó esetében a 10 bar-on 60 °C-os hőmérséklet 50%-os megemelése annyit javít a folyadék porlaszthatóságán, mint a 60%-kal magasabb nyomás kisebb mértékű, csak 30%-os hőmérsékletemelése. Mindezt kísérletekkel igazoltam [104], [105].
2. Akusztikusan öngerjesztő lángok esetén, külső keverésű, ellentétes perdületű segédközegecs porlasztó alkalmazásakor mind kerozin, mind a nagyobb viszkozitású és nehezebben párolgó repceolaj tüzelőanyag esetében, a cseppek axiális irányára az oszcilláció fáziszöge nincs hatással, axiális és tangenciális sebességre viszont igen. Az oszcilláció hatása az axiális sebességre a 100%-kal nagyobb felületi feszültségű és 130%-kal nagyobb viszkozitású repceolaj esetén (a maximális értékhez viszonyítva) -36%, míg kerozin esetében -50%. Az oszcilláció tangenciális sebességre gyakorolt hatása rendre -20 és -33% [106], [107], [108], [109], [110].
3. Kísérletekkel igazoltam, hogy oszcilláló égés esetén a repceolaj, illetve a kerozin tüzelőanyag hasonló CO és NO_x károsanyag képződési lefolyást eredményez, mind a légfelesleg, mind pedig a bevezetett hőteljesítmény függvényében [106], [107], [108], [109], [110].
4. Bebizonyítottam, hogy repceolajjal a vizsgált magasabb rendű alkoholok 20 V/V%-ig térfogati kontrakció nélkül elegyednek. Mint ismeretes, az egyszerű alkoholok a repceolajjal nem elegyednek, vízzel történő elegyítésükkor viszont jelentős a térfogati kontrakció (etanol – víz 50 V/V%-os elegyénél a 3,7%-ot is eléri, de általában 1-2% körüli) [111].
5. Előkamrás egyhengeres dízelmotorban célszerű a repceolajhoz butanolt, vagy propanolt elegyíteni a viszkozitás csökkentése és az égési folyamat javítása érdekében, 20 V/V%-ig. Motorikus felhasználás szempontjából a vizsgált alkoholok közül a butanol a propanolnál kedvezőbb tulajdonságú, a fűtőértéke miatt. Az alkoholoknak az elegyek cetánszámára, viszkozitására gyakorolt hatásuk megegyezik. A hidegszűrhetőségi határhőmérsékletet a 20 V/V% butanol is lecsökkenti a nyári előírásnak megfelelő szintre, az elegyített alkohol

az oxidációs stabilitására nincs hatással. A butanol jobban csökkenti (azonos térfogat% esetén) az elegy lobbaspontját, ezért fokozottan tűz- és robbanásveszélyes [112], [113], [114], [115].

6. Igazoltam azt a feltételezést, miszerint a motor égésterében az alkohol-repceolaj elegy égése két lépcsőben játszódik le: a magasabb cetánszámú repceolaj gyullad meg először, és ennek lángja gyújtja meg az elegyből kipárolgott, jó kompressziótűrésű alkoholt. Kísérletekkel igazoltam, hogy a repceolaj–alkohol cseppből az alkohol párolgása már alacsony (30 °C alatti) hőmérsékleten elkezdődik, a kipárolgás részaránya a hőmérséklet növelésével nő. 180 °C fölött a csepp már nem tartalmaz alkoholt, csak repceolajat, amely viszont ezen a hőmérsékleten még nem párolog [113], [115], [116].
7. Mérésekkel bizonyítottam, hogy az előkamrás dízelmotorban felhasznált repceolaj – magasabb rendű alkoholok elegyének a károsanyag kibocsátására az alkohol hatása - típusától függetlenül - azonos nagyságrendben van. Kimutattam, hogy 10 és 20 V/V% magasabb rendű alkohol repceolajhoz történő elegyítése esetén a károsanyag-kibocsátás változása az alkoholtartalommal nem lineáris. A változás függvényét a mérési pontok grafikonjával megadtam [117], [118].

Irodalomjegyzék

- [1] SÁGI: *Mezőgazdaságunk útja az Európai Unióba 5. Újratermelődő természetes nyersanyagok az Európai Unióban.* Országos Mezőgazdasági Könyvtár és Dokumentációs Központ, Budapest, 2000.
- [2] SCHÖN: *Verwendung von Rapsöl zu Motorentreibstoff und als Heizölersatz in technischer und umweltbezogener Hinsicht.* Kurzfassung, TU München, 1992.
- [3] BIRKNER: *Untersuchung der Eignung von Pflanzenölen als Kraftstoff für Dieselmotoren und Vorstellung eines neuen Pflanzenöl-Motor-Konzeptes.* Disszertáció, TU Kaiserslautern, 1995.
- [4] SYASSEN, ONNO: *Roh-Rapsöl – Biodiesel.* Összehasonlító jelentés, TU Bonn, 2000.
- [5] ANONYM: *Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard.* Szabvány-javaslat, LTV-Arbeitskreis Dezentrale Pflanzenölgewinnung, Weihenstephan, 2000.
- [6] REMMELE: *Der Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff.* 9. C.A.R.M.E.N. Forum, (vol. 9., pp. 11-21), 2002.
- [7] RACHNER: *Die Stoffeigenschaften von Kerosin Jet A-1.* Közlemény, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Institut für Antriebstechnik, 1998.
- [8] HOLZER: *Experimentelle Untersuchung von Gasturbinen-Zerstäubern bei oszillierender Flamme mittels Laseroptischer Messtechnik.* Diplomamunka, Institut für Thermische Strömungsmaschinen, Universität Karlsruhe (TH), 2004.
- [9] LAZA: *Untersuchungen zur Einsetzbarkeit von rohem Rapsöl für die Verbrennung in Gasturbinen.* Diplomamunka, Institut für Thermische Strömungsmaschinen, Universität Karlsruhe (TH), 2001.
- [10] STUMPF: *Entwicklung eines rapsölbetriebenen Pflanzenölkochherd.* Disszertáció, Technische Universität Stuttgart, 2005.
- [11] BARABÁS, BARABÁS, CSIBI: *Alternatív motorhajtó anyagok I. A repceolaj.* Műszaki szemle, (vol. 20., pp. 3-10), 2002.
- [12] LAMMERS, WENZEL: *Boiling properties and thermal decomposition of vegetable oil methyl ester with regard to their fuel suitability.* vol. 45/12., pp. 4748-4752, Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997.
- [13] GOERING, SCHWAB, DAUGHERTY PRYDE: *Fuel properties of eleven vegetable oils.* ASAE, (vol. 6., pp. 1472-1477), 1982.

