

MTA DOKTORI PÁLYÁZAT

***EGYES ALKOHOLOK DÍZELMOTOROS
FELHASZNÁLÁSÁNAK VIZSGÁLATA ÉS ÉRTÉKELÉSE***

Írta:
Dr. Bereczky Ákos László

2020

Köszönetnyilvánítás

Sokaknak tartozom köszönettel, hogy eljuthattam odáig, hogy elkészíthettem a MTA doktori pályázatomat. A teljesség igénye nélkül és időrendi sorrendben Dr. Penninger Antalnak, Dr. Stépán Gábornak és Dr. Czigány Tibornak a buzdításért és a motiváció fenntartásáért, Dr. Gróf Gyulának és Dr. Bihari Péter tanszékvezetőknek, akik lehetővé tették a kutatásokat és azokat lehetőségeik szerint jelentősen támogatták. Szintén köszönettel tartozom Dr. Meggyes Attilának, aki doktoranduszként témavezetőm volt és azóta is tanácsaival segít és támogat. Továbbá szorosan vett munkatársaimnak, akik nélkül mindez nem jöhetett volna létre, valamint a hallgatóknak, akik lelkesedésükkel és érdeklődésükkel sokszor átsegítettek a nehézségeken. Szintén, de nem nevesítve köszönöm a szakmai és az ipari partnereknek a terület fenntartását és fejlesztését.

Végül, de nem utolsó sorban hálával tartozom szüleimnek, feleségemnek és gyermekeimnek, akik megteremtették a lehetőséget és végig túrták ezt a közel két évet!

TARTALOMJEGYZÉK

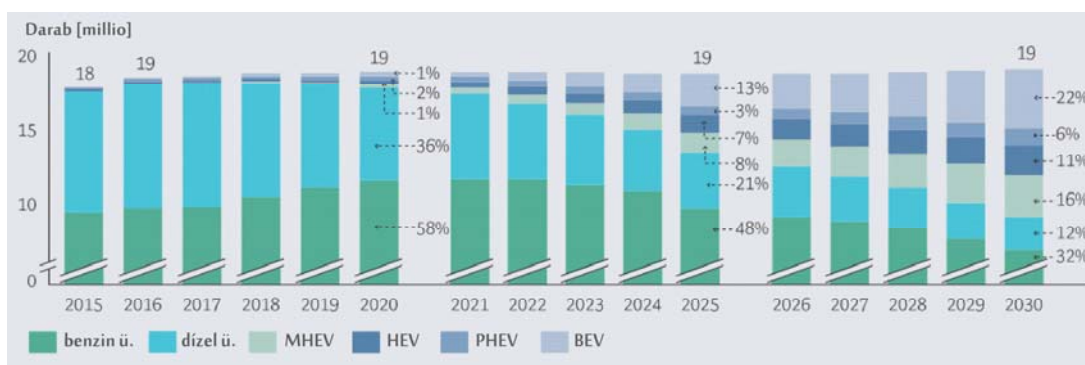
Köszönetnyilvánítás	3
1. Bevezetés	6
1.1. Célkitűzések	8
1.1.1. Lehatárolás	9
2. Irodalmi áttekintés.....	11
2.1. Nyers növényi olajok felhasználásának áttekintése	12
2.2. A különböző alkoholok égési tulajdonságainak áttekintése	13
2.3. A magasabb alkoholok motoros felhasználásával és károsanyag-kibocsátással kapcsolatos szakirodalom áttekintése.....	23
2.4. Kitekintés a korszerű, alacsony károsanyag-kibocsátású butanol felhasználásáról	25
2.5. Kitekintés a butanol felhasználás keveredési és égési folyamatainak modellezéséről	27
3. Magasabb alkoholok hasznosítása nyers növényi tüzelőanyagok esetén.....	31
3.1. Tüzelőanyag vizsgálatok.....	33
3.1.1. Viskozitás vizsgálatok	34
3.1.2. Hidegszűrhetőségi határhőmérséklet vizsgálatok	36
3.1.3. Lobbanáspont vizsgálatok	37
3.1.4. Sűrűség vizsgálatok	38
3.1.5. Fűtőérték vizsgálatok	39
3.1.6. Cetánszám vizsgálatok	40
3.1.7. TG és DTG vizsgálatok	42
3.1.8. Elegyek összetétele	45
3.2. Motoros vizsgálatok eredményei	45
3.2.1. A kettős elegyek motoros vizsgálatai.....	46
3.2.2. A hármas elegyek motoros vizsgálatai	46
3.2.2.1. Üzemi paraméterek értékelése.....	47
3.2.2.2. Égési folyamatok általános értékelése.....	48
3.2.2.3. Károsanyag-kibocsátások értékelése hármas elegyek esetén	51
3.3. Tézisek 1-2: összefoglalása nyers növényi olajokkal elért eredményeknek.....	53
4. Kettős tüzelőanyag-elegyek hatásának értékelése.....	57
4.1. Változtatható kompresszióviszonyú motoron végzett vizsgálatok.....	58
4.2. Előbefecskendezés hatásának értékelése.....	62
4.2.1. Az előbefecskendezés hatása az égési folyamatra	63
4.2.2. Az előbefecskendezés hatása károsanyag-kibocsátásra	67
4.3. Terhelés változás hatásának vizsgálata	69
4.3.1. A terhelésváltozás hatása égési folyamatra.....	71
4.3.2. A terhelésváltozás hatása károsanyag-kibocsátásra	77

4.3.3.	Tézis 3-5: a kettős elegyekkel elért eredmények összefoglalása	82
4.3.3.1.	A kettős elegyek égési folyamataival kapcsolatos eredmények összefoglalása	82
4.3.3.2.	A kettős elegyek motor üzemmel és a károsanyag-kibocsátással kapcsolatos eredmények összefoglalása	84
4.4.	Metanolbekeverés összehasonlító vizsgálata	87
4.4.1.	A biodízel és a metanolbekeverés hatása károsanyag-kibocsátásra	94
4.4.2.	Tézis 6: összefoglalása a metanol – biodízel - gázolaj elegyekkel kapcsolatos eredményeknek	98
5.	Kettős tüzelőanyagú rendszerek értékelése	100
5.1.1.	A kettős tüzelőanyagú metanolbekeverés hatása károsanyag-kibocsátásra	105
5.1.2.	Tézis 7: összefoglalása a kettős tüzelőanyagú metanolbekeveréssel kapcsolatos eredményeknek	106
6.	Összefoglalás	107
	Mellékletek	109
	M-1. Hivatkozott Források	109
	M-2. Saját publikációk	113
	M-3. Fogalmak	115
	M-4. Rövidítések	117
	M-5. Felhasznált berendezések és számított paraméterek mérési bizonytalanságai	119
	M-6. A mérésekhez használt berendezések leírása	132
	M-7. Vizsgált motorok	136
	M-8. Ábrajegyzék	140

1.BEVEZETÉS

Értekezésemben egyes alkoholok dízelmotoros felhasználását vizsgáltam. Ezzel kapcsolatban felmerülhet a kérdés, hogy miért is érdemes ezekkel a motorokkal foglalkozni, hiszen a jelenleg leggyakoribb felhasználási területükön, a gépjárművek területén – a megjelenő és folyamatosan változó – hírek szerint a közeljövőben jelentősen visszaszorulnak nem csak a dízelmotorok, de általában a belsőégésű motorok is. Ezt a kérdést több oldalról lehet és kell vizsgálni, milyen a várható jövője a belsőégésű motoroknak, illetve a meglévők milyen tüzelőanyagokkal fognak üzemelni.

Ezek alapján tartottam érdemesnek áttekinteni a belsőégésű motorok, azon belül a dízelmotorok jövőbeli szerepét. Ezen a területen számos rövidebb és hosszabbtávú előrejelzés volt elérhető. Ezek közül három gyakran idézett mutatót be a továbbiakban. Az alternatív hajtások legnagyobb elterjedését a Deloitte pénzügyi tanácsadó cég előrejelzése mutatta be [1]. A vizsgálat szerint a személygépjármű eladások területén az alternatív hajtások, mint a teljesen elektromos hajtás (BEV), hálózatról tölthető hibrid hajtás (PHEV), a hatótáv növelt villamos hajtás (REX) és a tüzelőanyag cellás hajtás (FCEV) 2030-ra 52,2%-ot érhetnek el.

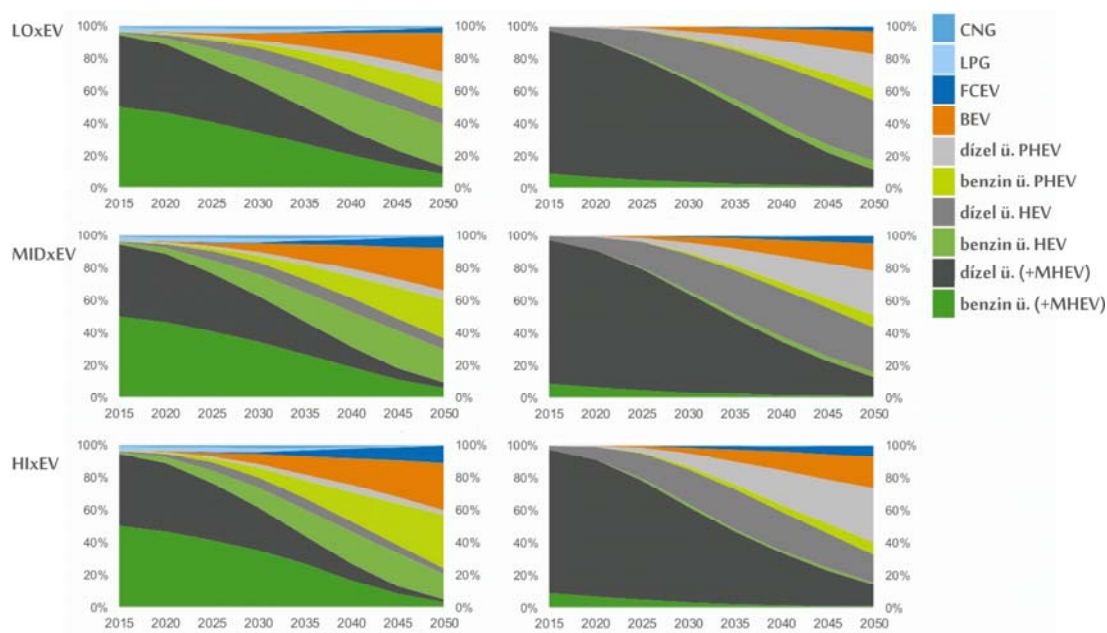


1. ábra A Boston Consulting Group (BCG) előrejelzése európai gépjármű eladásokra és a hajtás láncokra [2]

A Boston Consulting Group (BCG), a világ egyik vezető üzleti tanácsadó cége tanulmánya szerint [2] a teljesen elektromos hajtás elterjedését a nyersolaj és az akkumulátorok ára, valamint a törvényi szabályozók fogják meghatározni. A tanulmányuk szerint 2030-ra világszinten a teljesen elektromos hajtású (BEV) új személygépjárművek aránya 14 % lesz, a hagyományos hajtásláncok 52 %-ot fognak képviselni (Ottó motoros 47 %, dízelmotoros 5 %), míg a hibrid hajtásláncok piaci aránya 34 % lesz. Az EU piaci arányok ettől jelentősen eltérnek a tanulmány szerint, 2030-ban a BEV aránya 22 %-ra nő, a hagyományos hajtásláncok 44 %-ra csökkennek, de a dízelmotoros hajtásláncok aránya 12 % marad, a különböző hibrid hajtások aránya 33 %-ra nő (1. ábra).

Ennél részletesebb és hosszabb távú volt a Ricardo Energy & Environment (REE) EU-ra vonatkozó tanulmánya [3], melyben három feltételrendszer alapján dolgozták ki az előrejelzéseiket az EU-ban újonnan értékesített gépjárművek hajtásláncaira. Az első feltételrendszer szerint (legkisebb elektromos hajtás részarány, LOxEV) a 2030-as és 2050-es években betartásra kerülnek az EB által 2020-ra előírt átlagos fajlagos CO₂-

kibocsátás határértékek (gCO₂/km). Az előrejelzés szerint ebben az esetben 2050-re az elektromos hajtás (BEV, PHEV és FCEV) részarány 70 %-ra növekszik.



2. ábra A REE előrejelzése az európai személy- (balról) és kistehergépjármű (jobbról) állományokra és a hajtásláncokra a különböző előrejelzések szerint [3]

A második modell (MIDxEV) az első és a harmadik közötti közepes elektromos hajtás részarányt feltételez. A harmadik feltételrendszer az extrapolációja az első forgatókönyvnek úgy, hogy 2050-re az összes új gépjármű eladás elérje a 100 % elektromos hajtás részarányt (HlxEV).

Az első feltételrendszer szerint az új személygépjárművek esetén 2030-ra a hagyományos dízel- és Ottó-motorok aránya közel 40 %-ra csökken, ide számítva a mild hibrid (MHEV) hajtásláncokat is. A hibridek aránya közel 46 %-ra nő, míg a BEV közel 10 %-ot ér el. 2050-ben a teljesen elektromos meghajtások (BEV) aránya 35 %, míg a PHEV és HEV aránya közel 60 % lesz. A harmadik forgatókönyv szerint 2030-ra az új BEV aránya közel 15 %-ot ér el, míg közel 8 %-ot ér el a tüzelőanyag cella (FCEV), a sűrített földgáz (CNG) és az autógáz (LPG) együttesen. 2050-ben az új személygépjárművek közel 15 %-a tüzelőanyag cellás, a teljesen elektromos hajtás (BEV) aránya 40 %, míg a benzinmotoros tölthető hibrid (PHEV) részesedése 45 %. Az MIT Energy Initiative által megjelentetett tanulmány [4] szerint 2050-ben a villamos hajtás aránya (BEV+PHEV) a könnyű haszongépjármű állományban 33 % lesz, de ez akár az 50 %-ot is elérheti, ha a támogatások is elősegítik ezt. Visszatérve a dízelmotoros hajtásláncokra a REE jelentés [3] tanulmány szerint a kistehergépjárművek esetén a harmadik feltételrendszer (HlxEV) szerint is kb. 60 % marad a dízelmotoros hajtásláncok aránya, de ezek elsősorban a hálózatról tölthető hibridek (PHEV) lesznek.

A fenti elemzések alapján megállapítható, hogy az előrejelzések között jelentős eltérések tapasztalhatók. 2030-ra az alternatív hajtásláncok (BEV, PHEV, FCV) aránya az új eladások között a pesszimistább forgatókönyvek figyelembevételével 60-52 % közöttire tehető, ezen belül a BEV aránya 12-20 % között várható. A REE jelentés [3] szerint a korszerű dízelmotorokban felhasználásra kerülő megújuló (és alternatív) tüzelőanyagok aránya is jelentőssé válik a CO₂ kibocsátási célok megvalósulása

érdekében. A tanulmány harmadik forgatókönyve (HlxEV) szerint is a 2050-ben üzemben lévő kistehergépjárművek több, mint 60 %-a dízelmotoros hibrid vagy hálózatról tölthető dízelmotoros hibrid hajtású (HEV és PHEV) lesz (2. ábra). Tehát továbbra is fontos kérdés, hogy a tüzelőanyagok mennyire támaszkodnak a fosszilis készletekre és mennyire a megújuló forrásokra. Ezekkel kapcsolatos lényeges megállapítás, hogy a ma felhasznált megújuló tüzelőanyagok közül nem egy előállítása közel megegyező, vagy több energiát igényel, mint a létrejövő tüzelőanyag elégetése során felszabaduló hőenergia, így a terület fejlesztése szükségszerű. Ezért a mai technológiákat alapul véve foglalkoztam az általam kiválasztott tüzelőanyagokkal (A kiválasztás indokairól részletesen a vonatkozó fejezetekben írtam). További kérdés a BEV és PHEV gépjárművek esetén, hogy a villamos energia előállítása mennyire környezetbarát. Erre a kérdésre a válasz igen sarkalatos és számos szempontból vizsgálendő, ebben a témában most jelenik meg egy publikációnk [S-18].

1.1.CÉLKITŰZÉSEK

Mivel az előrejelzések alapján fontos feladat lesz a dízelmotorok átállítása minél nagyobb mértékben megújuló tüzelőanyagokra, így a célom megoldás keresése volt a meglévő dízelmotorok legkisebb átalakításával járó újszerű, megújuló tüzelőanyagok hasznosítására. További célom a kiválasztott tüzelőanyagok és módszerek értékelése volt. Ennek megfelelően vizsgáltam a nyers növényi olajok felhasználásának lehetőségeit, valamint az elért eredmények alapján foglalkozom az *n*-butanol, a metanol és a kettős tüzelőanyagú rendszerek alkalmazhatóságának lehetőségeivel. A megoldásokat a vizsgált motorok üzemi paramétereinek (teljesítmény és fajlagos fogyasztás), a szabályozott károsanyag-komponensek (NO_x, CO, THC és PM) kibocsátása szempontjából, valamint az égési folyamat jellemzőinek változásai alapján értékeltem. Referenciaként a gázolaj tüzelőanyag alkalmazása során kapott paramétereket használtam.

A célkitűzés megvalósításához a következő kutatásokat végeztem el:

1. Magasabb szénatomszámú alkoholok (*n*-propanol és izomerjei, *n*-butanol és izomerjei) és a kiválasztott nyers növényi olajok kettős és hármas elegyei fizikai és kémiai tulajdonságainak meghatározása és értékelése a főbb tüzelőanyag-paraméterek alapján dízelmotoros felhasználhatóság szempontjából;
2. A fizikai és kémiai tulajdonságok alapján kiválasztott elegyek dízelmotoros felhasználásának megismerése az égési folyamatra és a motor üzemi paramétereire (teljesítmény, effektív hatásfok üzemi paraméterek és károsanyag-kibocsátás) gyakorolt hatás szempontjából;
3. A gázolaj – *n*-butanol kettős elegyek dízelmotoros felhasználásának vizsgálata az égési folyamatok és az üzemi paraméterek, valamint a károsanyag-kibocsátás szempontjából;
4. A gázolaj – biodízel – metanol elegyek felhasználhatóságának vizsgálata szintén az üzemi paraméterek, a károsanyag-kibocsátás és az égési folyamat szempontjából; ezek összevetése a *n*-butanol – gázolaj elegyekkel;
5. A metanol felhasználásának megismerése kettős tüzelőanyagú dízelmotorban;
6. Az eredmények alapján javaslattétel a felhasználásra és a további kutatási irányokra.

A célkitűzésnek megfelelően disszertációm felépítése a következő:

A technika mai állásának bemutatása és értékelése után az első lépésben a nyers növényi olajok és a kijelölt magasabb szénatomszámú alkoholok elegyeit vizsgáltam. Az elért eredmények alapján megállapítottam, hogy a hármás elegyek (*n*-butanol – nyers növényi olaj – gázolaj) lényegesen jobb tulajdonságokkal rendelkeznek, mint a vizsgált kettős elegyek (magasabb alkoholok – nyers növényi olaj). Mivel ezeknél a viszkozitás javítása, noha jelentős, de nem valósítja meg a kívánt mértéket, ezért a hármás elegyekkel elvégzett motoros vizsgálati eredményeket mutatom be. A motoros mérések során jól megfigyelhető volt a bekevert *n*-butanol hatása a károsanyag-kibocsátásra és az égési folyamatra, ezért a továbbiakban már csak gázolaj – *n*-butanol elegyekkel foglalkoztam, mivel ennek a jelentősebb elterjedése várható. Ezeknél a vizsgálatoknál lehetőségem volt három különböző motoron mérni az *n*-butanol bekeverés hatását. Az első vizsgálat során egy változtatható kompresszióviszonyú motoron tanulmányoztam a kompresszióviszony és az *n*-butanol bekeverés hatását az égési folyamatra. Következő lépésben egy kis kompresszióviszonyú dízelmotoron vizsgálom az előbefecskendezés és az *n*-butanol bekeverés hatását az üzemi paraméterekre, a károsanyag-kibocsátásra és az égési folyamatra. A harmadik vizsgálatnál egy nagyobb kompresszióviszonyú motoron elemeztem az *n*-butanol bekeverés hatását, szintén az üzemi paraméterekre, a károsanyag-kibocsátásra és az égési folyamatra különböző terhelések esetén. Végül, az eredményeket összefoglalva értékeltem a gázolaj – *n*-butanol elegyek hatását különböző vizsgálati körülmények között.

Az *n*-butanol bekeverésének hatásvizsgálata után célszerű egy sokkal elterjedtebb alkohol tanulmányozása annak eldöntésére, hogy ennél a tüzelőanyagnál is hasonló változások figyelhetőek-e meg, valamint milyen és mekkora eltérés jellemzi a mérési adatokat az *n*-butanolhoz képest. Erre a célra gázolaj – biodízel elegyet és gázolaj – biodízel – metanol elegyeket hasonlítottam össze az eddigiekhez hasonlóan, vizsgálva a bekeverés hatását az égési folyamatra, üzemi paraméterekre és a károsanyag-kibocsátásra. Ezek összehasonlító elemzése után bemutatom a kettős tüzelőanyagú motort, amely megítélésem szerint a metanol legcélszerűbb felhasználása. Itt szintén röviden elemzem, majd összefoglalom az eredményeket, végül javaslatot teszek a felhasználásra és a további kutatási irányokra.

1.1.1.LEHATÁROLÁS

Számos kérdéssel nem foglalkoztam a jelen munkámban: többek között kenési tulajdonságokkal, stabilitási kérdésekkel, gazdasági számításokkal, CO₂- és ÜHG-kibocsátás-csökkenéssel, mivel ezek nem férnek be az adott munka terjedelmébe, illetve ezek nagy része nem tartozik szakterületemhez. Az előállítással is csak röviden foglalkozom, mivel ezek mindegyike legalább egy-egy PhD disszertációt ölelnek fel.

A vizsgálatok során elsősorban a nem közúti–gépjárművekben történő felhasználásra fókuszálok, mivel ma az ott alkalmazott állandósult pontokban történt méréseknél lényegesen összetettebb vizsgálati módszereket (pl. ETC, WHTC, RDE, stb.) kell alkalmazni, amelyhez szükséges rendszerek nem állnak a rendelkezésünkre. Továbbá a nyers növényi olajok felhasználása sokkal célszerűbb energiatermelésre, vagy az erőgépes felhasználásra, pl. szivattyúhajtásra.

Továbbá nem volt lehetőségem a közös nyomócsöves technika (Common-Rail, CR) alkalmazására, a vizsgált tüzelőanyagok tesztelésére. Ennek több oka volt, a munkásságom során számos CR motoron végeztem méréseket és lehetőségem volt applikációs munkákra is [pl. S-17 és Sz-2], azonban időkeret és pénzügyi források hiánya eddig nem tette lehetővé alternatív tüzelőanyagok vizsgálatát. A terveim között szerepel egy erre a célra szolgáló kisteljesítményű tesztrendszer kiépítése. Itt már nem csak a kereskedelmi berendezésekben történő hagyományos tesztelésre, de a motor adaptálására és kísérleti égési folyamatok tesztelésére is lehetőség nyílna, mint például a PPCI, HCCI és az RCCI.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

Az irodalmi áttekintést öt részre bontottam. Az első részben áttekintettem a nyers növényi olajok közvetlen felhasználása területén elért eredményeket és a felmerülő nehézségeket. A második részben azokat az információkat tekintettem át, amelyek magasabb alkohol – gázolaj elegyek, elsősorban az *n*-butanol befecskendezésével, párolgásával és égési folyamataival kapcsolatosak. Ezek alapján hipotézist állítottam fel a különféle alkohol – gázolaj elegyek esetén az égési folyamat és a károsanyag-kibocsátás várható változásaira. A harmadik részben az *n*-butanol tartalmú kettős elegyek felhasználásával és azok károsanyag-kibocsátásra gyakorolt hatásaival kapcsolatos irodalmakat tekintettem át és értékeltem. A negyedik részben a butanol felhasználásával kapcsolatos előremutató kutatásokat mutattam be. Végül az ötödik részben a modellezéssel kapcsolatban elért eredményeket és nehézségeket dolgoztam fel.

Ahhoz, hogy képünk legyen az irodalomkutatásban szereplő tüzelőanyagokról a dízelmotoros felhasználás szempontjából a főbb paramétereket az 1. táblázatban foglaltam össze.

		D2	nyers növényi olajok [#]	<i>n</i> - butanol
összetétel		C ₁₁₋₈₆ H ₁₄₋₃₄	C ₁₈₋₅₇ H ₁₀₁₋₁₀₅ O ₅₋₆	C ₄ H ₁₀ O
fűtőérték (LHV)	MJ/kg	43	34.9-36.98	33.1
cetánszám	-	>51	40-52	~25
kinematikai viszkozitás (40°C-on)	mm ² /s	2-4.5	33.4-34.8	3.6
sűrűség (15°C-on)	kg/m ³	820-860	901-935 ^{&}	810
forráspont	K	453-643	-	390
öngyulladás hőmérséklet	K	503	-	618
párolgáshő	KJ/kg	~250	-	585
elméleti égési levegőigény	kg/kg	14.8-15.0	13.2-12.1	11.2

1. táblázat A vizsgált tüzelőanyagok paraméterei (#: csak az általam vizsgált nyers növényi olajok, &: 28°C-on)
[S-6 és S-7 alapján]

Megállapítható, hogy a nyers növényi olajok fűtőértéke (LHV) a gázolaj fűtőértékének ~83 %-a, az *n*-butanolé 77 %-a. A cetánszám a nyers növényi olajok esetén kisebb, vagy megegyezik a gázolajével, de az *n*-butanol esetén csak közel a fele. Legjelentősebb eltérés a nyers növényi olajoknál porlasztás szempontjából fontos viszkozitás esetén tapasztalható. A nyers növényi olajok viszkozitása 40°C-on a gázolaj viszkozitásának több, mint tízszerese, ezzel ellentétben az *n*-butanol viszkozitása közel megegyezik a gázolaj viszkozitásával. A gázolajhoz képest az *n*-butanol forráspontja 28 %-kal alacsonyabb, viszont az öngyulladási hőmérséklete 22 %-kal nagyobb, a párolgáshője pedig több, mint kétszerese. A nyers növényi olajok elméleti égési levegőigénye a gázolajnál 15 %-kal, az *n*-butanolnak 25 %-kal kisebb – az oxigéntartalom és az eltérő C/H arány miatt –.

2.1. NYERS NÖVÉNYI OLAJOK FELHASZNÁLÁSÁNAK ÁTTEKINTÉSE

A célkitűzésnek megfelelően röviden összefoglalom a nyers növényi olajok közvetlen felhasználásával kapcsolatos eredményeket.

Hemmerlein és munkatársai [5] hat különböző előkamrás, perdítő kamrás és közvetlen befecskendezésű, nem közúti motorban vizsgálták a nyers repceolaj felhasználhatóságát. A vizsgálatokat a régi 13 pontos ECE R-49-es ciklus szerint végezték. Megállapításuk szerint nyers repceolaj esetén a nyomaték és a hatásfok jelentősen nem változott a gázolajhoz képest, a CO-kibocsátás nőtt, az el nem égett szénhidrogén (THC) kibocsátás – eltekintve az egyik nem feltöltött közvetlen befecskendezésű motortól – szintén jelentősen nőtt. A NO_x-kibocsátás szempontjából négy motor esetén a nyers repceolaj alacsonyabb kibocsátású volt, két motor esetén nem volt változás, a részecske-kibocsátás (PM) a motorok felénél javult, másik felükénél romlott. Egyes motoroknál 155-255 óra járatás után a teljesítmény 20 %-kal csökkent. Megnövekedett lerakódást tapasztaltak a befecskendezőn, az égéster falakon és a dugattyúgyűrűkön, továbbá a közvetlen befecskendezésű motorok kipufogó szelepszárán és szeleptányérján. Összefoglalva az 500-600 órás tartóteszteket, a nyers repceolaj rosszabb tulajdonságokkal rendelkezett a vizsgálatok többségében, de a szerzők megállapítása szerint osztott égésterű és nagy hengertérfogatú motorok képesek voltak tiszta, nyers repceolajjal üzemelni. Arról nincsen adat, hogy a nyers repceolajt előmelegítették-e a vizsgálat során.

Schlick és munkatársai [6] 75 V/V % gázolaj - 25V/V % nyers szójaolaj és nyers napraforgóolaj elegyekkel végeztek 200 órás üzemeltetési teszteket teljes terhelésen. A kísérletek után a motor égésterében, a befecskendezőkön és a kipufogó szelepeken jelentős lerakódásokat figyeltek meg. Megállapításuk szerint a teljesítmény és a hatásfok szempontjából a nyersolaj elegyek megfelelőek. Azonban az égéster és a befecskendezők állapota nem volt kielégítő a vizsgálatok után.

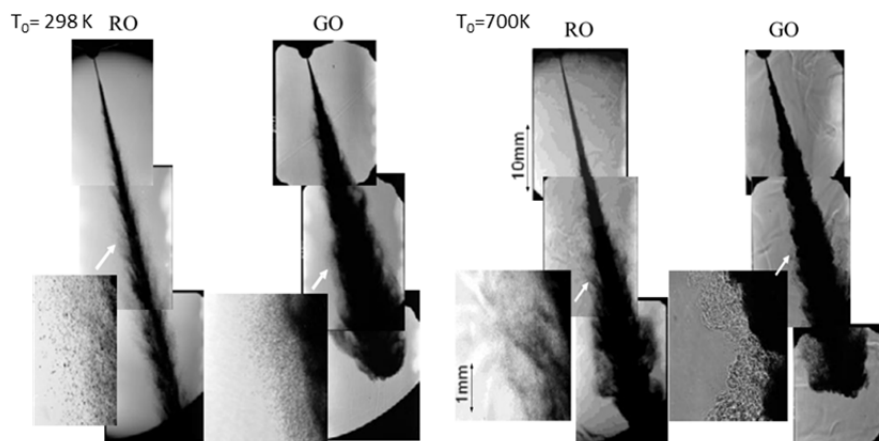
További tanulmányok [7] és [8] is arról számolnak be, hogy a nyers növényi olajokkal üzemelő dízelmotorok alacsonyabb teljesítményt és nyomatékot adtak le. Célszerű a nyers növényi olajokat kisebb fordulatszámon használni, továbbá a befecskendező lerakódását, szűrő eltömődését, dugattyúgyűrűk beállítását és a kenőolaj kenési képességeinek romlását okozhatnák.

Altin és munkatársai [9] egyhengeres motoron több nyersolajjal (napraforgó, gypotmag, szója kukorica, mák és repce) végeztek vizsgálatokat. Az eltömődések ellen a tüzelőanyag hőmérsékletet 80 °C-on tartották, amely hatására a nyers növényi olajok kinematikai viszkozitása a 27 °C-on mért 39,5-65 mm²/s értékről 75 °C-on lecsökkent 9-16 mm²/s értékre (átlagosan 24 %-ra csökkenve). Mérési eredményeik alapján a nyers növényi olajok felhasználása esetén a motor teljesítménye átlag 16 %-kal csökkent, a CO-kibocsátás átlagosan másfélszeresére nőtt, a részecske (PM) kibocsátás 29-49 %-kal növekedett, és a NO_x-kibocsátás 10-75 %-kal csökkent.

Corsini és munkatársai [10] 2015-ben egy korszerű, 1,9 literes, turbótöltött és Common-Rail befecskendező rendszerű motoron végeztek vizsgálatokat. A mérésekhez három tüzelőanyagot használtak: nyers repceolajat, sűrűolajból készített biodízelt és referencia gázolajat. Az előzetes vizsgálataik alapján a tüzelőanyagot 90 °C-ra melegítették elő, ezen a hőmérsékleten a gázolaj és a repceolaj viszkozitása közel megegyezett. A méréseket különböző fordulatszámokon és terheléseken végezték. Az

eredményeik alapján a motor teljesítménye – hasonló gázkar állás mellett – repceolaj esetén 18-22 %-kal csökkent, elsősorban kisterheléseken, melyet az eltérő sűrűséggel és az ECU beavatkozásával indokoltak. A károsanyag-kibocsátás területén egyedül az el nem égett szénhidrogén növekedett, a többi komponens (CO, NOx, PM) változatlan maradt, vagy csökkent nyers repceolaj esetén. További fejlesztési lehetőséget az előmelegítés optimalizálásában láttak.

A fenti eredményekből látható, hogy elsősorban a csökkenő viszkozitás a nyersolajok hasznosításának fontos lehetősége. Ezzel kapcsolatos kutatásokat végzett Sapti és munkatársai [11], akik árnyfényképezés technikával (shadowgraph) vizsgálták gázolaj és nyers repceolaj porlasztási képeit (3. ábra) két különböző kamra hőmérsékleteken ($T_0=298^\circ\text{K}$ és $T_0=700^\circ\text{K}$). Megállapításuk szerint a magas kamrahőmérséklet esetén a repceolajcseppek hőmérséklete nő és ez növeli a befecskendezési kúpszöget. *(Ezt kiegészítem annyival, hogy a magas kamrahőmérséklet feltehetőleg előmelegítette a tüzelőanyagot, így jelentős lehet a szerepe az ennek hatására csökkenő viszkozitásnak is, nem csak a kamrában történő melegedésnek.)* A fotókon jól megfigyelhető, hogy alacsony kamrahőmérséklet esetén a nyers repceolaj sugár jelentős mértékben eléri a falat, ami rontja a keveredést és emiatt növekednek elsősorban a THC és PM károsanyag komponensek és alakulnak ki a lerakódások az égéstérben.



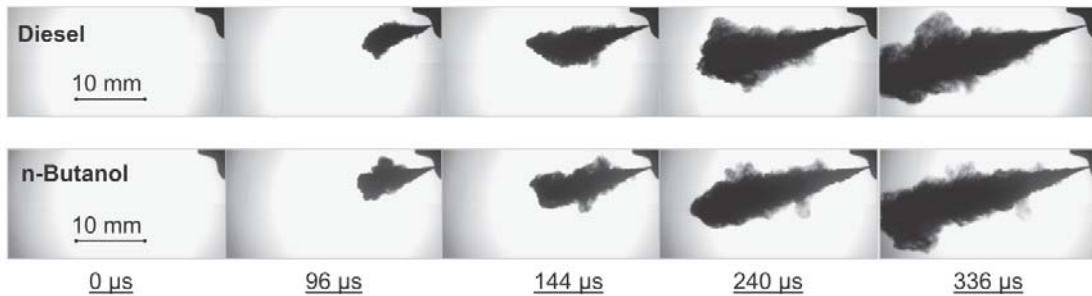
3. ábra A nyers repceolaj (RO) és a gázolaj (GO) tüzelőanyagok porlasztási képe 0,5 ms-kel a befecskendezés után $T_0=298\text{ K}$ és 700 K esetén ($P_{bef}=700\text{ bar}$, $P_0=10\text{ bar}$) [11]

Az első részben áttekintett szakirodalom alapján megállapítható, hogy a nyersolajok felhasználhatók dízelmotorokban, azonban jelentős problémák tapasztalhatók, elsősorban a kisebb hőmérsékleten jelentkező alacsonyabb viszkozitás miatt. Az előmelegítéssel javuló üzemi és emissziós paraméterek érhetők el. Ennek alapján ezen a területen a kijelölt kutatási irányom megoldás keresése volt a nyersolajok előmelegítés nélküli felhasználására, mivel előmelegítésre leggyakrabban a már üzemmeleg motor esetén áll rendelkezésre lehetőség.

2.2. A KÜLÖNBÖZŐ ALKOHOLOK ÉGÉSI TULAJDONSÁGAINAK ÁTTEKINTÉSE

Ebben a részben a jelen és a későbbi fejezetekben (3.1.) bemutatásra kerülő alkoholok égés előtti, illetve égési folyamatainak főbb paramétereivel foglalkozom azok időbeli sorrendjének megfelelően (porlasztás, párolgás, gyulladás, előkevert és diffúz égés).

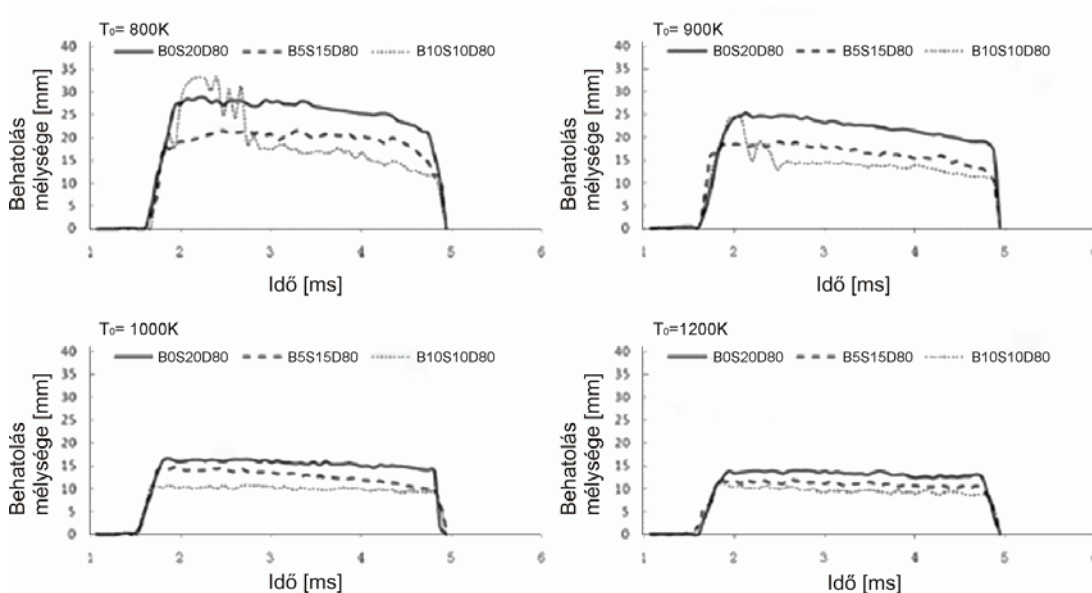
Han és munkatársai [12] többek között tiszta gázolaj és tiszta *n*-butanol porlasztási kép összehasonlító vizsgálatok során ($P_{bef}=1200$ bar, $P_0=40$ bar, T_0 = szobahőmérséklet) arra az eredményre jutnak, hogy a porlasztási kép nagyon hasonló, kivéve, hogy az *n*-butanol kissé keskenyebb kúpszöggel rendelkezik (4. ábra).



4. ábra A tiszta gázolaj (Diesel) és a tiszta *n*-butanol porlasztási képe ($P_{bef}=1200$ bar, $P_0=40$ bar, T_0 = szobahőmérséklet) [12]

A keverékképzés következő fontos része a párolgás. Az alkohol tartalmú elegyek esetén fontos azzal a kérdéssel foglalkozni, hogy két vagy több, eltérő párolgási tulajdonsággal rendelkező folyadékelegyek magas hőmérsékleten történő párolgása során milyen folyamatok alakulhatnak ki.

Liu és munkatársai [13] állandó térfogatú égéstérbe fecskendeztek hármass elegyeket (szójaolaj metil-észter (S) – gázolaj (D) – *n*-butanol (B)), különböző összetételekben. A keverési arányokat úgy állították be, hogy a felületi feszültség közel megegyezzen: B5S15D80 (5 V/V % *n*-butanol – 15 V/V % szójaolaj – 20 V/V % gázolaj) és B10S10D80, referenciaként B0S20D80 tüzelőanyag-elegyet használtak. Az égési folyamat vizsgálata során megállapították, hogy 800 K-os és 900 K-os kezdeti hőmérséklet esetén nagyon intenzív előkevert égés figyelhető meg. Azonban 1200 K kezdeti hőmérsékleten csak „ellenőrzött égés” volt megfigyelhető, azaz az előkevert és a diffúz égés nem vált szét. A kezdeti hőmérséklet csökkentésével a hőfelszabadulás maximum értékei csökkentek.

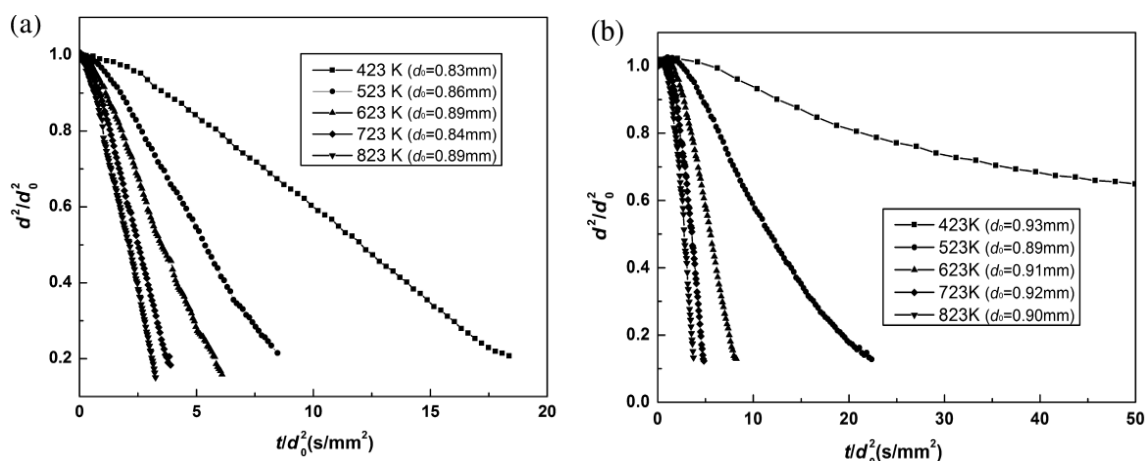


5. ábra A B0S20D80, B5S15D80 és B10S10D80, tüzelőanyag-elegyek behatolási mélysége a kezdeti hőmérséklet függvényében [13]

A vizsgálati eredmények alapján megállapították, hogy az *n*-butanol bekeverése az előkevert égést elősegítette. 5 V/V %-os és 10 V/V %-os *n*-butanol elegyek esetén

800 K-es kezdeti hőmérsékleten alacsonyabb *n*-butanol arány alacsonyabb égési csúcsnyomást eredményez. A maximális égéstérnyomás a 10 V/V % *n*-butanol elegynél körülbelül 10 %-kal nagyobb, mint az 5 % V/V *n*-butanol esetében. A porlasztási kép vizsgálata során arra a megállapításra jutottak, hogy minden esetben a B10S10D80 behatolási mélysége volt a legrövidebb. Viszont a 800 K és 900 K kezdeti hőmérsékleten a B10S10D80 elegy esetén a tüzelőanyag sugár behatolási mélysége hirtelen lecsökkent, 800 K-es kezdeti hőmérsékleten közel 3 ms után (5. ábra). Ennek magyarázatát abban látták, hogy az égés során felszabaduló hő ekkor melegíti fel a vizsgálati térfogatot kb. 1100 K-re és ekkor kialakul a gőzrobbanás. Ezután égésnélküli – O₂ hiányos – égéstérben vizsgálták a 30 V/V %-os *n*-butanol elegy esetén különböző szójaolaj metil-észter és gázolaj arányok mellett a gőzrobbanás kialakulásának feltételeit. Az eredmények alapján arra következtettek, hogy ha a vizsgálati tér hőmérsékletét tovább növelik, a gőzrobbanás korábban következik be, de jelentősen növelve a hőmérsékletet a gőzrobbanás nem jön létre. Ezt azzal magyarázták, hogy magas hőmérsékleten minden komponens olyan gyorsan párolog, hogy nem alakulnak ki a gőzrobbanás feltételei.

Ma és munkatársai [14] ABE-vel (aceton–butanol–etanol 3:6:1 térfogat arányú elegye) és gázolajjal (D2) és ezek elegyeivel foglalkoztak. Céljuk tüzelőanyag és tüzelőanyag elegy cseppek párolgásának leírása volt. Megfigyeléseik szerint (6. ábra) az ABE cseppek élettartama minden kísérleti körülmények között rövidebb, mint a gázolajé, valamint az ABE és a gázolaj cseppek élettartama a környezeti hőmérséklet növekedésével csökkent. Az ABE és gázolaj cseppek élettartamának különbsége a magasabb hőmérsékleten is kisebb lesz, 523 K-en az ABE csepp élettartama 8,87 s/mm², míg a gázolajé 22,37 s/mm², 823 K-on az ABE csepp élettartama 3,25 s/mm², míg a gázolaj cseppé 3,73 s/mm². A tiszta ABE és gázolaj cseppek párolgása során nincs buborékképződés.