- [14] REMMELE: *Begleitforschung zur Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff für Pflanzenöltaugliche Dieselmotoren in Fahrzeugen und BHKW*. Zárójelentés, T. U. München, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, 2000.
- [15] LANG, DALAI, BAKSHI: *Preparation and characterization of bio-diesels from various bio-oils*. Bioresource Technology, (vol. 80., pp. 53-62.), 2001.
- [16] THUNEKE, KERN: *Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke*. Adatbank, TU München, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, 2002.
- [17] MACMILLAN: *Effects of Increased jet fuel freeze point on cold start ability*. Journal of Aircraft, (vol. 19., pp. 360-363), 1982.
- [18] ZÖLDY: *Növényi alapanyagú megújuló tüzelőanyagok adagolásának hatása a gázolaj viszkozitására és az égésfolyamatra*. Mezőgazdasági technika, (vol. 46/11., pp. 2-4.), 2005.
- [19] ZÖLDY: *Bioethanol-biodiesel-diesel oil blends effect on cetane number and viscosity*. 6th International Colloquim Fuels, Technische Akademie Esslingen, Németország, BME, 2007.
- [20] DEMIRBAS: *Fuel properties and calculation higher heating values of vegetable oils*. Fuel, (vol. 77., No. 9/10, pp. 1117-1120), 1998.
- [21] WIDMANN, APFELBECK, GESSNER: *Verwendung von Rapsöl zu Motorentreibstoff und als Heizölerstatz in technischer und umweltbezogener Hinsicht*. Zárójelentés, Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 1992.
- [22] ACKMAN, EATON: *AOCS Official Methods and Recommended Practices*. Am. Oil Chem. Soc., (54:435.), 1977.
- [23] DMYTRYSHYN, DALAI, CHAUDHARI: *Synthesis and characterization of vegetable oil derived esters: evaluation for their diesel additive properties*. Bioresource Technology, (vol. 92., pp. 55-64), 2004.
- [24] FÜLÖP: *Ásványolajtermékek kézikönyve*. Mátradekor, 1987.
- [25] FOGARASSY: *Energianövények a szántóföldön*. SZIE GTK Európai Tanulmányok Központja, 2001.
- [26] LEITNER: *Technologischer und ökonomischer Wandel biogener Treibstoffe in der Automobilindustrie*. Diplomamunka, Karl-Franzens Universität Graz, 2000.
- [27] HEMMERLEIN, KORTE, RICHTER: *Performance, Exhaust Emissions and Durability of Modern Diesel Engines Running on Rape seed Oil*. SAE Technical Paper Series no. 910848, SAE, Warrendale, 1991.

- [28] KARABEKTAS, HOSUZ: *Performance and emission characteristics of a diesel engine using isobutanol–diesel fuel blends*. *Renewable Energy*, (vol. 34/6., pp. 1554-1559), 2009.
- [29] MOLLENHAUER, TSCHÖKE: *Handbuch Dieselmotoren*. Springer Verlag, 2007.
- [30] PARK, KIM, LEE: *Blending effects of biodiesels on oxidation stability and low temperature flow properties*. *Bioresource Technology*, (vol. 99., pp. 1196-1203), 2008.
- [31] BARI, LIM, YU: *Effects of preheating of crude palm oil (CPO) on injection system, performance and emission of a diesel engine*. *Renewable Energy*, (vol. 27., pp. 339-51), 2002.
- [32] NWAFOR: *The effect of elevated fuel inlet temperature on performance of diesel engine running on neat vegetable oil at constant speed conditions*. *Renewable Energy*, (vol. 28., pp. 171-181), 2003.
- [33] NWAFOR: *Emission characteristics of diesel engine running on vegetable oil with elevated fuel inlet temperature*. *Biomass and Bioenergy*, (vol. 27., pp. 507-511), 2004.
- [34] AGARWAL: *Performance and emissions characteristics of Jatropha oil, (preheated and blends) in a direct injection compression ignition engine*. *Applied Thermal Engineering*, (vol. 27/13., pp. 2314-2323), 2007.
- [35] LABECKAS, SLAVINSKAS: *Performance of direct-injection off-road diesel engine on rapeseed oil*. *Renewable Energy*, (vol. 31., pp. 849-863), 2006.
- [36] PLASSMANN, HASSEL: *Neuen Kraftstoffen auf der Spur*. Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bonn, 1974.
- [37] HOUGHTON, ALICO: *Alcohol Fuels*. Westview Press, Boulder, Colorado, 1982.
- [38] CERRI, BOTTA, CHENNAOUI: *Combustion of Emulsified Biofuels in Gas Turbines*. Proceedings of the E.ON UK Power Technology, Ratcliffe on Soar, Nottingham, Università degli Studi Roma Tre Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale., 2006.
- [39] LAZA, KECSKÉS, BERECZKY MEGGYES PENNINGER: *Növényiolaj-alkohol keverékek cetánszámának vizsgálata*. *Energiagazdálkodás*, Budapest, (vol. 46/6., pp. 3-7.), 2005.
- [40] ZÖLDY, HOLLO, THERNESZ: *Butanol as diesel extender option for internal combustion engine*. SAE International, (2010-01-0481), 2010.
- [41] ALASFOUR: *Butanol – A single-cylinder engine study: availability analysis*. *Applied Thermal Engineering*, (vol. 17/6., pp. 537-549), 1997.
- [42] EMÓD, FINICHIU: *Növényi olaj – környezetkímélő motorhajtóanyag a közlekedésben és a mezőgazdaságban*. Környezetvédelmi füzetek, Budapest, OMIKK, 1995.

- [43] PETERSON, REECE: *Potential of vegetable oil as a transportation fuel*. Proceedings of the ASCE 3rd International Conference on Applications of Advanced Technologies in Transport Engineering., ASCE, Seattle, 1993.
- [44] MURAYAMA, OH, MIYAMOTO: *Low Carbon Flower Buildup, Low Smoke, and Efficient Diesel Operation with Vegetable Oils by Conversion to Monoesters and Blending with Diesel Oils or Alcohols*. SAE Technical Paper Series no. 841161, SAE, Warrendale, 1984.
- [45] KORUS, MOUSETIS, LLOYD: *Polymerization of vegetable oils*. Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels. ASAE, (pp. 218 - 223), 1982.
- [46] MILLS, HOWARD: *A preliminary investigation of polynuclear aromatic hydrocarbon emissions from a diesel engine operating on vegetable oil-based alternative fuels*. Journal of the Institute of Energy, (vol. 56., pp. 131-137.), 1982.
- [47] WILLIAMSON, BADR: *Assessing the Viability of using Rape Methyl Ester (RME) as an Alternative to Mineral Diesel Fuel for Powering Road Vehicles in the UK*. Applied Energy, (vol. 59/2-3., pp. 187-214), 1998.
- [48] BATCHELOR, BOOTH, WALKER: *Energy analysis of rape methyl ester (RME) production from winter oilseed rape*. Industrial Crops and Products, (vol. 4., pp. 193-202), 1995.
- [49] ALTIN, CETINKAYA, YÜCESU: *The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines*. Energy Conversion and Management, (vol. 42., pp. 529-538), 2007.
- [50] KUMAR, RAMESH, NAGALINGAM: *An experimental comparison of methods to use methanol and Jatropha oil in a compression ignition engine*. Biomass and Bioenergy, (vol. 25., pp. 309 - 318), 2003.
- [51] PRAMANIK: *Properties and use of jatropha curcas oil and diesel fuel blends in compression ignition engine*. Renewable Energy, (vol. 28., pp. 239-248), 2003.
- [52] SPESSERT, SCHLEICHER: *Einfluss von Biokraftstoffen auf die Abgas- und Geräuschemission kleiner Industriedieselmotoren*. MTZ, (vol. 68/3., pp. 212-222), 2007.
- [53] WARDLE: *Global sale of green air travel supported using biodiesel*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, (vol. 7., pp. 1-64), 2003.
- [54] KIMBLE-THOM, STANEY, CHOLIS LOPP: *The use of bio-fuels as additives and extenders for aviation turbine fuels*. ASME TURBO EXPO '99, (Paper 99-GT-293), 1999.
- [55] LOPP, STANLEY, ROPP: *Soy-diesel blends use in aviation turbine engines*. Report, Indiana Soybean Growers Association, 1995.

- [56] DUNN: *Alternative jet fuels from vegetable oils*. ASAE, (vol. 44/6., pp. 1751-1757), 2001.
- [57] ARDY, BARBUCCI, BENELLI: *Development of Gas Turbine Combustor Fed with Bio-Fuel Oil*. Proc. Second Biomass Conference of the Americas, (pp. 429-438), 1995.
- [58] JUSTE, MONFORT: *Preliminary test on combustion of wood derived fast pyrolysis oils in a gas turbine combustor*. Biomass and Bioenergy, (vol. 19., pp. 119-128), 2000.
- [59] GÖKALP, LEBAS: *Alternative fuels for industrial gas turbines (AFTUR)*. Applied Thermal Engineering, (vol. 24., pp. 1655-1663), 2004.
- [60] WENDIG: *Untersuchungen zur energetischen Nutzung von Pflanzenölen und Biogas in Mikrogasturbinen*. Zárójelentés, Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, 2004.
- [61] DIELMANN: *Betrieb einer Mikrogasturbine mit Pflanzenöl*. AIF Kutatási jelentés 05, AIF, Aachen, 2005.
- [62] EBBINGHAUS, WIESEN: *Aircraft Fuels and their Effect upon Engine Emissions*. Air and Space Europe, (vol. 3., pp. 101-103), 2001.
- [63] MASH: *Biofuels: aviation alternative?* Renewable Energy Focus, (vol. 9/4., pp. 48-51), 2008.
- [64] TURNS: *An introduction to combustion: concepts and applications*. McGraw-Hill, 1996.
- [65] GÖKALP, CHAUVEAU, BERREKAM: *Vaporization of miscible binary fuel droplets under laminar and turbulent convective conditions*. Combust. Sci. and Tech., (vol. 174., pp. 117-142.), 1994.
- [66] SIRIGNANO: *Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays*. Cambridge University Press, 1999.
- [67] MORIN, CHAUVEAU, GÖKALP: *Droplet vaporisation characteristics of vegetable oil derived biofuels at high temperatures*. Experimental Thermal and Fluid Science, (vol. 21., pp. 41-50), 2000.
- [68] BIROUK, GÖKALP: *A new correlation for turbulent mass transfer from liquid droplets*. International Journal for heat and mass transfer, (vol. 45., pp. 37-45), 2002.
- [69] KLAUSMANN: *Untersuchungen zur turbulenten Tropfenbewegung und Verdampfung unter Brennkammertypischen Strömungsbedingungen*. Disszertáció, Universität Karlsruhe (TH), 1989.
- [70] LAVIEILLE, LEMONIE, LEMOUCHÉ: *Investigation of evaporating Droplets in linear stream Using two-color Laser-induced fluorescence*. Combust. Sci. and Tech., (vol. 174., pp. 117-142), 2002.

- [71] PROMMERSBERGER: *Untersuchung der Gemischaufbreitung in Gasturbinenbrennkammern unter Berücksichtigung der Eigenschaften kommerzieller Flüssigbrennstoffe*. Disszertáció, Universität Karlsruhe (TH), ITS, 2004.
- [72] OCHS: *Verdunstung monodisperser, frei beweglicher Brennstoff-Tropfen in einer turbulenten Heissluftströmung*. Disszertáció, ETH Zürich, 1999.
- [73] KNEER, WILLMANN, SCHULZ: *Untersuchungen zur Einzeltröpfchenverdunstung und Charakterisierung von Brennstoffsprühstrahlen*. Kutatási jelentés, Sonderforschungsbereich 167, Institut für Thermische Strömungsmaschinen, Universität Karlsruhe, 1992.
- [74] SCHNEIDER, KNEER, WITTIG: *Effects of refractive index gradients on phase Doppler particle sizing*. The International Symposium on Special Topics in Chemical Propulsion, Hollandia, Institut für Thermische Strömungsmaschinen, Universität Karlsruhe, 1993.
- [75] STENGELE: *Tropfenverdunstung in Hochdruckatmosphäre*. Disszertáció, Universität Karlsruhe (TH), ITS, 1998.
- [76] LEFEBVRE: *Atomization and Sprays*. Hemisphere Pub. Corp., N.Y., USA, 1989.
- [77] LANDIS, MILLS: *Effect of diffusional resistance on the evaporation of binary droplets*. Konferencia-kiadvány, 5th Int. Heat Transfer Conference, Tokyo, 1974.
- [78] AGGARWAL: *Modelling of a dilute vaporizing multicomponent fuel spray*. pp. 1949-1961, Int. Heat Mass Transfer Conference, 1987.
- [79] BURGER, SCHMEHL, PROMMERSBERGER: *A Multi-Component Droplet Evaporation Model for Real Aviation Fuels at Elevated Pressures*. Renewable Energy, (vol. 27., pp. 339-351), 2002.
- [80] WILLMANN: *Charakterisierung eines Airblastzerstäubers - Bestätigung numerischer Simulationen mit einem angepassten Phasen-Doppler-Tropfenmessverfahren*. Kutatási jelentés, Institut für Thermische Strömungsmaschinen, 1999.
- [81] AIGNER: *Charakterisierung der bestimmenden Einflussgrößen bei der Luftunterstützte Zerstäubung: physikalische Grundlagen und messtechnische Erfassung*. Disszertáció, Institut für Thermische Strömungsmaschinen, Universität Karlsruhe (TH), 1986.
- [82] MAIER: *Gemischaufbereitung bei der mageren Vormischverbrennung in Gasturbinen: Entwicklungspotential und Grenzen*. Disszertáció, Universität Karlsruhe (TH), ITS, 2000.
- [83] RAETZO: *Charakterisierung von Düsen zum Zerstäuben von Flüssigkeiten*. Disszertáció, ETH Zürich, 1995.
- [84] SAMENFINK: *Sekundärzerfall von Tropfen*. Kurzlehrgang Atomization and Sprays, Institut für Thermische Strömungsmaschinen, 1995.

- [85] OHNESORGE: *Die Bildung von Tropfen an Düsen und der Zerfall flüssiger Strahlen*. Angewandte Mathematik und Mechanik, (vol. 16., pp. 355-358), 1936.
- [86] HEHLE: *Aufbereitung und Verteilung flüssiger Brennstoffe: Untersuchung bei Druck und numerische Beschreibung*. Kutatási jelentés, Universität Karlsruhe (TH), Institut für Thermische Strömungsmaschinen, 2002.
- [87] KEREK: *Numerischer Beitrag zur Simulation von BDE-Motoren mit Mehrlochinjektor und Strahlgeführtem Einspritzverfahren*. Disszertáció, Universität Karlsruhe (TH), Institut für Kolbenmaschinen, 2006.
- [88] PENNINGER: *Helmholtz rezonátornak, mint nem akusztikai lengőrendszernek a vizsgálata*. Disszertáció, BME, 1977.
- [89] MATVEEV: *Thermoacoustic Instabilities in the Rijke Tube: Experiments and Modeling*. Disszertáció, California Institute of Technology Pasadena, California, 2003.
- [90] RAYLEIGH, LORD F. R. S.: *On the Instabilities of Jets*. Jelentés, Proceedings of the London Mathematic Society, Oxford, 1879.
- [91] BAADE: *Selbsterregte Schwingungen in Gasbrennern*. Klima und Kälteingenieur, (Ki4), 1974.
- [92] HERMAN, ZANGL, GLEIS: *Untersuchung der Anregungsmechanismen selbsterregter Verbrennungsschwingungen an einem Verbrennungssystem mit Flüssigkraftstoff*. Kutatási jelentés, Nr. 1193, VDI, Düsseldorf, 1995.
- [93] HEHLE, SCHÄFER, KOCH: *Experimentelle Untersuchung von periodischen Instationaritäten an einem neuartigen Zerstäuber mittels phasenaufgelöster PDA-Messungen*. Spray, (Reihe-Freiberger Forschungsheft, pp. 123-132), 2002.
- [94] MÜLLER, HEHLE, KOCH: *Zerstäubungsverhalten von Airblastdüsen bei oszillierenden Strömungen*. 22 Deutscher Flammentag, (VDI-Berichte Nr. 1888. pp. 249-257), 2005.
- [95] MEIER, WEIGAND, DUAN: *Detailed characterization of the dynamics of thermoacoustic pulsations in a lean premixed swirl flame*. Combustion and Flame, (vol. 150., pp. 2-26), 2007.
- [96] SCHILDMACHER: *Experimentelle Charakterisierung der Instabilitäten vorgemischter Flammen in Gasturbinen-Brennkammern*. Kutatási jelentés, ITS, Universität Karlsruhe, 2005.
- [97] BÜCHNER: *Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Entstehungsmechanismen selbsterregter Druckschwingungen in technischen Vormischverbrennungssystemen*. Disszertáció, Universität Karlsruhe (TH), 1992.
- [98] WILLIAMS: *Combustion of liquid fuel sprays*. Butterworth and Co. Ltd, 1990.