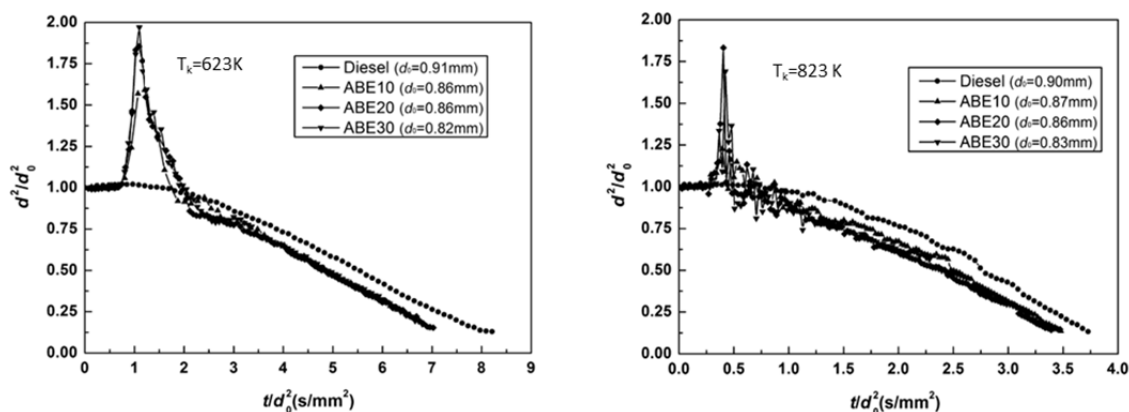


6. ábra A normalizált cseppátmérő négyzet a különböző tüzelőanyagok esetén a normalizált idő függvényében különböző hőmérsékleteken ((a) ABE, (b) gázolaj) [14]

Viszont elegyek esetén, magasabb hőmérsékleteken ettől jelentősen eltérő párolgási folyamatokat tapasztaltak. 623 K kamrahőmérsékleten az ABE – gázolaj elegy cseppek párolgásának egy térfogatonövekedési és -zsugorodási (fluktuáló) fázisa van (7. ábra). A párolgást három fázisra osztották: tranziens melegedési fázis, fluktuáló párolgási fázis és az egyensúlyi párolgási fázis. Ennek magyarázata a szerzők szerint a következő: 623 K hőmérsékleten az ABE komponensek gyorsabban párolognak a cseppek felületéről, amely a felszín közelében a kevésbé illékony gázolaj komponensek nagyobb koncentrációját eredményezi, ez megakadályozza az illékonyabb ABE komponensek

kiszökését. Ahogy az ABE elegy párolog, a cseppekben az ABE gőzök mennyisége nő, így a cseppekben kialakuló gőzbuborékok a cseppek kitágulását okozzák, de ezek nyomása nem elegendően nagy a cseppek szétszakításához. Miután az ABE komponensek kigőzölögtek, a csepp átmérője már a gázolajéhoz hasonlóan csökken.

Megfigyelésük szerint 823 K kamrahőmérsékleten az ABE - gázolaj elegy cseppek párologtatása szintén három hasonló fázisra osztható, viszont a második fázis eltérő. Ezen a hőmérsékleten a csepp átmérője intenzív változást mutat, ami azt jelzi, hogy gőzrobbanás történik. A szerzők szerint ez két okra vezethető vissza: (1) a nagyobb hőmérséklet gyorsabb hőmérsékletnövekedést eredményez a cseppekben, amely hatására ABE komponens intenzívebb gőzképződése zajlik a cseppen belül; (2) a magasabb hőmérséklet a buborékok belsejében nagyon élénk belső mozgást eredményez és ennek hatására a buborékok felszakadhatnak.

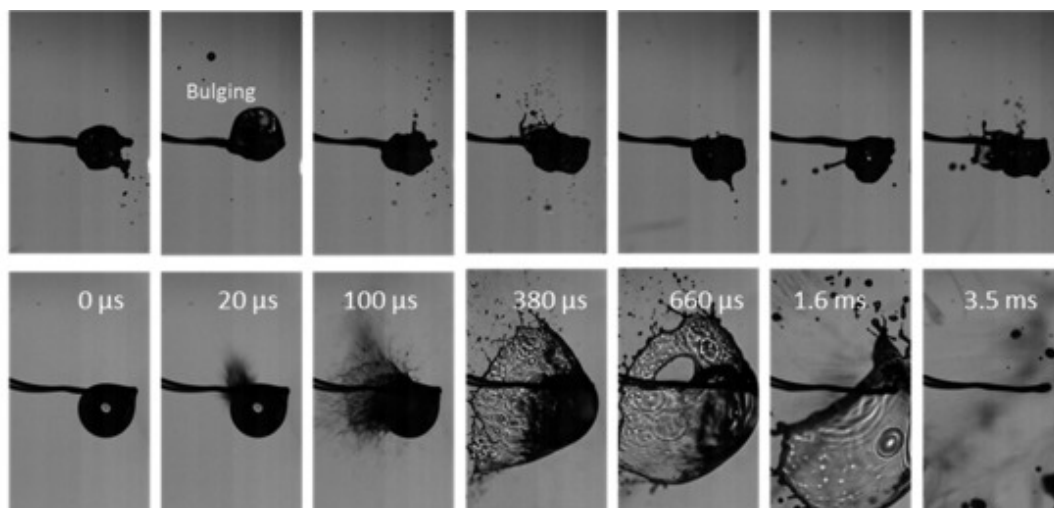


7. ábra A normalizált cseppátmérő négyzet a különböző tüzelőanyag elegyek és gázolaj (Diesel) esetén normalizált idő függvényében különböző keverési arányok esetén 623 K és 823 K kamrahőmérsékleten [14]

Az utóbbi irodalommal kapcsolatban megjegyelem, hogy az áttekintett művek közül a [14] írta le legrészletesebben a párolgási folyamatot, feltételezhető, hogy tiszta *n*-butanol esetén is hasonló folyamat zajlik le, mivel például az aceton forrási hőmérséklete 329 K és párolgáshője 525 kJ/kg, amely csak kismértékben tér el az *n*-butanol ugyanezen paramétereitől.

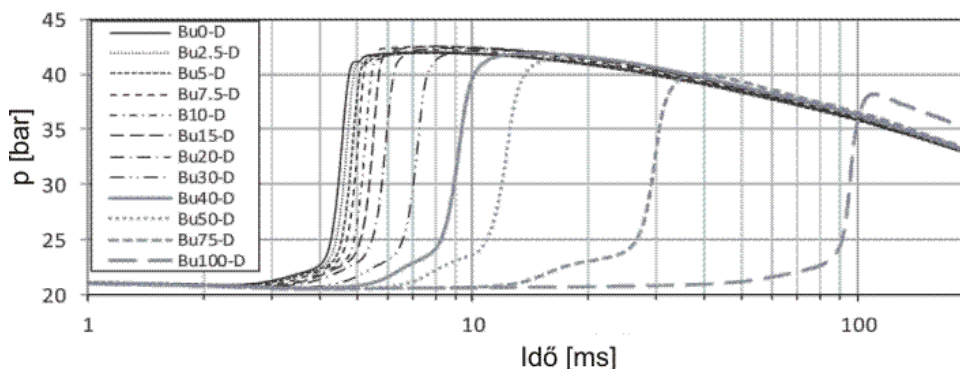
C. Shen és munkatársai [15] butanol, szója metil-észter (SME) és gázolaj elegyeket vizsgáltak. Az eredményeik szerint a „gőzrobbanás” nem volt tapasztalható 1000 K kezdeti hőmérsékleten. A szerzők megállapítása szerint a többkomponensű elegyek felületéhez közel lévő könnyebb összetevők elpárologtak, míg a cseppek belsejében lévők, a véges diffúzió miatt nem tudtak eljutni a folyadék felületre. Ennek következtében, a cseppen belül már kialakulhat olyan hőmérséklet, amely magasabb, mint a gyorsabban párologó komponens helyi forráspontja még akkor is, ha a cseppfelület nem haladja meg a forrási hőmérsékletet. Amikor a hőmérséklet a cseppen belül elég nagy ahhoz, hogy buborékok keletkezzenek, amelyeknek gyors növekedése „gőzrobbanást” eredményez. A létrejövő másodlagos cseppek mérete számottevően csökkent, ez jelentősen javította a keverékképzést, noha a cseppek penetrációja csökkent.

Más szerzők [16] a gőzrobbanást tovább bontják és bevezetik a pufogás (puffing) fogalmát is. Ez utóbbi alacsonyabb hőmérsékleten zajlik le, amikor gőz tör ki a cseppek felületén és ez magával ragad kisebb mennyiségű folyadékot is (8. ábra).



8. ábra Pufogás és gőzrobbanás repce metil-észter – gázolaj – etanol elegy esetén [16]

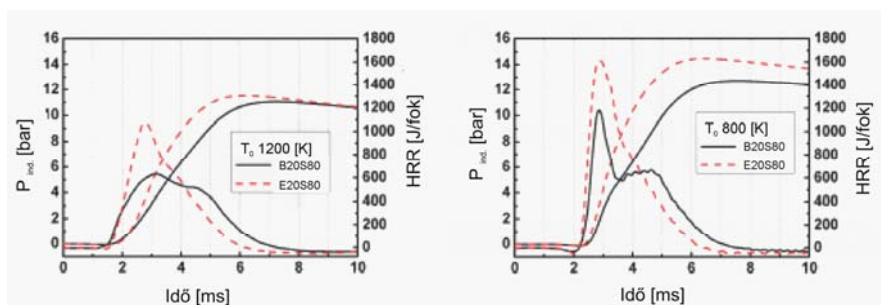
A porlasztás és a keveredés után a következő folyamat az égéskezdet. A befecskendezés után beinduló párolgási és keveredési folyamat hatására kialakul az égésképes levegő-tüzelőanyag keverék a cseppek környezetében, ezután, ha megfelelően nagy a hőmérséklet, elkezdődik az égési folyamat első része, az előkevert égés. A befecskendezés kezdet és a gyulladás közti időtartamot nevezzük gyulladási időnek (késelelemnek). Ennek vizsgálatára végeztek kísérleteket Lapuerta és munkatársai [17] állandó térfogatú kísérleti berendezésben (Herzog Cetane ID510) különböző nyomásokon és hőmérsékleteken, többek között gázolaj és *n*-butanol, valamint gázolaj és etanol elegyekkel, *n*-butanol esetén 0-100 V/V % és etanol esetén 0-75 V/V % keverési arányok esetén. A referencianyomás 21 bar és a hőmérséklet 875 K volt. A befecskendezést nem nevesített CR befecskendező rendszerrel 1000 bar rail nyomáson 2,5 ms befecskendezési idővel végezték, ezt később csak a légfeleslegtényező állandó értéken tartása miatt változtatták. A mérések alapján megfigyelték, hogy a két alkoholelegy hatására mind a hideg égés, mind a főégés gyulladási ideje nőtt, kb. 50 V/V % bekeverési arányig a bekeveréssel arányosan, amit a csökkenő cetánszámmal magyaráztak. Vizsgálták a nyomásváltozás hatását. 16 bárról csökkentve a nyomást, jelentősen növekedett a gyulladási idő, míg ez a hatás már nem jelentős növelve a nyomást 16 bártól, a gyulladási idő kismértékben változott. A hőmérséklet növelés hatására a gyulladási idő jelentősen csökkent, viszont megállapították, hogy 913 K-nél nagyobb hőmérsékletek esetén a csökkenés mértéke már nem jelentős. További fontos megállapítása a kutatásnak, hogy az alkoholorészarány növelésével a maximális nyomás csökkent. Ezt három okkal indokolták a szerzők: a bevitt hő mennyisége csökken a fűtőérték csökkenése miatt, szegényebbé vált az elegy a kisebb elméleti égési levegőigény miatt, valamint a megnövekedett gyulladási idő miatt az elegy egyre jobban eloszlott az égéstérben. Azonban azt tapasztalták, hogy az általam is vizsgált 5 - 20 V/V % *n*-butanol bekeverési arányok esetén a nyomásmaximum megnövekedett, de csak *n*-butanol elegyeknél. Ezt a megnövekedett égési sebességgel indokolták. Ennek igazolására két irodalmi forrásra hivatkoztak.



9. ábra A mért nyomásértékek különböző *n*-butanol bekeverés esetén [17]

Ebből a két hivatkozásból érdekesek a Liu és munkatársai által végzett kísérletek [18]. A szerzők szintén állandó térfogatú rendszerben (átmérő 110 mm és magasság 65 mm) különböző nyomásokon és hőmérsékleteken (800 K, 900 K, 1000 K és 1200 K) végeztek méréseket. Ebben a cikkben két tüzelőanyag eleggyel 80 V/V % szójaolaj metil-észter (S) és 20 V/V % butanol (B20S80) és 80 V/V % szójaolaj metil-észter és 20 V/V % etanol elegyekkel foglalkoztak (E20S80). A befecskendezés időbeli lefutását vizsgálták, amely során a gyorskamerás felvételekből megállapították, hogy a befecskendezés során 800 K és 900 K esetén a tüzelőanyag sugár csúcsa szétesett. Ezt a biodízel és az alkoholok jelentősen eltérő párolgási tulajdonságaival magyarázták, mivel a butanol és az etanol sokkal alacsonyabb forráspontú a biodízelhez [19] képest. Feltételezésük szerint sugárirányban haladva melegedés során az alkoholtartalom részben eléri a túlhevítési hőmérsékletet és ez buborékképződéshez vezet, amely „gőzrobbanást” eredményezett. Megállapításuk szerint magasabb hőmérsékleten ez a jelenség nem lépett fel, mivel a gyorsabb párolgás és a hamarabb bekövetkező gyulladás miatt erre nincsen idő.

Továbbá az állandó térfogatú égéstérben mért nyomásváltozás és az abból számított hasznos hőváltás sebesség (HRR) alapján vizsgálták a szerzők az égési folyamat alakulását és a gyulladási időt. Megállapításuk szerint, a rendszer nem tekinthető adiabatikusnak, jelentős hatása van a láng-fal közti hőátadásnak. A mérési eredményeik alapján az E20S80 tüzelőanyag magasabb csúcsnyomást eredményezett a B20S80 tüzelőanyag képest, ami az E20S80 tüzelőanyag jobb hőfelszabadítási tulajdonságának a következménye. Ennek a megfigyelésnek a lehetséges magyarázata, hogy az E20S80-mal az égés a faltól távolabb történt, ami alacsonyabb hőveszteséget eredményez. Továbbá az etanol nagyobb párolgáshője alacsonyabb lánghőmérsékletet eredményez, ami alacsonyabb hőveszteséghez vezetett, továbbá az etanol nagyobb lamináris lángterjedési sebessége is jelentős hatással van az etanol égési folyamatára, így összességben az etanol elegy gyorsabban égett el.

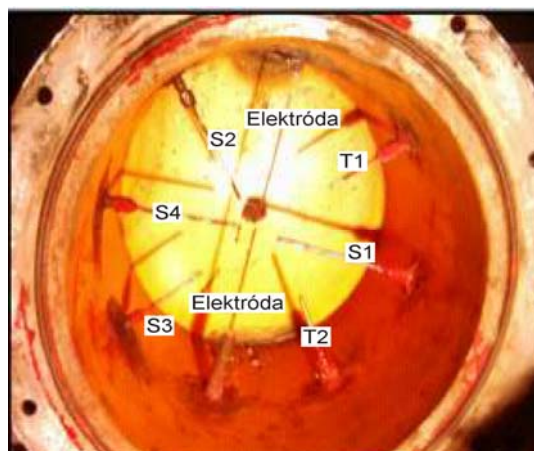


10. ábra Mért nyomásértékek és a hasznos hőfelszabadulás sebesség (HRR) különböző *n*-butanol bekeverés esetén [18]

Fontos megemlíteni, hogy ebben a publikációban sajnos nem adott a befecskendezés-időpontjában a nyomás (ez 8-30 bar-ra feltételezhető), valamint a [17] által bemutatott hideg égés feltehetőleg a rövidebb gyulladási idő miatt nem jelentkezett.

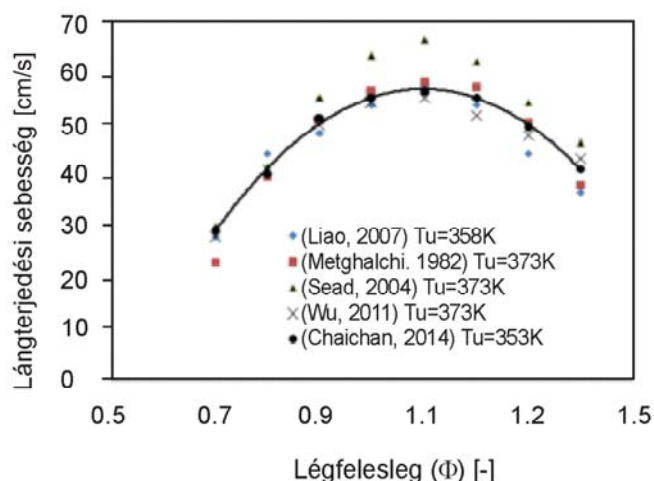
A következőkben az égési folyamat két legfontosabb égési tulajdonságának, az adiabatikus lánghőmérsékletnek és a lángterjedési sebességének összehasonlítása területén áttekintett eredményeket mutatom be. Mivel ezek a tulajdonságok is jelentős hatással vannak a motor égésterében történő hőfelszabadulásra és a károsanyag-kibocsátásra.

Gázolaj-alkoholok elegyeinek lángterjedési sebességéről kevés adatot lehet találni, az általam végzett irodalomkutatás során mindössze egy ilyen irodalmat sikerült találni [20]. Chaichan egy hengeres, állandó térfogatú tartályban végzett vizsgálatokat (11. ábra), a hengerben a különböző elegyeket elektródák segítségével gyújtotta meg, majd termoelemek eredményei alapján határozta meg a lángterjedési sebességet [21].



11. ábra A Chaichan által alkalmazott mérőrendszer [21]

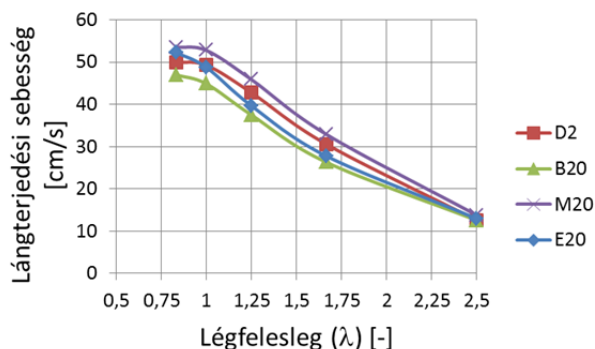
A szerző a mérőrendszerét a metanol-levegő elegyekkel ellenőrizte és megállapítása szerint a mérési bizonytalanság kevesebb volt, mint 5 %, amely igazolta a mérési módszer helyességét (12. ábra).



12. ábra A Chaichan által alkalmazott mérőrendszerrel mért lángterjedési sebesség és az irodalmi adatok metanol-levegő keverékekre [20]

A mérései során iraki gázolajat (D2), 20 V/V % napraforgó metil-észter – gázolaj (B20), 20 V/V % metanol – gázolaj (M20) és 20 V/V % etanol – gázolaj (E20) elegyeket vizsgált.

A metanol elegy stabilitása érdekében 2 V/V % *izo*-butanolt és cetánszámnövelő adalékot (2 V/V %) használt. Ugyanerre a célra etanol esetén 1,5 V/V % oldószert és cetánszám növelőt alkalmazott.

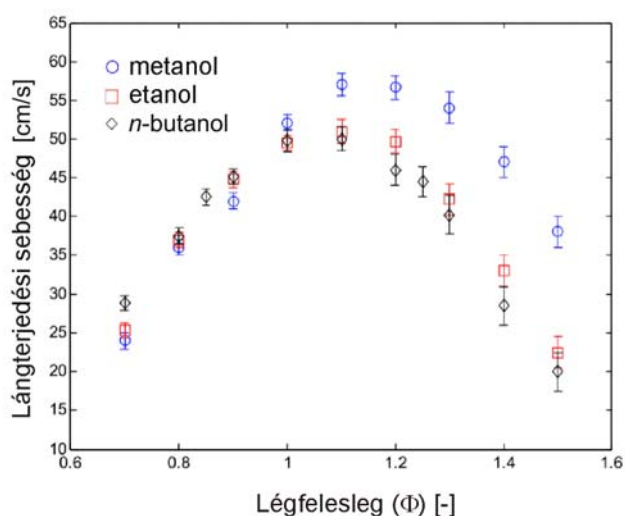


13. ábra A iraki gázolaj (D2), 20 V/V % metanol (M20), 20 V/V % etanol (E20) és a 20 V/V % biodízel (B20) lángterjedési sebességei, $T_u = 353$ K hőmérséklet és $P_0 = 1$ bar nyomás esetén a légfelesleg-tényező függvényében [20].

A mérési eredményei alapján megállapítható, hogy metanolbekeverés hatására a lángterjedési sebesség kismértékben (<10 %) növekedett, míg etanol bekeverés hatására kismértékben (<10 %) csökkent, biodízel esetén a legnagyobb a csökkenés (<15 %).

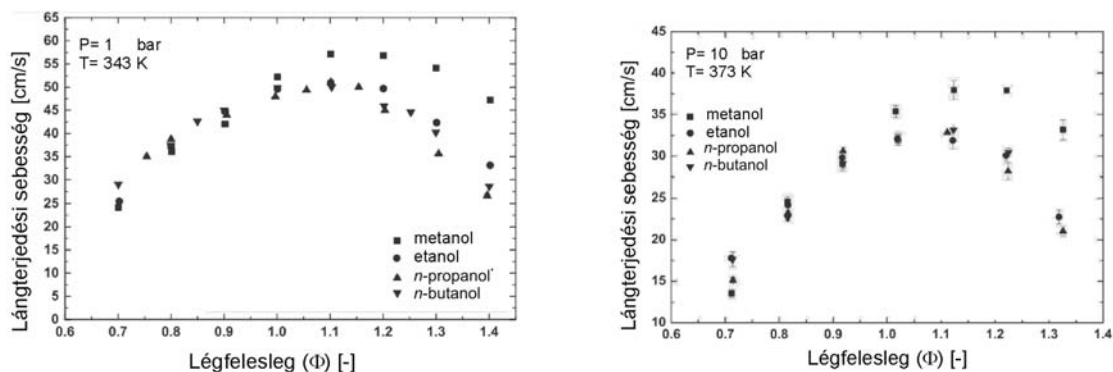
Butanol – gázolaj elegyekkel kapcsolatos eredményt nem sikerült találnom, így itt az *n*-butanol – metanol – etanol kapcsolatos összehasonlító eredmények alapján tudok feltételezésekkel élni. Veloo és munkatársai ikerláng-módszerrel (counterflow) végeztek méréseket mindhárom alkohollal légköri nyomáson [22].

Eredményeik alapján megállapítható, hogy tüzelőanyagban szegény keverék esetén legnagyobb lángterjedési sebessége az *n*-butanolnak van, de ez közel megegyezik az etanol lángterjedési sebességével és a metanolé a legkisebb. Sztöchiometrikus esetben közel megegyezik az etanol és az *n*-butanol lángterjedési sebessége, míg a metanolé kismértékben nagyobb. A tüzelőanyagban dús keverékek esetén a metanolnak a legnagyobb lángterjedési sebessége és a *n*-butanolnak a legkisebb (14. ábra).



14. ábra Veloo és munkatársai által mért lángterjedési sebesség metanol-levegő, etanol-levegő és *n*-butanol levegő keverékek esetén a légfelesleg-tényező függvényében ($T_u = 343$ K, $P = 1$ bar) [22]

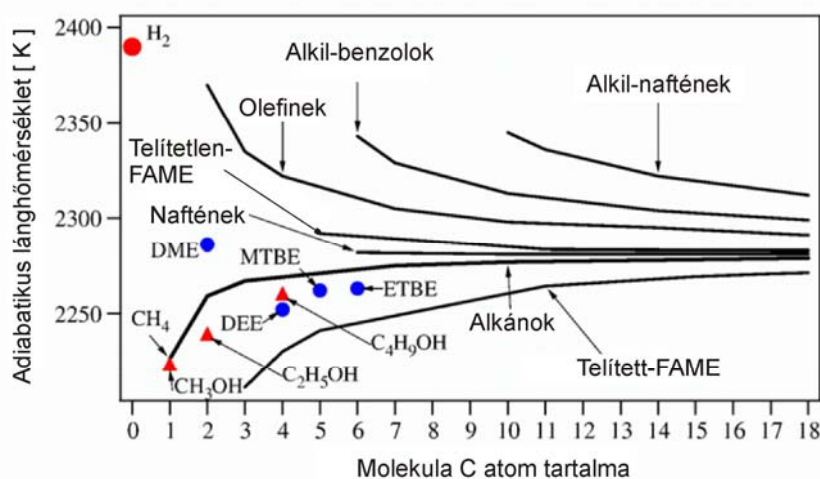
Beeckmann és munkatársai hasonló vizsgálatokat végeztek gömb alakú égetőkamrában [23] két nyomáson és négy alkohol esetén. Az eredmények alapján megállapítható, hogy az *n*-propanol is hasonlóan viselkedik, mint az etanol és az etanol és az *n*-butanol között van a lángterjedési sebessége. Emelt nyomáson (10 bar) csökken a lángterjedési sebesség, tüzelőanyagban dús keverékek esetén a metanol továbbra is jelentősen nagyobb lángterjedési sebességgel rendelkezik (15. ábra).



15. ábra Beeckmann és munkatársai által mért lángterjedési sebesség metanol-levegő, etanol-levegő, *n*-propanol-levegő és *n*-butanol levegő keverékek esetén a légfelesleg-tényező függvényében ($T_u=343$ K, $P=1$ és 10 bar) [23]

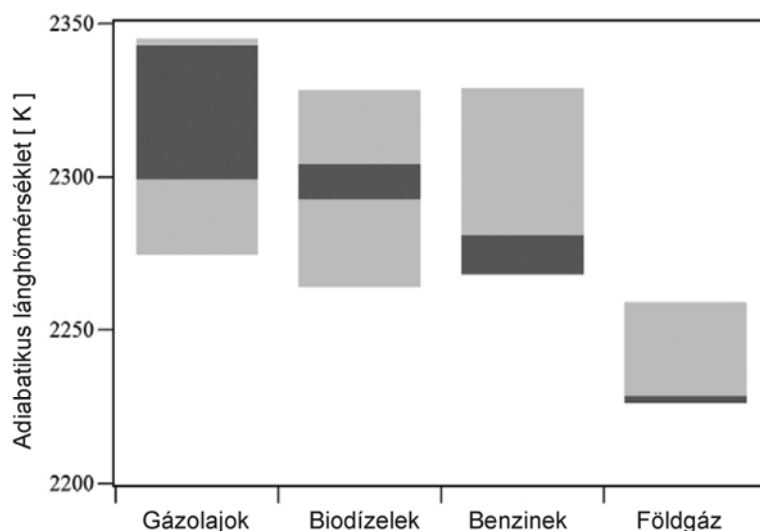
A vizsgálatra kerülő tüzelőanyagokhoz tartozó adiabatikus lánghőmérséklettel kapcsolatban Glaude és munkatársai jelentettek meg publikációt [24], melyben többek között különböző nyersanyagokból előállított biodízeleket (zsírsav metil-észterek (FAME)) és fosszilis tüzelőanyagokat vizsgáltak kiegészítve egykomponensű megújuló tüzelőanyagokkal, mint például az alkoholok (16. ábra).

Jól megfigyelhető, hogy a biodízel komponensek főbb csoportjai közül a telítetlen zsírsav metil-észterek („telítetlen FAME”) adiabatikus lánghőmérséklete csökken, míg telítetlen zsírsav metil-észterek („telített FAME”) adiabatikus lánghőmérséklete növekszik a molekula szénatomszám függvényében. Meghatározták a metanol, etanol és *n*-butanol mellett a dimetil-éter (DME), dietil-éter (DEE) metil-tercier-butil-éter (MTBE) és az etil-tercier-butil-éter (ETBE) adiabatikus lánghőmérsékletét is.



16. ábra Az adiabatikus lánghőmérséklet a molekulák C atom tartalmának függvényében ($T_u=300$ K, $P=1$ bar) [24]

A vizsgált biodízel nyersanyagok a repce, napraforgó, szója, pálma és faggyúolajok voltak.



17. ábra Különböző tüzelőanyagok adiabatikus lánghőmérsékletének tartománya (a világos szín az egyes tüzelőanyagokban található teljes fajtacsoporthoz által lefedett tartomány, a sötétszürke a legfeladatosabb komponens által lefedett tartományt jelzi, $T_u=300\text{K}$, $P=1\text{ bar}$) [24]

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a vizsgált alkoholok adiabatikus lánghőmérséklete (metanol esetén kb. 2200 K, butanol esetén kb. 2260 K) alacsonyabb, mint a gázolajok és a biodízelek adiabatikus lánghőmérsékletei. Fontos megjegyezni, hogy a párolgáshők hatásait az eredmények nem tartalmazzák. Hasonló tendenciákat mutat be Davis és Law [25] metanol és etanol adiabatikus lánghőmérsékletével kapcsolatban is. A szerzők megállapítása szerint, bár az *n*-heptán széles körben a gázolaj (D2) modellezéshez használt molekula, de annak kémiai és fizikai tulajdonságai távol állnak egy igazi dízel tüzelőanyagtól (D2).

A szakirodalom áttekintése alapján az *n*-butanol égési tulajdonságaival kapcsolatban a következőket állapítottam meg (hipotézis):

A többkomponensű tüzelőanyag-elegyek esetén az illékonyabb alkoholkomponensek az alacsonyabb forráspontjuk miatt a gázolajhoz képest gyorsabban párolognak ki a cseppekből. A kigőzölgés folyamatos alacsony hőmérsékleten, magasabb hőmérsékleten pedig a kigőzölgés lehet fluktuáló cseppnövekedéses, vagy puffogós, esetleg „gőzrobbanással” is járhat. Figyelembe véve a dízelmotorok nagy kompresszióviszonyát és a kompresszió okozta magas hőmérsékletet, ez utóbbiak valószínűsíthetők. Ez a jelenség viszont kisebb cseppméretet és jobb keveredést eredményezhet, ami viszont csökkentheti a CO, PM és el nem égett szénhidrogén (THC) kibocsátást. Még magasabb hőmérsékleten a komponensek olyan gyorsan párologhatnak el, hogy nem figyelhető meg sem a fluktuáló párologási fázis, sem a puffogás, vagy gőzrobbanás.

Továbbá az alkoholok bekeverésének hatására nő a gyulladási idő. Az irodalomkutatói eredmények alapján megállapítható, hogy várhatóan sztöchiometrikus és tüzelőanyagban dús keverékek esetén az *n*-butanol – gázolaj elegyek lángterjedési sebessége kisebb, mint a gázolaj lángterjedési sebessége. Az alkoholok (metanol, etanol és *n*-butanol) adiabatikus lánghőmérséklete kisebb, mint a gázolajé (D2). Ezek alapján várhatóan hasonló beállítások esetén a hatásfok romlik, csökken a NO_x-kibocsátás, nő a CO- és az el nem égett szénhidrogén- (THC) és a részecske-kibocsátás.

Ez alapján fontos megvizsgálni, hogy milyen eredmények születtek a felhasználás szempontjából.

2.3.A MAGASABB ALKOHOLOK MOTOROS FELHASZNÁLÁSÁVAL ÉS KÁROSANYAG-KIBOCSÁTÁSSAL KAPCSOLATOS SZAKIRODALOM ÁTTEKINTÉSE

A magasabb szénatomszámú alkoholok motoros felhasználásával és károsanyag-kibocsátással kapcsolatban két jelentős összefoglaló cikk készült (Babu és munkatársai, 2017 és Kumar és Saravanan, 2016) [26], [27]. Ezek alapján foglalom össze az elmúlt években a területen elért eredményeket.

Az *n*-butanol előállításával kapcsolatban megállapították, hogy az *n*-butanol – amelyet gyakran "butanolnak" neveznek – biomasszából (bio-butanol) vagy fosszilis nyersanyagokból (petro-butanol) állítható elő.

Az első olajválság idején (1973-75) az alkoholok közül az etanol kapott kiemelt figyelmet, mivel akkor a hagyományos keményítő alapú fermentációs eljárás során 1 kg kukoricából 0,43 liter etanol volt előállítható, míg az ABE (aceton-butanol-etanol) eljárás alkalmazásával 1 kg kukoricából csak 0,22 liter butanol nyerhető ki.

Napjainkban azonban a modern folyamatok jelentősen javították a butanol hozamot. Az elmúlt évtizedben a *Clostridium* és az *Escherichia coli* genetikailag módosított törzseinek jelentős fejlesztése zajlott le. A Tajvani Ipari Technológiai Kutató Intézet (ITRI) nemrégiben egy „Butyfix” [28] néven ismert új bio-butanol technológiát mutatott be, amely képes a rendelkezésre álló széntartalom 94 %-át átalakítani. Míg a jelenlegi fermentációs folyamatok az etanol előállítása során 67 %-os maximális szénkonverziós hatásfokot érnek el.

Az *n*-butanol számos további előnnyel rendelkezik az etanollal szemben:

- az *n*-butanolt ugyanabból a biomassza alapanyagból lehet előállítani, mint az etanolt pl.: búza, kukorica, cukorrépa, cukornád és manióka, illetve, ami fontos lesz a jövőben: mezőgazdasági melléktermékek és hulladékok;
- az *n*-butanolt mind két, mind hat szénatom számú tartalmú cukrokból lehet előállítani;
- a meglévő etanolos üzemek átalakíthatóak *n*-butanol előállítására és a meglévő csővezetékek az *n*-butanol szállítására is használhatók;
- az *n*-butanol kevesebb energiát igényel az előállításához, mivel a komplex makromolekulák felbomlásának folyamata korábban megállhat és így energiát lehet megtakarítani;
- az *n*-butanol alacsonyabb polaritása következtében jól keverhető gázolajjal;
- az *n*-butanol hidrofób és ez jó oldhatóságot biztosít gázolajban;
- az *n*-butanol kevésbé maró hatású;
- az *n*-butanol kevésbé maró hatású és normál tüzelőanyag tartályokban is tárolható hosszabb ideig.

A Kumar és Saravanan cikke [27] 26 irodalmat dolgoz fel butanol – gázolaj elegyek károsanyag-kibocsátása és effektív hatásfok szempontjából ([29], [30], [S-10], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [53]). A vonatkozott cikkek alapján a következőket tudtam megállapítani: az effektív hatásfok a cikkek 64 %-a alapján nőtt, a NO_x-kibocsátás a

cikkek 46 %-a szerint csökkent, 15 %-a szerint nem változott, míg 38 %-a szerint nőtt. A részecske-kibocsátás a legtöbb cikk (75 %) szerint csökkent, míg a CO-kibocsátás csökkent, illetve változatlan maradt (55 % illetve 15 %), valamint a THC-kibocsátás a források 67 %-a szerint nőtt.

Látható, hogy az égési tulajdonságok vizsgálata alapján felállított hipotézisnek megfelelően a PM-kibocsátás csökkent, a THC-kibocsátás nőtt a legtöbb cikk szerint, viszont a CO csökkent, illetve változatlan maradt és a várt csökkenés helyett a NO_x-kibocsátás egyes szerzők szerint nőtt, mások szerint csökkent, míg az effektív határfok nőtt. Ez ellenmondásnak tűnik elsősorban a gyulladási idő, az adiabatikus lánghőmérséklet és láng terjedési sebesség területén tapasztaltakkal szemben.

A szerzők [26] és [27] a következő eredményeket vonták le a feldolgozott irodalmak alapján¹:

- A elegyek *n*-butanol tartalmának növelésével az alacsonyabb cetánszámú *n*-butanol hatására növekszik a gyulladási idő;
- Az égési csúcsnyomás és a hasznos hőráta (HRR) enyhén emelkedik az *n*-butanol hozzáadása következtében a megnövekedett előkevert égés hatására, melyet a nagyobb gyulladási idő okoz;
- A effektív határfok általában növekszik a elegyben lévő *n*-butanol tartalom növekedésével;
- A butanol oxigéntartalma javítja az égést, különösen a diffúziós égési fázis során;
- A fajlagos fogyasztás nő (!) a elegyekben lévő *n*-butanol tartalom növekedésével. Az *n*-butanol fűtőértéke megközelítőleg 21-23 %-kal alacsonyabb, mint a gázolajé, ezért a motor nagyobb mennyiségű tüzelőanyagot igényel megegyező nyomaték esetén;
- A füstkibocsátás csökken az *n*-butanoltartalom növelésével. A nagyobb oxigéntartalom és az *n*-butanol kisebb szénatom tartalma, különösen a lokálisan tüzelőanyagban dús zónákban javítja az égetési folyamatot, ami alacsonyabb füstkibocsátást eredményez;
- Az el nem égett szénhidrogén (THC) kibocsátás nő az *n*-butanol bekeveréssel;
- Gázolajba akár 40 V/V % *n*-butanol is bekeverhető, és lehetséges a dízelmotorokban történő alkalmazása jobb tüzelőanyag átalakítási hatékonysággal és alacsonyabb károsanyag-kibocsátással.

Jövőbeli a szerzők által javasol kutatási irányok:

- További vizsgálatokra van szükség a 40 V/V %-nál butanolt tartalmazó elegyek esetén;
- Célszerű vizsgálni a motor teljesítményét és károsanyag-kibocsátását nagy tengerszint feletti magasságok esetén és alacsony környezeti hőmérsékleten (-20 °C és 5 °C);
- Kutatást igényel a *n*-butanol – gázolaj elegyek biológiai lebonthatósága és hosszú távú stabilitása napsugárzásnak és a hőhatásának kitett elegyek esetén.

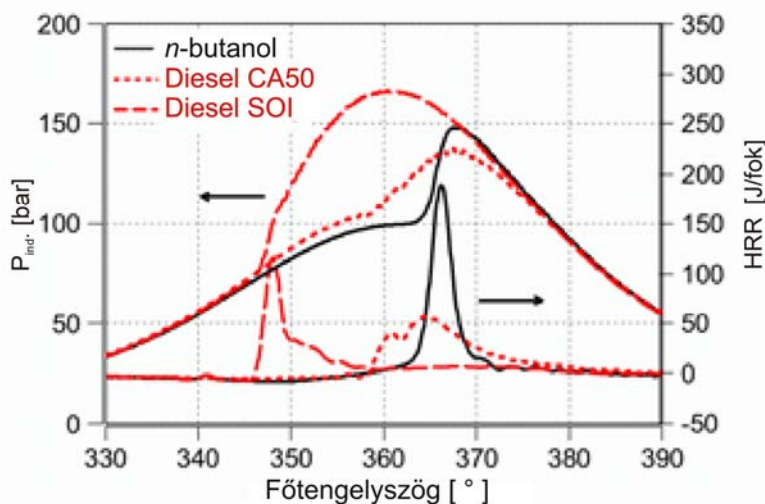
¹ Megjegyzés: A szerzők további eredményeket is megfogalmaztak, például a BSFC csökken a butanol bekeverésével az alacsonyabb fűtőérték miatt, ez ellentmondás, ezt javítottam, de jeleztem a szövegben (!). Továbbá a nyomásnövekedés egyik okát a szerzők a butanol nagyobb lángterjedési sebességével indokolják (gázolaj 33 cm/s [58], butanol 45 cm/s), ami ellentmond 2.2. fejezetben leírtakkal. Gázolaj esetén forrás egy hivatkozás: TUPRAS. Product specification. Turkey; 2009 [in Turkish]. Azonban ebben a forrásban sem ezt az adatot, sem az égéskezdeti hőmérsékletet, sem a nyomást nem találtam, ezért többek között ezt a megállapítást nem építettem be!

2.4.KITEKINTÉS A KORSZERŰ, ALACSONY KÁROSANYAG-KIBOCSÁTÁSÚ BUTANOL FELHASZNÁLÁSÁRÓL

X. Han és munkatársai [12] *n*-butanollal, mint a dízelmotorok lehetséges következő generációs tüzelőanyagával foglalkoztak. Megállapításuk szerint a különböző motorokban és különböző üzemeltetési körülmények esetén végzett kísérletek alapján a gázolaj – butanol elegyek lényegesen csökkentik a részecske-kibocsátást (PM), a NO_x-kibocsátás csökken, illetve kismértékben nő, de füstgáz visszavezetés segítségével ez hatékonyan csökkenthető. A másik megoldás a felhasználásra a kettős tüzelőanyagú keverékképzés, ennél a megoldásnál az *n*-butanolt a szívócsőbe fecskendezik, hasonlóan a szikragyújtású motorokhoz, viszont a gyújtást az égéstérbe fecskendezett gázolaj végzi. A szerzők meglátása szerint ennek előnye a kettős tüzelőanyag-keverékekkel szemben, hogy a keverékarány az üzemi igénynek megfelelően változtatható. Ezzel a technológiával jól csökkenthető a részecske (PM) kibocsátás. Viszont szerintük kevésbé vizsgált az üzemeltetés tisztán *n*-butanollal.

A motoros összehasonlító vizsgálataik során egy terhelési pontban, 338 ft°-nál fecskendezték be a referencia gázolaj és tiszta *n*-butanol tüzelőanyagokat, továbbá úgy határoztak meg egy gázolaj befecskendezés-időpontot, hogy az égési hasznos hő bevitel 50 %-a (CA50) megegyezzen a tiszta *n*-butanoléval (18. ábra).

Megállapításuk szerint a nyomásnövekedés sebessége az *n*-butanol esetén olyan jelentősen nőtt, amely már káros mértékű, az égési folyamat pedig megközelítette az elméleti Ottó-motoros körfolyamatot. Az eredményeik alapján javulhat a hatásfok, az NO_x- és a PM-kibocsátás is csökkenhet *n*-butanol alkalmazásánál, elsősorban a butanol nagy gyulladási ideje miatt kialakuló kései intenzív előkevert égés miatt².



18. ábra A mért indikált nyomás és hőfelszabadulás sebessége (HRR) gázolaj befecskendezés (bef. időpontja, 338 és 353 ft°) és *n*-butanol esetén (bef. időpontja, 338 ft°) [12]

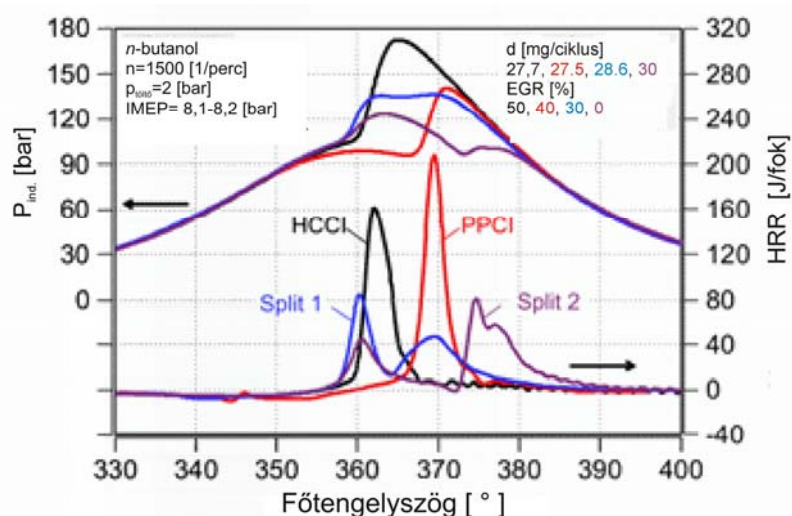
Az újszerű égési folyamatokkal kapcsolatos első vizsgálataik során az úgynevezett PPCI (Partially Premixed Compression Ignition), azaz a részlegesen előkevert kompressziógyújtású módszert tesztelték (19. ábra). Ez gyakorlatilag egy korai befecskendezést jelent, ebben a cikkben 13 és 35 ft° között. Ennek hatására a

² A NO_x-szel kapcsolatos megjegyzésem, hogy ez a nagyobb gyulladási idő miatt a felsőhőtpont után lezajló égési folyamat következménye is lehet.

tüzelőanyag nagyrészt elpárolog, megfelelő keveredési idő esetén a hengertöltet közel homogén lesz. Ennek eredményeként a tüzelőanyagban szegény és jól kevert hengertöltet lassú és instabil égést eredményez. Ennek hatására jelentősen csökkent a NO_x- (<20 ppm) és PM-kibocsátás, viszont a CO- és a THC-kibocsátás igen nagy volt.

A következő vizsgálat az úgynevezett HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition), azaz a homogén keverékű kompresszió gyújtás volt. Ebben az esetben a szívási ütemben fecskendezték be az *n*-butanolt a szívócsőbe, amely legkésőbb a kompresszió során elpárolog, így itt a befecskendezés időzítése nincs hatással az égési folyamatra, ellentétben a levegő töltet tulajdonságaival, amely a feltöltéssel vagy a füstgáz visszavezetéssel szabályozhatók. Ebben az esetben is igen alacsony a NO_x- (<10 ppm) és a PM-kibocsátás, viszont a CO- és THC-kibocsátás továbbra is igen jelentős.

Mindkét üzemmód esetén megfigyelhető, hogy nagy teljesítményen a nyomásnövekedés sebessége többszöröse (20 bar/fok) a hagyományos gázolajos üzemhez képest (4-8 bar/fok).



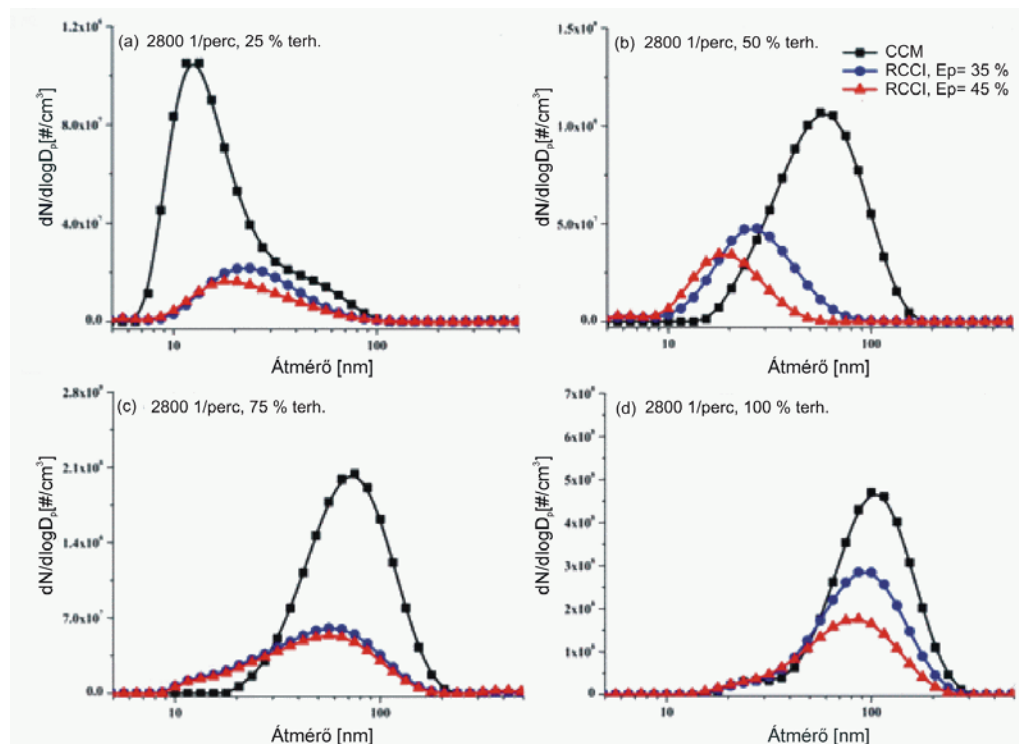
19. ábra A tiszta *n*-butanol tüzelőanyag égéster nyomása és a hőfelszabadulási sebesség (HRR) a főtengelyszög függvényében HCCI and PPCI – és a két osztott befecskendezés esetén 8,2-8,1 bar effektív középnyomás esetén [12]

A szerzők javaslata alapján célszerű tisztán *n*-butanol tüzelőanyag esetén nagy terhelésen az úgynevezett osztott (Split) befecskendezés alkalmazása, ez lehet részben homogén keverékű kompresszió gyújtás (HCCI) és többszörös direkt befecskendezés keveréke (Split1), vagy csak többszörös befecskendezés (Split2) alkalmazása. Az utóbbit az egész működési tartományban lehet alkalmazni. Kis és közepes terheléseken a HCCI és a részlegesen előkevert kompresszió gyújtás (PPCI) módszerekkel a gázolajos üzemhez hasonló jó hatásfokot lehet megvalósítani a szerzők megállapítása szerint (19. ábra).