- [99] MERKLE: *Flammenstabilität einer Air-Blust-Zerstäuber/Brennkammer-Anordnung bei atmosphärischer Druck*. Zárójelentés, Engler-Bunte Institut, Universität Karlsruhe, 2001.
- [100] MEIER, SCHMEHL, ROSSKAMP: *Verbundvorhaben - KEROMIX Stabile schadstoffarme Verbrennung. Teilprojekt: Airblast-Zerstäubung*. Zárójelentés, Universität Karlsruhe (TH), 1999.
- [101] HADEF, LENZE: *Measurements of droplets characteristics in a swirl-stabilized spray flame*. Experimental Thermal and Fluid Science, (vol. 30., pp. 117-130), 2005.
- [102] HERMANN: *Anregungsmechanismen und aktive Dämpfung selbsterregter Brennkammerschwingungen in Flüssigkraftstoffsystemen*. Kutatási jelentés, Nr. 364, VDI, Düsseldorf, 1997.
- [103] LOSONCZI, HERMANUTZ, LAZA: *Investigation of combustion process of pure and refuse vegetable oil in Diesel engine*. Gépészet 2006, 2006.
- [104] LAZA, MEIER, PENNINGER: *Untersuchungen zur Einsetzbarkeit von rohem Rapsöl für die Verbrennung in Gasturbinen*. Frühlingsakademie, München, BME - Institut für Thermische Strömungsmaschinen, Universität Karlsruhe (TH), 2002.
- [105] LAZA, MEIER, KOCH: *Untersuchungen zum Einsatz von Rapsöl in Gasturbinen*. Internationale Conference on Heat Engines and Environmental Protection, Balatonfüred, (pp. 99-106), 2003.
- [106] LAZA, KOCH, PENNINGER: *A kerozin és repceolaj gázturbinaszpecifikus vizsgálata II*. Magyar Energetika, (vol. 13/5., pp. 3-9), 2005.
- [107] LAZA, KOCH, PENNINGER: *Examination of kerosine and rape oil with specification of gas turbine*. Gépészet 2004, (pp. 622-626), 2004.
- [108] LAZA, KOCH, PENNINGER: *Kerozin és repceolaj gázturbinaszpecifikus vizsgálata*. Magyar Energetika, (vol. 12/5., pp. 28-33), 2004.
- [109] LAZA, KOCH, PENNINGER: *Analysis of oscillation of gas turbine combustion in case of rape seed oil and kerosine jet-a fuel*. microCAD2005, Miskolc, (pp. 49-54), 2005.
- [110] LAZA, KOCH, PENNINGER: *Analysis der Oszillation eines rapsölbetriebenen Kleingasturbinenbrenner*. 22. Deutscher Flammentag, Braunschweig, (VDI-BERICHT 1888. pp. 673-679), 2005.
- [111] LAZA, TÓVÁRI, PENNINGER: *Investigation of Density and Heat Value of Rape Seed Oil and Rape Seed Oil + Alcohol Mixtures*. Proc. of International Conference of Energetics and Electrical Engineering, Cluj Napoca, (pp. 65-69), 2006.
- [112] LAZA, PENNINGER: *Repceolaj és magasabb rendű alkoholok keverékének viszkozitása*. Energiagazdálkodás, Budapest, (vol. 46/5., pp. 3-5), 2005.

- [113] LAZA, KERÉKES, PENNINGER: *A repceolaj, valamint a repceolaj és magasabb rendű alkohol-keverékek tűzveszélyességének meghatározása*. Szent István Egyetem Tudományos Közlemények, Budapest, (vol. 3/1., pp. 40-44), 2006.
- [114] LAZA, KECSKÉS, BERECZKY PENNINGER: *Examination of burning process of regenerative liquid fuel and alcohol mixtures in diesel engine*. Periodica Politechnica ser. Mech. Eng., Budapest, (vol. 50/1., pp. 11-29), 2006.
- [115] LAZA, BERECZKY: *Determination of the Evaporation Constant in Case of Pure and with Alcohol Mixed Rape Seed Oil*. Proc. of 6th International Conference in Mechanical Engineering, Brasov, (pp. 232-237), 2008.
- [116] LAZA: *Pilot Test and Theoretical Analysis of Evaporation of One and More Component Fuels*. Periodica Polytechnica-Mechanical Engineering, (vol. 52/2., pp. 67-71), 2009.
- [117] LAZA, BERECZKY: *Influence of Higher Alcohols on the Combustion Pressure of Diesel Engine Operated with Rape Seed Oil*. Acta Mechanica Slovaca, (vol. 13/3. pp. 54-61), 2009.
- [118] LAZA, BERECZKY: *Magasabb rendű alkohol hatása dízelmotorban lejátszódó égési folyamatokra repceolaj tüzelőanyag esetén*. Energiagazdálkodás, (vol. 50/6., pp. 19-24), 2009.
- [119] CRC: *Handbook of aviation fuel properties*. CRC Report No. 530, Coordinating research Council, 1983.
- [120] MTU: *Chemisch- physikalischen Kenndaten von Flugkraftstoffen*. Jelentés, Motoren- und Turbinen Union, 1992.
- [121] SICHTIG, BORMANN, LÜTHE: *Zum Siedeverhalten von Rapsöl*. vol. 110/3., Erdöl, Erdgas, Kohle, 1994.
- [122] DEMIRBAS, GÜLLÜ, CAGLAR AKDENIZ: *Fuel properties of oils*. Energy Sources, vol. 19., pp. 765, Black Sea University, Turkey, 1997.
- [123] GARDNER, WHYTE: *Gas Turbine Fuels*. Közlemény, Institute of Petroleum, 1990.
- [124] MEGGYES, BOSCHÁN: *Korszerű tüzeléstechnika, III. kötet*. Országos Műszaki Információs Központ és Könyvtár, 1986.
- [125] LEFEBVRE: *Gas Turbine Combustion*. Hemisphere Pub. Corp., N.Y., USA, 1983.
- [126] JONES, TROUT, WEAR MCBRIDE: *Combustion gas properties*. NASA TP-2359, NASA, 1984.
- [127] RUCK: *Laser-Doppler-Anemometrie*. AT-Fachverlag GmbH, Stuttgart, 1987.
- [128] MENRAD, KÖNIG: *Alkoholkraftstoffe*. Springer Verlag, Wien, 1982.
- [129] MEGGYES: *Hőerőgépek égéstermékei okozta levegőszennyezés*. Műegyetemi Kiadó, 1993.