Szintén terjedő keverékképzési módszer az úgynevezett reakció képesség kontrolált kompresszió gyújtás (RCCI). Ennek a módszernek a lényege, hogy az alacsony reakcióképességű, azaz rossz öngyulladási tulajdonsággal rendelkező tüzelőanyagot (pl. benzin, etanol, butanol, stb.) külső keverékképzés során fecskendezik be és hoznak létre egy homogén keveréket. A jó öngyulladási tulajdonsággal rendelkező tüzelőanyagot (pl. gázolaj, biodízel) nagy előbefecskendezéssel juttatják az égéstérbe, amely a rossz öngyulladási tulajdonsággal rendelkező tüzelőanyaggal elpárologva és összekeveredve hoz létre elegyeket. Az égési folyamatot vagy öngyulladással, vagy

gyújtó befecskendezéssel indítják el. Ezt a keverékképzési módszert általában kisterhelések esetén alkalmazzák.

Pan és munkatársai [54] méréseik során 2-butanol és gázolaj tüzelőanyagokat vizsgáltak 2800 1/perc fordulatszámon és 25 %-tól 100 % terhelésig.



20. ábra A részecskeszám a részecskeméret függvényében 2800 1/perc fordulatszámon és 25 %, 50 %, 75 % és 100 %- terheléseken gázolaj (CCM) és 35% és 45% két elsődleges 2-butanol energia tartalom (Ep) esetén RCCI üzemben [54]

A méréseket referencia gázolajjal (CCM - Conventional Combustion Mode) és RCCI üzemmódban két elsődleges butanol tüzelőanyag energiataralom esetén³ (Ep= 35 % és 45 %) végezték. Az eredményeik szerint RCCI üzemben az effektív hatások kisterhelésen (kis mértékben) csökkent, míg nagy terhelésen növekedett, a THC- és CO-kibocsátás jelentősen megnövekedett, viszont a NOx- és a PM-kibocsátás jelentősen csökkent a gázolajhoz képest. A szerzők a szabályozott káros anyagok mellett vizsgálták a részecskeszámeloszlást is (20. ábra). Megállapításuk szerint „RCCI működési módban részecskeméret-eloszlása kisebb átmérő-tartományba kerül.”(!).

Zheng és munkatársai [55] összehasonlító vizsgálatokat végeztek *n*-butanol – biodízel elegyekkel (0 - 80 V/V % bekeverési aránnyal) és ugyanezekkel az elegyekkel reakció képesség kontrolált kompresszió gyújtás (RCCI) üzemben, különböző terheléseken végeztek méréseket. Eredményeik szerint a részecske kibocsátás (PM) a butanol tartalom növelésével csökkent. A NOx-kibocsátás RCCI üzemben jelentősebben csökkent, viszont a THC- és a CO-kibocsátás jelentősen növekedett.

2.5. KITEKINTÉS A BUTANOL FELHASZNÁLÁS KEVEREDÉSI ÉS ÉGÉSI FOLYAMATAINAK MODELLEZÉSÉRŐL

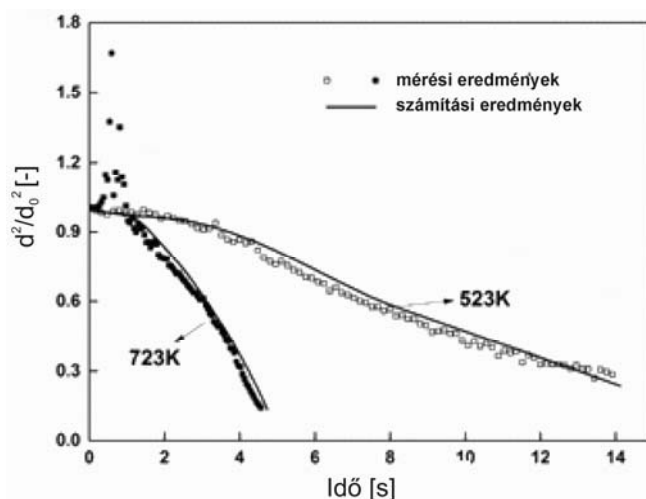
A modellezéssel kapcsolatban elért eredményekkel a Ma és munkatársai [14] által elvégzett mérések alapján Ni és munkatársai [56] foglalkoztak a kettős tüzelőanyag-

³ Az elsődleges tüzelőanyag energiataralom definíciója a 5. fejezetben kerül bemutatásra (7. egyenlet).

elegy (gázolaj és ABE) cseppek párolgási folyamatainak modellezésével. A modellalkotás során a következő feltételezésekkel éltek:

1. a cseppek szimmetrikusak, amit a kis cseppméret indokol;
2. a cseppek hőmérséklete és összetétele egyenletes, de az idő függvényében változik, ami alkalmas egydimenziós folyadékfázis-számításra;
3. mivel a gázfázis termikus energiája nagyobb, mint a folyadékfázisé, így a cseppecskéket körülvevő gőzfázis kvázi állandósult állapotban van;
4. mind a gőz, mind a folyékony fázis termodinamikai egyensúlyban van a csepp felületén;
5. a cseppet körülvevő gázkeverék oldhatatlan a folyadékfázisban és a cseppecskék nem érhetik el a kritikus állapotot a környezeti feltételek mellett.

Az irodalmi adatok alapján [14] megállapítják, hogy az ABE20 csepp kísérleti görbéje nyilvánvalóan ingadozásokat mutat a párolgás során, ami a buborékok képződésének, csepp-torzulásának és részleges szakadásának jelenségét mutatja (21. ábra). Megállapításuk szerint a kidolgozott ABE20 modell segítségével a numerikus eredmények magyarázatot adhatnak a fluktuáló cseppátmérőre a csepphőmérséklet és az összetevők forráspontja alapján. A fluktuálás kvantitatív leírásának kivételével a modell eredményei jól közelítik a kísérleti eredményeket a cseppecskék átmérőjének változásáról.



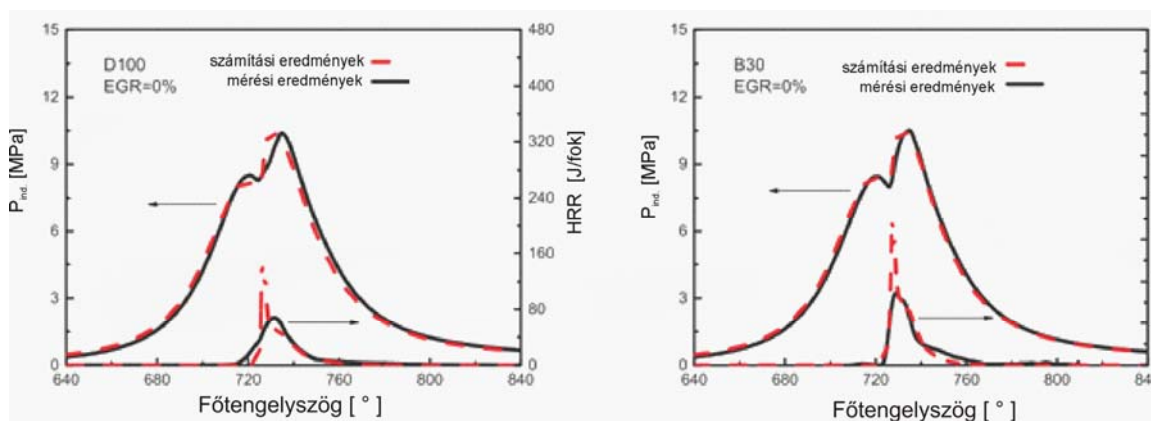
21. ábra A normalizált cseppátmérő négyzet ABE20 elegy esetén az idő függvényében 523 K és 723 K hőmérsékleteken [56]

A gázolaj – butanol elegyek égési folyamatának modellezése hosszú múltra tekint vissza. Az áttekintett publikációk közül ezen a területen egyik legkorábbi Dagaut és Togbé 2009-es munkája [57]. A szerzők 1-butanol – *n*-heptán elegyek (20/80 és 50/50 mol/mol) oxidációját egy jól kevert reaktorban (JSR) vizsgálták. A modellezést és a kísérleteket 530-1070°K hőmérséklet tartományban, 10 atm (10,1 bar) nyomáson, két légfesleség esetén (0,5 és 1), 750 ppm kezdeti tüzelőanyag koncentrációval végezték. Az égési folyamat reakciómechanizmusa *n*-heptán és butanol reakciómechanizmusok összevonásából származtak [58].

Wang és munkatársai [59] tovább egyszerűsítették a Sarathy és munkatársai [60] butanol izomer reakciómechanizmusait és ezt a reakcióutat egyesítették egy egyszerűsített *n*-heptán – policiklusos aromás szénhidrogén (PAH)

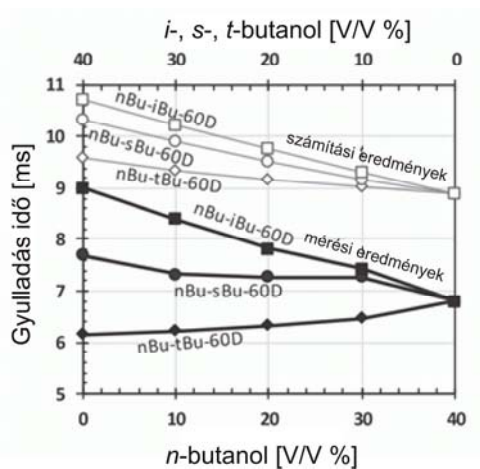
reakciómechanizmussal. Az így kapott *n*-heptán – *n*-butanol – PAH reakciómechanizmust validálták a gyulladási idő, előkevert láng és motoros vizsgálatok segítségével.

Ezt továbbfejlesztve Huang és munkatársai [61] egy egyszerűsített, 101 molekulát és 531 reakciót tartalmazó *n*-heptán – toluol – *n*-butanol – PAH égési mechanizmust dolgoztak ki *n*-butanol – gázolaj tüzelőanyag-elegyekre. A CFD modellezéshez az AVL Fire, a reakciómechanizmus számítására a CHEMKIN-PRO (2008) szoftvert használták. Ezt a mechanizmust CFD-vel összekapcsolva dízelmotoros mérések segítségével validálták. A motorvizsgálatok során kétféle tüzelőanyagot, tiszta gázolajat (D100) és 30 V/V % *n*-butanol és gázolaj elegyét használták. Megállapításuk szerint az indikált nyomás és a hasznos hőváltás (HRR) szempontjából a szimulációs és a mérési eredmények jól egyeztek, de a HRR maximumok nagyobbak voltak a kísérleti eredményeknél (22. ábra). Ennek oka a szerzők szerint, hogy az égésterben kialakuló turbulencia, valamint a tüzelőanyag-befecskendezés időbeni lefutása nem volt teljes mértékben figyelembe véve.



22. ábra A mért és számított indikált nyomás és a hasznos hőfelszabadulás sebesség (HRR) a főtengelyszög függvényében gázolaj (D100) és 30V/V % butanol (B30) esetén [61]

Hernández és munkatársai [62] a butanol izomereit és azok gázolaj és biodízel elegyeinek a gyulladási idejét vizsgálták és modellezték. A méréseket 0-40 V/V % elegyekkel, különböző kezdeti hőmérsékleteken (535 °C, 600 °C és 650 °C) hajtották végre állandó térfogatú rendszerben.



23. ábra A számított és a mért gyulladási idő értékek a butanol tartalom függvényében különböző izomerek esetén [62]

A modellszámításokhoz szintén a Sarathy és munkatársai [60] által kifejlesztett butanol izomer reakciómechanizmusait, a gázolaj modellezésére egy helyettesítő *n*-heptán – toluol reakciómechanizmust használtak.

Megállapításuk szerint a számított és a mért gyulladási idő értékek nem pontosan illeszkednek (23. ábra). De a különböző dízel–butanol izomerek gyulladási idő sorrendje megegyezik a kísérleti (*i*-Bu < *s*-Bu < *t*-Bu) elegyek eredményeivel. Így a számított eredmények megállapításuk szerint hasznosak az egyes izomerek hatásának kvalitatív elemzéséhez.

Emellett Sazhin [63] a tüzelőanyag-cseppek melegedési és párolgási tulajdonságainak vizsgálatával kapcsolatos művében megemlíti, hogy még számos megoldatlan probléma van ezen a területen. Az általa említett, eddig megoldatlan problémák (pl. nem gömb alakú cseppek melegedése és párolgása, az ETC/ED (Effective Thermal Conductivity/Effective Diffusivity) modellek alkalmazhatósági kérdései, a cseppek közötti kölcsönhatások vizsgálata stb.) mellett további szempont, hogy a cseppek felmelegedése és elpárolgása közel szuperkritikus körülmények között történik. Ezt fontos külön hangsúlyozni, mivel pl. az *n*-heptán, amelyet a gázolaj-közelítő modellek esetén alkalmaznak, kritikus nyomása 27 bar ($T_s = 765$ K), míg *n*-butanol esetén a kritikus nyomás 54 bar ($T_s = 563$ K), így jelentős hibát eredményezhet a modellezés során, ha ezt figyelmen kívül hagyják (lásd [25] is).

Egyrészt a fentiek alapján nem foglalkoztam az *n*-butanol – gázolaj elegyek modellezésével, másrészt mivel a modellezés informatikai része kereskedelmi szoftverekkel készül, így többek szerint ezek nem tekinthetők új tudományos eredménynek.

3. MAGASABB SZÉNATOMSZÁMÚ ALKOHOLOK HASZNOSÍTÁSA NYERS NÖVÉNYI TÜZELŐANYAGOK ESETÉN

A nyers növényi olajok hasznosítása tüzelőanyagként egyidős a dízelmotorok történetével. A növényi olajok többnyire trigliceridekből állnak. A trigliceridek eredendően viszkózusak. A nagy viszkozitás és a rossz párolgási tulajdonságuk nagy kihívást jelent, illetve kizárja felhasználásukat a modern és erre fel nem készített dízelmotorokban.

Különböző módszerek alkalmazhatók a növényi olajok viszkozitási és az egyéb, a gázolajtól eltérő paramétereinek átalakítására. Elterjedt és kutatott az észterezés, pirolízis és katalitikus krakkolás, mikro-emulziók létrehozása és dízel tüzelőanyaggal történő keverés stb. (pl. [7], [64], [65] és [66]). Ezek közül a módszerek közül az észterezés a ma leginkább elterjedt módszer növényi olajok fosszilis gázolajhoz hasonlóvá tételének céljából (pl. [8], [67], [68] és [64]).

A növényi olajok összekeverése másik, alacsony viszkozitású tüzelőanyaggal egy olyan módszer, amely elsősorban a viszkozitásuk csökkentésére alkalmazható. Ez többek között lehetővé teszi, hogy a tüzelőanyag-rendszer eltömődésének elkerülésével és a porlasztás szempontjából megfelelően lehessen használni növényi olajokat. A különböző növényi olaj – gázolaj elegyek sikeresnek bizonyultak tüzelőanyagként (pl. [69] [70], [71], [72]). A rövid távú vizsgálati eredmények biztatóak voltak, de problémák merültek fel a hosszú távú motortartóssági tesztekben. Ezért nem praktikus növényi olajokat – bizonyos arányokat meghaladóan – tartalmazó elegyek alkalmazása sem közvetlen égésterű, sem előkamrás dízelmotorokban.

Keverés szempontjából az egyszerű alkoholok (etanol és metanol) használata – mint a dízelmotorokban használt tüzelőanyag-elegy összetevők – különböző előnyökkel jár. Ezeknek az alkoholoknak alacsony a viszkozitásuk és gazdaságosan előállíthatók a kifejlesztés alatt álló 2. és 3. generációs technológiák felhasználásával. Ugyanakkor számos nehézség jelentkezik az egyszerű alkoholok felhasználása során dízelmotorokban, mint például a korlátozott keveredés gázolajjal, a fázissztválás, a tüzelőanyag-elegyek esetén a vízzel szembeni intolerancia, alacsony fűtőérték és alacsony cetánszám.

Ezzel szemben a nagyobb szénatomszámú alkoholok alkalmazása számos előnnyel jár, így például gázolajjal és nyers növényi olajokkal keverhetők felületaktív anyag vagy emulgátor nélkül. Jelentős részük előállítható biomasszából, alacsony viszkozitással rendelkeznek és így felhasználhatók az elegyek viszkozitásának csökkentésére. Az egyszerű alkoholoknál nagyobb a fűtőértékük, a cetánszámuk és a viszkozitásuk is.

Hipotézisem szerint az általam vizsgált magasabb szénatom-számú alkoholok – elsősorban az *n*-butanol – megfelelő keverőkomponens növényi olaj – gázolaj elegyek számára ([S-3], [S-4], [S-5] és [S-6]). Ezek az alkoholok stabil elegyeket hoznak létre gázolajjal és a gázolajtól erősen eltérő kémiai és fizikai paraméterekkel rendelkező nyers növényi olajok is hasznosíthatóvá válnak kettős vagy hármas elegyek formájában dízelmotorokban, elsősorban az alkoholok növényi olajokénál kisebb viszkozitása miatt

A hipotézis igazolására vizsgáltam különböző nyersolajok és elegyeinek viszkozitását, sűrűségét, fűtőértékét, cetánszámát (CN), és meghatároztam hidegszűrhetőségi határhőmérsékletét (CFPP), a termogravimetriás (TG) és a derivatív termogravimetriás (DTG) tulajdonságaikat (l. 2. táblázat).

	RSO – magasabb alkoholok	RSO, CRO, JAO, COO	RME, CRME, COME, JAME	CRO – BU – D2
viszkozitás	X	X	X	X
CFPP	X			
lobbanás pont	X			
sűrűség	X	X	X	X
fűtőérték (LHV)	X	X	X	X
CN	X	X	X	X
TG és DTG	X	X	X	X
motoros felhasználás	X	X	X	X

2. táblázat Az elvégzett mérések táblázata (X – bemutatott eredmények, X – elvégzett, de értékezésben be nem mutatott vizsgálatok)

Első lépésben a hazánkban rendelkezésre álló nyers repceolajat (RSO) és elegyeit vizsgáltam. Az ezen a területen elért eredmények alapján további három nyers – egzotikus – olajat és ezek elegyeit vizsgáltam tovább, ezek a krotonolaj (CRO) az ismertebb jatrophalaj (JAO) és a kókuszolaj (COO).

A krotonolajat a Croton Megalocarpus fa terméséből állítják elő, terméshozama 5-10 t/ha, olajtartalma 30-35 %, ideális körülmények esetén 2,4 t/ha az olajkihozatala. Csapadékgénye jelentős, minimum 800 mm évente.

A jatrophalajat a Jatropha Curcas terméséből állítják elő, csapadékgénye legalább 200 mm, terméshozama 0,2-5,5 t/ha, olajtartalma 25-40 %, ideális körülmények között kb. 1,2 t/ha az olajkihozatal. Fontos megemlíteni, hogy a két utóbbi olaj nem étkezési olaj, ellentétben a kókuszolajjal és a repceolajjal.

A kókuszolaj (Oleum Cocos) a kókuszpálma (Cocos nucifera) magjának beléből (korpából) készített növényi olaj, tipikus egyenlítő környéki növény, olajhozama 0,7-3,3 t/ha.

A repce magvak olajtartalma 40-50 %, vízigénye magas, 580-700 mm, olajkihozatala 0,6-2,0 t/ha. A vizsgált nyersolajok főbb paraméterei a 3. táblázatban találhatóak.

A nyersolajok vizsgálata mellett a komolyabb technológiát igénylő – és az első generációs rendszereknél (10-20 % m/m_{biodízel}) bemenő metanol igényű és kimenő (10-25 % m/m_{biodízel}) glicerint [S-1] mellékterméket eredményező – olajokból készült metil-észterekkel (biodízelek) is foglalkoztam, mivel ezek komplexen még kevésbé vizsgáltak az afrikai eredetű olajok esetén. A repce metil-észtert külföldi tank állomáson szereztük be (EN 14214), a többi metil-észtert a dél-afrikai partner készítette [73] és [74].

Továbbá foglalkoztam hármass elegyekkel is. Ezek a hármass elegyek 10-20 V/V % nyersolajat, 5-10 V/V % *n*-butanol és 80 V/V % gázolajat tartalmaztak. Ez utóbbi elegyek vizsgálatát azért választottam, mivel szakirodalmi adatok alapján a biodízel – gázolaj – etanol hármass elegyek kedvezőek, elsősorban a károsanyag-kibocsátást csökkentik, pl. [75], [76], [77] és [78]. Azonfelül megfelelő viszkozitású tüzelőanyag-elegyeket kapunk a hármass elegyekkel, erre a viszkozitás vizsgálatoknál térek ki részletesen (3.1.1 fejezet).

	sűrűség (28 °C)	fűtőérték (LHV)	cetánszám (CN)	kinematikai viszkozitás (40 °C)
	[kg/m ³]	[MJ/kg]	[-]	[mm ² /s]
repceolaj (RSO)	914.0	36.89	41.6	34.8
krotonolaj (CRO)	920.0	39.65	40.7	33.4
jatrophaolaj (JAO)	901.0	34.56	41.8	34.6
kókuszolaj (COO)	935.8	34.11	50.3	34.1
gázolaj (D2)	811.6	42.92	54.6	2.6

3. táblázat A vizsgált (nyers) olajok főbb paraméterei [S-6, S-7, S-8 és S-9]

3.1. TÜZELŐANYAG VIZSGÁLATOK

Az első vizsgálatokat öt különböző magasabb szénatomszámú alkohollal végeztem szerzőtársammal, ezek a következők: *n*-butanol (1-butanol), 2-butanol, izobutanol, valamint 1-propanol és 2-propanol. A butanol és izomerei potenciális megújuló tüzelőanyagok (pl. [12]). Az *n*-butanol keményítő erjesztésével a *Clostridium Acetobutyricum* vagy *Clostridium Beijerinckii* baktérium segítségével állítják elő (pl. [79], [80], [81]) fermentációval a glükózok közvetett hidratálásából, vagy a szénhidrogének desztillációjából [82]. Az izobutanol a kozmás vagy kozma olajok alkotórésze. A két propanolt – mint kevésbé kutatott 3 szénatom számú alkoholt – vettük be a vizsgálatokba [S-6]. Az 1-propanolt etilén, szén-monoxid és hidrogén reakciójával állítják elő, valamint szintén a kozmás olajok alkotórésze. A 2-propanolt vagy izopropil-alkoholt propilénből állítják elő.

Ezeket az alkoholokat a hazai forrásokból akkor rendelkezésre álló nyers repceolajjal (RSO) kevertük. A vizsgált alkoholok főbb adatai a 4. táblázatban találhatóak.

	1-propanol	2-propanol	izo-butanol	<i>n</i> -butanol	2-butanol	gázolaj (D2)
Kémiai képlet	C ₃ H ₇ OH	C ₃ H ₇ OH	C ₄ H ₉ OH	C ₄ H ₉ O H	C ₄ H ₉ O H	C ₁₄ H ₃₁ *
Moláris tömeg [g/mol]	60.1	60.1	74.1	74.1	74.1	199
forráspont [°C]	97.2	82.4	107.9	117.7	100	~180
lobbanáspont [°C]	15	11.7	25	29	24	> 55
sűrűség [kg/m ³] (15°C)	803.5	785.0	802.7	809.8	806.5	830.0
fűtőérték [MJ/kg] (LHV)	30.68	30.68	33.07	33.07	33.07	> 43
kinematikai viszkozitás [mm ² /s] (25 °C)	2.41	2.49	4.92	3.73	-	2-4.5

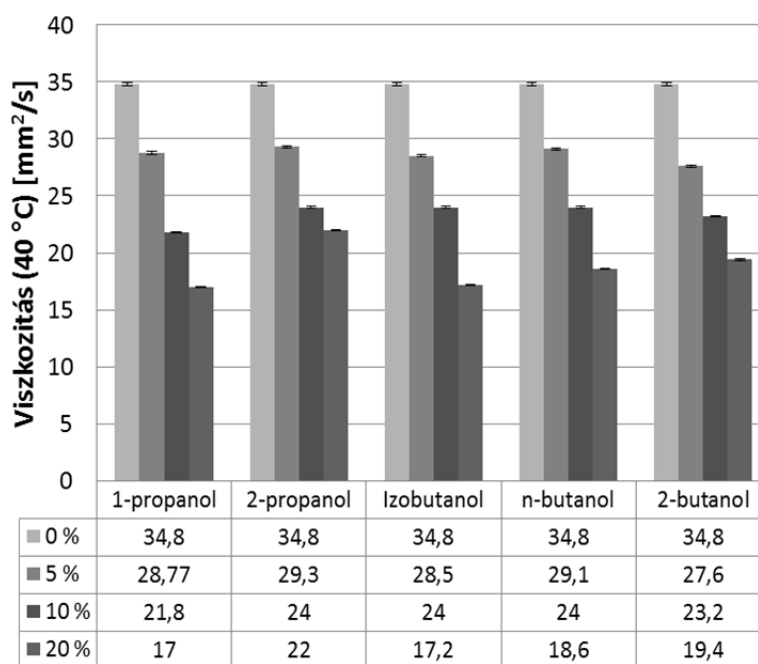
4. táblázat A vizsgált alkoholok főbb paraméterei [S-6]

A magasabb szénatom-számú alkoholok és nyers repceolaj elegyek viszkozitásával, cetánszámával, lobbanáspontjaival és hidegfolyási határhőmérséklettel (CFPP)

kapcsolatos eredményeket Laza Tamás szerzőtársam [S-6] PhD disszertációjában bemutatta és erre vonatkozó téziseket állított fel így azzal kapcsolatosan megállapításokat csak általánosságban teszek. Viszont a téma minél teljesebb feldolgozása érdekében ezeket az eredményeket én is bemutatom.

3.1.1. VISZKOZITÁS VIZSGÁLATOK

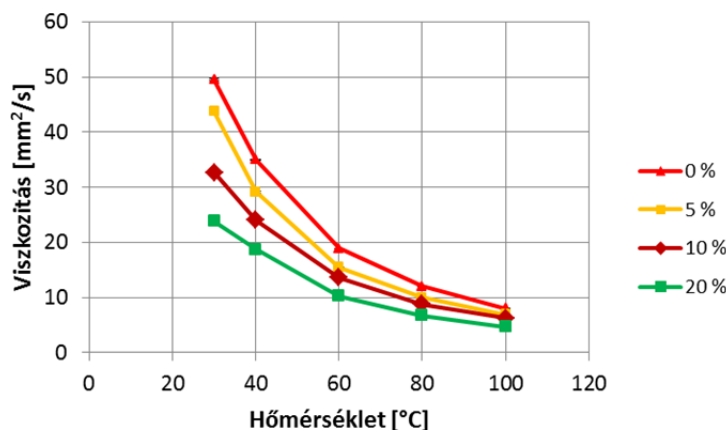
A vizsgálatokat az ISO 3104:1994 előírás szerint végeztem 40 °C-on üvegkapillárisos viszkoziméterrel, amely egy Thermostat-D Type 674-ben volt elhelyezve.



24. ábra A repceolaj és az öt különböző vizsgált alkohol kinematikai viszkozitása 40 °C-on különböző bekeverési arányokban [S-6] ($\delta_{\text{viszk}} \pm 0,35 \%$)

A hipotézisnek megfelelően az elegyek kinematikai viszkozitása csökken az alkohol bekeverés növelésével (24. ábra). A legjelentősebb a csökkenés 40 °C-on az izobutanol és az 1-propanol (50 %, illetve 51 %) a 20 V/V % alkohol elegyek esetén, viszont a kinematikai viszkozitás továbbra is lényegesen nagyobb volt, mint a gázolajjal (2,0-4,5 mm²/s, EN 590:1999), illetve biodízzel (3,5-5 mm²/s, EN 14214) szembeni követelmény.

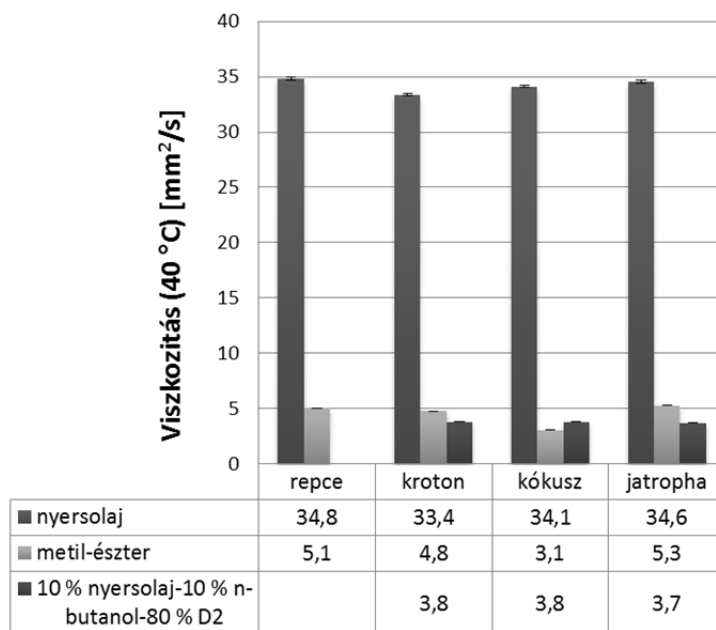
A viszkozitás csökkentésének másik lehetősége a hőmérsékletnövelés. Itt megfigyelhető volt, hogy a hőmérséklet növelésével az alkoholok viszkozitás csökkentő hatása kevésbé jelentős (25. ábra). Mivel a vizsgált alkoholok forráspontja 82,4 és 117,7 °C között van, így az e feletti hőmérsékleten az alkohol – részben – elpárolgott.



25. ábra A repceolaj kinematikai viszkozitása a hőmérséklet függvényében *n*-butanol bekeverési arányok esetén [S-6] ($\delta_{\text{viszk}} \pm 0,35 \%$)

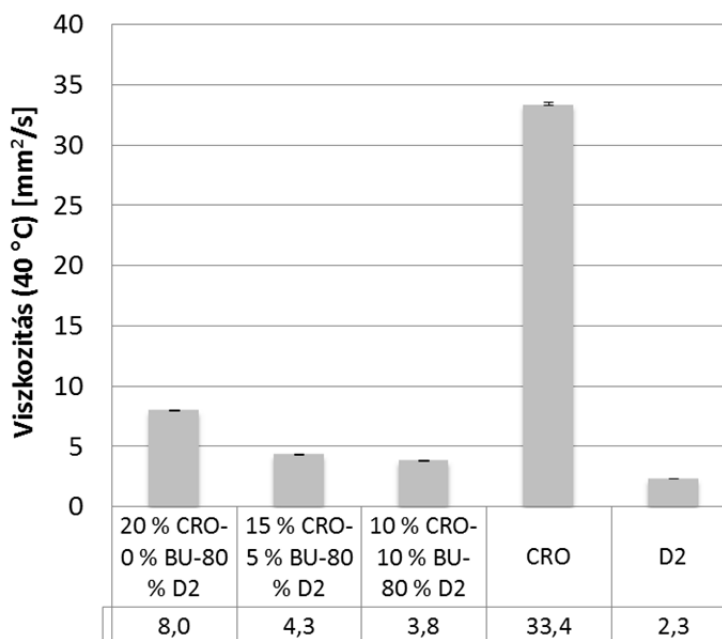
A különböző olajok viszkozitásának (26. ábra) összehasonlításából látható, hogy legnagyobb viszkozitású a repceolaj, a legkisebb viszkozitása a krotanolajnak volt, de ez is $33,4 \text{ mm}^2/\text{s}$, viszont az eltérés az egyes nyersolajok között nem volt jelentős.

A vizsgált metil-észterek közül a repce metil-észter és a jatropha metil-észter viszkozitása határérték fölötti, legalacsonyabb viszkozitás a kókuszolaj metil-észter esetén volt. Ez utóbbi nem véletlenül kedvelt nyersanyaga a biodízelgyártásának, viszont a termelése komoly környezeti veszélyeket okozhat!



26. ábra A nyers növényi olajok (repce, kroton, kókusz, jatropha), azokból készült metil-észterek és nyers növényi olajok – gázolaj – *n*-butanol elegy kinematikai viszkozitása 40 °C hőmérsékleten [S-6, S-7 és S-8] alapján ($\delta_{\text{viszk}} \pm 0,35 \%$)

A kettős elegyekkel végzett vizsgálatok alapján – az alkohol bekeverés ellenére is magas viszkozitás miatt – célszerű volt változtatni a kutatási irányon így nem a nyersolaj-alkohol keverékekkel, hanem a hármas elegyekkel (nyersolaj–alkohol–gázolaj) kezdtem foglalkozni. A rendelkezésre álló, Európában kevésbé ismert és alkalmazott olajokkal folytathattam vizsgálatokat dél-afrikai partnerekkel.



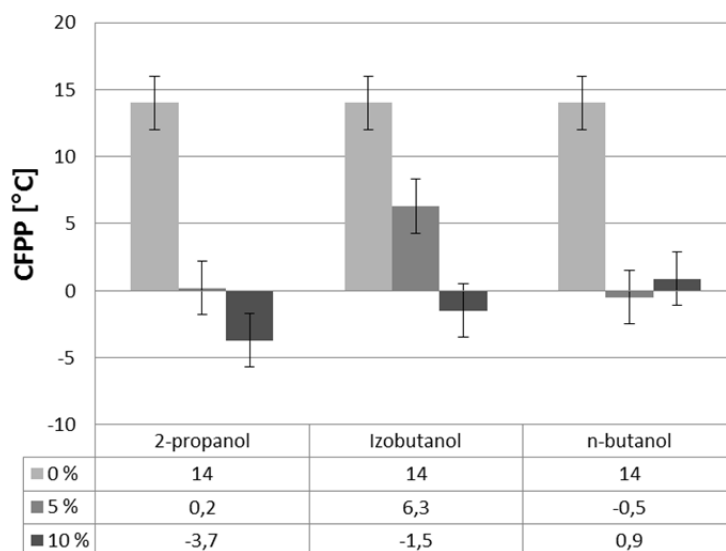
27. ábra A kettős és hármas krotanolaj (CRO) elegyek, valamint a keverőkomponensek kinematikai viszkozitása 40 °C-on [S-8] alapján ($\delta_{\text{viszk}} \pm 0,35 \%$)

Az eredményekből (27. ábra) jól megfigyelhető, hogy a 20 V/V % nyers krotanolaj – 80 V/V % gázolaj elegy esetén a viszkozitás a határértéknél nagyobb. 5 V/V % és 10 V/V % *n*-butanol bekeverésre volt szükség a határérték eléréséhez. Ez alapján a nyers repceolaj és a 2-butanol, izobutanol, valamint 1-propanol, 2-propanol alkoholok elegyeivel továbbiakban nem foglalkoztam, csupán a teljesség miatt mutatom be azokat a vizsgálatokat, amelyeket csak ezekkel a elegyekkel végeztem el (CFPP és lobbanáspont és cetánszám).

3.1.2. HIDEGSZŰRHETŐSÉGI HATÁRHŐMÉRSÉKLET VIZSGÁLATOK

A nyersolajok további jelentős hátránya, hogy alacsony hőmérsékleten elsősorban a parafin elkezd kikristályosodni. Ennek vizsgálatára a hidegszűrhetőségi határhőmérsékletet határozták meg (CFPP, EN 14214).

Minden esetben csökkent a hidegszűrhetőségi határhőmérséklet az alkohol hozzáadásával, legjelentősebben 20 V/V % izobutanol esetén, ekkor 14 °C-ról a CFPP - 1.5 °C-ra csökkent (28. ábra). Viszont az ábrából megfigyelhető, hogy az alkohol bekeverés nagysága nem volt arányos a CFPP csökkenéssel.

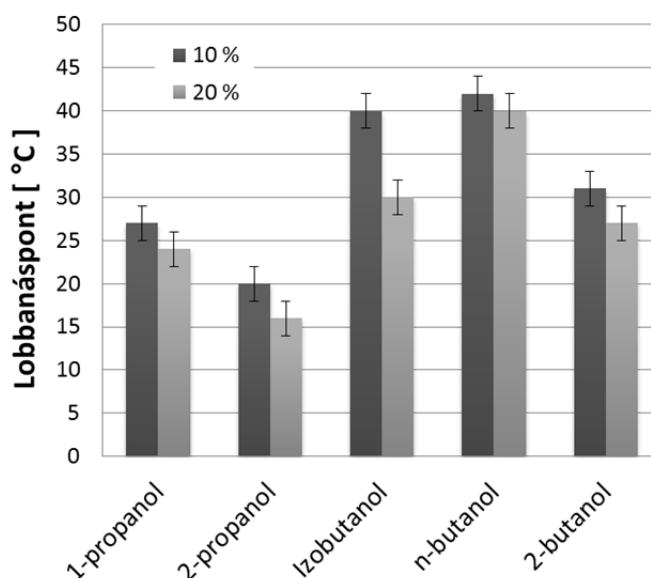


28. ábra A repceolaj és 2-propanol, izobutanol és n-butanol különböző elegyeinek hidegszűrhetőségi határhőmérsékletei (CFPP) [S-6] ($\sigma_{CFPP} = \pm 2$ °C)

3.1.3. LOBBANÁSPONT VIZSGÁLATOK

A lobbanáspont az a hőmérséklet, amelynél a tüzelőanyag egy része olyan keveréket képez, amely szikra vagy láng hatására meggyullad. Ismeretes, hogy a magas lobbanáspont nagyobb biztonságot nyújt az tüzelőanyag kezelésében és tárolásában. Amint az a 29. ábrán látható, az elegyek lobbanáspontjának hőmérséklete csökkent, ahogy az elegyben az alkohol koncentrációja nőtt. A nyers repceolaj lobbanáspontja 253 °C, ami jóval magasabb volt, mint a vizsgált alkoholokra jellemző 12 °C és 29 °C közötti lobbanáspont hőmérséklet. A vizsgált alkoholok közül a propanolok lobbanáspontja volt alacsonyabb (1-propanol esetén 15 °C, a 2-propanol esetén 11,7 °C), a butanolok lobbanáspontja magasabb, – itt jelentős eltérés nem volt tapasztalható – legnagyobb az *n*-butanol esetén 29 °C (4. táblázat). A vizsgált elegyek közül (29. ábra) a 10 V/V %-os izobutanol és 10 V/V %-os *n*-butanol keverékeknek volt a legnagyobb a lobbanáspontja, amely alacsonyabb, mint a gázolaj 53-82 °C közötti lobbanáspontja. Így az eredmények alapján megállapítható, hogy tűzveszélyes gázolajhoz képest (lobbanás pont 50-300 °C között) a vizsgált elegyek már „tűz és robbanásveszélyes”-ek (a lobbanás pont 20-50 °C között).

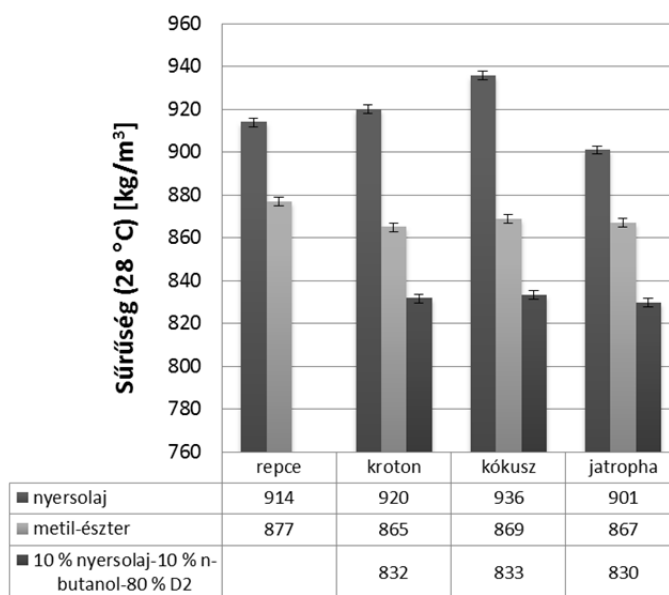
Viszont, ami fontos eredménye a vizsgálatnak, hogy feltehetőleg a bekevert alkoholok kipárologtak az elegyekből, és ez a kipárolgott alkoholgőz lobbant be [S-6]. A kipárolgás sebessége erősen függ a bekeveréstől, így nagyobb koncentráció esetén alacsonyabb lesz a lobbanáspont [S-6]. Itt érdemes megemlíteni, hogy biodízelek esetén az EN 14214 előírás szerint a lobbanáspont legalább 101 °C, amíg a gázolaj lobbanáspontja legalább 55 °C, ami jelzi, hogy a biodízelek intenzív párolgása magasabb hőmérsékleten zajlik le.



29. ábra A zárt terű lobbanáspont értékek az öt különböző vizsgált alkohol és nyers repceolaj esetén, különböző bekeverési arányokban [S-6] ($\sigma_{\text{lobbanásp.}} = \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$)

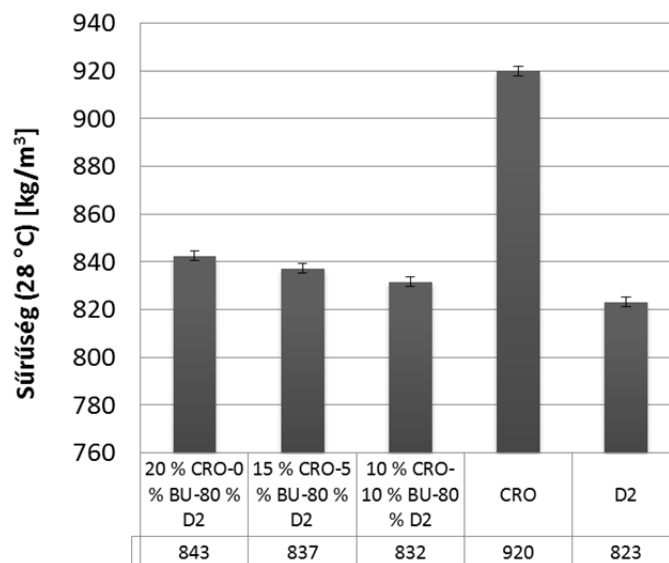
3.1.4. SŰRŰSÉG VIZSGÁLATOK

A sűrűség a porlasztás és a tüzelőanyag-fogyasztás fontos paramétere. A vizsgált nyersolajok esetén a legnagyobb sűrűsége a kókuszolajnak, legkisebb a jatrophaolajnak volt. Az észterezés hatására a négy olaj sűrűsége jelentősen csökkent, és megfigyelhető, hogy a sűrűségek különbsége is nagymértékben közeledett egymáshoz. (30. ábra). A 28 °C-on történő méréseket a kókuszolaj alacsony dermedési hőmérséklete indokolta.



30. ábra A sűrűség 28°C-on a nyers növényi olajok (repce, krotón, kókusz, jatropha), azokból készült metil-észterek és nyers növényi – gázolaj – n-butanol elegy esetén [S-6, S-7 és S-8] ($\sigma_{\text{sűrűség}} = \pm 2 \text{ kg/m}^3$)

A megvizsgált hármas elegyek esetén a sűrűség jelentősen csökkent a nyersolajhoz képest a referencia gázolaj 823 kg/m³ és az n-butanol 812 kg/m³ sűrűsége miatt, legkisebb a sűrűsége a legtöbb n-butanolt tartalmazó elegy esetén volt (31. ábra).