A. Függelék

Irodalomkutatás

A.1. Repceolaj és kerozin jet-A tulajdonságai

Kerozin forrása

Kondenzálódott folyadékmennyiség [térf.%]	Hőmérséklet [°C]		
	1. mérés [119]	2. mérés [120]	3. mérés
IBP	177	168	150
5	184	177	167
10	190	184	170
20	201	194	176
30	208	201	181
40	211	207	186
50	212	211	191
60	214	216	197
70	221	222	203
80	233	230	211
90	250	243	222
95	258	253	230
FBP	266	264	244

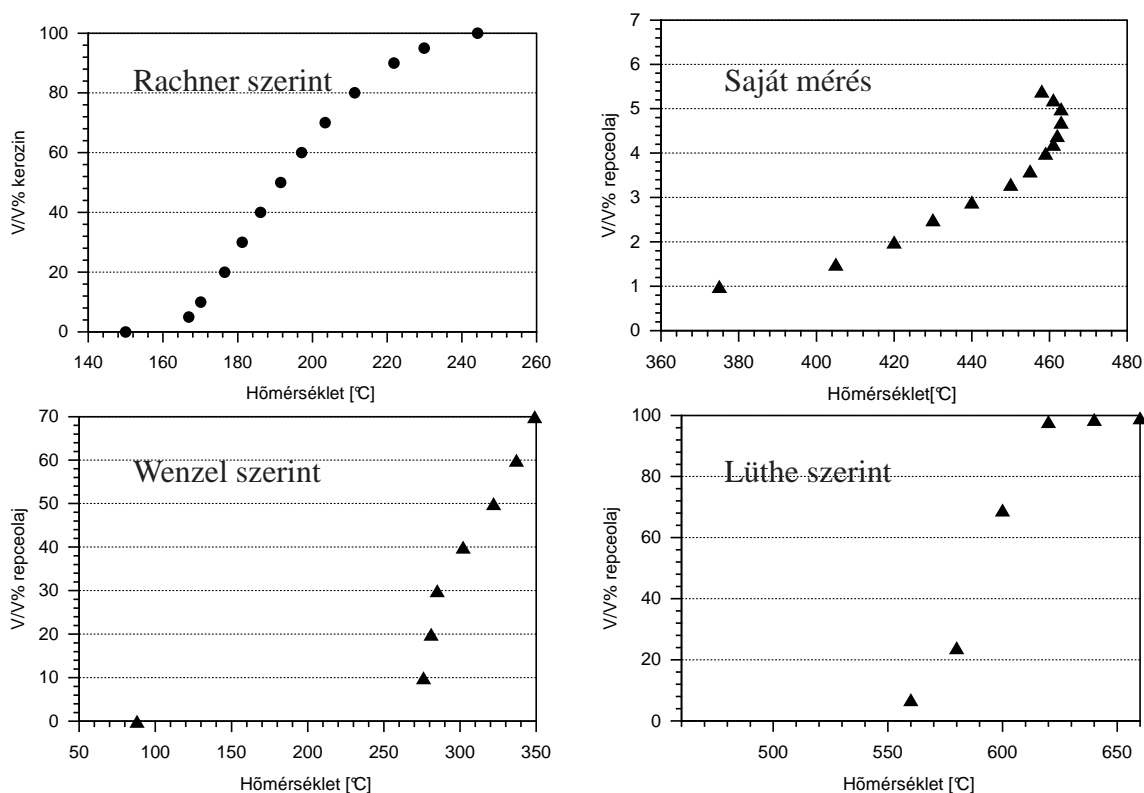
A.1. táblázat. Kerozin desztillációs görbéjének néhány pontja

Forrás – Desztillációs görbe

A folyékony tüzelőanyagok fontos tulajdonsága az illékonyság, amelyet leginkább a tüzelőanyag gőznyomása jellemez. Ennek értéke azonban az olajoknál túl alacsony, ezért a desztillációs görbét használjuk az illékonyság bemutatására [98].

A desztillációs görbe a többkomponensű anyagok elpárolgásáról ad felvilágosítást. Mérése: 100 cm³ térfogatú anyagot hevítenek, és az elpárolgott gőz hőmérsékletét mérik. A keletkezett gőzt egy kondenzátorban lecsapatják, majd annak a tömegét megméri. A két mért adat megadja a desztillációs görbét. Forrás kezdetének azt tekintjük, amikor az első csepp megjelenik, végének pedig a legnagyobb hőmérsékletet, ahol még volt kondenzáció (és ezzel együtt elpárolgás). A desztillációs görbe alakulása függ a berendezéstől, a mérési programtól, így az csak minőségellenőrzésre használható.

A kerozin forrása 162 ± 12 °C-nál kezdődik, és 262 ± 12 °C-nál végződik. A nyers repceolaj desztillációs görbéje 70–525 °C között van (lásd A.1. ábra).



A.1. ábra. Repceolaj és kerozin desztillációs görbéje

A desztillációs görbe (lásd A.1. ábra) felvétele folyamán az irodalomban talált adatokkal megegyezően krakkolódás lépett föl [3], [2], [21]. A próba felmelegítésénél a rövid szénhidrogénláncok gyorsan elpárolognak, a hosszúak még folyékonyak maradnak. Egy adott hőmérséklet felett a hosszúak felhasadnak, új, rövid láncú molekulákat képeznek. Ezek gyorsan elpárolognak, így a méréshez szükséges vákuum lecsökken, erős füstképződés lép fel. A repceolaj forrasi hőmérséklete körülbelül 330 °C-nál kezdődik, vagyis mintegy 170-200 °C-kal magasabban, mint a keroziné, és körülbelül 100 °C-kal magasabban, mint a dízelolajé. Wenzel és Lammer [12] magyarázata szerint a hosszú szénláncú molekulák hasadása már alacsony hőmérsékleten is végbemegy, azonban ezek részaránya kicsi, az elpárolgás minőségére nincs igazán hatással. Nagyobb hőmérsékleten felgyorsul a zsírsavmolekulák felhasadása, egyszerre nagy mennyiségű könnyen párolgó molekula jelenik meg, ami a párolgási hőmérséklet csökkenését

vonja maga után. Wenzeléknek sikerült a repceolajat mintegy 70%-ban desztillálniuk. Igaz, a mérések elején sűrű, nem átlátszó gőz képződött, amit nem sikerült lecsapatniuk, így az elillant. Ez a gőzképződés körülbelül 140 °C-ig tartott, aztán megszűnt. A mérések végén, körülbelül 700 °C-nál a mérőedényben tovább nem desztillálható maradvány maradt.

Lüthe [121] DISTACT módszerrel 99%-ban desztillálta a repceolajat (lásd A.1. ábra [121]). Ezen módszernél a desztillálendő folyadékot 10^{-3} mbar nyomáson vékony filmként viszik fel egy hőcserélő felületre, ahol „molekulárisan” elpárolog. Atmoszférius körülmények között 328 °C-nál (38%-os desztillációnál) erős füstképződés miatt leállította a kísérletet.

Égéshő (E), fűtőérték (F)

Demirbas [122] az égéshő, illetve a fűtőérték meghatározására először a tüzelőanyagban található szén, hidrogén és oxigéntartalmat használta (A.1 egyenlet).

$$E = 33,5c + 142,3h - 15,4o \quad (\text{A.1})$$

Gardner és Whyte munkájában [123] közölt formula (A.2 egyenlet) alapján a folyékony tüzelőanyagok fűtőértéke kiszámítható, ahol a h , a c , az s a hidrogén, a szén, illetve a kén tömegaránya a tüzelőanyagban, ρ_{liq} a tüzelőanyag sűrűsége 15 °C-on.

$$F_{Gardner} = 37,2889 \cdot 10^6 c + 0,566173 \cdot 10^8 h - 0,3266 \cdot 10^8 s - 2,3003 \cdot 10^3 \rho_{liq} \quad (\text{A.2})$$

A szerzők szerint ez az egyenlet 95%-os pontosságú, ha a hidrogéntartalom $h = 0,013 \div 0,1414$ között, $s = 0,01 \cdot 10^{-2} \div 0,33 \cdot 10^{-2}$ között, a sűrűség pedig (15 °C-on) $\rho_{liq} = 789 \div 830 \text{ kg/m}^3$ között helyezkedik el. A kerozin teljesíti ezeket az előírásokat, a repceolaj viszont nem, mert annak sűrűsége nagyobb a megengedettnél.

Boie szerint a szilárd és folyékony tüzelőanyagok fűtőértéke a következő összefüggés szerint számítható (A.3 egyenlet).

$$F_{Boie} [MJ/kg] = 34,8c + 93,9h + 6,3n + 10,5s - 10,5o - 2,5w \quad (\text{A.3})$$

Egy későbbi munkájában Demirbas [20] 20 növényi olaj égéshőjét vizsgálta meg, a szappanosodásérték (saponification value, SV) és jódtartalom (szén-szén kettős kötés-tartalom) (iodine value, IV) alapján. Ebben a munkában a növényi olaj molekulaszervezetére visszavezető egyenletet állított fel az égéshő kiszámítására. A szappanosodásérték csökken a molekulatömeg emelkedésével, a jódtartalom növekedése a fűtőérték csökkenését vonja maga után. A szerző által javasolt képlet: A.4 egyenlet.

$$E [MJ/kg] = 49,43 - [0,041(SV) + 0,015(IV)] \quad (\text{A.4})$$

Adiabatikus égési hőmérséklet

Az adiabatikus égési hőmérsékletre több tényező gyakorol erős hatást. Ezek: a légfeszültség, az oxigéntartalom, az előmelegítési hőmérséklet, a nyomás és a hidrogén/szén-arány [124], [125]. A maximális adiabatikus láng hőmérséklet tüzelőanyagban gazdag keverékben keletkezik, ha a nyomás 200 bar alatti.

Szénhidrogének sokkal nagyobb hőmérsékleten égnek el, ha nem levegővel, hanem oxigénnel égetjük őket. Minél nagyobb az oxigéntartalom, annál nagyobb az adiabatikus égési hőmérséklet.

Az előmelegítési hőmérséklet növelésével nő az adiabatikus égési hőmérséklet. A bevitt entalpiatöbblet csak körülbelül 50-70%-a fordítódik a láng hőmérséklet emelésére, a többit a nagyobb hőmérséklet miatt megnövekedett disszociáció emészti föl.

A disszociációs folyamatokat a nyomás növelésével gátolni lehet, ezért a nyomás növekedésével nő az adiabatikus égési hőmérséklet. Ha az adiabatikus égési hőmérséklet 1 bar nyomáson 2100 K alatti, akkor ez a hatás alig érezhető, mert ezen a hőmérsékleten a CO₂ és H₂O disszociációja kismértékű, hatása elhanyagolható [124].

Jones [126] munkájában a számításokhoz több kerozinpróba átlagát vette figyelembe, a következő értékekkel: H/C arány: 1,9067, fűtőérték: 43,264 MJ/kg. Ezek az értékek alig térnek el a már említett értékektől (H/C=23/12=1,917, F=43,260 MJ/kg). Vizsgálatai folyamán a kerozin hőmérsékletét állandó értéken tartotta ($T_{kerozin}=298$ K), a belépő levegő hőmérsékletét $T_{lev.be}$ állította, mégpedig 250, 400, 600, 800, 1000, 1100, 1150 K-re. Vizsgálta még a nyomás és az FAR (fuel-air-ratio, FAR) hatását az égési hőmérsékletre.

		Adiabatikus hőmérsékletemelkedés kerozin jet-A esetén [126] alapján $T_{kerozin}=298$ K			
		$\Phi = 1.0$	$\Phi = 1,4$	$\Phi = 1,6$	$\Phi = 1,8$
$T_{lev} = 250$ K	p=1 atm	2009 K	1786 K	1635 K	1492 K
	p=20 atm	2072 K	1789 K	1636 K	1493 K
	p=40 atm	2082 K	1789 K	1636 K	1493 K
$T_{lev} = 400$ K	p=1 atm	1921 K	1726 K	1575 K	1431 K
	p=20 atm	1998 K	1731 K	1577 K	1432 K
	p=40 atm	2011 K	1732 K	1577 K	1432 K
$T_{lev} = 600$ K	p=1 atm	1798 K	1645 K	1495 K	1351 K
	p=20 atm	1895 K	1656 K	1500 K	1353 K
	p=40 atm	1912 K	1657 K	1500 K	1353 K
$T_{lev} = 800$ K	p=1 atm	1671 K	1560 K	1417 K	1273 K
	p=20 atm	1788 K	1584 K	1427 K	1277 K
	p=40 atm	1810 K	1586 K	1427 K	1278 K

A.2. táblázat. Kerozin adiabatikus égési hőmérséklete

A kapott eredmények megegyeznek a bevezetőben említett tendenciákkal.

Repceolaj esetében is ugyanúgy érvényesek a kerozinnál megállapított tendenciák. Tovább növelhető az égési hőmérséklet a tüzelőanyag előmelegítésével, ezt azonban a krakkosodás, oxidálódás miatt csak mértékkel lehet alkalmazni. Kísérleti megfigyeléseim [104] mutatták, hogy már 70 °C-os repceolaj-előmelegítés esetén is jelentős kokszerakódás keletkezik a nyomásportlasztóban, ami a stabil üzemet veszélyezteti.

Prof. Dr. Meggyes Attila segítségével [124] sikerült meghatározni a repceolaj adiabatikus égési hőmérsékletét. A módszer figyelembe veszi a repceolaj összetételét, a kisebb égésilevegő-szükségletet, valamint a disszociációt. A módszer segítségével 298 K kiinduló hőmérséklet, 1 bar nyomás, és $\lambda = 1$ esetén

$$T_{ad., Repceolaj} = 1965K$$

ami valamivel alacsonyabb a kerozin adiabatikus égési hőmérsékleténél.

B. Függelék

Kísérleti berendezések

A repceolaj porlaszthatóságához, az akusztikusan öngerjesztő lángokhoz, a repceolaj és repceolaj+alkohol elegyek belső égésű motorokban történő vizsgálatához a fejezetben bemutatott módszereket és kísérleti berendezéseket használtam fel.

B.1. PDA

A PDA nem egy síkban méri az áramlást, hanem egy pontban, viszont nem csak két, hanem 3 dimenzióban, valamint lehetővé teszi a mért csepp átmérőjének meghatározását is.

A mérési elv a következő: két azonos hullámhosszú, fókuszált lézernyalábot metszésbe hozunk, akkor a metszéspontban interferenciacsíkok alakulnak ki, azaz periodikusan hol erősebb, hol gyengébb intenzitású a fény. Ha ezen a mérési térfogaton áthalad egy csepp, akkor a csepp általi szórás is periodikusan erős/gyenge lesz. A szórásintenzitás változásának a gyorsaságából és az interferenciasávok egymástól való távolságából ki lehet számolni a csepp sebességét, merőlegesen az interferencia-sávokra.

Hogy az erre merőleges sebességet is meg lehessen határozni, egy második, az elsőtől eltérő hullámhosszú lézersugárpárt alkalmaznak.