31. ábra A kettős és hármas krotanolaj (CRO) elegyek, valamint a keverőkomponensek sűrűségei [S-8]
($\sigma_{\text{sűrűség}} = \pm 2 \text{ kg/m}^3$)

3.1.5. FÜTŐÉRTÉK VIZSGÁLATOK

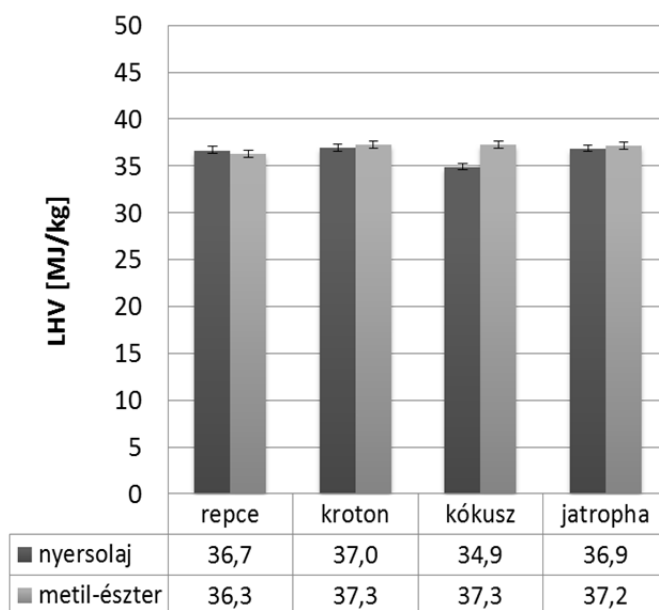
A fűtőérték (LHV) szintén fontos paraméter a tüzelőanyag-fogyasztás és a hőbevitel szempontjából. Ha csökken a fűtőérték, a fogyasztás – állandó hatásfokot feltételezve – megnő. A megnövekvő fogyasztás hatására a dózis növekszik, ami kis terhelés esetén javíthatja a keveredési folyamatot, viszont nagy terhelés esetén ronthatja az égési folyamatot. Továbbá ha a fűtőérték az oxigéntartalom miatt csökken, az is javíthatja az égési folyamatot. Az égéshő (HHV) meghatározása az akkori FVM Mezőgazdasági Gépesítési Intézetének tulajdonában levő, akkreditált IKA C2000 basic automata kaloriméterrel történt, az égéshőből a fűtőérték (LHV) meghatározására a [83] szerinti az 1. egyenlet felhasználásával történt:

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 0,2122 \cdot H \text{ [m/m \%]}$$

1. egyenlet

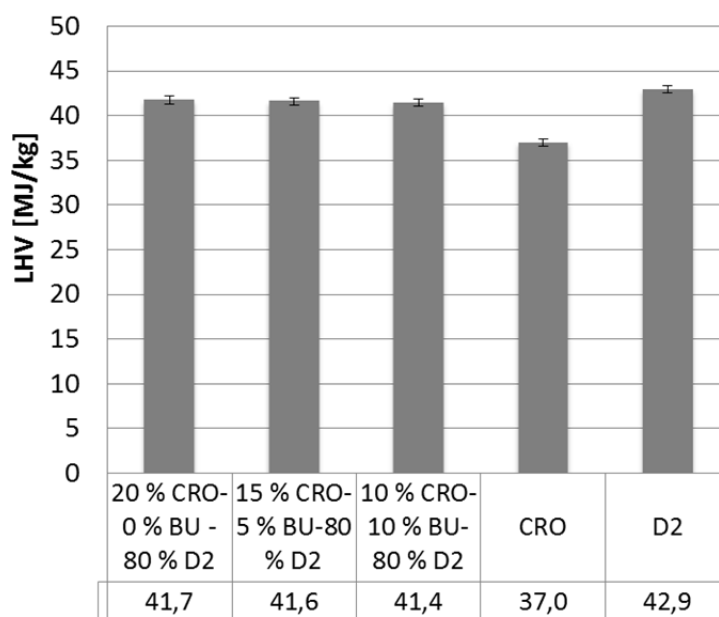
A növényi olajok fűtőértéke azok zsírsav összetételétől függ. Az értékét növeli, ha az egyes zsírsavak hossza nő és ha az olajban az oxigén mennyisége csökken, ugyanakkor csökken a kettős kötések számának növekedésével [84]. A vizsgált nyersolajok esetén (32. ábra) a legalacsonyabb a kókuszolaj fűtőértéke, ez 81 %-a a gázolajénak, a többi olaj fűtőértéke hasonló, közel 86 %-a a gázolajénak.

A biodízelek esetén eltérő eredményeket lehetett tapasztalni. A legalacsonyabb a repce metil-észter fűtőértéke volt, ez 85%-a a gázolajénak, a három további biodízel esetén ugyanez az érték közel 87%-a a gázolaj fűtőértékének. Ezeknél a tüzelőanyagoknál is a fűtőérték az észterezés során kialakuló zsírsav-összetételére vezethető vissza [24].



32. ábra A fűtőérték (LHV) a vizsgált négy nyersolaj és az ezekből készült biodízelek esetén [S-6 és S-7] ($\delta_{LHV} \pm 0,88 \%$)

A hármas elegyek esetén (33. ábra) a fűtőérték jelentősen nem változott a bekeverés hatására, az *n*-butanol tartalom növelésével a fűtőérték kismértékben csökkent a gázolaj fűtőértékének 97 %-áról (20 % CRO-0 % BU-80 % D2) 96 %-ra 10 V/V % *n*-butanol bekeverés hatására (10 % CRO-10 % BU-80 % D2).

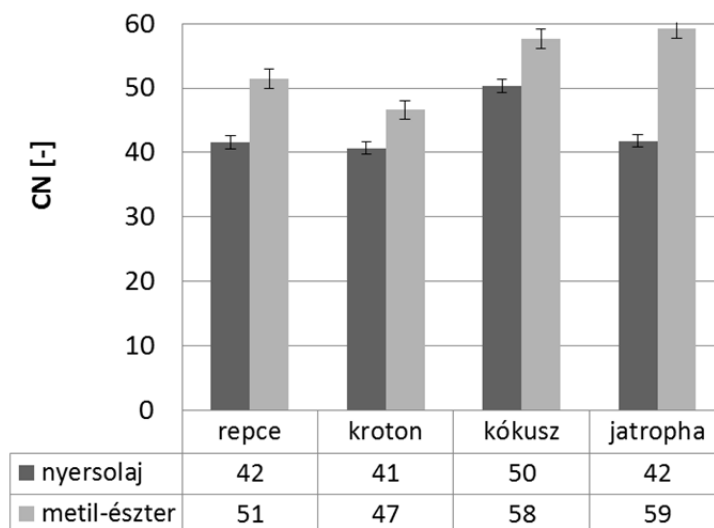


33. ábra A kettes és hármas krotonolaj (CRO) elegyek, valamint a keverőkomponensek fűtőértékei (LHV) [S-7 és S-8] ($\delta_{LHV} \pm 0,88 \%$)

3.1.6.CETÁNSZÁM VIZSGÁLATOK

A cetánszám (CN) a dízelmotor tüzelőanyagok égési tulajdonságainak egyik fő mutatója, a tüzelőanyagok gyulladási idejét (késedelmét) írja le, azaz azt az időtartamot, ami a befecskendezés kezdete és az égési folyamat kezdete között telik

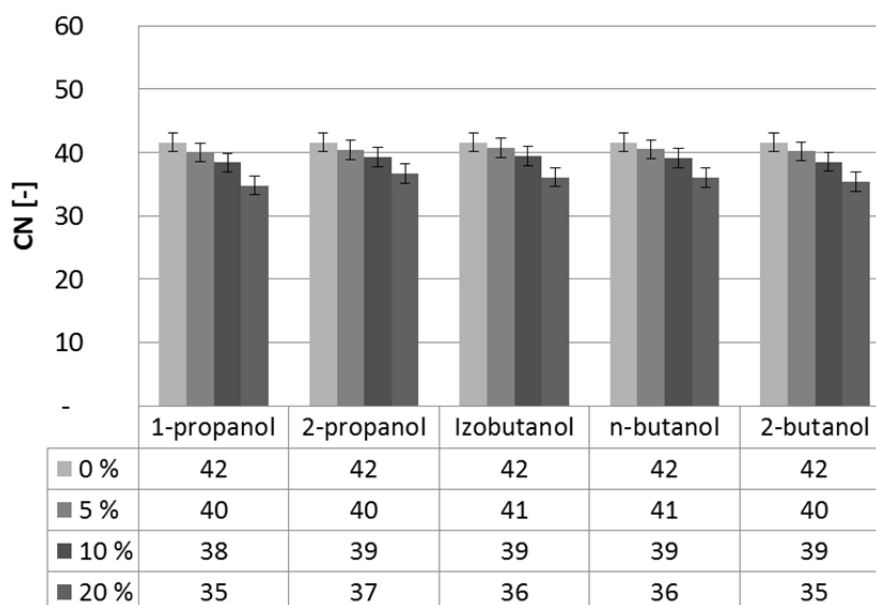
el. Minél rövidebb ez a gyulladási idő, annál nagyobb a CN. A magas CN esetén jobb a hidegindítási tulajdonságok és alacsonyabb égési zaj keletkezik, mivel az előkevert égésfolyamat során kevesebb az elégtő tüzelőanyag.



34. ábra Nyers növényi olajok (repce, kroton, kókusz, jatropha) és az azokból készült metil-észterek cetánszámai [S-6 és S-7] ($\sigma_{\text{cetánszám}} = \pm 1,5$)

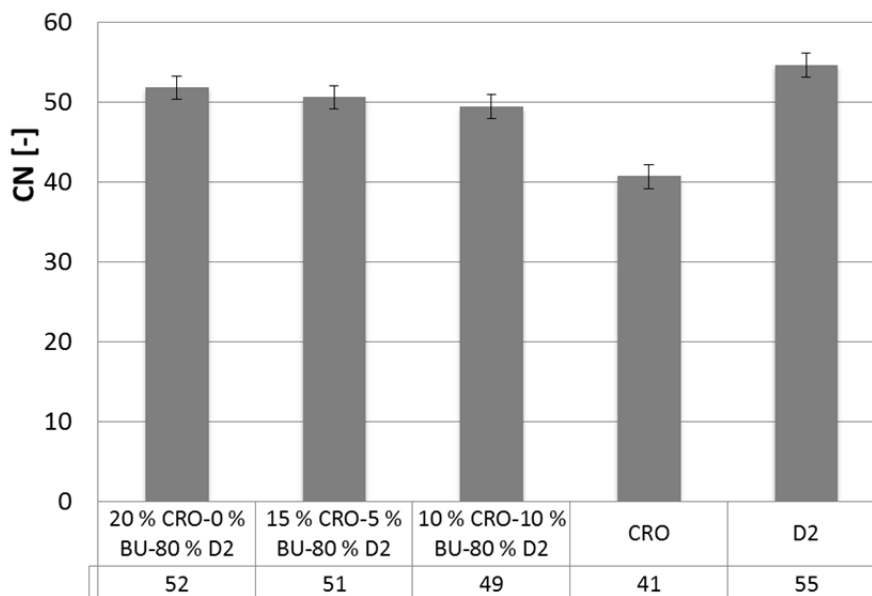
A vizsgált nyersolajok esetén (34. ábra) a legalacsonyabb a nyers jatrophaolaj cetánszáma, a kroton- és repceolaj esetén valamivel magasabb volt a cetánszám, de az eltérés nem volt jelentős, viszont a kókuszolaj esetén igen magas a cetánszám, megközelíti a gázolaj és a biodízel szabványok által előírt (EN 590:1999 és EN 14214) >51 értéket.

A biodízelek esetén az észterezés hatására a cetánszám jelentősen növekedett, mivel megváltozik a zsírsav összetétel és többségbe kerülnek magas cetánszámú komponensek [85]. Továbbra is a kókuszolaj metil-észternek a legnagyobb a cetánszáma és a krotonolaj metil-észternek a legkisebb, ez már nem is teljesítette a biodízel szabványt.



35. ábra A cetánszámok alakulása az öt különböző vizsgált alkohol és nyers repceolaj esetén különböző bekeverési arányokban [S-6] ($\sigma_{\text{cetánszám}} = \pm 1,5$)

Az öt különböző vizsgált alkohol esetén különböző bekeverési arányok mellett (35. ábra) megfigyelhető, hogy a nyers repceolaj alacsony cetszáma (42 -) még tovább csökkent. Legnagyobb a csökkenés 1-propanol bekeverésével, míg a legkisebb csökkenés 2-propanol esetén, az eltérés az alkohol bekeverések között nem volt jelentős.



36. ábra A kettes és hármas krotonolaj (CRO) elegyek, valamint a keverőkomponensek cetánszámai [S-7 és S-8] ($\sigma_{\text{cetánszám}} = \pm 1,5$)

A hármas elegyek esetén (36. ábra) a referencia gázolaj nagy cetánszáma és a krotonolaj és az *n*-butanol kis cetánszámai miatt bekeverés esetén az elegyek cetánszámai kismértékben csökkentek. A 20 V/V % krotonolaj bekeverés esetén a gázolaj és a biodízel szabványoknak megfelelően 51 felett maradt, továbbá az *n*-butanolt tartalmazó elegyek esetén jelentősen nem tért el attól. Megjegyzendő, hogy az elegyek esetén használt gázolaj cetánszáma magas volt.

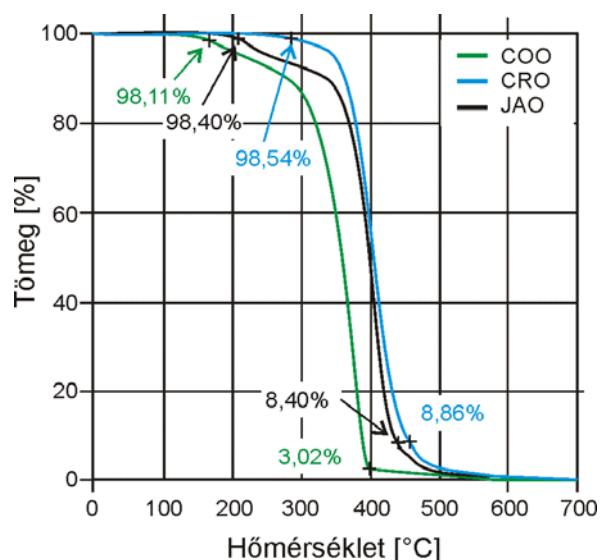
3.1.7. TG ÉS DTG VIZSGÁLATOK

A párolgási tulajdonságok meghatározásához TG (termogravimetriás) elemzések [S-7] egy TG 2050 CE készülékkel kerültek elvégzésre a Szervetlen és Analitikai Kémia Tanszék (BME, VBK) munkatársaival együttműködve. A 4-6 mg mintát egy nyitott platina mérőedénybe helyeztük, a vizsgálatokat nitrogéngáz környezetben hajtottuk végre 10 cm³/perc térfogatáram és 10 °C/perc hőmérsékletváltozási sebesség mellett, 30-700 °C hőmérséklet-tartományban. A tömegváltozást és a hőmérsékletet a mérésvezérlő PC rögzítette és ennek segítségével került meghatározásra a tömegváltozás (TG) és ebből annak sebessége, azaz a derivatív termogravimetria (DTG).

A nyersolajok közül a nyers krotonolaj párolgása 190 °C-on kezdődött, 286 °C-ig tartott és 1,46 % tömegcsökkenést eredményezett. Az elsődleges bomlás 447 °C-ig tartott, a maradék tömeg 8,65 % volt, a pirolízis termékek másodlagos bomlása kb. 500 °C-ig tartott, a lepárlási maradék tömege 0,15 % volt.

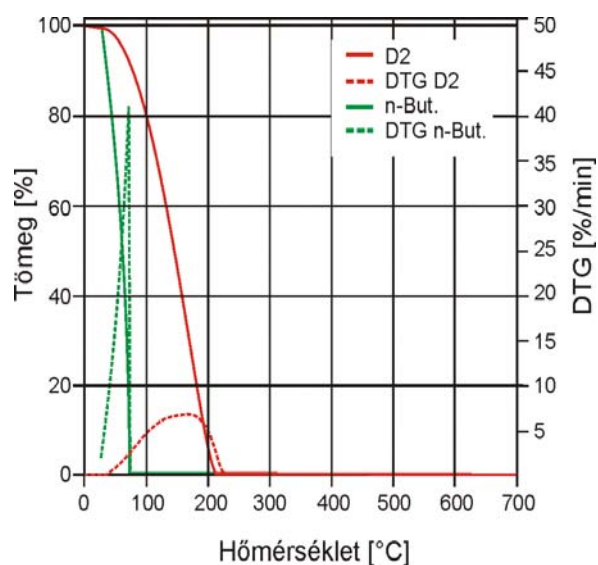
A jatrophaolaj párolgása 140 °C-on kezdődött, 209 °C-ig tartott és 1,6 % tömegcsökkenést eredményezett. Az elsődleges bomlás 442 °C-ig tartott, a maradék tömeg 8,4 % volt, a pirolízis termékek másodlagos bomlása kb. 490 °C-ig tartott, a lepárlási maradék tömege 0,36 % volt.

A kókuszolaj párolgása 130 °C-on kezdődött, 168 °C-ig tartott és 1,9 % tömegcsökkenést eredményezett. Az elsődleges bomlás 404 °C-ig tartott, a maradék tömeg 3,0 % volt, a pirolízis termékek másodlagos bomlása kb. 500 °C-ig tartott, a lepárlási maradék tömege 0,15 % volt. (37. ábra).



37. ábra A krotón-, a jatropha- és kókusz- (CRO, COO, JAO) olajok TG (termogravimetriás) eredményei [S-7]

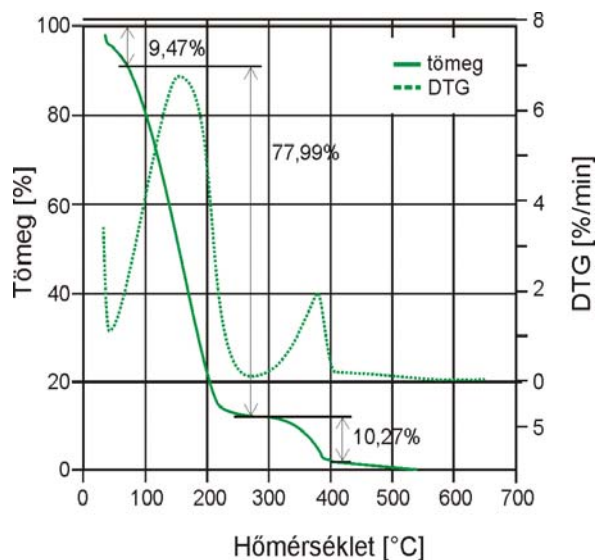
A gázolaj (D2) közel 5 % tömegvesztést szenvedett 59 °C-ig, ettől a hőmérséklettől gyors tömegvesztés volt megfigyelhető 150 °C-ig, majd lelassult a tömegvesztés, 210 °C-on a minta fennmaradó tömege 5 % volt (38. ábra). Az *n*-butanol 30 °C és 60 °C között párolgott el.



38. ábra A gázolaj (D2) és az *n*-butanol (*n*-But) TG (termogravimetriás) és DTG (derivatív termogravimetria) eredményei [S-7] alapján

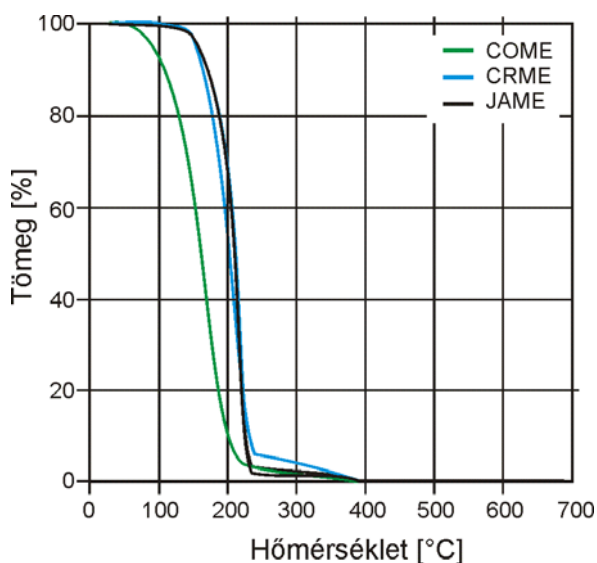
A hármas elegyek közül a 10 % CRO-10 % BU-80 % D2 vizsgálatát mutatom be. Jól megfigyelhető, hogy a minta tömegcsökkenésének három fő szakaszát lehet

megkülönböztetni. A tömegcsökkenés első szakasza, amely szinte azonnal megkezdődött és 59 °C-ig tartott 9,5 % tömegvesztéssel. Ezt az *n*-butanol elpárolgása okozhatta (lsd. [14]). A második fázisban a legnagyobb a tömegvesztés. Az elsődleges bomlás és a további mintapárolgás 260 °C-ig tartott és 78 %-os tömegvesztést eredményezett, ez feltételezhetően a gázolaj kipárolgása. Egy harmadik kis tömegvesztést észlelhettünk, ez a pirolízis termékek másodlagos bomlása az elsődleges bomlási fázisból, valamint a krotonolaj párologása és bomlása, 260 °C-tól 400 °C-ig, 10,3 % tömegvesztéssel. Ennek az elegynek a maradék mennyisége 700 °C-on 0,46 % volt (39. ábra).



39. ábra A 10 % CRO- 10 % BU-80 % D2 hármass elegy olajok TG (termogravimetriás) és DTG (derivatív termogravimetria) eredményei [S-7]

Az összehasonlítás érdekében bemutatom a három metil-észter TG eredményeit (40. ábra). A kroton metil-észter (CRME) minta párologása 90 °C és 150 °C között kezdődött, ami 2,8 % tömegvesztést eredményezett. A minta elsődleges bomlása, amely 150 °C és 230 °C között zajlott, 91,5 % tömegvesztésnek felelt meg. A pirolízis termékek másodlagos bomlása 230 °C és 375 °C között zajlott le, a tömegvesztés 4,3 %, maradék mennyisége 700 °C-on 0,24 % volt.



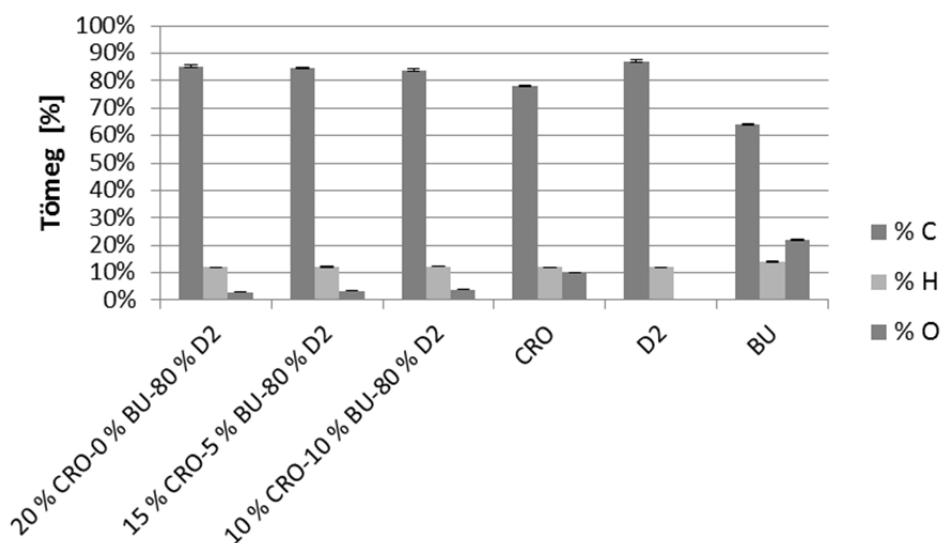
40. ábra A kroton, a jatropha és kókusz metil-észterek (CRME, COME, and JAME) TG (termogravimetriás) eredményei [S-7]

A kókusz metil-észter (COME) 125 °C és 140 °C között kezdődött, ami 4,2 % tömegvesztést eredményezett, viszont jelentős tömegvesztés volt megfigyelhető a minta elsődleges bomlása során 140 °C és 210 °C között, amely 91,3 % tömegvesztést eredményezett. Egy másik kismértékű tömegcsökkenés volt megfigyelhető 210 °C és 375 °C között, ami az elsődleges bomlási fázisból származó pirolízis termékek másodlagos bomlása, ennek tömegvesztése 3,7 %. A maradék mennyiség 630 °C-on ~0 % volt.

A jatropha metil-észter (JAME) minta párolgása 90 °C és 150 °C között kezdődött 3,3 % tömegvesztéssel. A fő tömegvesztés 150 °C és 227 °C között zajlott le, ez a minta elsődleges bomlása, ami 94 % tömegvesztésnek felelt meg. A pirolízis termékek elsődleges bomlási fázisából származó másodlagos bomlás 227 °C-tól 350 °C-ig volt tapasztalható, a tömegvesztés 2,1 %. A maradék mennyisége 700 °C-on ~0 % volt.

3.1.8. ELEGYEK ÖSSZETÉTELE

Az égési folyamatok vizsgálatához fontos ismerni az elegyek elemi összetételét, erre a célra elemi analízist készítettünk. A keverő komponensek közül az *n*-butanol oxigéntartalma a legmagasabb és ezt követi a nyers krotonolaj. Ez alapján a legtöbb alkoholt tartalmazó (10 % CRO-10 % BU-80 % D2) hármas elegy tartalmazta a legtöbb oxigént, 3,9 m/m %, míg a (20 % CRO-0 % BU-80 % D2) a legkevesebb oxigén tartalom 2,8 m/m % [S-7]. Az eredmények alapján a *n*-butanol bekeverés javítani fogja az égési folyamatot.



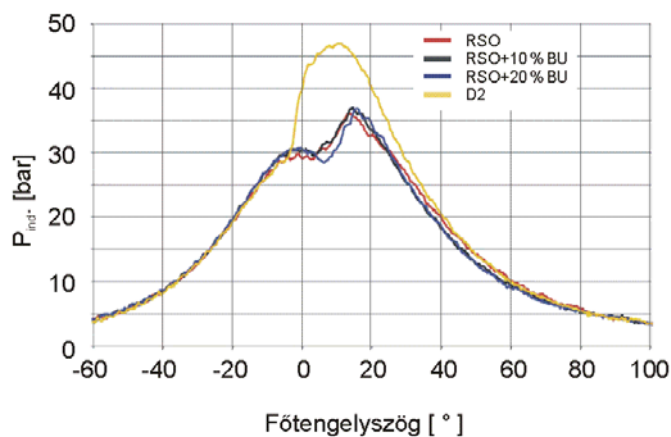
41. ábra Három különböző kettes és hármas krotonolaj elegy, valamint a keverőkomponensek C, H és O tartalma [S-7 és S-8] ($\delta_{C, H, O} \pm 0,5 \%$)

3.2. MOTOROS VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI

A felhasználás szempontjából az elegyek előző fejezetben bemutatott paramétereinek hatásvizsgálatára motoros méréseket végeztem, mind kettős elegyek (nyers repceolaj – magasabb szénatom számú alkoholok), mind hármas elegyek (nyers repceolaj – *n*-butanol – gázolaj) esetén.

3.2.1. A KETTŐS ELEGYEK MOTOROS VIZSGÁLATAI

A kettős elegyek motoros összehasonlító vizsgálatait a CFR F-5-ös cetánszám mérőmotor segítségével végeztük szerzőtársaimmal [S-3, S-4 és S-5]. A mérőberendezés a vonatkozó mellékletben (M-7) került bemutatásra. A vizsgálómotort a gázolaj (D2) cetánszámának meghatározásához szükséges paraméterekre állítottuk be és ezekkel üzemeltettük, tehát a kompresszióviszony úgy volt beállítva, hogy a gázolaj a mérőberendezés kijelzője szerinti felső holtpontban gyulladjon, az előbefecskendezés 13 főtengelyfok, a fogyasztás 13 ml/perc legyen, elegyek esetén egyedül a fogyasztást állítottuk utána úgy, hogy 13 ml/perc maradjon. A minták mérése során az eltérő tüzelőanyag elegyek – elsősorban az viszkozítások és gyulladási idők – eltérő égési folyamatot eredményeztek. A különböző elegyek esetén, megjegyzem, hogy ennél a motornál a porlasztási kép hatása nem jelentős. Az elkészült vizsgálatok közül csak a nyers repceolaj és az *n*-butanol elegy eredményeket mutatom be annak érzékeltetésére, hogy a lényegesen alacsonyabb cetánszám esetén az indikált nyomás hogyan változott (42. ábra).



42. ábra Az indikált nyomás gázolaj, nyers repceolaj (RSO) és 10 V/V % és 20 V/V % *n*-butanol bekeverés esetén [S-5] ($\delta_{P_{ind}}$, $\pm 3,59$ %)

Az eredményekből jól látható, hogy az alacsony cetánszám hatására a nyers repceolaj esetén az égési folyamat lényegesen később kezdődött, mint a gázolaj esetén. Az alkohol bekeverés hatására hiába csökkent jelentősen a viszkozitás – de el nem érve pl. az EN 14214 határértéket – az alacsony cetánszám miatt az *n*-butanol bekeverése esetén tovább nőtt a gyulladási idő. Ezen mérési eredményekről és azok további értékeléséről több közös publikáció készült pl. [S-3, S-4 és S-5], a szerzőtársam ezeknek a vizsgálatok eredményeit felhasználta a disszertációjában, így ezzel tovább nem foglalkozom.

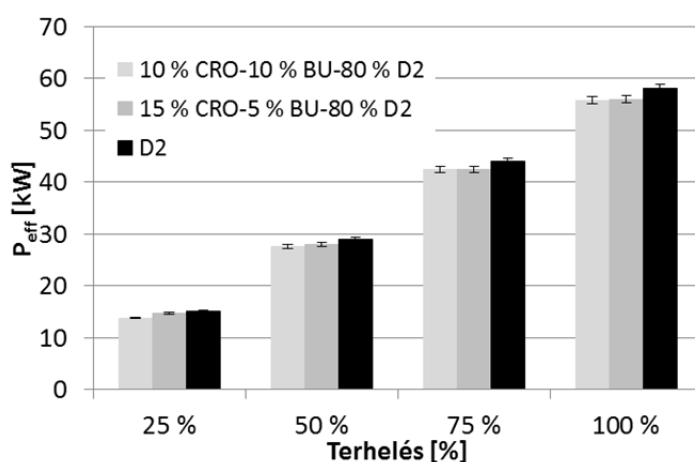
3.2.2. A HÁRMAS ELEGYEK MOTOROS VIZSGÁLATAI

A hármas elegyek motoros vizsgálatait a VW 1-Z, 1.9 L, TDI motoron végeztük (M-7), a mérőrendszer felépítése és a felhasznált eszközök szintén a vonatkozó mellékletben kerültek bemutatásra. A vizsgálatokat 3000 1/perc fordulatszámon végeztük, mivel ezen a fordulatszámon már megfelelően szabályozott töltőnyomás alakult ki, valamint a hármas elegyek tervezett felhasználása inkább állandó fordulatszámú üzemi pontokban – pl. generátor vagy szivattyú hajtása – várható. Az értekezés során két tüzelőanyag eleggyel foglalkoztam, ezek a következők: 15 V/V % nyers krotonolaj,

5 V/V % *n*-butanol és 80V/V % gázolaj (15 % CRO-5 % BU-80 % D2) és 10 V/V % nyers krotonolaj, 10 V/V % *n*-butanol és 80V/V % gázolaj (10 % CRO-10 % BU-80 % D2) elegyek. Minden tüzelőanyagnál üzemmeleg motor esetén meghatározásra került a maximális teljesítmény (100 %), majd ennek a teljesítménynek állítottam be a 75 %, 50 %, és 25 %-át.

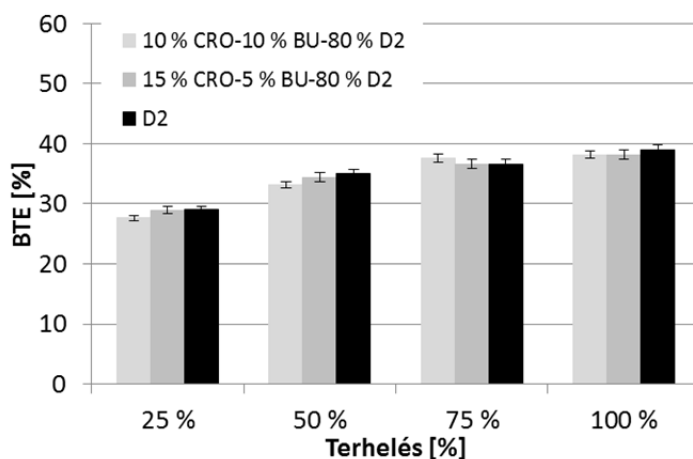
3.2.2.1. ÜZEMI PARAMÉTEREK ÉRTÉKELÉSE

A hármas elegyek esetén a teljesítmény csökkenése teljes terhelésen a gázolajhoz képest kevesebb, mint 4 % volt (43. ábra). Ennek oka, hogy az elegyek fűtőértéke 97 %-a a gázolaj fűtőértékének, viszont pl. 15 % CRO-5 % Bu-20 % D2 sűrűsége 1,7 %-kal nagyobb, viszkozitása 1,9-szerese a vizsgált gázolaj viszkozitásának, miközben a cetánszáma mindössze 7,3 %-kal (-4 [-]) kisebb. Azaz a vizsgált *n*-butanolt tartalmazó elegyek esetén a teljesítmény csökkenése közel megegyezett a fűtőérték csökkenésével.



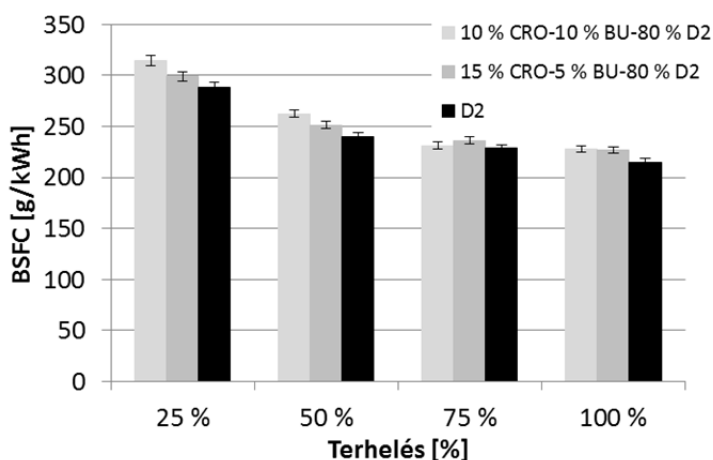
43. ábra A hármas elegyek és gázolaj esetén mért teljesítmény különböző terheléseken és 3000 1/perc fordulatszámon [S-9] ($\delta_{P_{eff}}$, $\pm 1,38$ %)

Az effektív hatásfok (BTE, 44. ábra) a terhelés csökkentésével romlott, a 75 %-os terheléstől eltekintve minden esetben a referencia gázolaj (D2) esetén volt a legnagyobb és az alkohol bekeverés növelésével csökkent. Így megállapítható, hogy az effektív hatásfokok az egyes terheléseken – különösen nagyterhelésen - nem tértek el jelentősen, közel a mérési bizonytalansággal megegyezők. Az alkoholok bekeverése esetén csökkenő hatásfok okaira az égési folyamat vizsgálata során kapunk részben magyarázatot. A 75 %-os terhelés esetén jelentkezett eltérésekkel okaival a 4.3.1. fejezetben foglalkozom részletesen.



44. ábra A hármas elegyek effektív hatásfokai (BTE) 3000 1/perc fordulatszámon különböző terhelések esetén [S-8, S-9] ($\delta_{BTE}, \pm 1,65\%$)

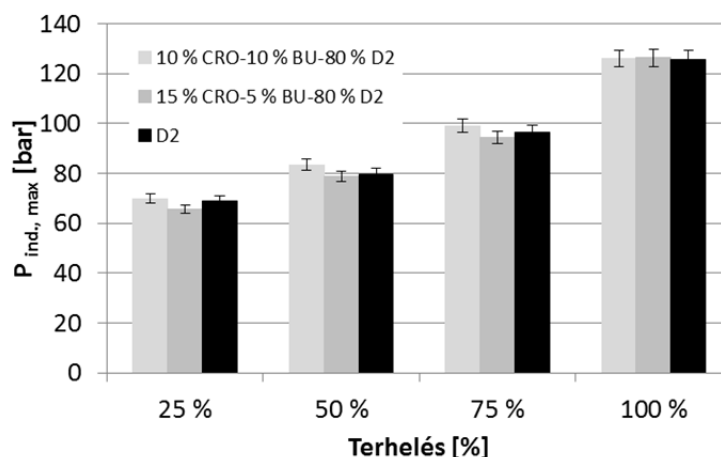
A fajlagostüzelőanyag-fogyasztással kapcsolatban (BSFC) megállapítható, hogy az a terhelés növelésével az elméleti megfontolásoknak megfelelően nőtt az alkohol bekeverésel. A 100 %-os terhelés esetén az effektív hatásfokkal és a hármas elegyek fűtőértékeivel kapcsolatban (3.1.5) leírtak szerint alakul, azaz a legnagyobb a fajlagos fogyasztás (BSFC) a 10V /V % krotonolaj- 10 V/V % *n*-butanol - 80V/V % gázolaj elegy esetén, majd az 5 V/V % *n*-butanol, végül a referencia gázolaj következik, ahogyan csökkennek az elegyek fűtőértékei. Ez a trend minden esetben megfigyelhető, kivéve a 75 % terhelésű esetet, ennek okával – mint már említettem – részletesen a 4.3.1. fejezetben foglalkozom.



45. ábra A hármas elegyek fajlagos fogyasztása (BSFC) 3000 1/perc fordulatszámon különböző terhelések esetén [S-8, S-9] ($\delta_{BSFC}, \pm 1,40\%$)

3.2.2.2. ÉGÉSI FOLYAMATOK ÁLTALÁNOS ÉRTÉKELÉSE

Az égési folyamatok értékelése során a folyamat vizsgálatát a disszertációmban két paraméter összehasonlításával végeztem, egyik az égéstérben kialakuló nyomás (indikátordiagram), másik a hasznos hőváltozás (HRR) összehasonlító értékelése. Itt is érdemes tisztázni, hogy a hasznos hőváltozás alatt a közeg (levegő, tüzelőanyag-levegő keverék és égéstermék) által felvett vagy leadott hő változását értem (lásd. M-3).



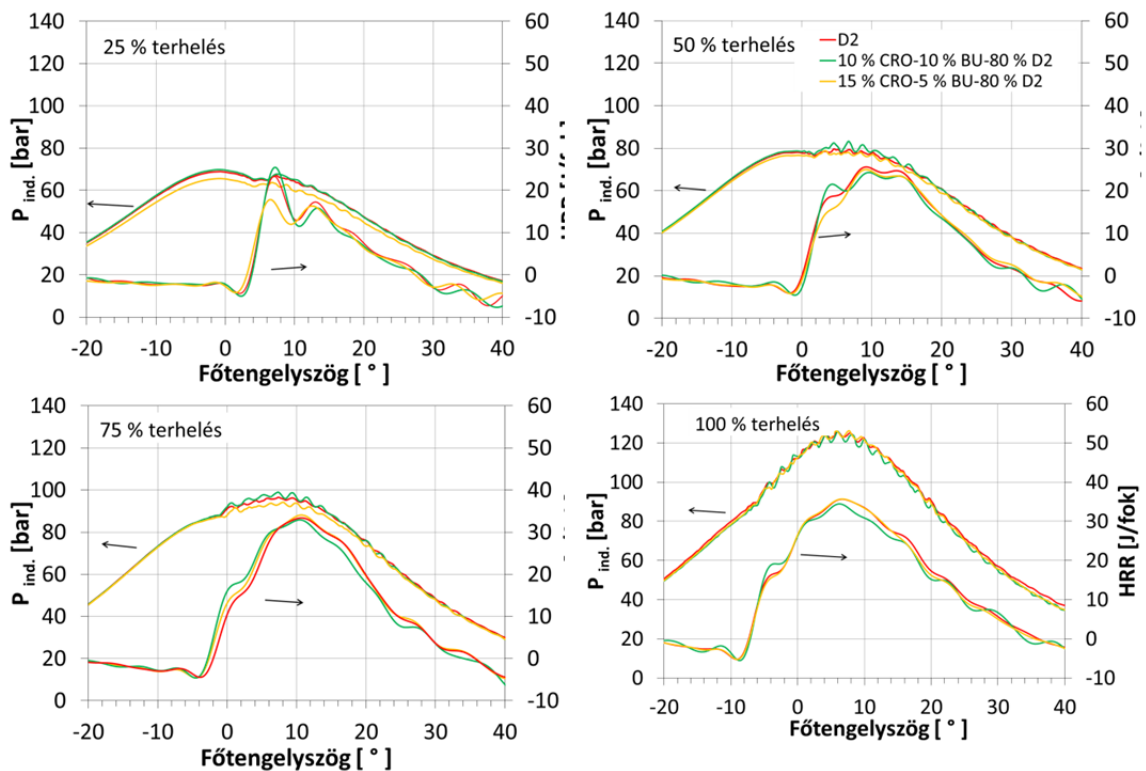
46. ábra Az indikátordiagramok maximum értékei 3000 1/perc fordulatszámon különböző terhelések és tüzelőanyag-elegyek esetén [S-9] (δ_{Pi} , $\pm 2,66$ %)

Ha csak az az égéstérnyomás maximális értékeit vizsgáljuk (46. ábra), megállapítható, hogy az elméleti megfontolásoknak megfelelően a terhelés növelésével a maximális nyomás növekedett. A hármas elegyek esetén, teljes terhelésen a nyomásmaximum kismértékben növekedett, ennek mértéke kisebb, mint a mérés hibája (a növekmény $< 0,5$ %). Részterhelések esetén a 10 % CRO-10 % Bu-20 % D2 elegy esetén volt a legnagyobb az égési csúcsnyomás. Azonban ennek értékelésénél fontos, hogy megvizsgáljuk a fő munkafolyamat lefolyását (47. ábra), azaz az indikátor diagramokat és az abból származó hasznos hő változást (HRR), ennek meghatározása az M-3 mellékletben található.

Megvizsgálva a fő munkafolyamatot, a HRR diagramokon (47. ábra) megfigyelhető, hogy az alkohol bekeveréssel kismértékben nőtt a gyulladási idő. Ezt elsősorban az alkohol bekeverés hatására csökkenő cetánszám indokolja, kivéve a 75 %-os terhelést, ahol feltehetőleg a növekvő dózis miatt a motorvezérlő elektronika (ECM vagy EDC) csökkentette az előbefecskendezést (lásd 4.3.1.).

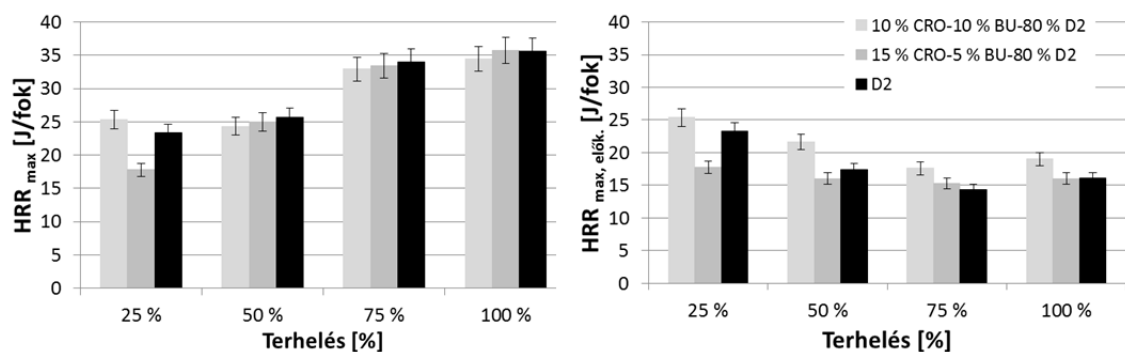
A nyomásmaximumok értékét a nyomáslengés intenzitása határozta meg, eltekintve a 25 %-os terheléstől, ahol az égés a felső holtpont után kezdődött. A kis dózis és a kis előbefecskendezés miatt (lásd később a 75. ábrán) „kétpúpú” nyomáslefutás alakult ki, így itt az égésnek nem volt hatása a nyomásmaximum értékére.

Az 50 %-os, a 75 %-os és a 100 %-os terhelés esetén jól megfigyelhető, hogy a hagyományos dízel égéstől eltérően az előkevert és a diffúziós égési folyamat nem volt jól elválasztható egymástól, azaz ellenőrzött égés zajlott le. Ennek oka elsősorban az 1-Z motorban alkalmazott két rúgós befecskendező, valamint a nagy kompresszióviszony (lásd. 4.3.). Viszont mind a három tüzelőanyag esetén az égési szakasz elején volt egy nagyobb intenzitású égési szakasz, amelyet, mint előkevert égést definiáltam. Szintén ezekben az esetekben látható, hogy az intenzívebb előkevert égés hatására kialakult egy nagyfrekvenciás nyomáslengés, amely a legnagyobb *n*-butanol tartalmú elegy esetén volt a legintenzívebb.



47. ábra A hármas elegyek és a referencia gázolaj (D2) égéstérnyomása és a hasznos hő változása (HRR) a főtengelyszög függvényében különböző elegyek és terhelések esetén [S-9] (δ_{P_i} , $\pm 2,66$ %, δ_{HRR} , $\pm 5,49$ %)

A 10 V/V % krotonolaj - 10 V/V % *n*-butanol - 80 V/V % gázolaj elegy esetén jól megfigyelhető, hogy a kialakuló előkevert égés során a hasznos hő változás a maximum értékek minden esetben megnövekedetek, ez feltehetőleg az *n*-butanol kiegészére vezethető vissza. Az intenzívebb előégés hatására a – diffúziós égési szakaszban található – HRR maximum értékek csökkentek (48. ábra), kivéve a 25%-os terhelést, mivel ott az előkevert égésnél volt a maximum.