Hogy a visszaáramlási zónában levő cseppek sebességét irányhelyesen lehessen meghatározni, ezért az egyik lézersugár hullámhosszát elhangolják. Ezt legtöbbször úgy valósítják meg, hogy a lézersugarat prizmával két részre osztják, majd az egyik hullámhosszát egy Bregg-cellával elállítják. Ezáltal az interferenciasávok mozognak, így az álló cseppeknek is van jelük. A mozgó interferenciacsíkokkal megegyező irányba mozgó cseppek kisebb frekvenciájú jeleket adnak, mint az azzal szemben mozgó. A frekvenciaeltolást olyan nagyra kell beállítani, hogy a cseppek sebessége és iránya egyértelműen meghatározható legyen [127].

Az átmérő méréséhez 3 detektort használnak, ilyenkor a különböző detektorokhoz időben eltolódva jut el a cseppeken megtört fény. Az, hogy a csepp felületén megtört fény milyen gyorsan halad el a detektorok között, arányos az átmérővel.

Az Institut für Thermische Strömungsmaschinen laboratóriumában rendelkezésre álló PDA adatai és a mérési beállítások a következők: 2D-Fiber lézer, hullámhossz: 514,5 nm és 488 nm.

A mérési térfogat hossza $200 \mu\text{m}$. Mind az adó, mind az érzékelő egy léptetőmotorral $0,001 \text{ mm}$ pontossággal mozgatható állványra van szerelve, így az egyes mérési pontok pontosan beállíthatók. A mérések pontonként 30 másodpercig, vagy stabil üzemben 20000 , oszcilláció vizsgálatakor 100000 darab detektált cseppig tartottak. A mérési szög kiválasztásánál két tényezőt kell figyelembe venni. Egyrészt a reagáló folyadékok mérésekor a csepp hőmérsékletét, mert a hőmérséklet változásával a törésmutató is állandóan változik. A törésmutató változásából eredő hiba 45° -nál a legkisebb. Másrészt viszont a legpontosabb méréshez a lehető legkisebb szórási szöget kell választani. Így a méréshez 30° -os szórási szöget választottuk. A mérési beállításról, a mérési hibákról és azok kiküszöböléséről az irodalomban további részletek találhatóak [127], [106], [8].

A mérések kiértékelésénél a cseppek axiális, tangenciális sebességét valamint a Sauter átmérőjét határoztam meg. Akusztikusan öngerjesztő lángok vizsgálata esetében mindezt az oszcillálás frekvenciájának függvényében végeztem el, a frekvenciát 20° -os tartományokra (fázisokra) felosztva.

B.2. Planer Mie Scattery (PMS)

Különböző tüzelőanyagok (repceolaj, kerozin) használata esetén az első különbségek már a primer porlasztás folyamán megjelennek. A primer levegő magával ragadhatja a kisebb cseppeket, ezzel a cseppek térbeli eloszlása a porlasztó szája közelében változik, mert nem csak a filmterítő ajakról kerül tüzelőanyag a tüzelőtérbe. Oszcilláció szempontjából stabilizálóbb hatásúak a nagyobb méretű elragadott cseppek, mert ezekre kevésbé hat az oszcilláció visszatorló hatása, folyamatosan kerülnek cseppek az tüzelőtérbe. Kis cseppek kisebb kinetikai energiával rendelkeznek, így a visszatorlasztás ugyanúgy kihat mozgásukra, mint a filmterítő ajkakon levő folyadékra.

A mérési elv a Fraunhofer-szóráson alapul: ha egy gömb alakú testet egy lézerfényvel megvilágítunk, akkor a mögötte elhelyezett ernyőn koaxiális sötétebb/világosabb gyűrűkből álló képet kapunk. A mért intenzitáseloszlásból ki lehet számolni a test átmérőjét. A kép felvétele multielemfotodetektorral történik [69] [81].

Ezen módszer segítségével gyorsan meghatározható egy spray cseppjeinek Sauter középátmérője, ellentétben a PDA-val, amellyel csak egy pontban határozható ez meg. Hátránya, hogy nagy lencsetávolság esetén a kisebb cseppekről érkező jelek elvesznek. Mivel egy mérés esetenként körülbelül fél percig tart, és a módszer nem veszi figyelembe a cseppek sebességét, így a lassabb cseppek átmérője súlyozottan kerül az eredménybe.

Könnyen párologó folyadékok esetén ún. „beam steering” léphet föl, amit a spray-t körülvevő felhőn megtörő lézersugár okoz. További problémát jelenthet az, ha a lézersugár nem a porlasztmány közepén megy át, mert ekkor az eredményben a mag és a szélső tartomány közötti cseppméret-különbségek előjönnek.

Az Institut für Thermische Strömungsmaschinen laboratóriumában rendelkezésre álló berendezés adatai: He-Ne lézer, hullámhossz: $632,8 \text{ nm}$, 31 félkörben elhelyezett multielemfotodetektor. Gyártó: Sympatec GmbH.

B.3. Lézersík-módszer

A lézersík-módszert gyakran használják áramlás, égés lefolyásának láthatóvá tételére. Ezzel a módszerrel kétdimenziós koncentrációeloszlást lehet mérni.

A mérés folyamán egy lézersugarat lencsékkel 10 cm széles és körülbelül 0,5 mm vastag síkká alakítunk, amit a porlasztmányon átvezetünk. A tüzelőanyag-cseppek, vagy az áramláshoz adott nyomkövető részecskék (tracer particle) szórják a rájuk eső fényt, amit egy nagysebességű kamerával lehet érzékelni. Ha a kamera elé szűrőt helyezük, vagy nagyfrekvenciás lézert alkalmazunk, akkor a láng saját fénye kiszűrhető, és csak a cseppek által szórt fény válik érzékelhetővé.

Ha az áramlás, illetve azon belül a láng pulzál, akkor lehetőség van az oszcilláció egyes fázisaiban felvételek készítésére, így láthatóvá válik a lengés különböző fázisaiban a cseppek előfordulásának gyakorisága a lézer által bevilágított síkban.

Méréseimhez a pulzációt 18 fázisra bontottam fel, így egy fázis 20° -ra adódik; fázisonként 100 darab képet készítettem, és abból számítottam ki a cseppek előfordulásának gyakoriságát.

B.4. PIV

A lézersík-módszerrel rokon mérési eljárás a Particle Imaging Velocimetry (PIV). Elve: két gyors egymásutánban felvett képen található részecskék elmozdulásából számítható az áramló cseppek sebessége. A cseppeket általában a beeső lézerfény által keltett Mie-szórás teszi láthatóvá. Egyes cseppek elmozdulásából a sebességvektor, a porlasztmány elmozdulásából pedig a sebességmező határozható meg, de csak a lézersík síkjában, arra merőleges összetevő nem kerül kiértékelésre.

A mérésekhez lehet auto- vagy keresztkorrelációt alkalmazni, attól függően, hogy egy vagy két „negatívra” vesszük fel a két képet. A keresztkorrelációval készült képek kiértékelése egyszerűbb, viszont nagyobb számítástechnikai kapacitást igényelnek.

Méréseimnél az áramlás várható iránya axiális, így autókorrelációt is lehetne alkalmazni, azonban számolni kell esetleges visszaáramlással, ahol lényeges a cseppek iránya, így a keresztkorrelációs mérési módszert választottam. A kiértékeléshez minden mérési fázisban 100×2 képet készítettem. Az oszcillálás 20° -os tartományokra lett felosztva.

Az Institut für Thermische Strömungsmaschinenen a következő berendezés állt rendelkezésre: 532 nm hullámhosszú Nd-YAG lézer, impulzushossz 20 ns, teljesítmény 120 nJ/impulzus. Gyártó: Dantec.