48. ábra A hasznos hőváltozás maximum és az előkevert szakasz maximum értékei 3000 1/perc fordulatszámon különböző terhelések és tüzelőanyag-elegyek esetén [S-8, S-9] (δ_{HRR} , $\pm 5,49$ %)

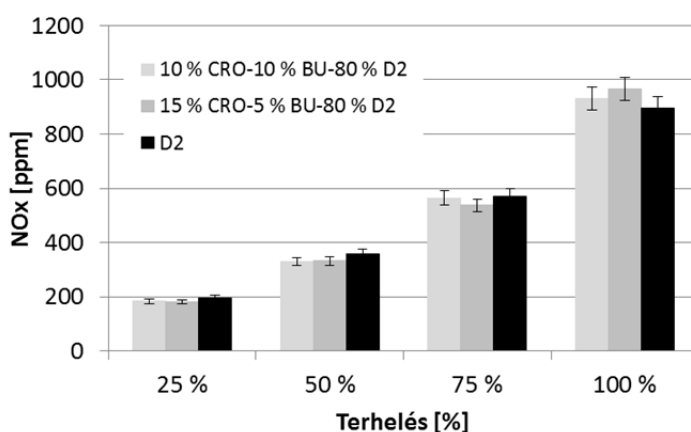
Továbbá, szintén a 25%-os terhelésnél látható, hogy a nyomásmaximum a felső holtpontra volt, a 15 % CRO-5 % BU-80 % D2 elegynél a nyomásmaximum alacsonyabb, feltöltés hiánya miatt.

Teljes terhelés esetén *n*-butanol bekeverés hatására az előkevert szakasz hasznos hőváltozásának növekedése a felső holtpontra elkerült, így az ennek hatására kialakuló nyomásnövekedés a kompressziómunkát növelte, ez kismértékben rontotta az effektív hatásfokot. Részterhelések esetén az első égési szakasz maximuma a felső holtpontra

környékén volt, de már jellemzően azon túl, így az a kompressziómunkát már nem növelte.

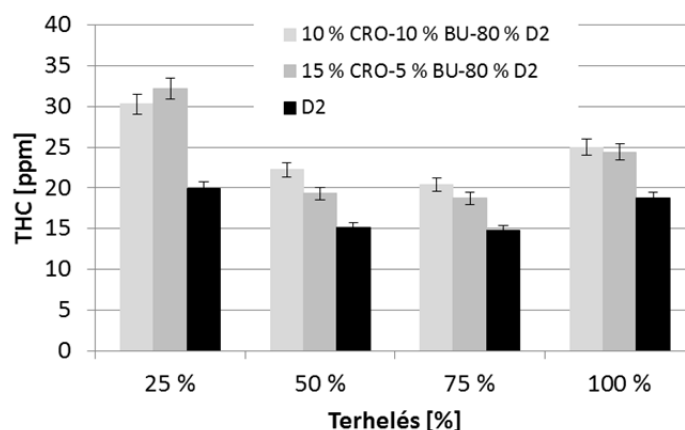
3.2.2.3. KÁROSANYAG-KIBOCSÁTÁSOK ÉRTÉKELÉSE HÁRMAS ELEGYEK ESETÉN

A nitrogénoxid (NOx) kibocsátás esetén jól megfigyelhető, hogy az a terheléssel nőtt, ez a növekvő átlaghőmérséklettel és az adott motor esetén a felső holtpont elé kerülő égéskezdettel [S-2] indokolható. Az alkohol bekeverés arányának növelésével a kibocsátás részterhelésen 6-8 %-kal csökkent, ezt az alkohol nagyobb párolgáshője és az alacsonyabb láng hőmérséklet okozhatja, amelyet részben kompenzált a növekvő előkevert égési szakasz intenzívebb égés. Teljes terhelésen a hármass elegyek esetén 4-8%-kal nőtt a kibocsátás, itt feltehetőleg a felső holtpont elé került intenzívebb előkevert égés miatt kialakuló nagyobb hőmérséklet hatásai jelentősebbek mint a párolgás nagyobb hőelvonása és az alacsonyabb láng hőmérséklet, így kismértékben növekedett a NOx-kibocsátás.



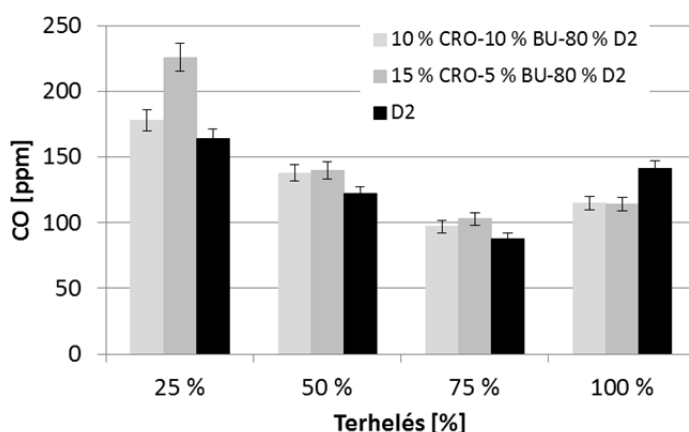
49. ábra A hármass elegyek és a referencia gázolaj (D2) nitrogénoxid (NOx) kibocsátása 3000 1/perc fordulatszámon, különböző terhelések esetén [S-9] ($\delta_{NOx} \pm 4,42$ %)

Az el nem égett szénhidrogén – (THC) kibocsátás a terheléssel csökkent 75 % terhelésig, ez elsősorban az égési folyamat hőmérsékletének növekedésével, a nagyobb áramlási sebességgel és az ennek hatására javuló keverékképzéssel magyarázható. Teljes terhelésen a csökkenő légfelesleg miatt kismértékben ismét növekedett a THC-kibocsátás. Az alkohol bekeverés hatására minden esetben nőtt a THC-kibocsátás, amely megfelel az irodalmi adatoknak pl. [86]. Az alkohol kevésbé tudott elégni, mivel hamarabb került gőzhalmazállapotba és ezért egy része olyan szegény keveréket hozott létre, amely nem tudott tökéletesen elégni, továbbá a nagyobb párolgáshő is növelhette a THC-kibocsátást.



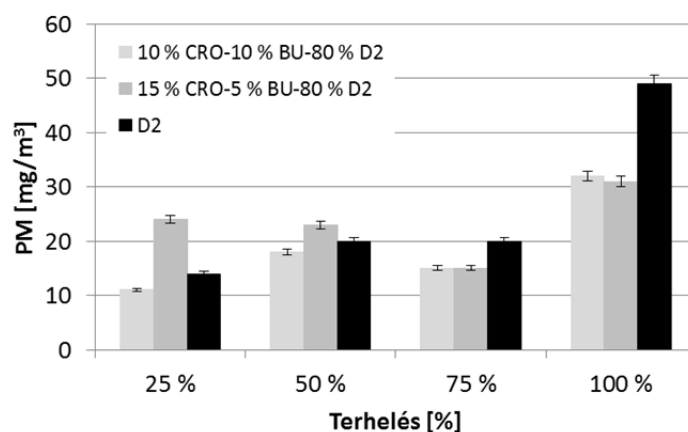
50. ábra A hármass elegyek és a referencia gázolaj (D2) el nem égett szénhidrogén (THC) kibocsátása 3000 1/perc fordulatszámon, különböző terhelések esetén [S-9] ($\delta_{THC} \pm 4,35$ %)

Megjegyzendő, hogy noha az eltérések jól megfigyelhetők, a kibocsátás meglehetősen alacsony, kisebb, mint 35 ppm volt. A THC-kibocsátás 25 %-os terhelésen feltehetőleg a feltöltés hatékonyságának csökkenése miatt (47. ábra) kialakult égési levegőhiány miatt nőtt meg a 15 % CRO - 5 % Bu-80 % D2 elegy esetén, a 75 %-os terhelés esetén változó előbefecskendezés változásának hatása nem volt kimutatható.



51. ábra A hármass elegyek és a referencia gázolaj (D2) szénmonoxid (CO) kibocsátása 3000 1/perc fordulatszámon különböző terhelések esetén [S-9] ($\delta_{CO} \pm 4,63$ %)

A szénmonoxid (CO) kibocsátás értékelése során megfigyelhető volt (51. ábra), hogy a kibocsátás hasonlóan alakult a THC-kibocsátáshoz eltekintve a teljes terheléstől. Ez több okra vezethető vissza. A CO-kibocsátás szempontjából feltételezhető volt, hogy az *n*-butanol gőz egy része olyan szegény keveréket hozott létre, amely nem tudott tökéletesen elégni. Továbbá szerepe lehet a viszkozitásnak, mivel bekeverés kismértékben rontotta a porlasztási képet (lásd [12]), valamint az alacsonyabb adiabatikus láng hőmérséklet amelyek hatására nőtt a CO-kibocsátás. Jól megfigyelhető 25 % terhelésen – a feltöltés csökkenése és a nagyobb viszkozitás miatt – a 15 % CRO-5 % BU-80 % D2 elegy esetén tapasztalható a legnagyobb CO-kibocsátás. Teljes terhelés esetén a CO-kibocsátás ismét növekszik, mivel ezen a terhelésen csökkent a rendelkezésre álló oxigén mennyisége a nagy dózis miatt, viszont a hármass elegyek esetén csökken a CO-kibocsátás feltehetőleg a tüzelőanyag oxigéntartalma miatt.



52. ábra A hármás elegyek és a referencia gázolaj (D2) részecske (PM) kibocsátása 3000 l/perc fordulatszámon különböző terhelések esetén [S-9] ($\delta_{PM} \pm 3,00 \%$)

A részecskekibocsátás (PM, 52. ábra) – elméleti megfontolásoknak megfelelően – a terheléssel növekedett. A növekvő dózis miatt azonban ennél a motornál az előbefecskendezési szög is nőtt a terheléssel, így a részecskék kiégése is nőhetett és nőtt a feltöltés is. Ez megfigyelhető gázolaj (D2) esetén, 50 % és 75 % terhelésen közel változatlan a PM-kibocsátás.

A hármás elegyek esetén az elméleti megfontolások alapján az oxigéntartalmú tüzelőanyagok esetén a PM-kibocsátás csökken, mivel lokálisan kevésbé dús keverékek alakulnak ki. Továbbá az alkoholok égése során kialakuló hidroxyl csoportok miatt a részecske kiégés intenzívebb lesz, amely csökkenti a PM-kibocsátást, valamint az alkoholok egyenes szénláncai kevésbé hajlamosak részecske képzésre [75]. Ennek hatását 75 %-os és teljes (100 %-os) terhelés esetén lehet jól megfigyelni (52. ábra).

A 25 %-os és 50 %-os terhelés esetén a 15 % CRO-5 % Bu-80 % D2 elegynek volt legnagyobb PM-kibocsátása. Ennek az elegynek a legnagyobb a viszkozitása és legkisebb az oxigéntartalma. Ennek okát egyes szerzők – hasonlóan az ennél az elegynél megnövekedett THC- és CO-kibocsátás esetén – a tüzelőanyag-keverék inhomogenitásával is magyarázzák [87], de 25 % terhelés esetén a feltöltés csökkenése is jelentősen hozzájárulhatott a növekedéshez.

3.3. TÉZISEK 1-2: ÖSSZEFOGLALÁSA NYERS NÖVÉNYI OLAJOKKAL ELÉRT EREDMÉNYEKNEK

A megvizsgált nyers növényi olajokkal kapcsolatban a következőket állapítottam meg:

- A nyers növényi olajok kinematikai viszkozitása 40 °C-on a gázolaj szabvány által elfogadott határérték több, mint hétszerese volt. Növekvő sorrendben a kinematikai viszkozitások a következők: krotonolaj (33,4 mm²/s), kókuszolaj (34,1 mm²/s), jatrophaolaj (34,6 mm²/s) és repceolaj (34,8 mm²/s). Jelentős eltérés nem tapasztalható a különböző nyersanyagok esetén, a legnagyobb eltérés 4,2 % ($\delta_{viszk} = \pm 0,35 \%$) volt.
- A 28 °C-on a vizsgált nyersolajok sűrűsége 9-14 %-kal szintén nagyobb volt, mint a gázolaj sűrűsége. Legnagyobb a sűrűsége a kókuszolajnak volt (935,8 kg/m³), utána sorrendben krotonolaj (920 kg/m³) repceolaj (914 kg/m³) és jatrophaolaj (901,0 kg/m³). A sűrűség szempontjából a legnagyobb eltérés 3,8 % ($\sigma_{sűrűség} = \pm 2 \text{ kg/m}^3$) volt.

- A vizsgált nyers növényi olajok fűtőértékei 14-18 %-kal alacsonyabbak voltak, mint a gázolaj fűtőértéke. Növekvő sorrendben a fűtőértékek: kókuszolaj (34,9 MJ/kg), repceolaj (36,7 MJ/kg), krotonolaj (36,9 MJ/kg) és jatrophaolaj (36,9). Szintén nagyobb eltérések tapasztalhatók a különböző nyersanyagok esetén, a legnagyobb eltérés 5,73 % ($\delta_{LHV} = \pm 2,82$ %) volt.
- A cetánszámok szempontjából a vizsgált nyers növényi olajok esetén megállapítható volt, hogy általában lényegesen alacsonyabb a cetánszámuk, mint az előírt 51 -, viszont a nyers kókuszolaj közel elérte azt. Sorrendben a cetánszámok: kókuszolaj (50 -), repceolaj és jatrophaolaj (42-42 -) és kroton olaj (41 -) ($\sigma_{\text{cetánszám}} = \pm 1,5$ -).
- TG (termogravimetriás) elemzések alapján megállapítható volt, hogy a nyersolajok párolgása lényegesen magasabb hőmérsékleten zajlott le, mint a referencia gázolaj párolgása. A vizsgált gázolaj (D2) közel 5 % tömegvesztést szenvedett 59 °C-ig, ettől a hőmérséklettől gyors tömegvesztés volt megfigyelhető 150 °C-ig, majd lelassult a tömegvesztés, 210 °C-on a minta fennmaradó tömege 5 % volt. A kókuszolaj párolgása 130 °C-on kezdődött, 168 °C-ig tartott és 1,9 % tömegcsökkenést eredményezett, az elsődleges bomlás 404 °C-ig tartott. A krotonolaj párolgása 190 °C-on kezdődött és 286 °C-ig tartott, az elsődleges bomlás 447 °C-ig tartott. A jatrophaolaj párolgása 140 °C-on kezdődött és 209 °C-ig tartott, az elsődleges bomlás 442 °C-ig tartott.

Ennek alapján megállapítottam, hogy a kiválasztott négy nyers növényi olaj az általam megvizsgált fizikai és kémiai tulajdonságaik alapján nem alkalmas felhasználásra egy nem átalakított dízelmotorban. Fontos megjegyezni, hogy a 28 °C-on történt sűrűségméréseket a kókuszolaj alacsony dermedési hőmérséklete indokolta!

Többször említettem, hogy a mért eredmények csak az általunk vizsgált olajmintákra igazak, ezeket a termőhely, az időjárás és egyéb paraméterek befolyásolhatják. Áttekintettem, hogy a leggyakrabban vizsgált repceolaj esetén más-más szerzők milyen értékeket adtak meg. Ez alapján azt tapasztaltam, hogy a fűtőérték átlagosan 38,04 MJ/kg, ennél 7,8 %-kal nagyobb és 3 %-kal kisebb értékeket is adtak meg a szerzők. A kinematikai viszkozitás átlagosan 65,6 mm²/s (40 °C-on), itt 14,2 %-kal nagyobb és 27 %-kal kisebb az eltérés mértéke, amíg a sűrűség 914,5 ± 5 kg/m³, és a cetánszám 39,6 ± 2 különböző szerzőknél. Ezek az eltérések feltehetőleg a minták különbözőségének tudhatóak be.

A megvizsgált nyers növényi olajokból készített metil-észterekkel kapcsolatban a következőket lehetett megállapítani:

- A kinematikai viszkozitás 40 °C-on a vizsgált gázolaj értékének közel kétszerese, viszont a jatrophaolaj metil-észterrel eltekintve megfelelt az EN 14214 szerinti követelménynek. A biodízelek kinematikai viszkozitása növekvő sorrendben a következő volt; kókuszolaj (3,1 mm²/s), krotonolaj (4,8 mm²/s), repceolaj (5 mm²/s) és jatrophaolaj (5,3 mm²/s). Jelentős eltérés tapasztalható a különböző nyersanyagok között. A legnagyobb eltérés 71 % ($\delta_{\text{viszk}} = \pm 0,2$ %).
- 28 °C-on a vizsgált nyersolajok sűrűsége szintén 5-6 %-kal nagyobb volt, mint a gázolaj sűrűsége. Legnagyobb a sűrűsége a repceolaj biodízelnak (877 kg/m³), utána sorrendben a kókuszolaj biodízelnak (869,5 kg/m³), a jatrophaolaj biodízelnak (867,2 kg/m³), és legkisebb a krotonolaj biodízelnak (865,0 kg/m³)

volt. A különböző nyersanyagok sűrűségei közel azonosak voltak, a legnagyobb eltérés 1,4 % ($\sigma_{\text{sűrűség}} = \pm 2 \text{ kg/m}^3$).

- A vizsgált biodízelek fűtőértékei 13-16 %-kal alacsonyabbak voltak, mint a gázolaj fűtőértéke, de kismértékben nagyobbak, mint a nyersolajoké. Növekvő sorrendben a fűtőértékek: repceolaj biodízel (36,3 MJ/kg), jatrophaolaj biodízel (37,2), kókuszolaj biodízel (37,3 MJ/kg) és krotonolaj biodízel (37,3 MJ/kg). Jelentős eltérések nem voltak tapasztalhatók a különböző nyersanyagok szerint, legnagyobb eltérés 2,75 % ($\delta_{\text{LHV}} = \pm 0,88 \%$).
- A cetánszámok szempontjából a vizsgált biodízelek esetén megállapítható volt, hogy a kókuszolaj (58 -) és a jatrophaolaj (59 -) biodízeleknek több, mint 10 %-kal nagyobb a cetánszáma, mint az előírt 51 -. A repceből készült biodízel cetánszáma 51 -, míg a kroton biodízel cetánszáma alacsonyabb, 47 – volt ($\sigma_{\text{cetánszám}} = \pm 1,5$).
- A TG (termogravimetriás) elemzések alapján megállapítható, hogy a metil-észterek párolgása és bomlása is magasabb hőmérsékleten zajlott le, mint a gázolajé, de alacsonyabb hőmérsékleten, mint a nyers növényolajoké. A kroton metil-észter minta párolgása 90 °C és 150 °C között kezdődött, az elsődleges bomlása 230 °C-ig tartott. A kókusz metil-észter párolgása 125 °C és 140 °C között kezdődött, a minta elsődleges bomlása 140 °C és 210 °C között zajlott le. A jatropha metil-észter minta párolgása 90 °C és 150 °C között kezdődött és elsődleges bomlása 150 °C és 227 °C között zajlott le.

Az előzőekben is leírtakat kiegészítem azzal, hogy a paraméterek nem csak az általam vizsgált mintákra igazak, de az eredményeket a technológia is befolyásolja. Az eredményekből megállapítható, hogy a gázolajhoz legjobban hasonló – vagy annál jobb – tulajdonságokkal a kókuszolaj és a kókuszolaj biodízel rendelkezik. A felhasználás szempontjából nagyon fontos azonban, hogy az előállítás és a hasznosítás hatásait globálisan és széleskörűen kell vizsgálni minden nyersanyag esetén.

Az általam vizsgált nyersolajok és alkoholok (n-propanol és izomerjei; n-butanol és izomerjei) kettős (nyers repceolaj – alkoholok) és hármas (krotonolaj – n-butanol – gázolaj) elegyeinek paramétereiről a következőket állapítottam meg:

(1. tézis) A kiválasztott nyers növényi olaj – alkohol kettős és nyers növényi olaj – alkohol – gázolaj hármas elegyek általam vizsgált fizikai és kémiai tulajdonságaik alapján részben alkalmasak felhasználásra egy nem átalakított dízelmotorban a következők miatt:

A nyers repceolaj – magasabb szénatom-számú alkoholok kettős elegyeinél 40 °C-on 20 V/V % alkohol bekeverés a kinematikai viszkozitást 35-50 %-kal és a cetánszámot 12-16 %-kal csökkentette. Ezek az értékek azonban még mindig a biodízel szabvány (EN 14214) kinematikai viszkozitáshatárértékének 3-4-szeresei és a cetánszám is túlságosan alacsony egy nem átalakított dízelmotorban történő felhasználásra. Ezzel szemben a vizsgált 10 V/V % krotonolaj – 10 V/V % n-butanol – 80 V/V % gázolaj, illetve a 15 V/V % krotonolaj – 5 V/V % n-butanol – 80 V/V % gázolaj hármas elegyekről megállapítható, hogy 40°C-on a kinematikai viszkozitás teljesíti az EN 14214 és az EN 590 szerinti követelményeket is. A hármas elegyek használata 5-10 %-kal csökkenti a cetánszámot, a sűrűséget viszont 2-1 %-kal

növeli a gázolajhoz képest. A termogravimetriás (TG és DTG) elemzések alapján megállapítható, hogy a 10 V/V % *n*-butanol tartalmazó hármas elegy közelíti meg legjobban a gázolaj párolgási tulajdonságait. A vizsgált paraméterek alapján a nem előmelegített hármas elegyek alkalmasak leginkább felhasználásra egy nem átalakított dízelmotorban ([S-6], [S-7], [S-8] és [S-9]).

Nagyobb *n*-butanol bekeverés esetén a cetánszám már jelentősen csökkenne, ezért ezzel nem foglalkoztam. Ez alapján a két *n*-butanol tartalmú hármas elegy vizsgálatát végeztem el egy dízelmotorban:

(2. tézis) A kiválasztott nyers növényi olaj – alkohol – gázolaj hármas elegyek motoros vizsgálatai alapján következőket állapítottam meg:

Nagy kompresszió-viszonyú, feltöltött, osztatlan égésterű és egyszeres befecskendezésű dízelmotorban a 10 V/V % *n*-butanol – 10 V/V % nyers krotonolajat és 80 V/V % gázolajat tartalmazó elegy esetén 3000 1/perc fordulatszámra és teljes terhelésen a motor teljesítménye kevesebb, mint 4 %-kal csökkent, elsősorban a növekvő viszkozitás és a csökkenő fűtőérték miatt. Az effektív hatásfok kevesebb, mint 2 %-kal csökkent. Az égési csúcsnyomás az égéstérben kevesebb, mint 5 %-kal nőtt. Az égési folyamat szempontjából megfigyelhető, hogy az előkevert égési szakasz hasznos hőváltozásának maximuma az *n*-butanol bekeverés hatására megnövekedett. A szabályozott károsanyag-kibocsátás szempontjából az el nem égett szénhidrogén kibocsátása teljes terhelésen több, mint 30 %-kal és részterheléseken ennél nagyobb mértékben nőtt. A szénmonoxid-kibocsátás teljes terhelésen több, mint 15 %-kal csökkent, részterheléseken közel 10 %-kal nőtt. A nitrogénoxid-kibocsátás kevesebb, mint 3 %-kal csökkent. A részecske-kibocsátás 10 % és 35 % között csökkent. A mérési eredmények alapján megállapítottam, hogy a vizsgált hármas elegy felhasználása az általam vizsgált motorban és üzemi tartományban a környezetterhelés szempontjából kedvező. ([S-8] és [S-9])

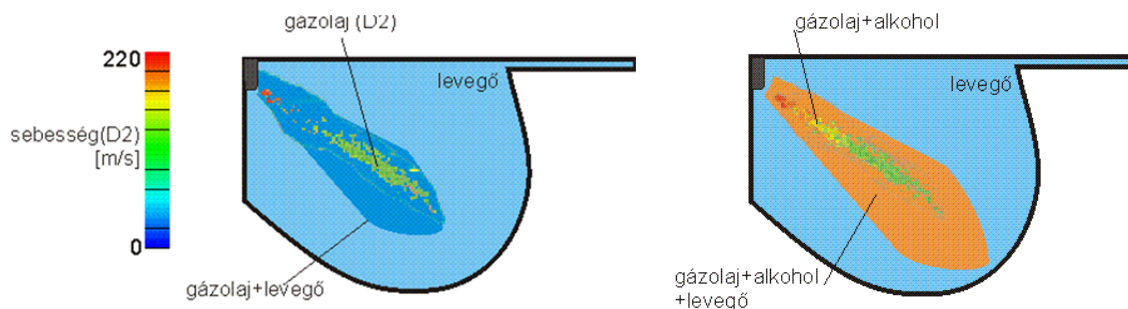
Amint az már szerepelt, itt a célkitűzés a vizsgált nyersolajok nem pl. járművekben történő felhasználása, hanem a helyi energia előállítása, amikor más – megújuló – tüzelőanyag nem vagy csak korlátozottan áll rendelkezésre.

4.KETTŐS TÜZELŐANYAG-ELEGYEK HATÁSÁNAK ÉRTÉKELÉSE

A bemutatott hármas elegyek vizsgálata esetén megfigyelhető volt az alkohol bekeverés a károsanyag kibocsátásra és az előkevert égési szakaszra gyakorolt hatása. A szakirodalomban és a 3.2.2 fejezetben tapasztaltak alapján az is megállapítható, hogy nemcsak a nyersolajok hasznosítási területén érdemes tovább foglalkozni az *n*-butanol hasznosításával, hanem gázolaj (D2) kettős elegyei esetén is. Ennek főbb indokai [S-7], [S-8], [S-9], [S-10], [S-12] a 2.3. fejezetben (pl. [26], [27]) bemutatokon kívül;

1. nincs kéntartalma – eltérően a hagyományos fosszilis alapú tüzelőanyagoktól;
2. az *n*-butanolnak alacsonyabb az öngyulladás hőmérséklete, mint a metanolnak és az etanolnak, így dízelmotorokban könnyebb meggyújtani;
3. az *n*-butanol jobb párolgási tulajdonsággal, nagyobb a cetánszámmal és energiasűrűséggel rendelkezik, mint az etanol és a metanol;
4. az *n*-butanol képes tisztítani a tüzelőanyag-rendszert, ezen belül a befecskendezőt, és jobb a keveredési tulajdonságai;
5. az *n*-butanol fajlagos oxigéntartalma nagyobb, mint a biodízelnél, ami tovább csökkentheti a koromkibocsátást.

Az irodalomkutatás és a 3.2.2 fejezetekben végzett vizsgálatok alapján hipotézisem szerint a gázolaj–*n*-butanol elegy párolgása során az *n*-butanol hamarabb és intenzívebben kezd el kigőzölgögni, így jelentős mennyiség párolog el és nagyrészt létre tud hozni égésképes keveréket, viszont az *n*-butanolnak a gázolajnál magasabb öngyulladás hőmérséklete miatt az égési folyamatot majd csak a gázolaj gyulladása indítja el. Ennek hatására nő az előkevert szakasz égésének intenzitása (53. ábra). Ezért nagyobb a nyomásnövekedés és intenzívebb az előkevert szakasz égése, amely növekvő átlag- és lokális hőmérsékletet eredményez. Ennek hatására növekvő NO_x-kibocsátás, valamint csökkenő CO- és THC-kibocsátás várható. Ugyanakkor a nagyobb párolgáshő és az alacsonyabb cetánszám miatt nő a gyulladási idő, ezért az égési folyamat az expanzió irányába tolódik el. Ezek hatására csökken a lokális hőmérséklet és csökkenhet az NO_x-kibocsátás. Mivel az *n*-butanol gőze a gyors párolgás miatt eltávolodhat az égési folyamattól, így nőhet a THC- és a CO-kibocsátás. Mindezek mellett az egyenes szénlánc és az oxigéntartalom miatt az *n*-butanol várhatóan csökkenti a PM-kibocsátást.



53. ábra A keveredési folyamat gázolaj és gázolaj – *n*-butanol elegy esetén (a csepp sebességek CFD modell eredmények alapján gázolajra készültek az [S-16 alapján])

Állandó beállítások esetén a hőfelszabadulás, a csúcsnyomás értéke és a nyomás lefutása várhatóan nem változik jelentősen, noha az elegy fűtőértéke csökken és az *n*-butanol párolgása hőt von el. Ennek az az oka, hogy a gyulladási idő hosszabbodását az előkevert szakasz intenzitásának növekedése kompenzálhatja, ha az előkevert égés nem kerül a megnövekedett gyulladási idő miatt az expanziós fázisba.

A hipotézisem igazolására több méréssorozatot végeztem el. Logikai sorrendben először az előkamrás és változtatható kompresszióviszonyú motoron végzett mérések eredményeit, majd egy osztatlan égésterű motoron kis kompresszióviszonyú ($\varepsilon=17$), és végül magasabb kompresszióviszonyú ($\varepsilon=19$) turbófeltöltött járműmotoron készült vizsgálatok eredményeit mutatom be. Az elegy komponenseinek főbb adatait az 5. táblázat tartalmazza.

		D2	<i>n</i> -butanol
LHV	MJ/kg	43	33.1
cetánszám	-	51	~25
kinematikai viszkozitás (40 °C-on)	mm ² /s	3.4	3.6
sűrűség (20 °C-on)	kg/m ³	860	810
forráspont	K	453-643	390
öngyulladás hőmérséklet	K	503	618
párolgáshő	KJ/kg	250	585
elméleti égési levegőigény	kg/kg	15.0	11.2

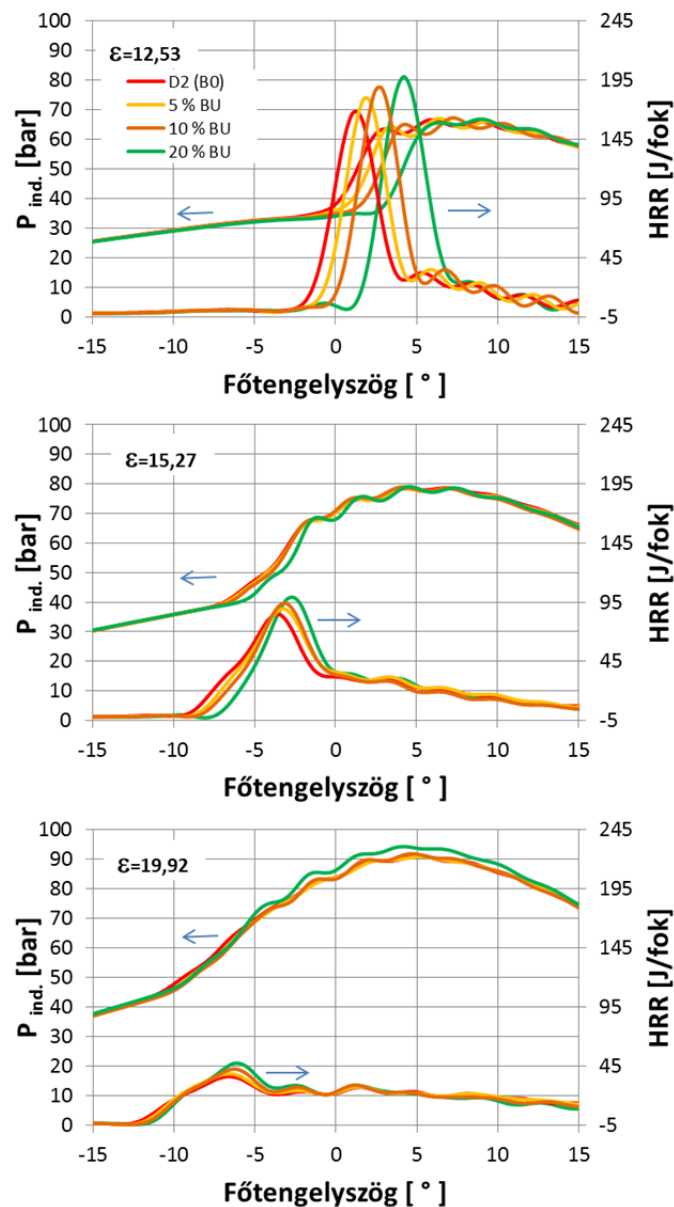
5. táblázat A vizsgált tüzelőanyag komponensek paraméterei [S-12]

4.1. VÁLTOZTATHATÓ KOMPRESSZIÓVISZONYÚ MOTORON VÉGZETT VIZSGÁLATOK

Az *n*-butanol bekeverés hatásának vizsgálatára első lépésben az égéstérnyomás és hőmérséklet hatását célszerű vizsgálni. Mivel motoros körülmények között a két paraméter egymástól csak részlegesen választható szét, ezért erre a célra a rendelkezésemre álló cetánszám mérőmotoron végeztem vizsgálatokat. Ennek a motornak két fontos tulajdonsága az előkamrás égéster és az előkamra térfogatának módosításával a változtatható kompresszióviszony. Megjegyzendő, hogy ténylegesen az előkamra közelebb áll a perdítő kamrához, mivel a fő égésteret és az előkamrát összekötő csatorna tangenciális kialakítású (perdítő furat, M-7 melléklet). Az ezen a motoron végzett mérések eredményeit csak konferenciákon mutattam be (pl. [S-12]), mivel ezek a mérések elsősorban a disszertációhoz készültek, hogy a folyamatok még érthetőbbek legyenek.

Ennél a motornál a befecskendező 120 bar nyitónyomáson a tüzelőanyagot elsősorban a kompresszióállító dugattyú falára és az előkamra falára fecskendezi. Három kompresszióviszony esetén végeztem méréseket (19,92, 15,27 és 12,53 [-]), a tüzelőanyag- fogyasztást 13 ml/perc értéken, míg az előbefecskendezési szöget 18 °-ra állítottam a jobb kezelhetőség miatt.

A mért indikált nyomások és az abból számolt hasznos hőváltozások (HRR) az 54. ábrán láthatóak.

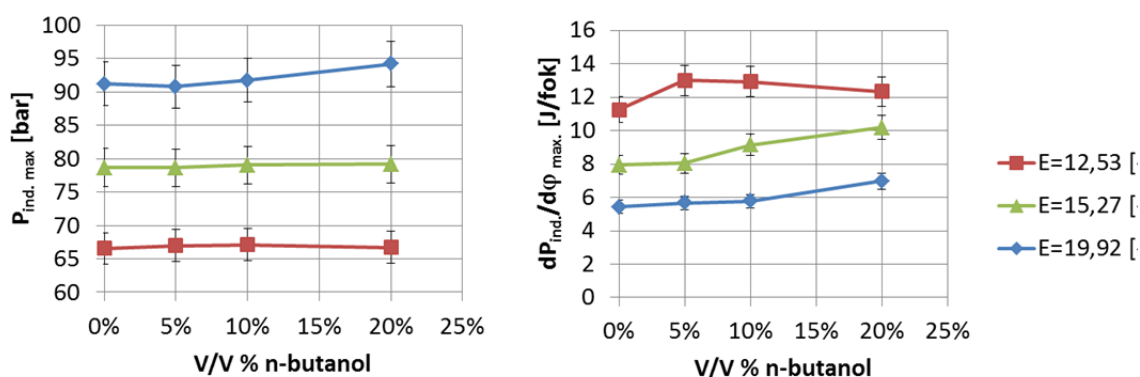


54. ábra Az indikált nyomás és az abból számolt hasznos hőváltozás (HRR) a főtengelyszög függvényében különböző kompresszióviszonyok és *n*-butanol részarányok esetén, ($\delta_{P_i} \pm 3,59\%$, $\delta_{HRR} \pm 21,66\%$) [S-12 alapján]

Minden esetben jól megfigyelhető a hasznos hőváltozás és az indikált nyomás ingadozása, amely feltehetőleg az előkamra és a nyomásjeladó beépítés következtében alakult ki. Ettől eltekintve megfigyelhető az 55. ábrán, hogy a kompresszióviszony emelésével a nyomásmaximumok növekedtek, viszont az alkoholrészarány növekedése nincsen jelentős hatással. Egyedül a 19,92 [-] kompresszióviszony esetén növekedett a csúcshőváltozás 20 % V/V % *n*-butanol elegynél esetén. Ez abból a szempontból fontos, hogy a tüzelőanyag-fogyasztás állandó volt, tehát a bevitt hő mennyisége csökkent az alkoholrészarány növekedésével.

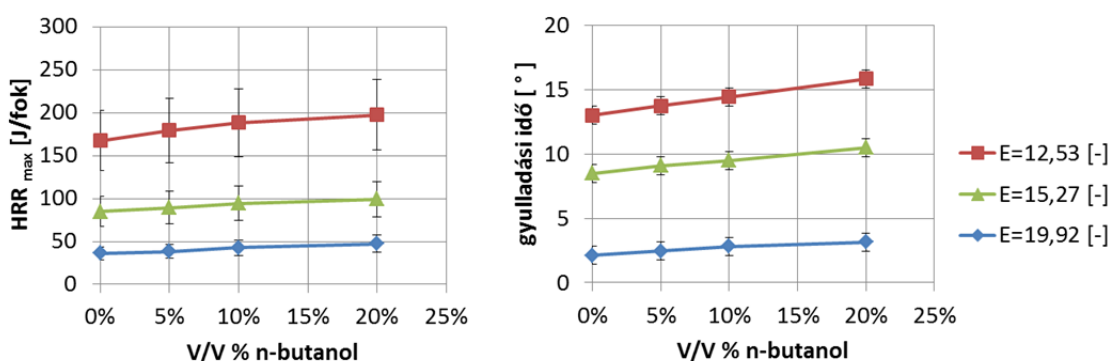
A nyomásváltozási sebesség ($dp_{ind}/d\varphi_{max.}$) gázolaj tüzelőanyag esetén (D2 vagy 0 % V/V % *n*-butanol) fordítottan nőtt a kompresszióviszonnyal. Ennek oka, hogy 12,53-as kompresszióviszony esetén volt a legintenzívebb az előkevert szakasz hasznos hőváltozás és ez a kompresszióviszony növelésével csökkent, mivel a gyulladási idő rövidebb. A nyomásnövekedési sebesség *n*-butanol bekeverés növelésével 12,53-as kompresszióviszony esetén kezdetben nőtt, majd csökkent, a közepes

kompresszióviszony esetén (15,27) folyamatosan nőtt, míg 19,92-es kompresszióviszonyú esetben közel változatlan volt.



55. ábra Az indikált nyomás maximuma és a nyomásváltozási sebesség maximuma különböző kompresszióviszonyok és n-butanol részarányok esetén [S-12 alapján] (δ_{Pi} , $\pm 3,59$ %)

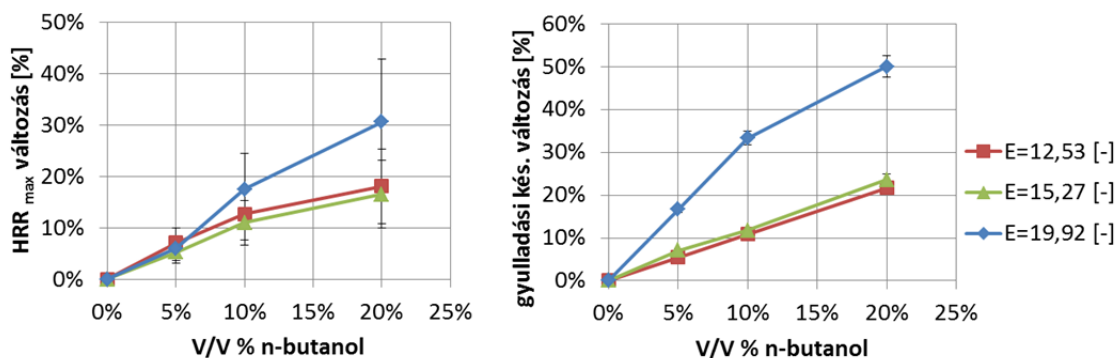
Az indikált nyomásmaximum és a nyomásváltozás sebesség maximum változásának magyarázata megfigyelhető az 54. és az 56. ábrákon. A kompresszióviszony csökkentése jelentős hatással volt a hasznos hőváltás maximumának növekedésére. A kompresszióviszony csökkentésével a hasznos hőváltás maximum értékei növekedtek, mivel nőtt a gyulladási idő, így intenzívebb lett az előkevert égési szakasz. Az alkohol bekeveréssel a hasznos hőváltás és annak maximum értéke előkevert szakaszban jelentősen növekedett, 20 V/V % bekeverés esetén, akár 30 %-kal (E=19,92, 20 V/V % n-butanol, 57. ábra).



56. ábra A hasznos hőváltás (HRR) maximuma és a gyulladási idő különböző kompresszióviszonyok és n-butanol részarányok esetén [S-12 alapján] (δ_{HRR} , $\pm 21,66$ %)

A kompresszióviszony növelésével, azaz a befecskendezés-időpontjában az égéstérnyomás és -hőmérséklet növelésével csökkent a gyulladási idő (56. ábra), és a hipotézisnek megfelelően az alkohol részarány növekedésével nőtt a gyulladási idő. A 19,92 [-] kompresszióviszony esetén, mint erről már szó volt, a gyulladási idő kicsi volt, az alkohol részarány növelésével a hasznos hőváltás maximumának növekedése miatt kismértékben növekedett a csúcsnyomás értéke. Ebben az esetben változott legjobban a hasznos hőváltás maximuma az n-butanol arányának növelésével (57. ábra), mivel kezdetben jelentős volt az n-butanol kigőzölgése. A kompresszióviszony csökkentésével a gyulladási idő nőtt, így nem csak az n-butanol tudott távozni az elegyből, hanem a gázolaj is. Ennek hatására az alkoholgőz hatása csökkent. Továbbá a 12,53-as kompresszióviszony esetén olyan nagy volt a gyulladási idő, hogy az égés a felső holtpont után került, így a magasabb előkevert szakaszbeli intenzitás növekedés

már nem tudta kompenzálni az expanszió hatását, ezért a nyomásnövekedés sebessége és a csúcsnyomás értéke csökkent az alkohol bekeveréssel.



57. ábra A hasznos hőváltozás (HRR) maximumának és a gyulladási idő változása a gázolajhoz (0V/V % *n*-butanol) képest, különböző kompresszióviszonyok és *n*-butanol részarányok esetén [S-12 alapján]

Az 57. ábrán megfigyelhető, hogy mind a három kompresszióviszony esetén az alkohol bekeveréssel nőtt a hasznos hőváltozás maximum és a gyulladási idő aránya a gázolajhoz képest.

Összefoglalva:

- Előkamrás motornál, állandó tüzelőanyagterfogat-áram és állandó előbefecskendezési szög esetén a gyulladási idő nőtt az *n*-butanol részarányával, a növekedés fordítottan függött a kompresszióviszonytól. A hasznos hőváltozás maximuma is magasabb lett az *n*-butanol részarányával, melynek mértéke nőtt a kompresszióviszony növelésével. A két hatás képes kiegyenlíteni egymást, aminek következtében a csökkenő fűtőérték ellenére az égési csúcsnyomás közel állandó volt, illetve kismértékben növekedett *n*-butanol bekeverésével.
- Előkamrás motornál, állandó tüzelőanyagterfogat-áram és állandó előbefecskendezési szög esetén a gyulladási idő változása a gázolajhoz képest legjelentősebben nagy kompresszióviszony esetén nőtt. Kisebb kompresszióviszonyok esetén közel megegyező mértékben változott. A hasznos hőváltozás maximum értéke is nőtt az *n*-butanol részarányával, legintenzívebben nagy kompresszióviszony esetén, kisebb kompresszióviszonyok esetén közel megegyező mértékben változott. Ennek magyarázata, hogy nagy kompresszióviszony esetén a gyulladási idő kisebb, mint 2-3 °, így ebben az esetben a befecskendezés után jelentős mennyiségű *n*-butanol párologt el, míg a gázolajnak csak kisebb része. Így itt több *n*-butanol – gőz volt a keverékben az égési folyamat elején. Kisebb kompresszióviszony esetén a hosszabb gyulladási idő során folyamatosan párologt ki a gázolaj és az alkohol is, így itt az égéskezdetkor a gázolaj – *n*-butanol arány nagyobb volt, mint a rövidebb gyulladási idő esetén.

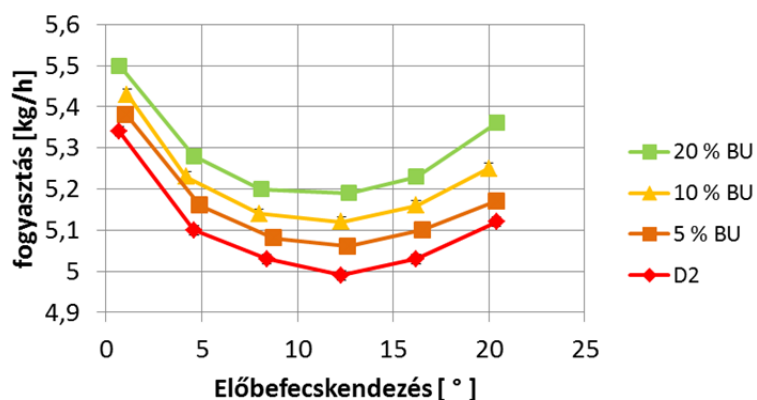
A fenti megállapítás alátámasztja hogy az alkalmazott beállítások esetén a befecskendezés kb. 5-6 fokig tartott, így megfigyelhető, hogy 12,53 [-] kompresszióviszony esetén a diffúz égési folyamat nem volt túl jelentős, tehát a tüzelőanyag nagy része már elpárologt az égés során, ellentétben pl. a 19,92 [-] kompresszióviszonnyal.

A mérési eredményekkel kapcsolatban érdekes megfigyelni egy jelenséget: a 12,53 [-] kompresszióviszony esetén (54. ábra) látható a felső holtpont körül a gyulladás előtt egy lokális maximum a hasznos hőváltozás függvényén, ez feltehetőleg egy hidegégéshez hasonló folyamat következménye volt.

Ennél a vizsgálatnál az emissziós eredményeket nem közlöm, mivel a beállítási értékeket csak rövid ideig lehetett pontosan tartani, így az emisszióméréshez nem állt rendelkezésre elegendő idő. Érdemes megemlíteni, hogy a kompresszióviszony növelésével a NO_x-kibocsátás csökkent, a részecskékibocsátás viszont jelentősen nőtt, a CO- és THC-kibocsátás növekedett, a *n*-butanol részarányával növelésével a NO_x-kibocsátás jelentősen nem változott, a részecskékibocsátás nem változott, illetve jelentősen csökkent 19,92 [-] kompresszióviszonynál, a CO- és THC-kibocsátás növekedett vagy csökkent más-más kompresszióviszony esetén.

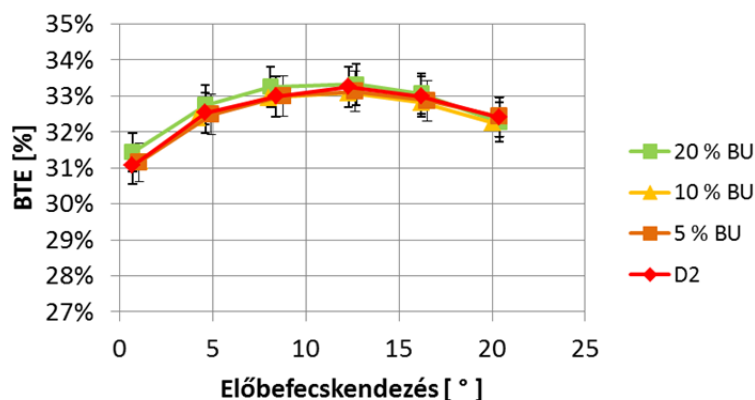
4.2.ELŐBEFECSKENDEZÉS HATÁSÁNAK ÉRTÉKELÉSE

A vizsgálat célja az alkohol bekeverés hatásának elemzése volt egy osztatlan égésterű és $\varepsilon=17$ kompresszióviszonyú motornál az előbefecskendezési szög függvényében. Az eltérő keverékképzésen kívül fontos, hogy a motor teljesítménye állandó volt –mivel ez egy dízelgenerátor egység–, így a fordulatszám szabályzó rendszer változtatta a tüzelőanyag mennyiségét. Így ebben az esetben a valóságos felhasználáshoz jobban hasonlító körülmények között teszteltem a bekeverés hatását. A vizsgálatokat állandó, 20 kW terhelésen végeztem el, ez a terhelés 21,5 kW effektív terhelést jelent, amit a számításoknál figyelembe vettem (ld. M-7 melléklet). Az előbefecskendezési szög állítása kézzel történt, melyek pontos értékei a kiértékelés során kerültek meghatározásra, így a vizsgált előbefecskendezés értékek és a hozzá tartozó valós befecskendezés kezdetek: 0: 1 °, 5: ~4,3 °, 8: ~8 °, 12: ~12,5 °, 16: ~16,2 ° és 20: ~20,1 ° voltak. Az egyes tüzelőanyag-elegyek esetén az eltérés maximum 0,36 fok volt, amely megegyezik a mérés abszolút hibakorlátjával. Az égési folyamat vizsgálata során nem foglalkozom az 5 V/V %-ot tartalmazó elegyekkel, mivel ott az eltérések a gázolajhoz (D2) képest közel megegyeztek a mérési pontossággal.



58. ábra A tüzelőanyag-fogyasztás 20 kW teljesítmény esetén az előbefecskendezés függvényében különböző 1-butanol részarányok esetén ($B0 = 0\%$, $B5 = 5\%$, $B10 = 10\%$ és $B20 = 20\%$ V/V % *n*-butanol) ($\delta_B, \pm 0,23\%$) [S-11 alapján]

A tüzelőanyag-fogyasztás az állandó 20 kW terhelés alatt változott az előbefecskendezési szög függvényében és minimuma volt, ennek okaival később foglalkozom. Az alkoholrészarány növelésével a tüzelőanyag-fogyasztás növekedett a csökkenő fűtőérték miatt (58. ábra).



59. ábra Az effektív hatásfok (BTE) 20 kW teljesítmény esetén az előbefeckendezés függvényében különböző *n*-butanol részarányok esetén ($B0 = 0\%$, $B5 = 5\%$, $B10 = 10\%$ és $B20 = 20\%$ V/V % *n*-butanol) ($\delta_{BTE} = \pm 1,65\%$) [S-11 alapján]

A vizsgálat előbefeckendezés tartományban az effektív hatásfoknak maximuma volt, ennek okaival később foglalkozom. Az alkohol bekeverés szempontjából 20 kW terhelés esetén trendet nem lehet megfigyelni, a különbségek nem voltak jelentősek (59. ábra).

4.2.1. AZ ELŐBEFECKENDEZÉS HATÁSA AZ ÉGÉSI FOLYAMATRA

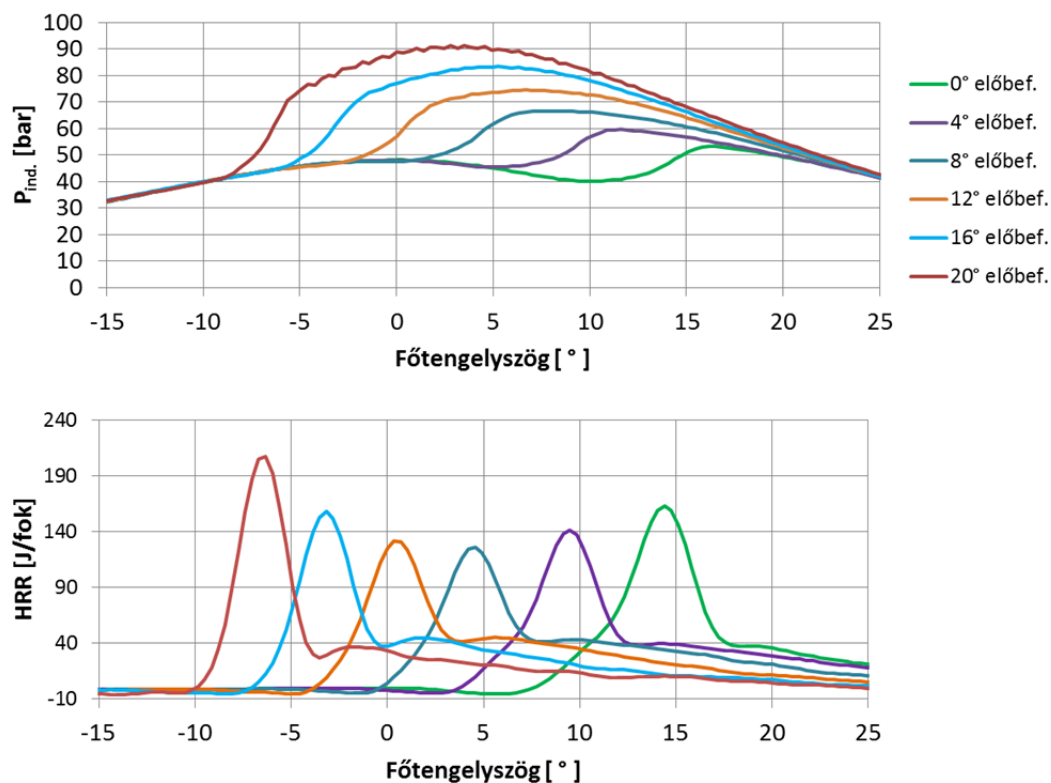
Ahhoz, hogy megértsük az adott vizsgálat sorozatot, célszerű először megismerni az előbefeckendezés hatását csak egy kiválasztott tüzelőanyag esetén (60. ábra). Ebben az esetben ez legyen tiszta gázolaj (D2).

A 20 °-os előbefeckendezés esetén jó látható, hogy az indikált nyomás -8,5 ° környékén kezdett el intenzíven emelkedni, majd kb. -5 °-tól a nyomás tovább növekedett, de kisebb intenzitással, a felső holtpont után kb. 5 °-kal már csökkent. Ennek hatása jól megfigyelhető az 59. ábrán, hogy a kialakuló nagy kompressziómunka-igény miatt a hatásfok kisebb volt. Az indikált nyomás alakulásának okai jól megfigyelhetők a hasznos hőváltozás görbében, a valóságosan -20,4 °-os befecskendezési kezdet esetében a befecskendezés már gyakorlatilag véget ért kb. -10 °-nál, az égési folyamat -10,9 °-nál kezdődött (61. ábra). Ez azt is jelenti, hogy a tüzelőanyag nagy része el tudott párologni. Így az égési folyamat jelentős része az intenzív előkevert égési folyamat során zajlott le.

Az előbefeckendezés csökkentésével (12 és 16 °-os előbefeckendezés) jól látható, hogy az intenzív nyomásnövekedés egyre közelebb került a felső holtponthoz, ezért csökkent a kompressziómunka, javult a hatásfok (59. ábra), így kisebb a tüzelőanyaggal bevitt hő mennyisége (58. ábra). Mivel a befecskendezési folyamat során az átlaghőmérséklet nőtt a kompresszió miatt, csökkent a gyulladási idő is (61. ábra). A rövidebb gyulladási idő miatt az égéskezdet egyre korábban történt, így a diffúz égési folyamat kismértékben növekedett. Továbbá a javuló hatásfok miatt kevesebb a szükséges hő, így a hasznos hőváltozás maximuma is alacsonyabb lett.

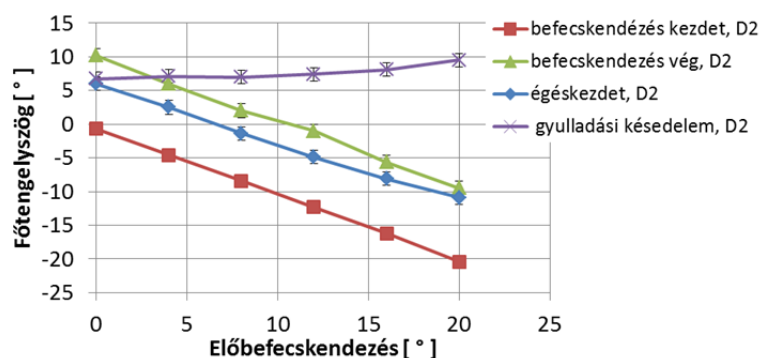
Tovább csökkentve az előbefeckendezési szöget (8, 4 és 0 °-os előbefeckendezés), látható, hogy a később kezdődő égési folyamat hatására az intenzív nyomásnövekedés egyre hátrébb tolódott, jóval a felső holtpont utánra. Ennek hatására romlott a hatásfok, ezért magasabb lett a tüzelőanyag-fogyasztás, azaz nőtt a bevitt hő. Így az

előkevert égési szakasz hasznos hőváltozás maximuma is növekedett, viszont mivel az előkevert égés az expanzióban zajlott le, ezért a csökkenő hőmérséklet miatt egyre inkább elhúzódott. A gyulladási idő kismértékben rövidebb lett, mivel a befecskendezés kezdeti időpontjában az átlaghőmérséklet nőtt.



60. ábra Az indikált nyomás (P_{ind}) és a hasznos hőváltozás a főtengelyszög függvényében különböző előbefecskendezések esetén, 1500 1/perc fordulatszámon és D2 tüzelőanyag esetén ($\delta_{Pi} \pm 3,29 \%$, $\delta_{HRR} \pm 7,90 \%$)

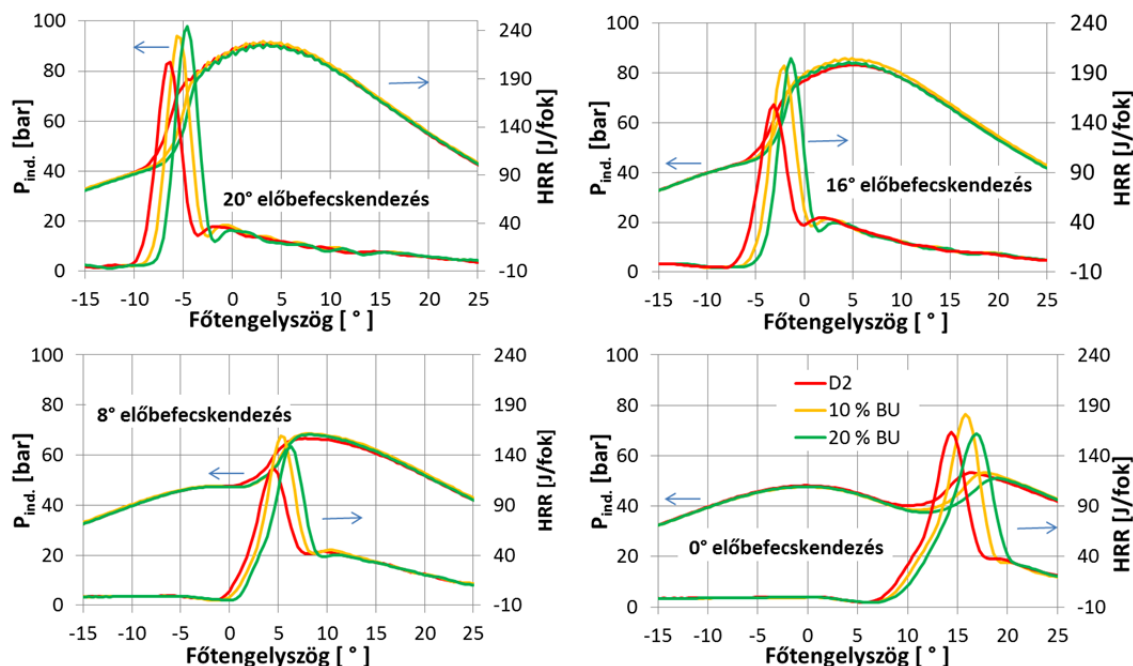
Fontos, hogy a befecskendezés hatása is jól megfigyelhető volt a hasznos hőváltozáson. A 12 °-osnál kisebb előbefecskendezéseknél észlelhető volt, hogy a hasznos hőváltozás lényegesen kisebb mértékben növekedett addig, amíg a befecskendezés még tartott, majd azt követően jelentősen megnövekedett (61. ábra). Ez elsősorban a befecskendezett tüzelőanyag párolgásának hűtőhatásával magyarázható.



61. ábra A valódi befecskendezési szög, az égéskezdet, a befecskendezés vége és a gyulladási idő az előbefecskendezés függvényében ($\sigma \pm 0,70$)

Ezek után vizsgáljuk meg az *n*-butanol bekeverés hatását (62. ábra). A 20 °-os és 16 °-os előbefecskendezések esetén az égési folyamat a befecskendezés vége után, illetve annak a vége közelében indult el, így a befecskendezésnek kimutatható hatása már

nem volt. Mindkét esetben megfigyelhető, hogy az *n*-butanol-tartalom növelésével a gyulladási idő a gázolajéhoz képest nőtt, amely az alacsonyabb cetánszámra vezethető vissza. Viszont a hasznos hőváltozás maximumának eltérése a gázolajhoz képest a 10 V/V % és a 20 V/V % *n*-butanol elegyek esetén nem volt jelentős (65. ábra).



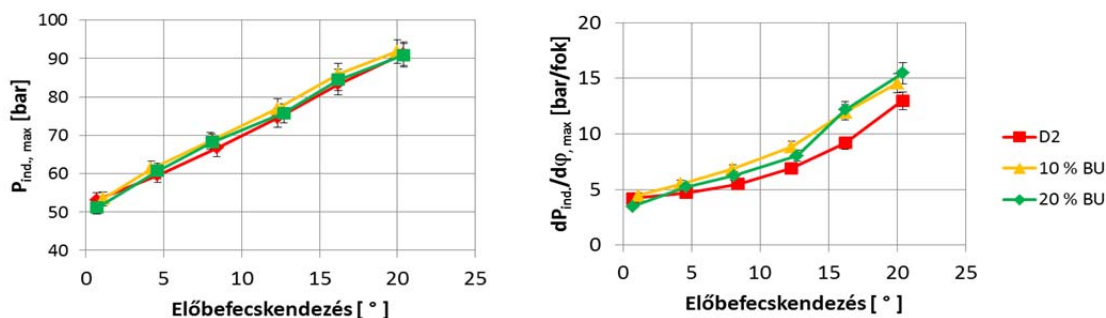
62. ábra Az indikált nyomás (P_{ind}) és a hasznos hőváltozás a főtengelyszög függvényében különböző előbefecskendezések, *n*-butanol részarány esetén, 1500 l/perc fordulatszámon és 20 kW terhelésen [S-11 alapján] ($\delta_{P_b} \pm 3,29\%$, $\delta_{HRR} \pm 7,90\%$)

Ez két okra vezethető vissza: az alacsonyabb fűtőérték miatt több tüzelőanyag került befecskendezésre, ami a párolgás során a hűtést növelte. Viszont a több tüzelőanyagból több *n*-butanol tudott kipárologni, így az előkevert égés intenzitása növekedett, de a jelentős késedelem miatt a gázolaj jelentős része is elpárolgott és elégett, ami az alkohol gyorsabb gőzölgésének hatását csökkentette, ahogyan az az előző vizsgálatnál is látható volt.

Kisebb előbefecskendezések esetén (pl. 8° és 0°) (62. ábra), szintén megfigyelhető volt, hogy az alkohol bekeverés hatására nőtt a gyulladási idő. Itt is elmondható, hogy a gázolajhoz képest a 10 V/V % és a 20 V/V % *n*-butanol elegyek esetén a hasznos hőváltozás maximumának növekedése nem volt jelentős – szintén a nagy gyulladási idő miatt. Viszont a hasznos hőváltozás maximuma 10 % BU (10 V/V % *n*-butanol bekeverés) esetén volt a legnagyobb. Ennek oka egyrészt az itt is a jól megfigyelhető befecskendezés (illetve ennek későbbi befejeződésének) hatása, valamint az expanzióban lezajló égési folyamat miatt az előkevert égési szakasz elhúzódása. Így összefoglalva megállapítható, hogy a kisebb előbefecskendezések esetén az *n*-butanol bekeverés az adott motornál kialakuló hosszabb gyulladási idő miatt az expanzióban lezajló előkevert égés következtében a nagyobb bekeverés hatására a több és gyorsabban elpárolgó *n*-butanol már nem volt képes növelni az előkevert égés hasznos hőváltozás maximumát.

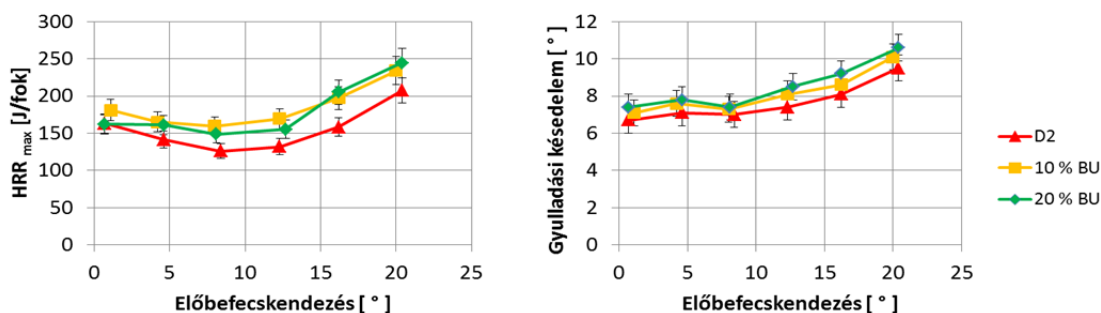
Továbbá a nagyobb dózis miatti hosszabb befecskendezés és a nagyobb párolgáshő hatása volt megfigyelhető a 20 V/V % *n*-butanol elegy esetében is a hasznos hőváltozás kezdeti szakaszán, amely hatására az előkevert égési szakasz elején még jobban

csökkent a hasznos hőváltás, többek között ez is okozta a maximum későbbre tolódását és ennek hatására a hasznos hőváltás maximumának csökkenését.



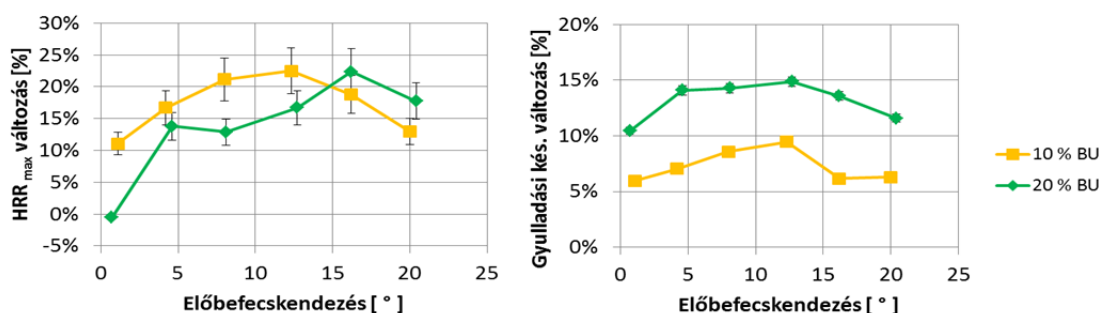
63. ábra Az indikált nyomás és a nyomás változás sebességének maximumai az előbefecskendezés függvényében 20 kW terhelésen különböző *n*-butanol elegyek esetén ($D2 = 0\%$, 10% BU = 10% V/V % és 20% BU = 20% V/V % *n*-butanol) [S-11 alapján] ($\delta_{P_b} \pm 3,29$)

Az égési csúcshőmérséklet az elméleti megfontolásoknak megfelelően növekedett az előbefecskendezés növelésével. Az alkohol bekeverés hatására nem jelentősen, maximum ~3 %-kal nőtt 10 V/V % *n*-butanol elegy 4 °-os és 12 °-os előbefecskendezés esetén, viszont 20 V/V % *n*-butanol elegy és 0 °-os előbefecskendezés esetén közel 4 %-kal csökkent, mivel itt a hasznos hőváltás maximuma jelentősen a felső holtpont után került. A nyomásváltozás sebessége szintén az előbefecskendezés növelésével gyorsult. A 16 °-os és 20 °-os előbefecskendezéseknél a 20 V/V % *n*-butanol elegy esetén, ennél kisebb előbefecskendezéseknél a 10 V/V % *n*-butanol elegy esetén volt a legnagyobb a nyomásváltozás sebessége, mivel a 20 % V/V % *n*-butanol elegy esetén az előbbiekben bemutatottak miatt az előkevert égés elhúzódott.



64. ábra A hasznos hőváltás maximuma és az idő késedelem az előbefecskendezés függvényében 20 kW terhelésen különböző *n*-butanol elegyek esetén [S-11 alapján] ($\delta_{HRR} \pm 7,90\%$)

A hasznos hőváltás maximuma (64. ábra) az előbefecskendezés növelésével kezdetben csökkent a referencia tüzelőanyag és a két elegy esetén, kivéve a már sokszor említett 0 °-os előbefecskendezést 20 V/V % *n*-butanol elegy esetén a jelentős előkevert égés elhúzódása miatt. A 12 °-os előbefecskendezéstől a maximum értékek nőttek a romló hatásfok miatt növekvő dózis miatt. Hasonlóan a nyomásváltozás sebességéhez itt is megfigyelhető volt, hogy 16 °-os és annál kisebb előbefecskendezések esetén a 10 V/V % *n*-butanol elegyeknek volt nagyobb a maximális értéke a 20 V/V % *n*-butanol elegyhez képest a jelentősen elhúzódó előkevert égés miatt. Ennél a motornál megfigyelhető volt a hosszú gyulladási idő, amely a csökkenő befecskendezési hőmérséklet miatt tovább nőtt az előbefecskendezés növelésével. Az eddigieknek megfelelően a gyulladási idő az *n*-butanol bekeverés növelésével emelkedett, de kevésbé jelentősen, mint az előző motornál (65. és 57. ábrák).



65. ábra A hasznos hőváltozás maximumának változása és a gyulladási idő változása a gázolajhoz képest az előbefeckendezés függvényében 20 kW terhelésen különböző *n*-butanol elegyek esetén

A hasznos hőváltozás maximumának változása és a gyulladási idő változása (65. ábra) a gázolajhoz tulajdonságaihoz viszonyítva az előbefeckendezés függvényben az eddigiekhez hasonló jelleget mutatott. Ezek az eredmények részletesen később kerülnek értékelésre, a különböző kettős elegy vizsgálatok után.

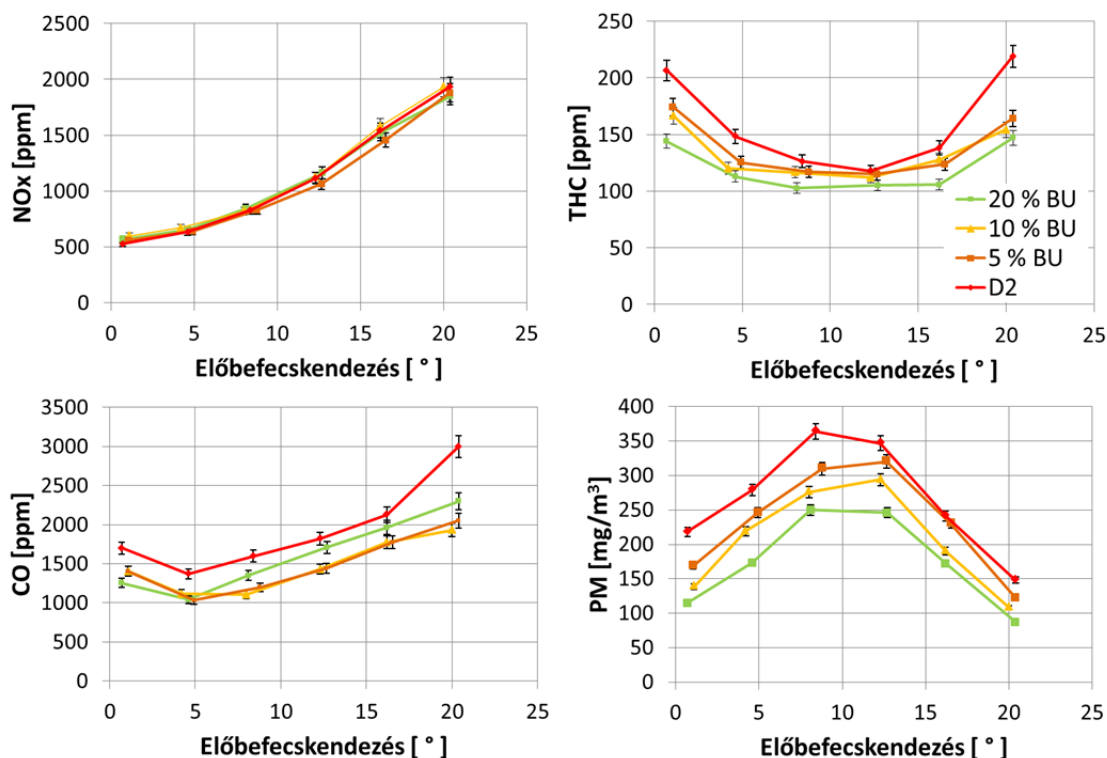
4.2.2. AZ ELŐBEFECSKENDEZÉS HATÁSA KÁROSANYAG-KIBOCSÁTÁSRA

A NO_x-kibocsátás az előbefeckendezési szög növelésével emelkedett, mivel a füstgáz hőmérséklete a kompresszió hatására tovább nőtt, amely kedvez a NO_x keletkezésének [S-2]. Az *n*-butanol bekeverés hatása átlagosan nem jelentős, 5 V/V % *n*-butanol elegy esetén átlag ~2 %-kal csökkent, 10 V/V % *n*-butanol esetén 1,6 %-kal, míg 20 V/V % *n*-butanol esetén ~2 %-kal növekedett (66. ábra). Ez elsősorban az előkevert égés intenzitásának növekedésével magyarázható: a párolgás hőelvonását az előkevert szakasz növekedése kompenzálta.

Az el nem égett szénhidrogének esetén (THC) ~12 °-os előbefeckendezésnél volt a legalacsonyabb a kibocsátás. Ennek magyarázata részben a 60. ábrán figyelhető meg. Az ehhez tartozó égési folyamatnak az előkevert szakasza zajlott le legközelebb a felső holtponthoz, így itt volt a legkisebb az égéstér térfogata, emiatt legmagasabb az átlaghőmérséklet. Ezen az előbefeckendezés-tartományon a legkisebb a tüzelőanyag-fogyasztás (58. ábra), viszont ebben az esetben volt legjelentősebb a fal lángkioltó hatása is. Az alkohol bekeverés hatására a kibocsátás csökkent. Legjelentősebb a csökkenés 20 V/V % *n*-butanol elegy esetén – a mind nagy (20 °), mind kis (0 °) előbefeckendezés esetén. Mivel az alkohol bekeverés javította a keverékképzést, viszont a nagy gyulladási idő miatt az alkohol gyorsabb kigőzölgése jelentősen nem befolyásolta az alkohol kiégését.

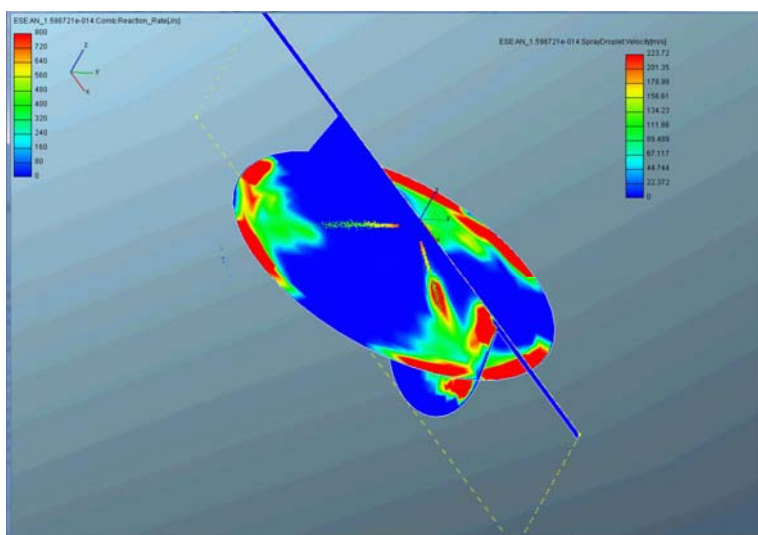
A CO-kibocsátás minimuma 4 °-os előbefeckendezésnél figyelhető meg. Nagyobb előbefeckendezések esetén a másodlagos keletkezés és a fal hűtőhatása feltételezhető. A 0 °-os előbefeckendezésnél a legalacsonyabb volt az égési folyamat átlaghőmérséklete, valamint ebben az esetben már az égés annyira az expanzióban zajlott le, hogy ez már rontotta a tüzelőanyag kiégését és növelte a CO-kibocsátást. Alkohol bekeverés hatására csökkent a CO-kibocsátás, de a mértéke nem volt egyértelmű.

A részecskékibocsátás (PM) szempontjából azt tapasztaltam, hogy 8 °-os előbefeckendezésig nőtt, majd 12 °-os előbefeckendezéstől csökkent a kibocsátás. Ez ellentmondásnak tűnik, mivel ebben a tartományban volt legjobb a hatásfok és legkisebb a tüzelőanyag-fogyasztás.



66. ábra A NOx-, el nem égett szénhidrogén (THC), a CO- és a részecske-kibocsátás (PM) az előbefeckendezés függvényében 20 kW terhelésen különböző n-butanol elegyek esetén [S-11 alapján] ($\delta_{NOx} \pm 4,42\%$, $\delta_{CO} \pm 4,63\%$, $\delta_{THC} \pm 4,35\%$, $\delta_{PM} \pm 3,00\%$)

Viszont a legnagyobb PM-kibocsátás tartományában volt legintenzívebb a diffúz égés és a legkisebb ez égéstér térfogata, tehát a befecskendezett tüzelőanyag egy része a dugattyúra került, így az ott kialakuló, lokálisan tüzelőanyagban dús keverék is volt a felelős a magas kibocsátásért (67. ábra). Az alkohol bekeveréssel csökkent a PM-kibocsátás, elsősorban az oxigéntartalom és az egyenes szénláncok arányának növekedése miatt.



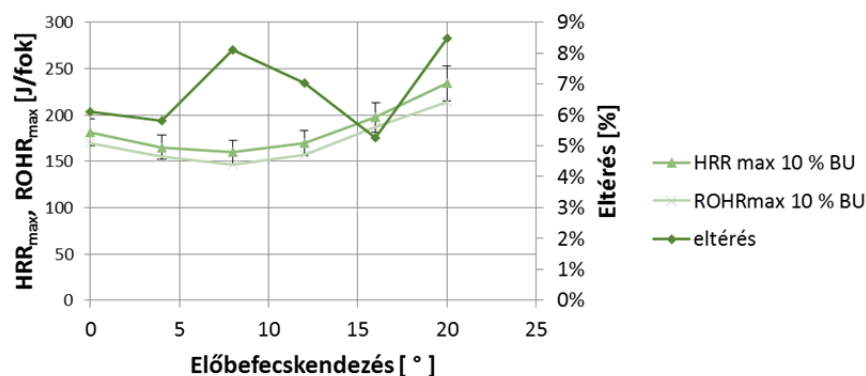
67. ábra A tüzelőanyag cseppek sebessége és az égési hőfelszabadulás a felső holtpont esetén, AVL Fire CFD számítási eredmény, 8 fokos előbefeckendezés, D2 tüzelőanyag esetén

Végezetül a későbbi összehasonlítások miatt összefoglaltam táblázatosan a négy vizsgált emissziós komponens változását a gázolaj esetén mért kibocsátásához képest.

	NOx vált. [%]	THC vált. [%]	CO vált. [%]	PM vált. [%]
5 % BU	-2,3 %	-12,7 %	-22,7 %	-13,2 %
10 % BU	1,6 %	-14,6 %	-23,4 %	-24,2 %
20 % BU	1,9 %	-23,3 %	-17,2 %	-35,9 %

6. táblázat A vizsgált emissziós komponensek változása a gázolajhoz képest *n*-butanol bekeverés hatására ($\delta_{NOx} \pm 4,42\%$, $\delta_{CO} \pm 4,63\%$, $\delta_{THC} \pm 4,35\%$, $\delta_{PM} \pm 3,00\%$)

Megemlítendő, hogy e vizsgálatoknál a saját fejlesztésű kiértékelési módszert az AVL Boost programcsomag BURN alrendszerével ellenőriztük. Ebben a rendszerben meg kell alkotni a motor modelljét és ennek segítségével a mért indikátor diagramok alapján a BURN rutin meghatározza a hasznos hőváltozás (ROHR, Rate of Heat Release), valamint a hőfelszabadulás változást (égéstörvény).



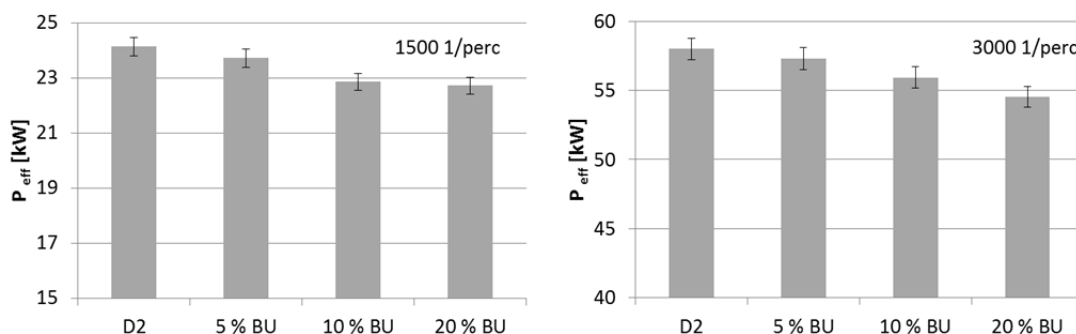
68. ábra A hasznos hőváltozás maximuma (HRR) és a hasznos hőváltozás maximuma az AVL Boost BURN program csomagja alapján (ROHR) B10 tüzelőanyag esetén az előbefecskendezés függvényében [S-11 alapján]

Az eredmények összehasonlítása (68. ábra) alapján megállapítható, hogy a saját fejlesztésű számítási eljárás megfelelő pontosságú, viszont megjegyzendő, hogy a BURN rutin filterezési eljárása nem ismert, továbbá 1 ° felbontású eredményeket ad, ami sokszor nem megfelelő pontosság.

4.3. TERHELÉS VÁLTOZÁS HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA

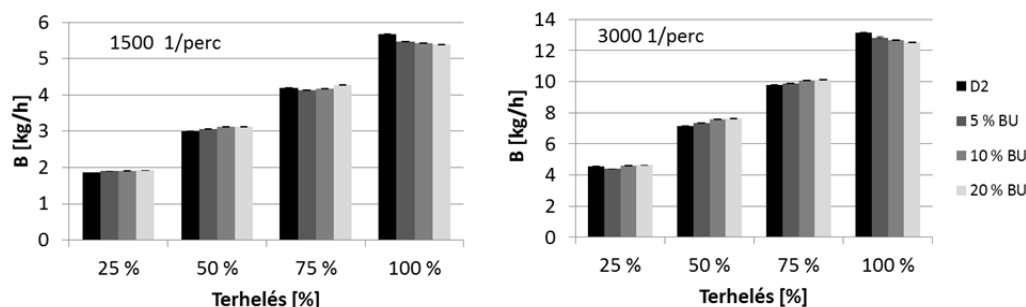
A következő vizsgálatot egy korszerűbb, magas kompresszióviszonyú ($\varepsilon=19$ [-]), de még nem CR rendszerű, EURO2-es környezetvédelmi besorolású személygépjármű motoron végeztem. A motor Bosch VE elosztórendszerű adagolószivattyús, Omega égésterű és szabályozott feltöltésű. Az égés szempontjából fontos, hogy úgynevezett kettős rugós befecskendezővel rendelkezik, melynek segítségével a befecskendezés elején kisebb mennyiségű tüzelőanyag kerül befecskendezésre, így az előkevert szakasz jól kontrollált. A vizsgálatok során a motoron semmilyen átalakítást nem végeztem.

A méréseket több fordulatszámon végeztem, itt az 1500 1/perc és a 3000 1/perc fordulatszámon végzett méréseket mutatom be, mivel a többi fordulatszámon csak a teljes terhelésen végeztem méréseket, részterhelésen nem. Továbbá bemutatom az alapjáratú emissziós eredményeket is. Ezeknél a méréseknél –hasonlóan az előző kísérletekhez – 5, 10 és 20 V/V % *n*-butanol elegyeket vizsgáltam.



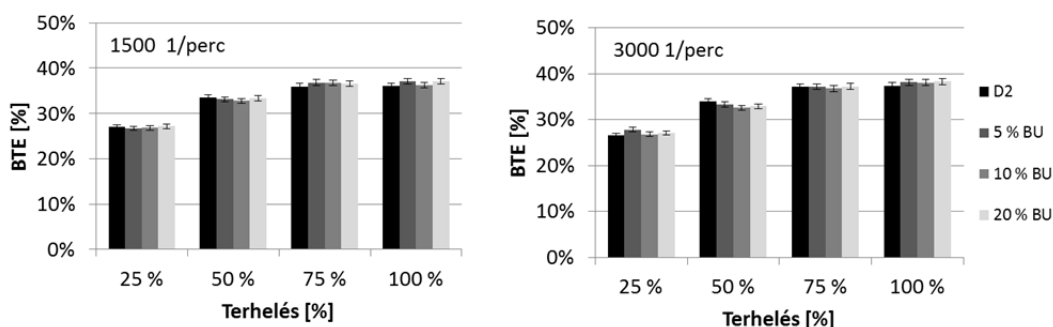
69. ábra A teljes terhelésen mért effektív teljesítmény különböző elegyek esetén 1500 és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10] ($\delta_{P_{eff}}, \pm 1,38\%$)

A vizsgálatok első lépésben meghatározásra került a 100 % gázkar álláshoz tartozó teljesítmény (69. ábra). Itt jól megfigyelhető, hogy a teljesítmény az alkohol bekeverés növelésével csökkent. Ennek oka, hogy a motorvezérlő elektronikája (EDC) határolta a dózist és az alkohol bekeveréssel csökkent a bevitt tüzelőanyag fűtőértéke.



70. ábra A tüzelőanyag-fogyasztás (B) különböző elegyek és terhelések esetén 1500 és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10] ($\delta_B, \pm 0,23\%$)

A részterheléseket viszont úgy állítottam be, hogy a gázolajjal mért maximális teljesítmény 75 %-a, 50 %-a és 25 %-a legyen, tehát a különböző *n*-butanol elegyek esetén ugyanazt a teljesítményt adta le a motor a részterheléseken. Ennek hatására megfigyelhető volt a tüzelőanyag-fogyasztások alakulásában is a növekvő trend a részterhelések esetén (70. ábra).



71. ábra Az effektív hatásfok (BTE) különböző elegyek és terhelések esetén 1500 és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10] ($\delta_{BTE}, \pm 1,65\%$)

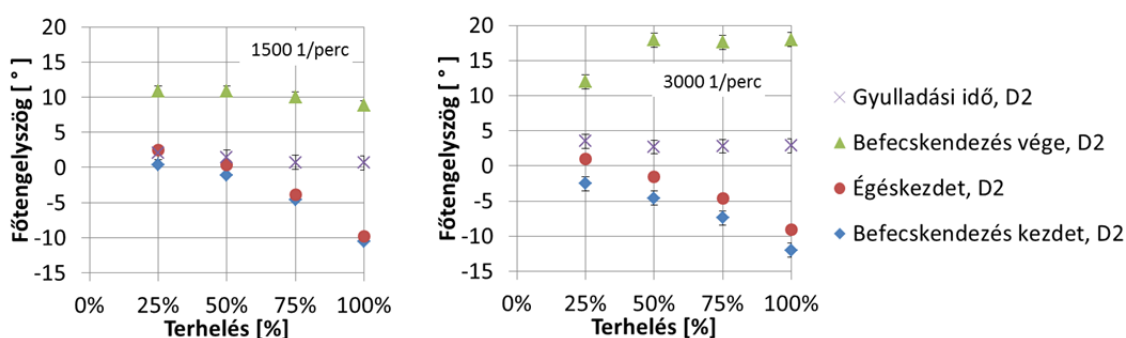
Az effektív hatásfok szempontjából megfigyelhető, hogy a terhelés növelésével az elméleti megfontolásoknak megfelelően nőtt a hatásfok, a fordulatszám növelésével viszont nem emelkedett jelentősen. Az alkohol bekeverés növelésével viszont jelentős változás nem volt megfigyelhető, mint azt már az előző két részben is tapasztaltam, az *n*-butanol bekeverés hatására a növekvő gyulladási idő, a párolgás hőelvonása és az

előkevert szakasz intenzitás növekedés hatásai közel kiegyenlíthetik egymást a vizsgált üzemi tartományokban.

4.3.1.A TERHELÉSVÁLTOZÁS HATÁSA ÉGÉSI FOLYAMATRA

Ennél a motornál – eltérően az előzőekben vizsgált motornál (4.2.1 fejezet)– jellemző a rövid gyulladási idő. Első lépésben csak gázolaj tüzelőanyag (D2) üzemet vizsgálva (72. ábra) megfigyelhető, hogy a motorvezérlő elektronika (EDC) hogyan változtatta a beállításokat az alacsony a károsanyag-kibocsátás és tüzelőanyag-fogyasztás érdekében.

Az alacsony NO_x-kibocsátás érdekében mind 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon 25 %-os és 50 %-os terhelése esetén kis befecskendezési szöget alkalmazott az EDC, így az égési folyamat a felső holtpont környékén kezdődött. 75 %-os és 100 %-os terhelések esetén növelte az előbefecskendezést az alacsony tüzelőanyag-fogyasztás érdekében.



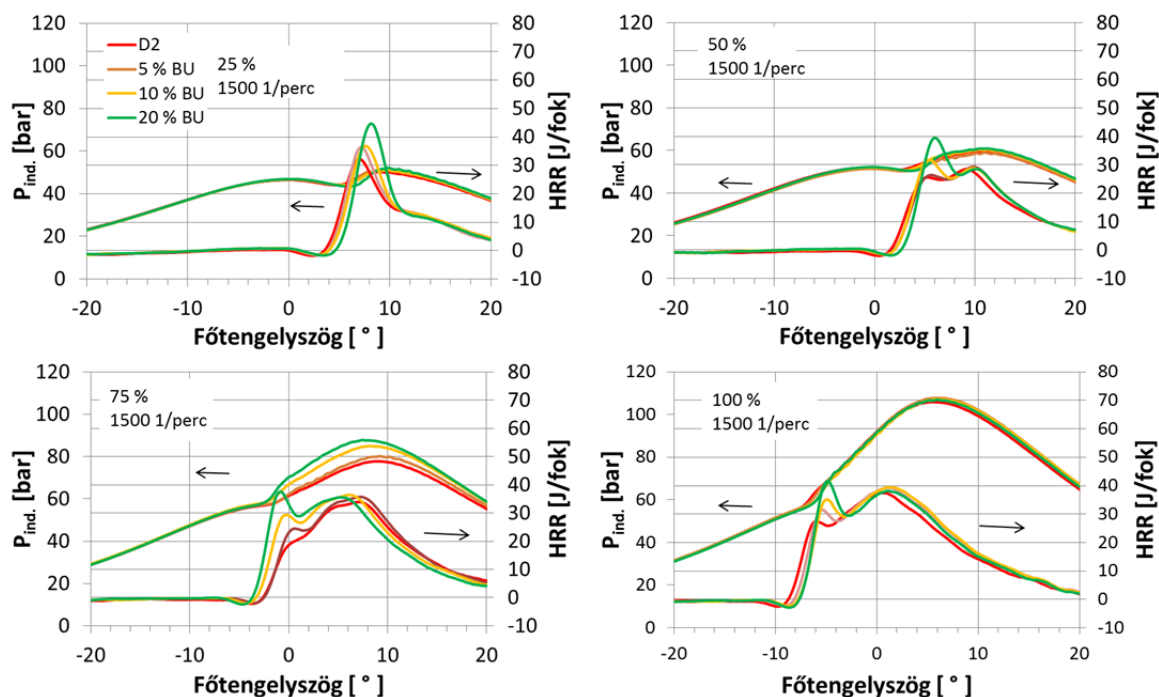
72. ábra A befecskendezés kezdet, égéskezdet, befecskendezés vége és a gyulladási idő gázolaj esetén különböző terheléseken 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon

A rövid gyulladási idő hatására jól látható, hogy –ellentétben az előző motorral (61. ábra)– a tüzelőanyag égése már a befecskendezés elején elkezdődött. A gyulladási idő és a befecskendezés hosszarány legnagyobb értéke (1500 1/perc, 25 % terhelés) 25 % körüli volt, de nagy terhelésen ez az érték lecsökkent: 1500 1/perc fordulatszám esetén ~4 %-ra, míg 3000 1/perc fordulatszám esetén ~10 %-ra.