B.5. Égéshő-meghatározó berendezés

A készülékben az égés 30 bar nyomású oxigén atmoszférában megy végbe. Mivel a készülék lehűti a füstgázokat a kiindulási hőmérsékletre, és ezáltal a füstgázból a nedvesség lecsapódik; a készülék az égéshő meghatározására alkalmas.

A fűtőérték az égéshőből számítással határozható meg, a következő képlet szerint.

$$H_u[MJ/kg] = H_o - r * \frac{9H + w}{100} \quad (B.1)$$

B.6. Lobbanáspontmérő készülék

Lobbanáspont az 101324 Pa nyomásra átszámított, °C-ban kifejezett legalacsonyabb hőmérséklet, amelyen megszabott körülmények mellett a folyadékból annyi gőz keletkezik, hogy az a körülötte levő levegővel elegyedve gyújtóláng közelítésére az anyag egész felületére kiterjedően ellobban. Gyulladáspontnál az égés 5 másodpercig fennmarad.

Nyílt téri lobbanáspont mérésénél a próbát nyílt tégelyben melegítjük, majd a keletkezett gőzöket egy gyújtóláng segítségével ellobbantjuk.

Zárt téri lobbanáspont mérésénél a próbát zárt, kevert tégelyben melegítjük, majd a keletkezett gőzöket egy izzítógyertya segítségével ellobbantjuk.

B.7. Sűrűségmérés

Sűrűség: egységnyi térfogatú anyag tömege 15 °C-on és 101,325 kPa nyomáson [kg/m³].

Areométerrel elvégzett mérés szakaszos, az Archimedes törvényén alapszik. Az areométer addig süllyed a folyadékba, míg az általa kiszorított folyadék súlya egyenlővé nem válik az egész areométer súlyával. A merülés mértéke függ a folyadék sűrűségétől, ami az areométer vékony csövén levő skálán leolvasható.

B.8. Viskoziméter

A kinematikai viszkozitás a folyadék gravitációs áramlásakor fellépő ellenállás.

A kinematikai viszkozitás során azt az időt mérjük, amely alatt egy meghatározott mennyiségű folyadék a viszkoziméter kapillárisán gravitációs áramlással reprodukálható hidrosztatikai nyomás hatására, adott hőmérsékleten átfolyik.

B.9. Termogravimetria – termomérleg

A termogravimetriás (TGA) görbék, amelyek a minta tömegvesztését írják le az idő, illetve a hőmérséklet függvényében, termomérleg segítségével veszik föl. Az eredmények értékelését gyakran segíti a tömegváltozás sebességének ábrázolása, ezt derivatív termogravimetriás (DTG) görbének nevezik. A TGA- és DTG-görbék egyidejű felvételével pontosabban lehet értelmezni és értékelni a minta hőbomlásának folyamatát.

B.10. Cetánszámmérés

Egy adott dízelolaj cetánszáma megegyezik a mérőmotorban vele azonos égési tulajdonságokat mutató elsődleges referencia-tüzelőanyag – cetán – és a másodlagos referencia-tüzelőanyag – α -metilnaphthalinból – készült elegy térfogatszázalékban kifejezett cetántartalmával.

B.11. Cetánszámmérő motor

A CFR F-5-ös dízel-tüzelőanyagok cetánszámát meghatározó eljáráshoz kifejlesztett berendezés egy egyhengeres, négyütemű, dízel körfolyamatú belső égésű motor. Különlegessége a berendezésnek a hengerfejben kialakított előkamrás égéstér (úgynevezett elsődleges égéstér), amelynek térfogatát (ezáltal a motor kompresszióviszonyát) változtatni lehet, akár a motor üzeme közben is. Az előkamrás égéstér kialakításnál a kamra térfogata ezen típusú dízelmotoroknál általában a főégéstér 20-50%-a.

A tüzelőanyag-ellátás három, egymástól elkülönített tartállyal van biztosítva, így a berendezéssel három különböző minta vizsgálható (célszerűen alsó és felső referencia, valamint a mérendő tüzelőanyag). A tartályból csak a választott minta jut egyenesen a befecskendezőszivattyúba. A fogyasztást a szabvány 13 ml/percben határozza meg.

A CFR F-5-ös berendezés digitális fejegysége a felső holtponthoz képest méri a gyulladási késedelmet, amit az ASTM szabvány 13 főtengelyfokban határoz meg. Ez azt jelenti, hogy a befecskendezéshez képest a gyulladás 13 főtengelyfokkal később történik. Az érték beállítását az előkamra méretének és azon keresztül a kompresszióviszony állításával végezhetjük el. Az előbefecskendezést szintén 13 főtengelyfokban határozza meg a szabvány.

A minta cetánszámának megállapításakor a két referencia-tüzelőanyag által meghatározott kompresszió-állító kézikerek állást hasonlítjuk a mintánál mért kézikerek állásához. A mérendő tüzelőanyag cetánszámaként az elsődleges referencia-tüzelőanyag cetánszámánál magasabb, míg a másodlagos referencia-tüzelőanyagénál alacsonyabb cetánszámú referencia-tüzelőanyagot kell választani.

A keverék, elegy cetánszáma a következő képlettel számolható [128]:

$$CSz = b * CSZ_1 + c * CSZ_2 \quad (B.2)$$

B.12. Emisszió

CO és SO₂-mérés

A készülék az infravörös abszorpció elvén működik. [129], azaz minden gáz (kivéve az egyatomos és az azonos atomokból álló molekulákat) infravörös tartományban a komponensre jellemző hullámhosszú sugárzást nyel el.

A CO méréseket Thermo Environmental Instruments MODEL 48 C HL, az SO₂-méréseket pedig Thermo Environmental Instruments MODEL 43 C HL típusú berendezéssel végeztem el.

NO_x-mérés

A készülék kemilumineszcencia elvén működik, vagyis a vizsgált gázban levő NO ózon hatására gerjesztett NO₂-vé alakul. A gerjesztett molekulák rájuk jellemző hullámhosszú fényt bocsájtanak ki, miközben az alapállapotukba visszajutnak. A füstgázban levő NO mennyisége arányos a kibocsájtott fénnel. [129]

A teljes NO_x-tartalom meghatározásához a különböző nitrogénoxidokat NO-vá alakítják, majd ezután gerjesztik azokat.

A méréseket Thermo Environmental Instruments MODEL 42 C HL típusú berendezéssel végeztem el.

Elégtelen szénhidrogén mérése

A készülék lángionizációs elven működik, azaz két elektróda között elhelyezkedő hidrogén lángon vezetjük át a füstgázt. Ha a lángban szénhidrogén is elég, akkor a szénhidrogén égése során szén gyökök keletkeznek, amelyek elektromosan vezetőek, az elektródák közt ionáram indul meg. Az ionáram nagysága arányos a mintában levő szénatomok számával. [129]

A méréseket Bernath Atomic Modell 9900 típusú berendezéssel végeztem el.

B.12.1. Határértékek

Gázturbinára a 7/1999. (VII 21.) KöM rendelet szerinti határértékek vonatkoznak 140 kW_{th} és 50 MW_{th} termikus teljesítmény között. Az értékek a B.1 táblázatban láthatók. A kibocsátási határértékek mg/m³-ban értendők.

Szén-monoxid	100
Nitrogén-oxidok	200

B.1. táblázat. Gázturbinára vonatkozó határértékek

Belső égésű motorokra vonatkozó adatok a 14/2001. (V. 9.) KÖM-EÜM-FVM együttes rendeletben található, az értékek a B.2 (3 MW_{th} alatti motorokra) táblázatban láthatók. A kibocsátási határértékek mg/m³-ban értendők.

Szén-monoxid	650
Nitrogén-oxidok	4000

B.2. táblázat. Dízelmotorra vonatkozó határértékek