Az *n*-butanol bekeverés hatása az égési folyamatra és az indikált nyomásra 1500 1/perc fordulatszám esetén a 73. ábrán, míg 3000 1/perc fordulatszám esetén a 74. ábrán látható.

1500 1/perc fordulatszámon 25 %-os terhelésen a befecskendezés a felső holtpont után ~1 °-nál kezdődött, az égési folyamat gázolaj esetén már ~3 °-on elkezdődött. Ebben az üzemi pontban jellegzetes „kétpúpú” indikátordiagram alakult ki. Az *n*-butanol bekeverés növelésével a gyulladási idő növekedett, a hasznos hőváltozás maximuma gázolaj esetén ~6,5 °-nál van. *N*-butanol bekeverés növelésével – hasonlóan az égéskezdethez – ez is hátrébb tolódott: a felső holtpont után, 20 V/V % *n*-butanol esetén ~8 °-ra és a maximum értéke jelentősen megnövekedett. A befecskendezés vége közel egybeesett a diffúz égési folyamat kezdetével. 50 %-os terhelésen az EDC korábbra állította a befecskendezés kezdetét. Ezen a terhelésen is az indikált nyomás és a hasznos hőváltozás is „kétpúpú” volt, mivel ebben az esetben is az előkevert szakasz hasznos hőváltozás maximuma a felső holtpont után volt. A megnövekedett dózis miatt a tüzelőanyag nagyobb részének égése –elsősorban kis *n*-butanol bekeverés esetén– a diffúz égési részben zajlott le. Az alkohol bekeverés

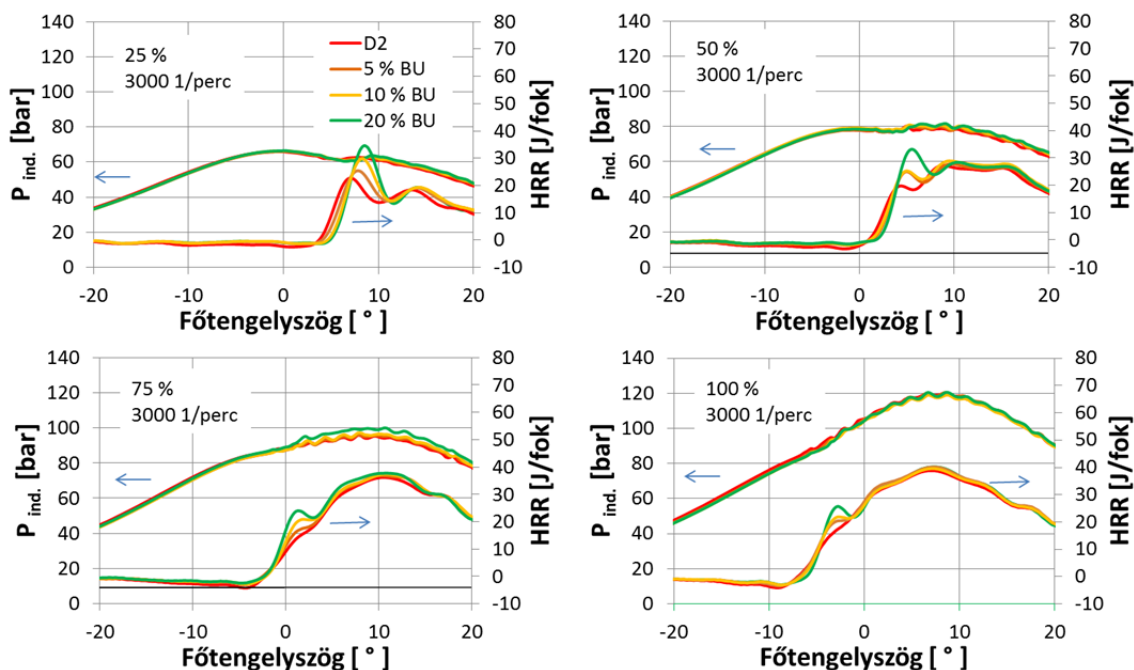
növelésével ebben az esetben is nőtt a gyulladási idő, az előkevert égés hasznos hőváltozásához tartozó maximuma szignifikánsan megnőtt és későbbre tolódott, gázolaj esetén a maximum $\sim 4,5^\circ$ -nál, míg 20 V/V % *n*-butanol esetén $\sim 6^\circ$ -nál volt.



73. ábra Az indikált nyomás (P_{ind}) és a hasznos hő változása a főtengelyszög függvényében különböző terheléseken és *n*-butanol részarány esetén 1500 1/perc fordulatszám [S-10] ($\delta_{Pb} \pm 2,66\%$, $\delta_{HRR} \pm 5,49\%$)

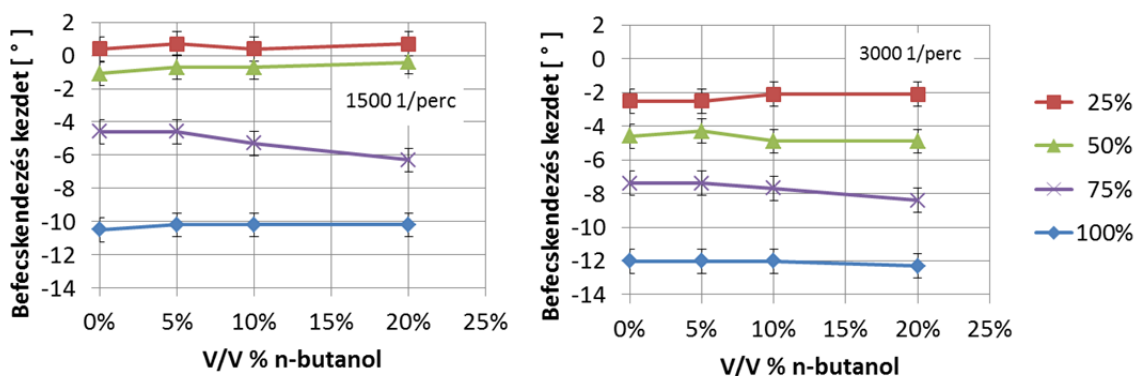
A 75 %-os terhelés esetén az eddig tapasztaltak jelentősen megváltoztak. Az égési folyamat a 20 V/V %-os *n*-butanol – elegynél kezdődött először. Legkésőbb a legnagyobb cetánszámú gázolaj égése kezdődött, ami ellentmondásnak tűnik. Az előkevert szakasz hasznos hőváltozás maximumai az eddigieknek megfelelően növekedtek, viszont a maximumot legelőször a 20 V/V %-os *n*-butanol elegy esetén érték el. Ennek magyarázata a 75. ábrán látható. A dózis növekedésével (70. ábra) ebben a terhelési tartományban az EDC növelte az előbefecskendezési szöget, gázolaj esetén $4,6^\circ$ -ról 10 V/V % *n*-butanol esetén $5,3^\circ$ -ra, majd 20 V/V % *n*-butanol esetén $6,3^\circ$ -ra. Emiatt ezt a mérési pontot a későbbiekben nem veszem figyelembe az értékeléseknél, de röviden bemutatom, mivel ebben a pontban egy fontos paraméter változott az *n*-butanol bekeverésével. Fontos megállapítás, hogy a korszerű motoroknál, a más-más tüzelőanyagoknál, illetve összehasonlítások esetén figyelembe kell venni az EDC beavatkozásait, a vezérlési térképek esetleges módosulását. A 100 %-os terhelés esetén az *n*-butanol – bekeverés hatására a 25 %-os és az 50 %-os terhelésekhez képest mind az égéskezdet, mind a hasznos hőváltozás hasonlóan alakult. Míg gázolaj esetén ezen a terhelésen nem különült el jelentősen az előkevert égés, addig *n*-butanol – bekeverés esetén jól különült.

A 3000 1/perc fordulatszám 25 %-os terhelésen a befecskendezés a felső holtpont előtt $\sim 2,5^\circ$ -nál, és az égési folyamat már $\sim 1^\circ$ -nál kezdődött gázolaj esetén. Az *n*-butanol bekeverés növelésével a gyulladási idő növekedett, a hasznos hőváltozás maximuma gázolaj esetén $\sim 7^\circ$ -nál volt, *n*-butanol bekeverés növelésével – hasonlóan az égéskezdethez – ez is hátrébb tolódott, 20 V/V % *n*-butanol esetén $8,4^\circ$ -ra. Ennek hatására itt is „kétpúpú” indikátordiagram alakult ki.



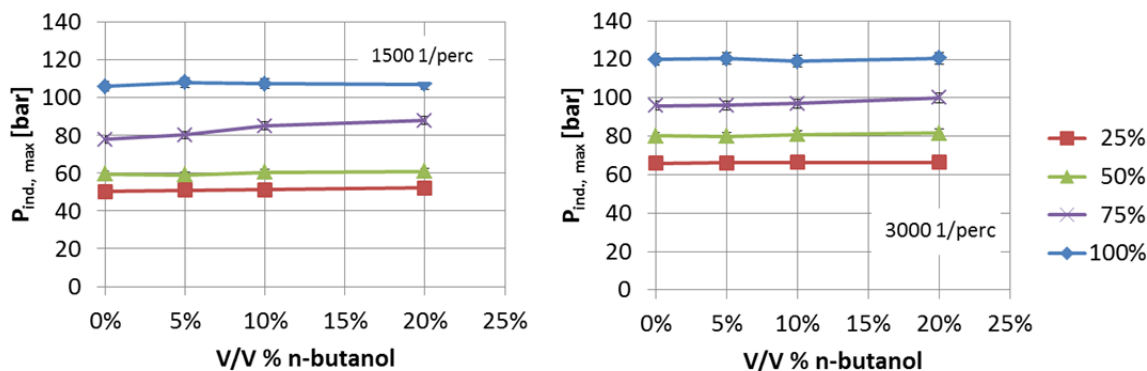
74. ábra Az indikált nyomás (P_{ind}) és a hasznos hőváltás a főtengelyszög függvényében különböző terheléseken és *n*-butanol részarány esetén 3000 1/perc fordulatszámon [S-10] ($\delta_{P_{ind}} \pm 2,66\%$, $\delta_{HRR} \pm 5,49\%$)

Az 50 %-os terhelésnél gázolaj esetén az előbefecskendezési szög $4,6^\circ$ ($-4,6^\circ$), az égéskezdet $-1,5^\circ$ volt. Az alkohol bekeverés hatására a szokásos trendeket lehetett megfigyelni: nőtt a gyulladási idő, az előkevert égés hasznos hőváltás maximuma szignifikánsan megnőtt, és későbbre tolódott. A 75 %-os terhelés esetén hasonlókat tapasztalhattunk, mint 1500 1/perces fordulatszámon. Itt a gázolaj esetén az előbefecskendezési szög $7,4^\circ$ és 20 V/V % *n*-butanol esetén ez $8,4^\circ$ -ra nőtt, ennek hatása ebben az esetben is megfigyelhető volt mind az indikátor diagramon, mind a hasznos hőváltáson. A 100 %-os terhelés esetén a 25 %-os és az 50 %-os terheléshez hasonlóan alakult mind az égéskezdet, mind a hasznos hőváltás módosulása. Ezen a fordulatszámon a megnövekedett dózis hatására a diffúz égési szakasz jelentősen megnövekedett.



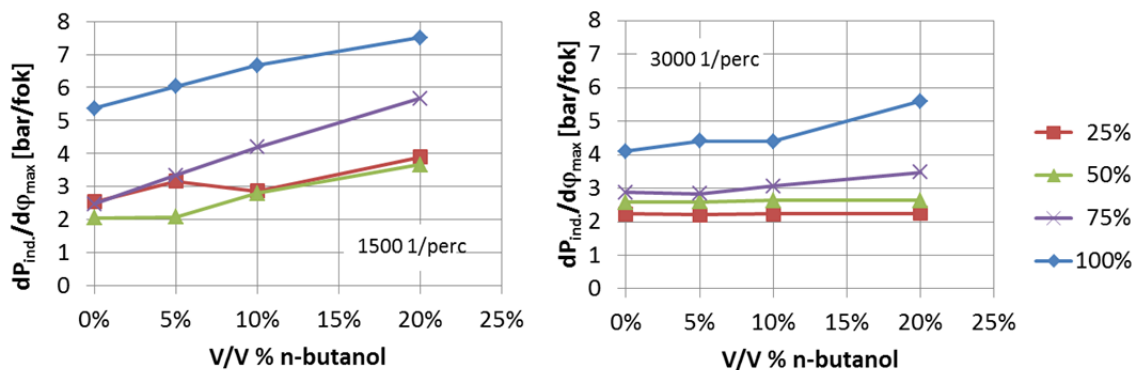
75. ábra A befecskendezés kezdet különböző terheléseken és *n*-butanol részarányok esetén 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámon [S-10 alapján]

A 75. ábra mutatja be a befecskendezés kezdet időpontjait. Eltekintve mind a két vizsgált fordulatszámon a 75 %-os terheléses esettől, megállapítható volt, hogy a mért előbefecskendezés a meghatározás pontosságával egyezett.



76. ábra Az indukált nyomás (P_i) maximumok különböző terheléseken és *n*-butanol részarányok esetén 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10 alapján] ($\delta_{P_i} \pm 2,66\%$)

Az indukált nyomásmaximum nőtt a terheléssel, viszont nem mutatott jelentős eltéréseket az alkohol bekeverés hatására, eltekintve a 75 %-os terhelésektől (76. ábra). 1500 1/perc fordulatszámon a legnagyobb eltérés 25 %-os terhelés esetén és 20 V/V % *n*-butanol esetén +4 % volt a gázolajhoz képest. 75 % terhelés esetén a maximális nyomás folyamatosan nőtt, 20 V/V % *n*-butanol esetén az eltérés +13 % volt az eltérő befecskendezés kezdet hatására. A 3000 1/perc fordulatszámon kisebbek az eltérések. Legnagyobb a változás 50 %-os terhelés és 20 V/V % *n*-butanol elegy esetén: +2 % volt a gázolajhoz képest. Itt is 75 % terhelés esetén a maximális nyomás folyamatosan nőtt, de 20 V/V % *n*-butanol esetén az eltérés csak +4 % volt a gázolajhoz képest.

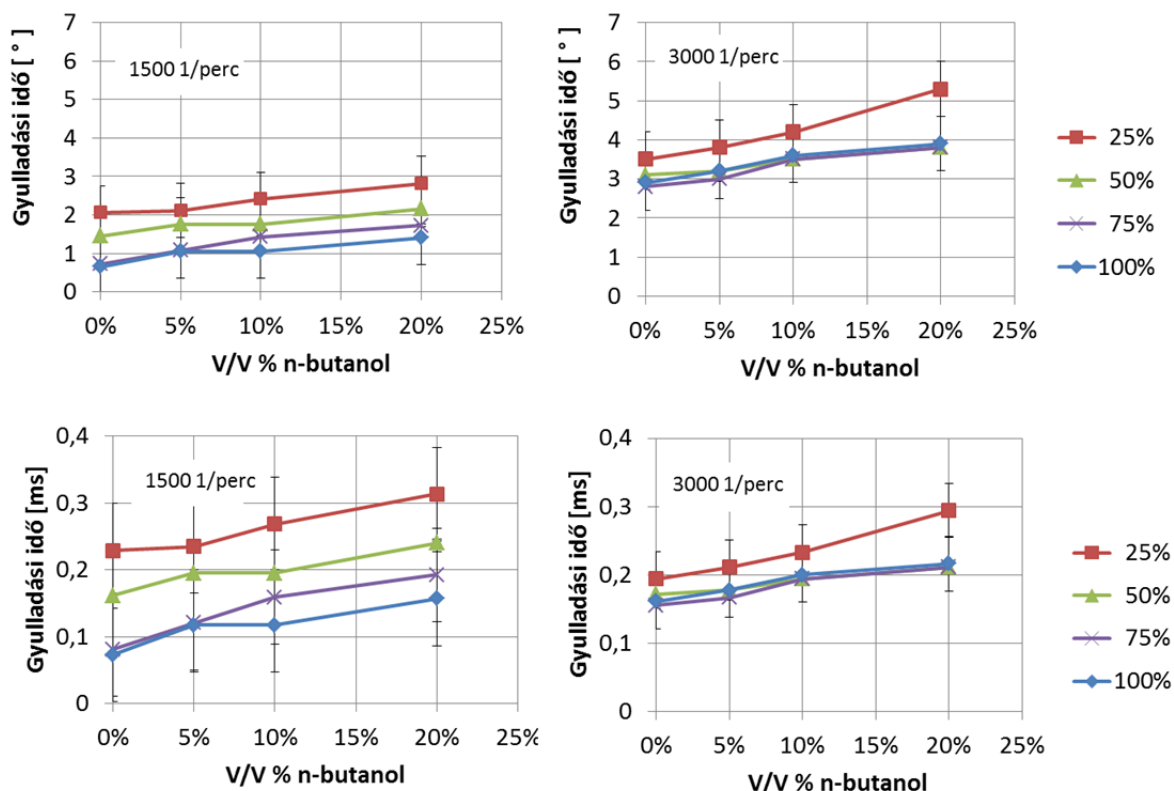


77. ábra Az indukált nyomásváltozás maximumai különböző terheléseken és *n*-butanol részarányok esetén 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10 alapján]

Az indukált nyomásváltozás (77. ábra) fontos paraméter, többek között a motor járás egyenlősége szempontjából. Az 1500 1/perc fordulatszámon, gázolaj esetén 50 %-os terhelés során volt legkisebb az indukált nyomásváltozás, de 25 %-os és 75 %-os terhelés esetén jelentősen nem tértek el egymástól alkohol bekeverés nélküli esetben. Jól megfigyelhető, hogy az alkohol bekeverés hatására a nyomásváltozás az elvártaknak megfelelően alakult az előkevert szakasz intenzitásának növekedésével, mivel az indukált nyomásváltozás maximumok mind az előkevert égés tartományban voltak. Eltérés egyedül 25 %-os terhelés esetén volt megfigyelhető, itt az előkevert égés az expanzióban volt és az alkohol bekeverés hatására kialakuló gyulladási idő miatt az előkevert égés nyomás növelése nem tudta kompenzálni az expanzió hatását.

A 3000 1/perc fordulatszámon eltérő volt a helyzet, itt alkohol bekeverés nélküli esetben legkisebb érték a 25 %-os terhelés esetén volt. A terhelés növelésével nőtt az

indikált nyomásváltozás, de az értékek jelentősen nem tértek el egymástól 75 %-os terhelésig, 100 %-os terhelés esetén viszont jelentős a növekedés, mivel ezen a terhelésen az égési folyamat a felső holtpont előtt kezdődött. Alkohol bekeverés hatását vizsgálva megfigyelhető, hogy 25 %-os és 50 %-os terhelés esetén nem volt észlelhető változás, ennek oka, hogy az indikált nyomásváltozás maximuma a kompresszió szakaszban volt. A 75 %-os és 100 %-os terhelés esetén már előkevert szakasz szögtartományában volt az indikált nyomásváltozás maximuma, így itt az alkohol bekeverés hatása már jól megfigyelhető volt.

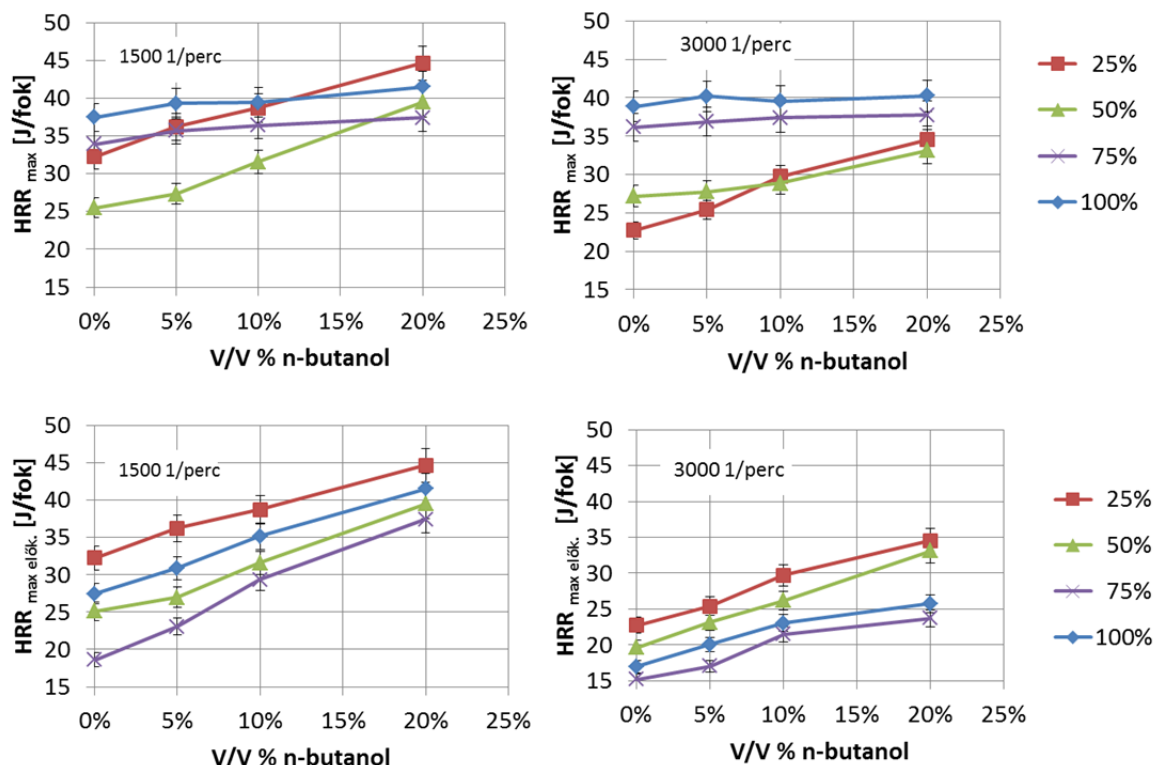


78. ábra A gyulladási idő különböző terheléseken és n-butanol részarányok esetén 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10 alapján] ($\sigma_{\bar{y}} \pm 0,72^\circ$)

A gyulladási idő (78. ábra) legkisebb mind a két fordulatszámon nagy terhelésen volt és a terhelés csökkentésével nőtt. Ez annak ellenére történt, hogy az előbefecskendezés a terhelés növelésével egyre inkább a felső holtpont elé került, de mivel a motor feltöltött, ezért nőtt a befecskendezés kezdeti nyomás és hőmérséklet is a terheléssel. Az alkohol bekeverés növelésével a gyulladási idő is növekedett, a fordulatszám növelésével a gyulladási idő fokban meghatározva nőtt. Viszont időben vizsgálva megállapítható, hogy a trendek közel megegyeztek, de 3000 1/perc fordulatszámon, 25 %-os terhelés esetén csökkent a gyulladási idő az 1500 1/perc fordulatszámhoz képest. Fontos megjegyezni, hogy 75 %-os terhelésen, elsősorban 1500 1/perc fordulatszámon az eltérő trend oka szintén az előbefecskendezés változása volt.

A hasznos hőváltás (HRR) maximuma (79. ábra) gázolaj esetén a legalacsonyabb 50 %-os terhelés esetén volt 1500 1/perc fordulatszámon, ezt a gyulladási idő és a hasznos hőváltás főtengeleyszög szerinti változása (73. ábra) indokolja. Ebben az esetben a 25 %-os terheléshez képest a gyulladási idő csökkent, így mind az előkevert HRR maximum csökkent, a diffúz égési szakasz HRR maximuma nőtt és közel

ugyanakkora volt, így mind a két maximum érték kicsi. Ettől az esettől eltekintve a terhelés növelésével nőtt a hasznos hőváltás maximuma, de gázolaj esetén az diffúz égési szakasz intenzitása nőtt jelentősen a nagy terheléseken (75 %-os és 100 %-os).



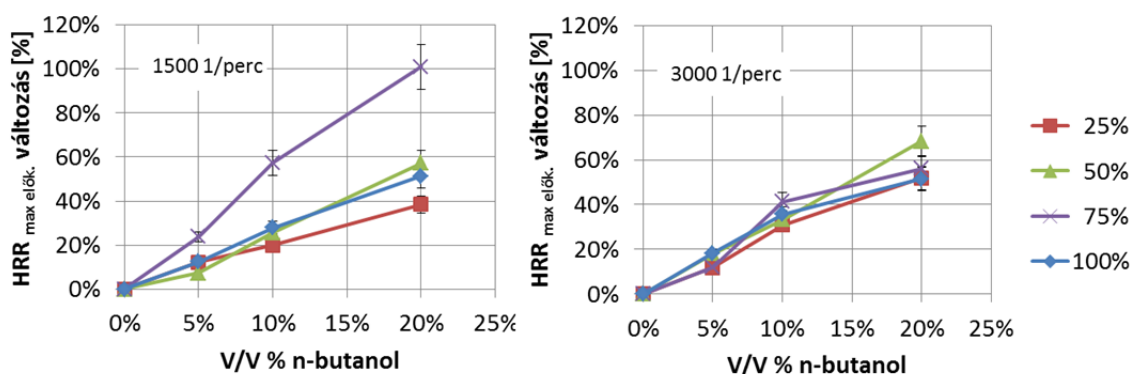
79. ábra A hasznos hőváltás (HRR) maximuma (felül) és az előkevert szakasz hasznos hőváltása maximuma (alul) különböző terheléseken és n -butanol részarányok esetén 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10 alapján] ($\delta_{HRR} \pm 5,49\%$)

Alkohol bekeverés hatására a 25 %-os és 50 %-os terhelések esetén a maximum értékek növekedtek. Nagyobb terhelések esetén az alkohol bekeveréssel (5 V/V % bekeverés esetén) a maximum értékek növekedtek, viszont nagyobb alkoholorészarány esetén nem volt megfigyelhető jelentős változás. A 25 %-os terhelés esetén a maximum értékek az előkevert szakaszban voltak, így a befecskendezés során gyorsabban kigőzölgő alkohol növelte az előkevert szakasz intenzitását. Az 50 %-os terhelés esetén 10 V/V % n -butanol bekeverés hatására az előkevert szakasz intenzitása lett a nagyobb és ez a bekeverés növelésével tovább növekedett. A 75 %-os és 100 %-os terhelések esetén is megfigyelhető volt, hogy 0-tól 10 V/V % n -butanol bekeveréséig a diffúz szakaszhoz tartozó HRR maximum értékek voltak a nagyobbak, mint az előkevert szakasz maximum értékei, viszont 20 V/V % bekeverés esetén már az előkevert szakaszhoz tartozó maximum értékek lettek a nagyobbak.

A 3000 1/perc fordulatszámon a legalacsonyabb HRR maximum értékek gázolaj esetén a 25 %-os terheléshez tartoztak, majd a terhelés növekedésével a maximum értékek is növekedtek (74. ábra). Megfigyelhető, hogy elsősorban a nagyobb dózis miatt a diffúz égés szakasza megnövekedett és a hasznos hőváltás maximuma is ebben a szakaszban volt, kivéve a 25 %-os terhelést, ahol már jelentősebb volt a diffúz szakasz – összehasonlítva az 1500 1/perc fordulatszámmal. Alkohol bekeverés növelésének hatására az előkevert szakasz HRR maximuma növekedett, 50 %-os terhelésnél 20 V/V % bekeverés esetén már az előkevert szakasz lett a legnagyobb,

ellentétben a 75 %-os és 100 %-os terheléssel, ahol továbbra is a diffúz szakasz maximuma maradt a nagyobb, így ott az *n*-butanol bekeverés hatása nem volt jelentős.

Mivel az eddigi vizsgálatok alapján az alkohol bekeverés az előkevert szakaszban fejtette ki a hatását, ezért vizsgáljuk csak az előkevert szakasz maximum értékeit (79. ábra alsórész). Ebben az esetben jól látható, hogy mind a két fordulatszámon a legnagyobb volt a hasznos hőváltozás maximuma 25 % terhelésen, mivel itt volt a legintenzívebb az előkevert égés a nagy gyulladási idő és a kis dózis miatt. Nagyobb terheléseken a gyulladási idő és a terheléssel növekvő dózis hatására változtak az eredmények.

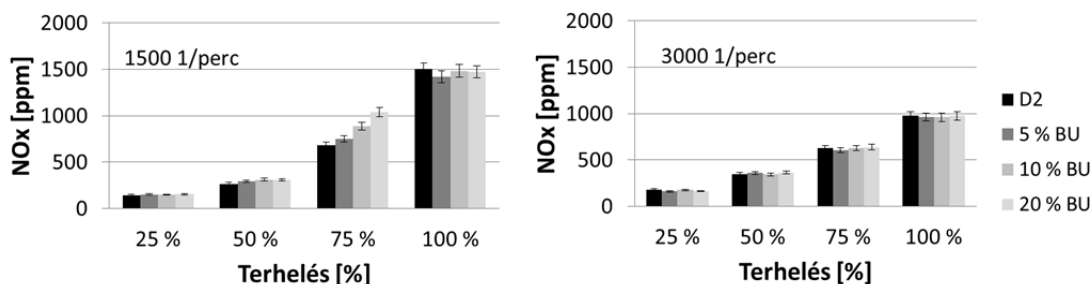


80. ábra Az előkevert szakasz a hasznos hőváltozás (HRR) maximumának változása a gázolajhoz képest különböző terheléseken és *n*-butanol részarány esetén 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10 alapján] ($\delta_{HRR} \pm 5,49 \%$)

Az alkohol bekeverés hatására az előkevert szakasz hasznos hőváltozás (HRR) maximum értékei folyamatosan növekedtek és ez a növekedés közel arányos a bekeverés mértékével (80. ábra). Az 1500 1/perc fordulatszámon legkisebb a hatása az *n*-butanol bekeverésének 25 % terhelésen, mivel itt a legnagyobb a gyulladási idő. A legnagyobb 75 % terhelésen, mivel itt az előbefecskendezési szög is változott (75. ábra). A 3000 1/perc fordulatszámon jelentős eltérés nem volt tapasztalható a négy terhelés esetén.

4.3.2. A TERHELÉSVÁLTOZÁS HATÁSA KÁROSANYAG-KIBOCSÁTÁSRA

A NO_x-kibocsátás a terhelés növelésével mind a két fordulatszámon nőtt, viszont kisebb mértékben nőtt nagyobb fordulatszámon, ez a turbótöltés hatására kialakuló nagyobb légfeszüléssel és a rövidebb keletkezési idővel [S-2] indokolható.

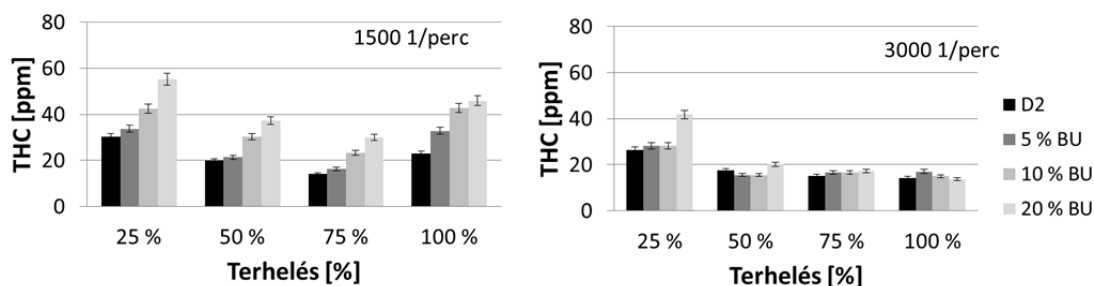


81. ábra A nitrogénoxid (NO_x) kibocsátás különböző terheléseken és *n*-butanol részarány esetén 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10] ($\delta_{NOx} \pm 4,42 \%$)

A 20 V/V % *n*-butanol bekeverés hatására a legnagyobb növekedés 1500 1/perc fordulatszámon 50 %-os terhelés esetén 16 % volt, a legnagyobb csökkenés 100 %-os terhelés esetén 5 V/V % *n*-butanol elegynél 6 % (-6 %).

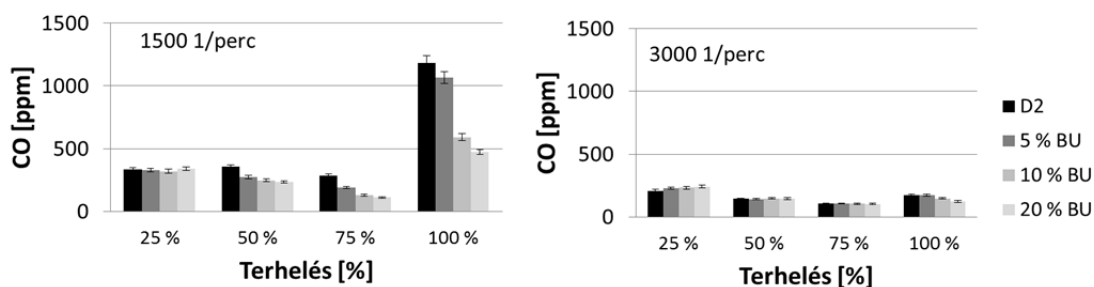
A 3000 1/perc fordulatszámon legnagyobb a növekedés 50 %-os terhelés esetén 20 V/V % *n*-butanol (20 % BU) elegynél 4 % volt, a legnagyobb csökkenés 25 %-os terhelés esetén 5 V/V % *n*-butanol elegynél 10 % volt (81. ábra). Ez az *n*-butanol nagyobb hőelvonásával, növekvő gyulladási idejével és az előkevert égés intenzitásának növekedésével magyarázható. Továbbá mind a két fordulatszámon a 75 %-os terhelés esetén az előbefecskendezési szög változott (75. ábra), ennek jelentős hatása elsősorban 1500 1/perc fordulatszámon figyelhető meg, így ezzel a terheléssel a NO_x-kibocsátás szempontjából nem foglalkozom [S-2].

Az el nem égett szénhidrogén (THC) kibocsátás 1500 1/perc fordulatszámon 75 %-os terhelésig csökkent, majd 100 %-os terhelésen ismét növekedett. A 3000 1/perc fordulatszámon a terheléssel folyamatosan csökkent a THC-kibocsátás gázolaj esetén. Az alkohol bekeverés hatására az alacsonyabb fordulatszámon alkohol bekeverés a THC-kibocsátás folyamatosan nőtt, míg 3000 1/perc fordulatszámon jelentős eltérés nem volt megfigyelhető. Az alkohol bekeverés hatására legnagyobb növekedés 1500 1/perc fordulatszámon 75 %-os terhelés esetén 20 V/V % *n*-butanol elegynél 114 % volt, de jelentős volt 100 %-os terhelés esetén is, 99 %. A 3000 1/perces fordulatszámon a legnagyobb növekedés 25 %-os terhelés esetén 20 V/V % *n*-butanol elegynél volt, ez 58 %. Az el nem égett szénhidrogén kibocsátás dízel motorokban elsősorban az olyan helyeken alakul ki, ahol a tüzelőanyag-levegő keveréke annyira dús lesz tüzelőanyagban, hogy nem tud elégni. Az alkohol bekeveréssel növekvő kibocsátás inkább a lokálisan szegény keverék hatása.



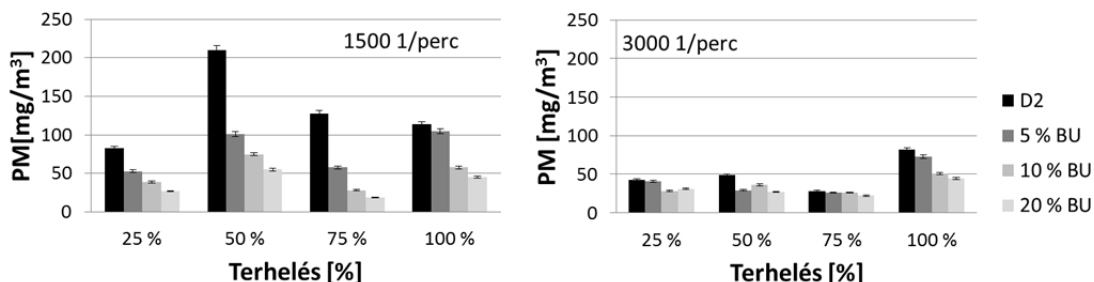
82. ábra Az el nem égett szénhidrogén (THC) kibocsátás különböző terheléseken és *n*-butanol részarány esetén 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10] ($\delta_{THC} \pm 4,35 \%$)

Ebben az esetben is hasonló figyelhető meg: alacsony fordulatszámon a kisebb dózis miatt ez a hatás jelentős volt, míg nagyobb fordulatszámon a növekvő dózis miatt kevésbé volt jelentős. Érdemes összehasonlítani ugyanezeket az értékeket az előzőekben vizsgált motor adataival, amely szintén alátámasztja ezt a feltételezést (66. ábra).



83. ábra A szénmonoxid (CO) kibocsátás különböző terheléseken és *n*-butanol részarány esetén 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10] ($\delta_{CO} \pm 4,63\%$)

A CO-kibocsátás gázolaj esetén a két fordulatszámon 75 %-os terhelésig kis mértékben csökkent, majd megnőtt, legnagyobb volt a növekedés 1500 1/perc fordulatszámon (83. ábra). Ebben az esetben is jelentős volt a feltöltés hatása, mivel a CO-kibocsátás elsősorban a lokális légfeleslegtől függ. Az alkohol bekeverés hatására 1500 1/perc fordulatszámon a kibocsátás csökkent, a legnagyobb csökkenés 100 %-os terhelés esetén 20 V/V % *n*-butanol elegynél volt, 60 % (-60 %). A 3000 1/perc fordulatszámon - mivel itt lényegesen nagyobb volt a légfelesleg-tényező – az alkohol bekeverés nem volt jelentős hatással, legnagyobb a növekedés 25 %-os terhelés esetén 20 V/V % *n*-butanol elegynél volt, 16 %. Itt feltehetőleg a párolgás hőelvonása miatt csökkenő hőmérséklet hatása volt jelentősebb, míg a legnagyobb csökkenés 100 %-os terhelés esetén 20 V/V % *n*-butanol elegynél volt, ez 29 %. Elméleti megfontolások alapján az *n*-butanol párolgása csökkenti az átlaghőmérsékletet, ami a CO-kibocsátást növeli, viszont az oxigéntartalom miatt a kibocsátás csökkenhet, itt az eredmények alapján ez utóbbi hatás érvényesült.



84. ábra A részecske (PM) kibocsátás különböző terheléseken és *n*-butanol részarány esetén 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10] ($\delta_{PM} \pm 3,00\%$)

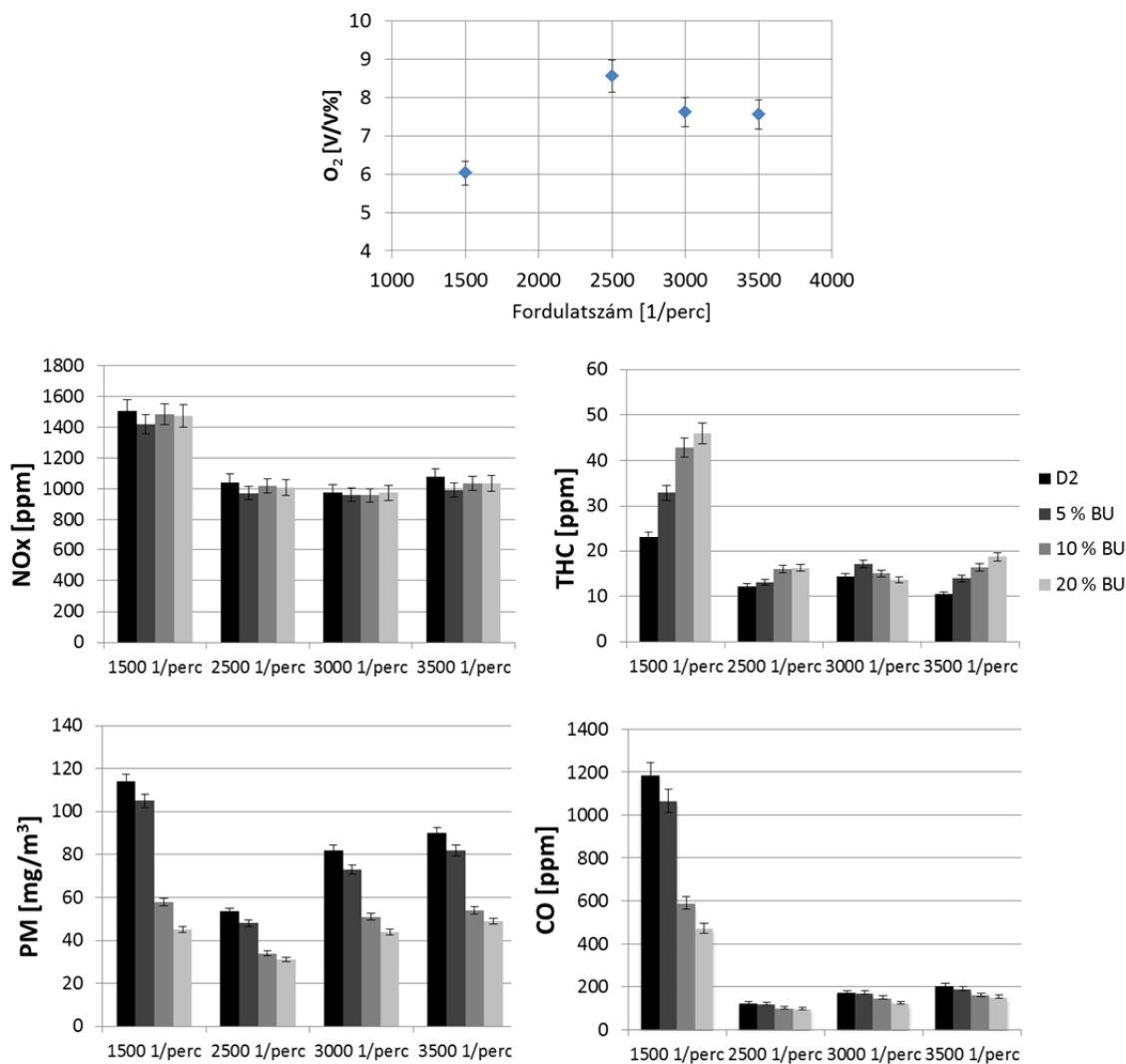
A részecske (PM) kibocsátás gázolaj tüzelőanyag esetén, mind a két vizsgálati fordulatszámon kezdetben növekedett 50 %-os terhelésig, majd ahogy beindult a feltöltés, elkezdett csökkenni 75 %-os terhelésen (84. ábra). Az 1500 1/perc fordulatszámon - mivel itt kevesebb a bevitt tüzelőanyag mennyisége – kismértékben csökkent a PM-kibocsátás a terhelés további növelésével. Viszont 3000 1/perc fordulatszámon, mivel a feltöltés nem tudta kompenzálni a dózis növekedését, megnőtt a PM-kibocsátás teljes terhelésen, de fontos megemlíteni, hogy ezen a fordulatszámon, minden terhelésen igen alacsony értéken maradt.

Az alkohol bekeverés hatására 1500 1/perc fordulatszámon a kibocsátás jelentősen csökkent, a legnagyobb csökkenés 75 %-os terhelés esetén 20 V/V % *n*-butanol elegynél 85 % volt. A 3000 1/perc fordulatszámon, mivel itt lényegesen nagyobb a légfelesleg-tényező, az alkohol bekeverés nem volt jelentős hatással - kivéve teljes terhelésen, itt a legnagyobb csökkenés 20 V/V % *n*-butanol elegynél 46 %.

A fordulatszám hatásának vizsgálatához fontos bemutatni a motor kibocsátási értékeit a fordulatszám függvényében teljes terhelésen (85. ábra). A motor fordulatszámának növelése során teljes terhelésen a feltöltés növekedett, 1500 1/perc fordulatszámon volt legalacsonyabb a kipufogógáz O_2 tartalma, azaz a légfelesleg-tényező, a maximumot 2500 1/perc fordulatszámon érte el, majd a szabályzás közel állandó értéken tartotta.

A NO_x - és THC -kibocsátás a fordulatszám növelésével csökkent a nagyobb légfelesleg-tényező miatt, de jelentős lehetett a dózis és a perdület növekedésnek hatása is. A CO - és a PM -kibocsátás egyértelműen a légfelesleg-tényezővel együtt változott.

Az n -butanol bekeverés hatása minden fordulatszámon hasonló, mint amit eddig bemutattam. Viszont fontos megjegyezni, hogy a kibocsátás csökkenésével a bekeverés hatása is csökken.



85. ábra Az oxigén, nitrogénoxid (NO_x), el nem égett szénhidrogén (THC), szénmonoxid (CO) és a részecske (PM) kibocsátás különböző fordulatszámon és n -butanol részarány esetén teljes terhelésen ($\delta_{NO_x} \pm 4,42\%$, $\delta_{CO} \pm 4,63\%$, $\delta_{THC} \pm 4,35\%$, $\delta_{PM} \pm 3,00\%$)

Végezetül, az összehasonlítások miatt, bemutatom táblázatosan a négy vizsgált emissziós komponens átlagos változását 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámon (7. táblázat és 8. táblázat). Azért választottam a két fordulatszám szerinti szétválasztást, mivel megfigyelhető volt, hogy a fordulatszám jelentős hatással volt a kibocsátásra, elsősorban a növekvő levegőmennyiség és hőmérséklet miatt.

A két táblázatból megfigyelhető, hogy a NO_x -kibocsátás szempontjából mind a két esetben az n -butanol bekeverés hatására a kibocsátás kismértékben növekedett, legjelentősebben 1500 1/perc fordulatszámon 10 V/V % és 20 V/V % n -butanol elegyek esetén 50 % terhelésen. Az el nem égett szénhidrogén- (THC) kibocsátás 1500 1/perc

fordulatszámon – arányosan a bekeveréssel – jelentősen növekedett, míg 3000 1/perc fordulatszámon kisebb mértékben, itt 10 V/V % n-butanol elegy esetén volt a legnagyobb a növekmény. A CO-kibocsátás 1500 1/perc fordulatszámon az alkohol bekeveréssel arányosan csökkent, míg 3000 1/perc fordulatszámon nem volt jelentős az alkohol bekeverés hatása. A részecskékibocsátás (PM) jelentősen csökken az alkohol bekeverés hatására, itt is számottevő az eltérés a két fordulatszám esetén. Az 1500 1/perc fordulatszámon az alkohol bekeverés hatása közel kétszer volt nagyobb, mint 3000 1/perc fordulatszámon.

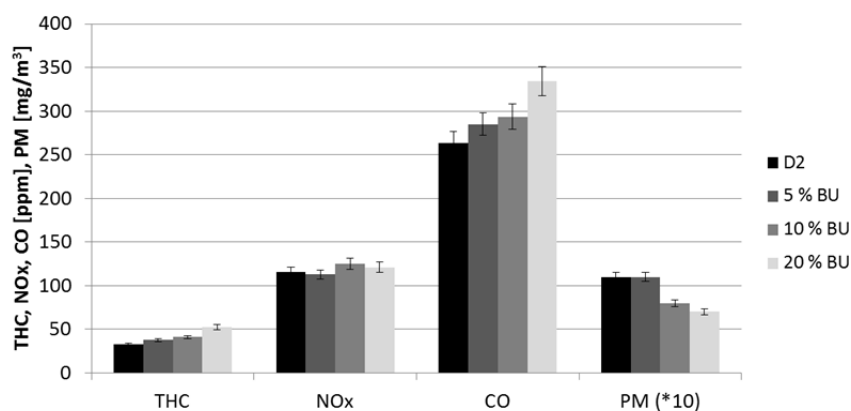
	NOx vált. [%]	THC vált. [%]	CO vált. [%]	PM vált. [%]
5 % BU	3 %	19 %	-17%	-38%
10 % BU	6 %	61 %	-35%	-61%
20 % BU	7 %	95 %	-38%	-72%

7. táblázat A vizsgálat emissziós komponensek változása a gázolajhoz képest az n-butanol bekeverés hatására 1500 1/perc fordulatszámon ($\delta_{NOx} \pm 4,42 \%$, $\delta_{CO} \pm 4,63 \%$, $\delta_{THC} \pm 4,35 \%$, $\delta_{PM} \pm 3,00 \%$)

	NOx vált. [%]	THC vált. [%]	CO vált. [%]	PM vált. [%]
5 % BU	-3 %	6 %	2 %	-16%
10 % BU	-2 %	3 %	0 %	-27%
20 % BU	-1 %	20 %	-3 %	-35%

8. táblázat A vizsgálat emissziós komponensek változása a gázolajhoz képest az n-butanol bekeverés hatására 3000 1/perc fordulatszámon ($\delta_{NOx} \pm 4,42 \%$, $\delta_{CO} \pm 4,63 \%$, $\delta_{THC} \pm 4,35 \%$, $\delta_{PM} \pm 3,00 \%$)

Végül az alapjáratú kibocsátásokról: ebben az üzemmódban az ún. meleg alapjáratot vizsgáltam mind a négy tüzelőanyag elegy esetén. Ebben az üzemmódban rosszak voltak az égés feltételei, kicsi az átlaghőmérséklet, kicsi a perdület, viszont igen magas a légfelesleg-tényező. Az eredmények alapján megállapítható, hogy az alkohol bekeverés hatására a THC-kibocsátás növekedett, a NOx-kibocsátás jelentősen nem változott, a CO-kibocsátás jelentősen növekedett, míg a részecskékibocsátás csökkent (86. ábra).



86. ábra Az el nem égett szénhidrogén (THC), a nitrogénoxid (NOx), a szénmonoxid (CO) és a részecske (PM) kibocsátás alapjáraton (900 1/perc) különböző n-butanol részarány esetén [S-10] ($\delta_{NOx} \pm 4,42 \%$, $\delta_{CO} \pm 4,63 \%$, $\delta_{THC} \pm 4,35 \%$, $\delta_{PM} \pm 3,00 \%$)

4.3.3. TÉZIS 3-5: A KETTŐS ELEGYEK ELÉRT EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

Az összefoglalásban külön fogalmazom az égési folyamattal és a motor üzemi paramétereivel kapcsolatos megállapításokat.

4.3.3.1. A KETTŐS ELEGYEK ÉGÉSI FOLYAMATAIVAL KAPCSOLATOS EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

Az elvégzett három, meglehetősen eltérő égésterű, egyszeres befecskendezésű és keverékképző rendszerű motoron mérési eredmények alapján a következők állapíthatók meg.

Megállapítottam, hogy a gyulladási idő az általam vizsgált égésrendszerű motorokban és kompresszióviszony tartományban egyenes arányban függött a kompresszióviszonytól a gázolaj tüzelőanyag esetén, a következő egyenlet szerint:

$$\tau_{\text{gyulladási idő, D2}} [\text{ms}] = -0,3572 \cdot \varepsilon + 7,0442 \quad (R^2 = 0,92) \quad (2. \text{ egyenlet})$$

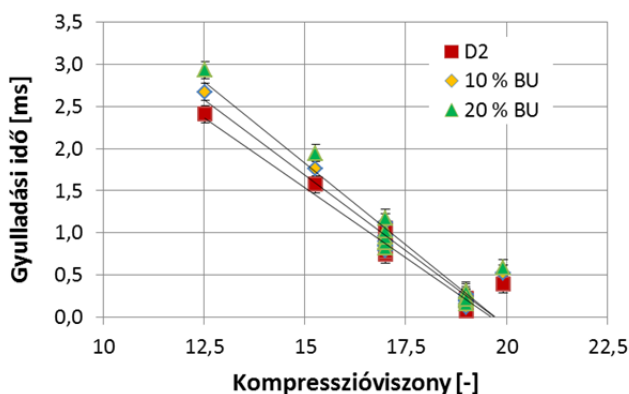
Továbbá az általam vizsgált *n*-butanol bekeverési tartományokban az *n*-butanol bekeverés növelésével a gyulladási idő nőtt és függött az *n*-butanol részarányától. Megállapítható, hogy a kompresszióviszony növelésével a lineáris közelítő függvények meredeksége nőtt a bekevert *n*-butanol arányában 10V/V % bekeverés esetén:

$$\tau_{\text{gyulladási idő, B10}} [\text{ms}] = -0,3315 \cdot \varepsilon + 6,5117 \quad (R^2 = 0,94) \quad (3. \text{ egyenlet})$$

szerint, és 20V/V % bekeverés esetén:

$$\tau_{\text{gyulladási idő, B20}} [\text{ms}] = -0,3861 \cdot \varepsilon + 7,6205 \quad (R^2 = 0,92) \quad (4. \text{ egyenlet})$$

Jól megfigyelhető, hogy az elő (perdítő) kamrás motor esetén ($\varepsilon = 19,92, 15,27$ és $12,53$ [-]) a gyulladási idő nagyobb volt, mint a közvetlen befecskendezésű motoroknál.



87. ábra A gázolaj (D2) és a *n*-butanol elegyek gyulladási ideje a kompresszióviszony függvényében

Az előkevert égés szakasz hasznos hőváltás (HRR) maximumának változása területén a következőket tudtam megállapítani:

(3. tézis) Az *n*-butanol bekeverés hatására az előkevert égési szakasz intenzitásának változása és a gyulladási idő között összefüggés mutatható ki:

Az osztott és osztatlan égésterű, egyszeres befecskendezésű dízelmotorokban történő felhasználás során a mérési eredményeim alapján

megállapítottam, hogy a vizsgált kompresszióviszony és *n*-butanol bekeverési tartományokban az *n*-butanol bekeverés hatására a gázolajhoz képest az előkevert szakasz hasznos hőváltozásának (HRR) maximuma megnőtt. A növekmény exponenciálisan csökken a növekvő gyulladási idővel abban az esetben, ha a befecskendezés nem befolyásolta az égési folyamatot, azaz nem az előkevert égés során ér véget a befecskendezés, és a hosszabb gyulladási idő miatt az égési folyamat nem húzódik túlzott mértékben az expanszióba. [S-10, S-11 és S-12]

A mérési eredményeim alapján a következő számszerű összefüggéseket tudtam meghatározni:

- 10 V/V % *n*-butanol elegy esetén;

$$\text{HRR}_{\text{max, elők. B10}} / \text{HRR}_{\text{max elők. gázolaj}} + 1 = 0,1576 * \tau_{\text{gyulladási idő}} [\text{ms}]^{-0,582} \quad (R^2 = 0,79)$$

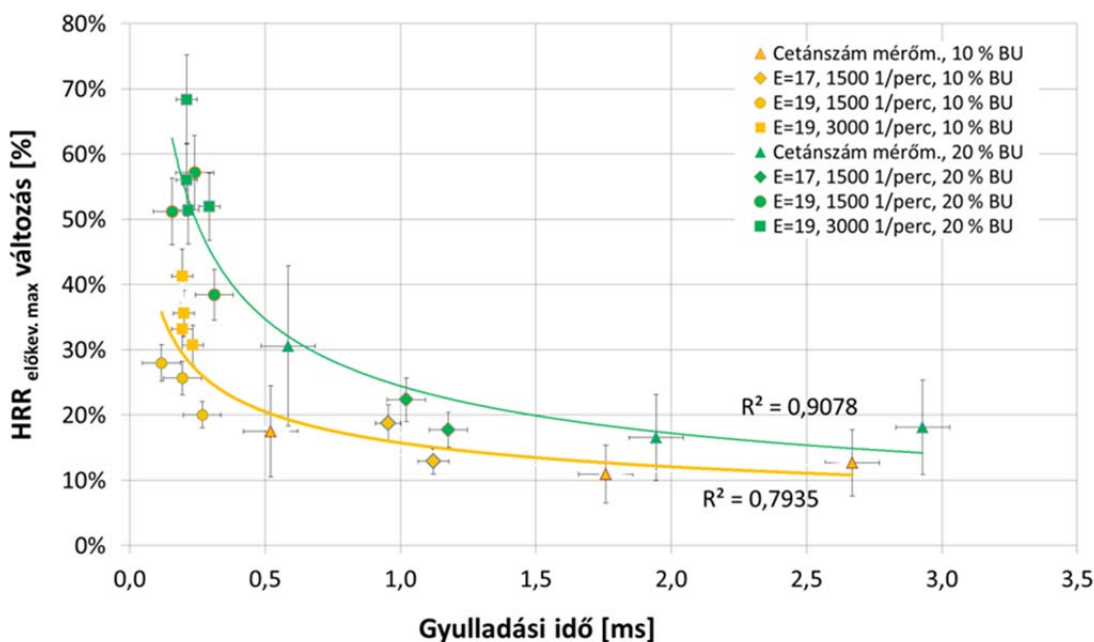
(5. egyenlet)

- 20 V/V % *n*-butanol elegy esetén;

$$\text{HRR}_{\text{max, elők. B20}} / \text{HRR}_{\text{max elők. gázolaj}} + 1 = 0,2447 * \tau_{\text{gyulladási idő}} [\text{ms}]^{-0,506} \quad (R^2 = 0,91)$$

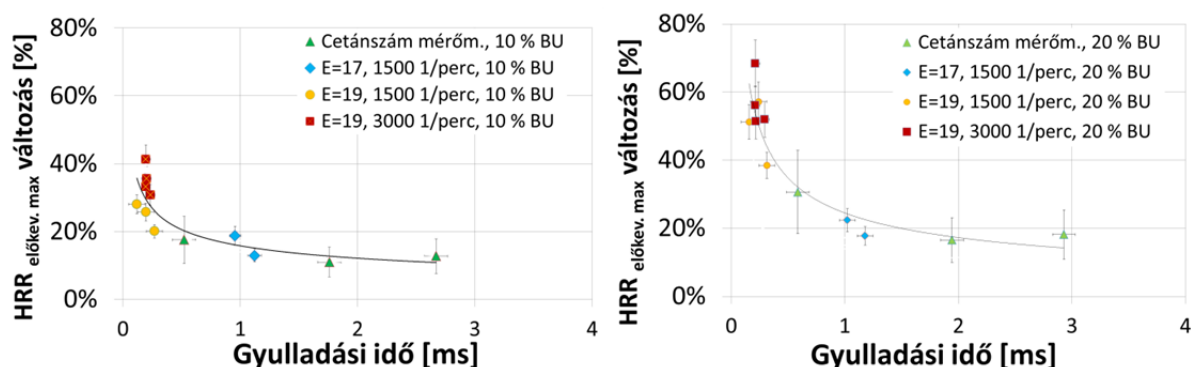
(6. egyenlet)

A fenti észlelések oka, hogy az *n*-butanol lényegesen alacsonyabb hőmérsékleten, így korábban kezd el kigőzölni az elegyből, hamarabb jön létre égésképes keverék a levegővel, mely megnöveli az előkevert szakasz hasznos hőváltozásának (HRR) maximumát. Ennek annál nagyobb a hatása, minél több *n*-butanolt tartalmaz az elegy. Nagy gyulladási idő esetén azonban nem csak az *n*-butanol tud kigőzölni és keveredni levegővel, hanem a gyulladás előtt a gázolaj is egyre nagyobb mértékben gőzölög ki és tud égésképes keveréket létrehozni, így az *n*-butanol hatása csökken (88. ábra).



88. ábra Az előkevert szakasz hasznos hőváltozás (HRR) maximumának változása a gázolajhoz képest a gyulladási idő függvényében 10 V/V % (10 % BU) és 20 V/V % *n*-butanol (20 % BU) tartalmú elegyek esetén [S-10, S-11 és S-12]

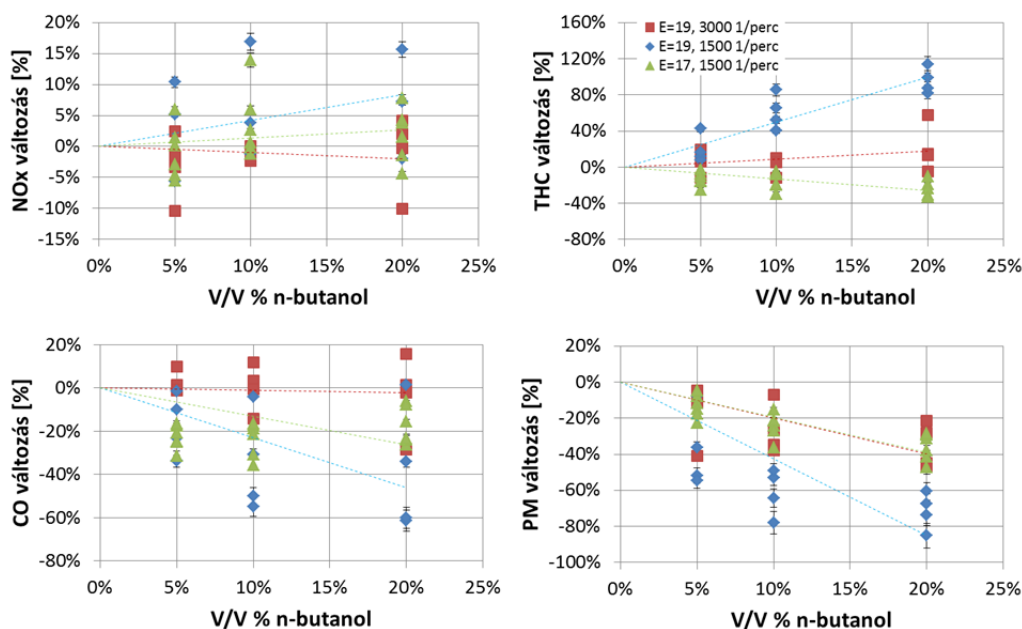
Az egyes motorokon és üzemmódokban az előkevert szakasz hasznos hőváltozás (HRR) maximumának változása a gázolajhoz képest a gyulladási idő függvényében 10 V/V % *n*-butanol (10 % BU) és 20 V/V % *n*-butanol (20 % BU) elegyek esetén a 89. ábrán láthatóak.



89. ábra Az előkevert szakasz hasznos hőváltozás (HRR) maximumának változása a gázolajhoz képest a gyulladási idő függvényében 10 V/V % (10 % BU) és 20 V/V % *n*-butanol (20 % BU) tartalmú elegyek különböző motorok és üzemi pontok esetén [S-10, S-11 és S-12]

4.3.3.2. A KETTŐS ELEGYEK MOTOR ÜZEMMEL ÉS A KÁROSANYAG-KIBOCSÁTÁSSAL KAPCSOLATOS EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

Megvizsgáltam, hogy a különböző körülmények között elvégzett vizsgálatok során a károsanyag komponensek gázolajhoz viszonyított változásai mennyire függtek az *n*-butanol bekeverés mértékétől (90. ábra). (megjegyzés: Az ábrában benne hagytam a lineáris közelítést, hogy jobban lehessen érzékelteni az eltérő trendeket.)



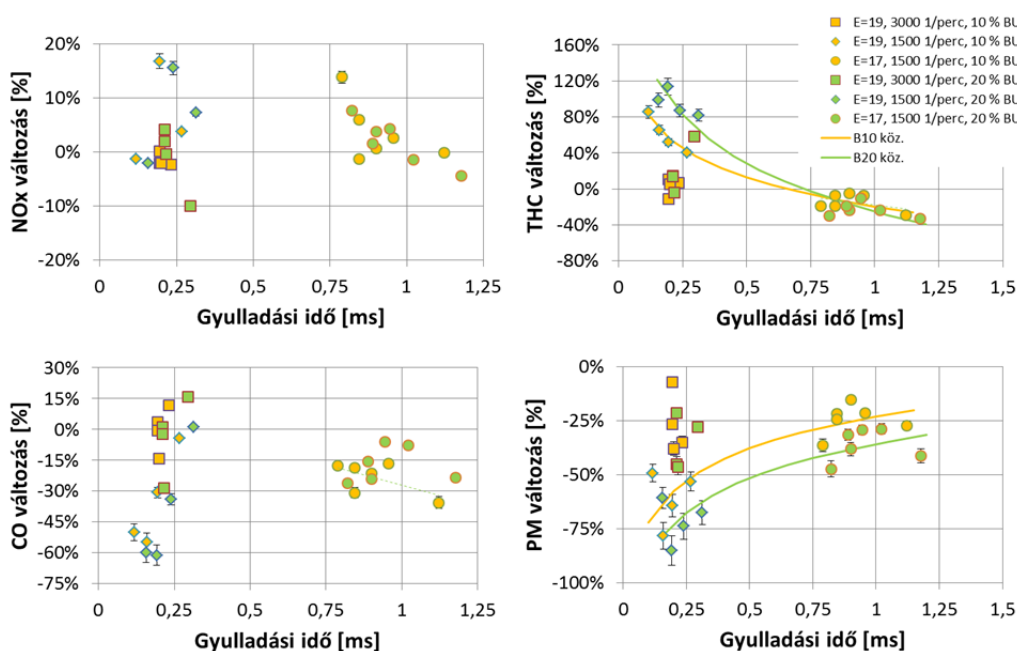
90. ábra A NOx-, THC-, CO- és PM-kibocsátás gázolajhoz viszonyított változása az *n*-butanol bekeverés hatására különböző vizsgálati körülmények esetén [S-10, és S-11]

Az eredmények értékelése alapján a következőket tudtam megállapítani:

(4. tézis) Az *n*-butanol bekeverésének mértéke és a károsanyag-kibocsátás között összefüggés nem mutatható ki:

Az általam vizsgált, osztatlan égésterű és egyszeres befecskendezésű dízelmotorokban történő felhasználás során a mérési eredményeim alapján megállapítottam, hogy a THC- és CO-kibocsátás gázolajhoz viszonyított változásai nem függenek az *n*-butanol gázolajba történő bekeverésétől, tehát a THC- és CO-kibocsátásra a felhasználás körülményei nagyobb hatással vannak, mint az *n*-butanol bekeverésének mértéke. A NO_x-kibocsátás kis mértékben növekszik az *n*-butanol bekeverés növelésével, azonban eltérő mértékben a különböző motorokban és üzemi pontokban, a növekedés átlagosan kisebb, mint 5%. A PM-kibocsátás a gázolajhoz képest csökken az *n*-butanol gázolajba történő bekeverésével, azonban ennek mértéke is jelentősen eltér a különböző motorokban és a különböző üzemi pontokban. Tehát ennél a komponensnél is a felhasználás körülményei nagyobb hatással vannak, mint az *n*-butanol bekeverésének mértéke [S-10, és S-11].

Amint azt láthattuk, az *n*-butanol hatása az égési folyamatra nagymértékben függ az *n*-butanol tartalomtól és a gyulladási időtől.



91. ábra A NO_x-, THC-, CO- és PM-kibocsátások változása a gázolaj kibocsátásához képest a gyulladási idő függvényében 10 V/V % (10 % BU) és 20 V/V % *n*-butanol (20 % BU) tartalmú elegyek 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon, különböző felhasználások esetén [S-10, és S-11]

Ezért megvizsgáltam (91. ábra) és a mérési eredmények alapján értékeltem a bekeverés mértékét és a gyulladási idő hatását a különböző általam vizsgált károsanyag komponensekre:

(5. tézis) A gyulladási idő, az *n*-butanol bekeverés mértéke és a vizsgált károsanyag-kibocsátás változása között részlegesen összefüggést mutattam ki:

Az osztatlan égésterű és egyszeres befecskendezésű dízelmotorokban történő felhasználás során a mérési eredményeim alapján megállapítottam,

hogy az *n*-butanol bekeverésének hatására a NO_x-kibocsátás gázolajhoz viszonyított változása és a gyulladási idő között összefüggés nem volt kimutatható. A THC-kibocsátás gázolajhoz viszonyítva kis gyulladási idő esetén nőtt, nagy gyulladási idő esetén csökkent, a változás függ *n*-butanol bekeveréstől és az logaritmikusan csökkent a gyulladási idő függvényében kis légfelesleg esetén, nagy légfelesleg esetén összefüggés nem mutatható ki. A CO-kibocsátás változása és a gyulladási idő között összefüggés nem volt kimutatható. A PM-kibocsátás csökkent *n*-butanol gázolajba történő bekeverésével és annak mértéke logaritmikusan csökken a gyulladási idővel kis légfelesleg esetén, nagy légfelesleg esetén összefüggés nem mutatható ki [S-10, és S-11].

4.4. METANOLBEKEVERÉS ÖSSZEHASONLÍTÓ VIZSGÁLATA

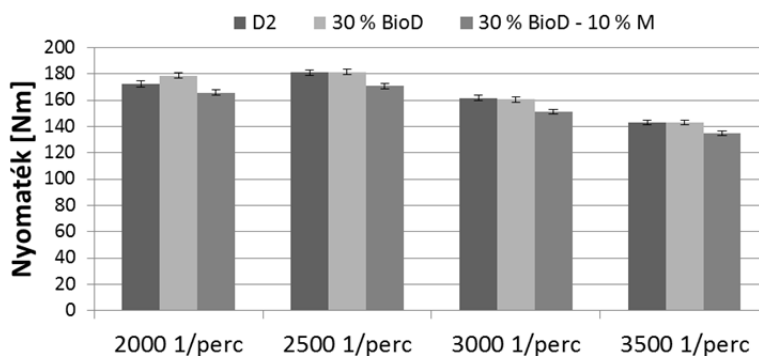
Az *n*-butanol bekeverésének hatásvizsgálata után célszerű egy sokkal elterjedtebb és gyakrabban vizsgált alkohol tanulmányozása annak eldöntésére, hogy ennél a tüzelőanyagnál is hasonló változások figyelhetők-e meg, valamint milyen és mekkora eltérés jellemzi a paramétereket az *n*-butanolhoz képest. A fentiek figyelembevételével a metanolt [S-13] választottam további tanulmányozás céljából, melynek főbb fizikai jellemzőit az 9. táblázat mutatja be. A metanol jellemzője az *n*-butanolhoz képest a nagyobb párolgáshő, valamint a kisebb cetánszám, kinematikai viszkozitás, fűtőérték és sűrűség.

A metanol nem képez stabil elegyet a gázolajjal, ezért erre a célra gázolaj (D2) – biodízel (BioD) – metanol (M) hármass elegyét alkalmaztam. A keverési arányok a referenciaelegy esetén 70 V/V % gázolaj és 30 V/V % biodízel (30 % BioD), illetve a vizsgált hármass elegy 60 V/V % gázolaj, 30 V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD – 10 % M)) volt.

		D2	biodízel	metanol	<i>n</i> -butanol
LHV	MJ/kg	43	37.3	20.1	33.1
cetánszám	-	51	51,4	<5	~25
kinematikai viszkozitás (40°C-on)	mm ² /s	3.4	4.88	0.6	3.6
sűrűség (15°C-on)	kg/m ³	837	882	792	810
forráspont	K	453-643		337	391
öngyulladás hőmérséklet	K	503		464	618
párolgáshő	KJ/kg	250		1178	585
elméleti égési levegőigény	kg/kg	14.7		6.4	11.2

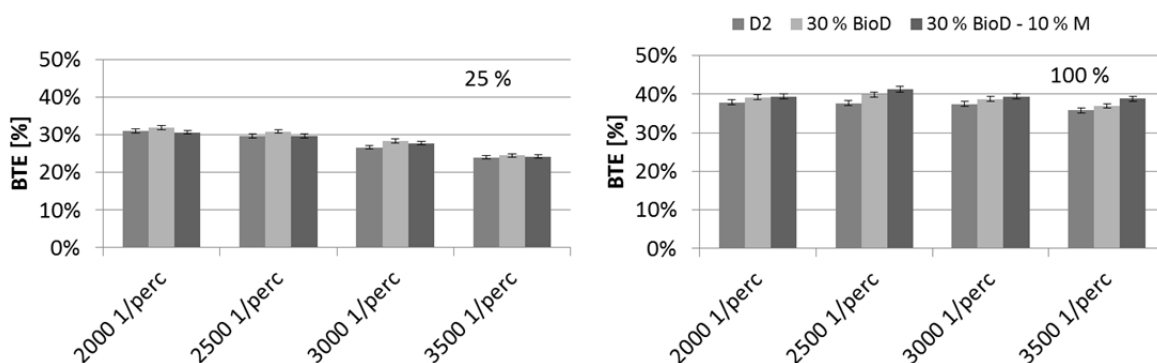
9. táblázat A vizsgált tüzelőanyagok főbb paraméterei [S-10 és S-13]

A méréseket hasonlóan végeztem, mint az *n*-butanol esetén a magasabb kompresszióviszonyú ($\epsilon=19$) motoron, de ebben az esetben négy különböző fordulatszámon (2000, 2500, 3000 és 3500 1/perc). Első lépésben mind a négy fordulatszámon meghatározásra került a maximális nyomaték (92. ábra) a három tüzelőanyaggal. Megfigyelhető volt, hogy biodízel esetén a nyomaték kismértékben – elsősorban kis fordulatszámokon – növekedett a gázolajhoz képest, és a metanolbekeverés hatására csökkent. Ennek okai hasonlóak az *n*-butanol bekeverésnél tapasztaltakhoz. Mivel a biodízel viszkozitása nagyobb, mint a gázolajé, így nőtt a dózis és az oxigéntartalom. A metanolbekeverés csökkentette a viszkozitást, így csökkent a dózis, továbbá a metanol fűtőértéke lényegesen alacsonyabb, mint a gázolajé.



92. ábra A maximális nyomaték gázolaj (D2), 30V/V % biodízel (30 % BioD) és 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M) esetén különböző fordulatszámokon [S-13 alapján] ($\delta_M, \pm 1,23$ %)

A 25 %-os, 50 %-os és 75 %-os részterheléseknél az adott fordulatszámhoz és gázolaj tüzelőanyaghoz tartozó maximális nyomaték arányában állítottam be a terhelést. Az effektív hatásfok mind a két elegy esetén nőtt, ez alól kivétel a 25 %-os terhelés, itt nem jelentősek az eltérések (93. ábra).



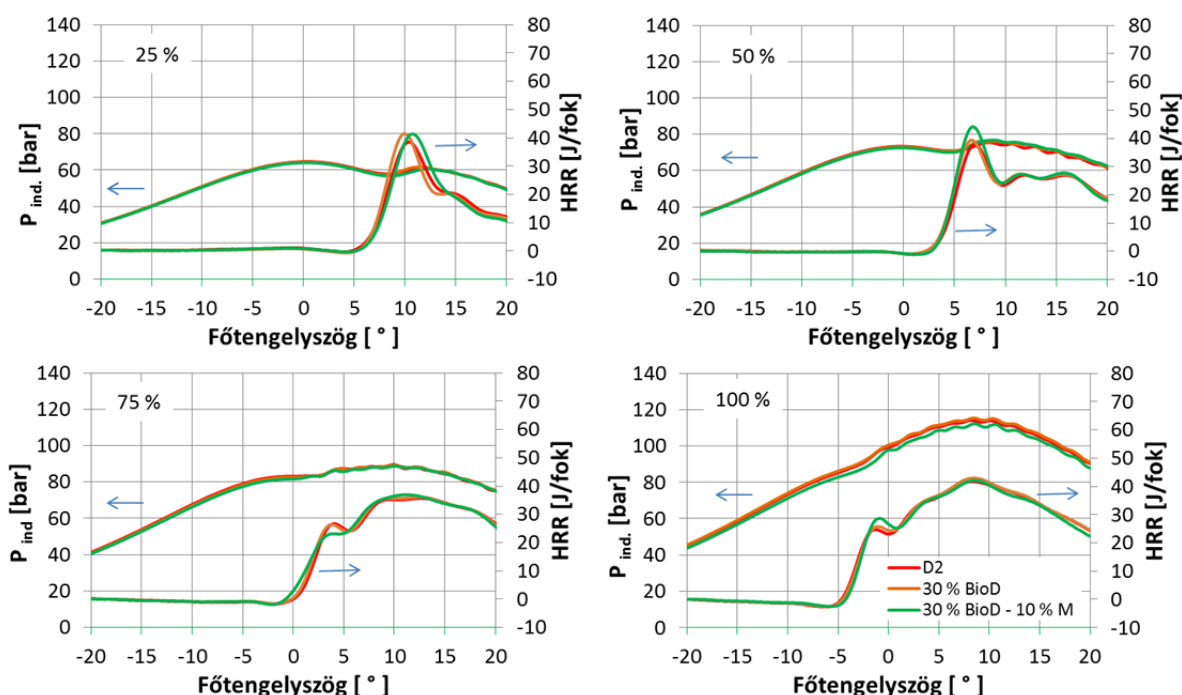
93. ábra Az effektív hatásfok (BTE) gázolaj (D2), 30V/V % biodízel (30 % BioD) és 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol elegy (30 % BioD - 10 % M) esetén különböző fordulatszámokon és 25 %-os és 100 %-os terhelésen [S-13 alapján] ($\delta_{BTE}, \pm 1,65$ %)

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a biodízel oxigéntartalma és megegyező cetánszáma javította az égési folyamatot, és ennek hatására kismértékben az effektív hatásfokot. A metanolbekeverés csökkentette a viszkozitást és a nagyobb gyulladási idő miatt nőtt az előkevert szakasz intenzitása. Mivel a méréseknél a felső holtpont után vagy a körül zajlott le az előkevert égés, így ez növelte a hasznos munkát. Elméleti megfontolások alapján ennek az ellenkezője lenne várható, mivel a metanol nagyobb párolgáshője csökkenti a munkafolyamat hőmérsékletét, de ez a hatás nem volt szignifikáns az eredmények alapján.

Az összehasonlíthatóság érdekében csak a 3000 1/perc fordulatszámhoz tartozó indikált nyomás és hasznos hőváltozás (HRR) eredményeket mutatom be (94. ábra). A 25 %-os terhelés esetén a nyomásmaximum helye a felső holtpontban található. A befecskendezés $-2,4^\circ$ -nál kezdődik, a gyulladási idő $6,3^\circ$ gázolaj és a 30 % BioD elegy esetén. A 30 % BioD - 10 % M elegy esetén megnövekedett $6,9^\circ$ -ra, az előkevert szakasz HRR maximum értéke gázolaj és 30 % BioD esetben $10,3^\circ$ közelében van, míg a megnövekedett gyulladási idő miatt 30 % BioD - 10 % M elegy esetén $10,9^\circ$ -nál. Ennek hatására ennél a terhelésnél is kialakult a „kétpúpú” indikátordiagram. Jól megfigyelhető, hogy a hasznos hőváltozás maximum értékek között nem jelentős az

eltérés, 30 % BioD esetén 6 %-kal, míg 30 % BioD - 10 % M elegy esetén 8,8 %-kal nőtt meg –emiatt sem volt tapasztalható lényeges eltérés az effektív hatásokban. A nyomásmaximumok esetén az eltérés szintén nem volt jelentős.

Az 50 %-os terhelés esetén a befecskendezés kezdet $4,2^\circ$ -os. A gyulladási idő 5° 30 % BioD és gázolaj tüzelőanyag esetén, az eltérés itt is a szög jeladó pontossága, míg 30 % BioD - 10 % M elegy esetén $5,9^\circ$ volt. Az előkevert szakasz maximum értéke mind a három tüzelőanyag esetében $6,7^\circ$ közelében volt. Itt jelentős eltérés nem volt megfigyelhető, viszont a HRR maximum értékek között már jelentősebb eltérés volt tapasztalható. A gázolajhoz képest 30 % BioD elegy esetén a növekedés 4,2 % volt, 30 % BioD - 10 % M elegy esetén 16,4 % volt a növekedés. Az indikált nyomásmaximumok 30 % BioD esetén 0,7 %, míg 30 % BioD - 10 % M elegy esetén 1,6 % volt a változás, amely itt is nyomás ingadozás és a mérési hiba hatása volt. Jól megfigyelhető volt a diffúz égési tartomány is ezen a terhelésen.

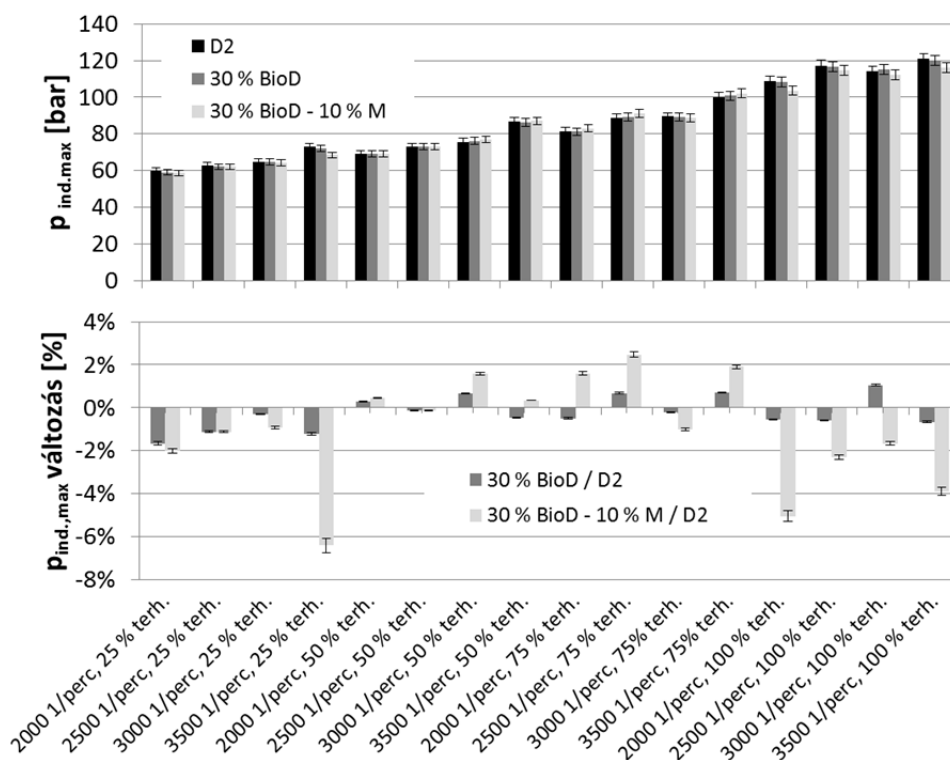


94. ábra Az indikált nyomás (P_{ind}) és a hasznos hőváltás (HRR) a főtengelyszög függvényében különböző terheléseken gázolaj (D2), 30V/V % biodízel (30 % BioD) és 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M) esetén 3000 l/perc fordulatszámon [S-13 alapján] ($\delta_{P_i} \pm 2,66 \%$, $\delta_{HRR} \pm 5,49 \%$)

A 75 %-os terhelés esetén jól megfigyelhető volt, hogy a megnövekedett dózis miatt a diffúz égési szakasz HRR maximuma nagyobb volt, mint az előkevert szakaszé. Ebben az esetben is az előző mérési sorozathoz hasonlóan a dózisz növekedés miatt az EDC módosította az előbefecskendezés időpontját. A gázolaj és a 30 % BioD elegy esetén a befecskendezés kezdet $-5,6^\circ$ volt, addig 30 % BioD - 10 % M elegy esetén $-6,3^\circ$ volt. Ennek hatására hiába nőtt meg a gyulladási idő $3,5^\circ$ -ról, $4,3^\circ$ -ra, a HRR maximum kisebb 30 % BioD - 10 % M elegy esetén, mint a gázolaj és a 30 % BioD elegy esetén, mivel itt a maximum a diffúz égés tartományában volt.

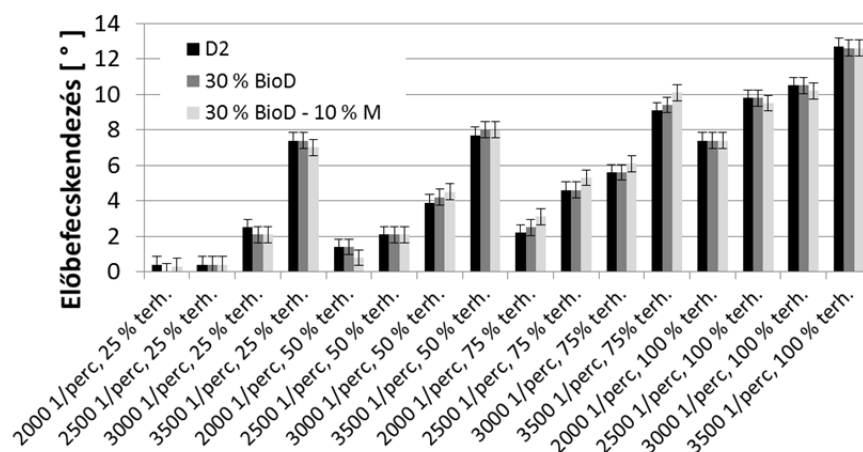
A teljes terhelésnél eltérően üzemelt a motor. Ebben az esetben az EDC közel állandó értéken tartotta a tüzelőanyag térfogatáramát, a kismértékű eltérést a viszkozitás befolyásolta. A befecskendezés kezdet mind a három esetben kb. $-10,5^\circ$ volt, a gyulladási idő gázolaj esetén $4,2^\circ$, 30 % BioD esetén $4,5^\circ$ és 30 % BioD - 10 % M elegy esetén $4,9^\circ$ volt. Az előkevert szakasz HRR maximum értéke gázolaj esetén $-1,7^\circ$

közelében, 30 % BioD esetben $-1,4^\circ$ közelében volt, míg a 30 % BioD - 10 % M elegy esetén $-1,0^\circ$ -nál volt a kismértékben megnövekedett gyulladási idő és a metanol tartalom miatt. A HRR maximum értékek között már jelentősebb eltérés volt tapasztalható. A gázolajhoz képes 30 % BioD elegy esetén 4,0 %, míg 30 % BioD - 10 % M elegy esetén 15,3 % volt a növekedés. Az indikált nyomásmaximumoknál 30 % BioD esetén 1,1 %, míg 30 % BioD - 10 % M elegy esetén $-1,7\%$ volt a változás, amely itt is nyomásingadozás és a mérési hiba, de a bevitt hő hatása is lehetett.



95. ábra Az indikált nyomásmaximum különböző terheléseken és fordulatszámokon gázolaj (D2), 30V/V % biodízel (30 % BioD) és 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M) esetén, valamint a 30 V/V % biodízel (30 % BioD / D2) és a 30V/V % biodízel+10V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M / D2) változása a gázolajhoz képest [S-13 alapján] ($\delta_{p_{i\max}} \pm 2,66\%$)

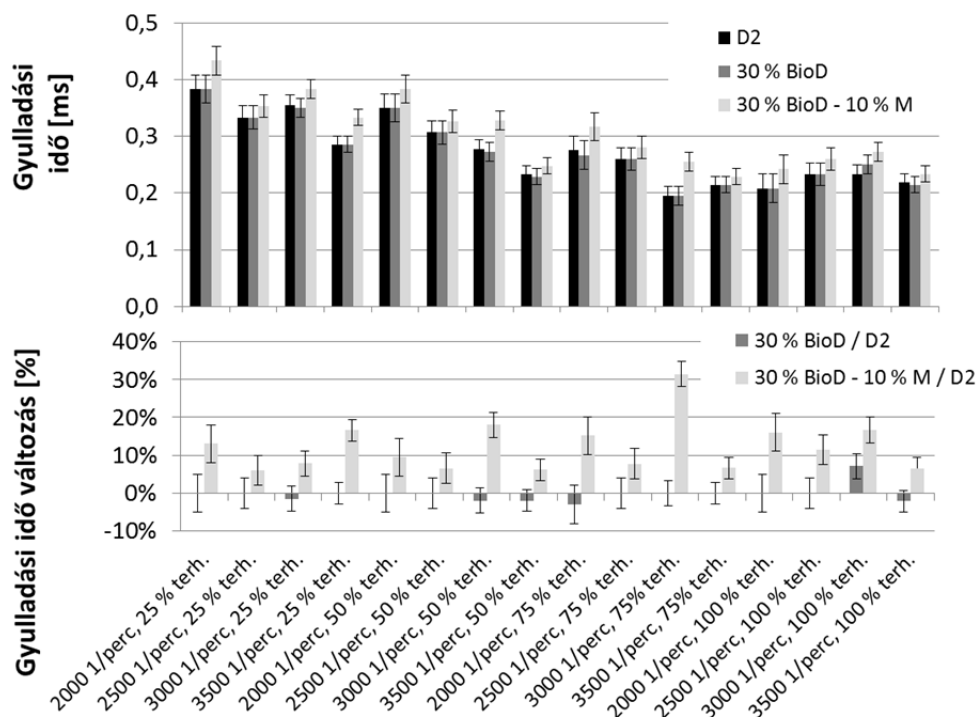
A nyomásmaximumok (95. ábra) mind a terheléssel, mind a fordulatszámmal növekedtek. A 30 % BioD elegy esetén jelentős eltérés nem volt tapasztalható, legnagyobb növekedés 1,1 %, a legnagyobb csökkenés 1,7 % volt. Ezzel szemben a 30 % BioD - 10 % M elegy esetén a legnagyobb növekedés 2,5 % volt 2500 1/perc fordulatszámon és 75 %-os terhelésen. Ennek oka az előbefeckendezési szög változása is. A nagyobb csökkenés 3500 1/perc fordulatszámon 25 %-os terhelésen 6,4 % és 5 % volt (2000 1/perc fordulatszámon, 100 %-os terhelésen).



96. ábra Az előbefecskendezés különböző terheléseken és fordulatszámokon gázolaj (D2), 30V/V % biodízel (30 % BioD) és 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M) tüzelőanyagok esetén [S-13 alapján]

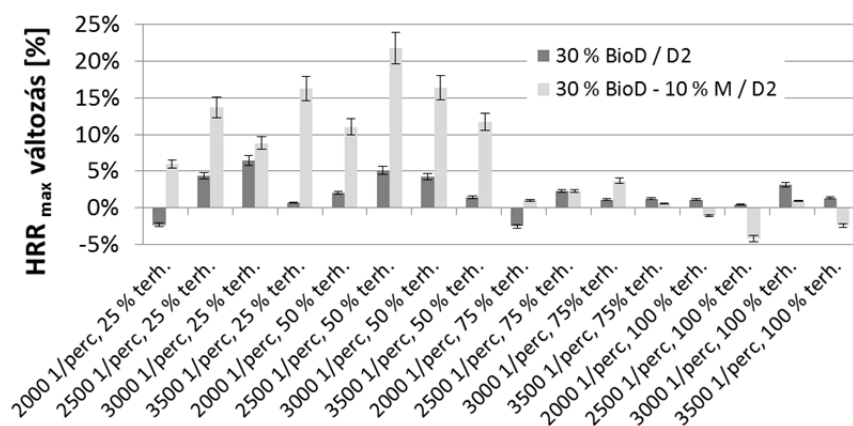
Az előbefecskendezést a motor EDC-je az előző vizsgálatokhoz hasonlóan állította. Megfigyelhető volt, hogy mind a fordulatszámmal, mind a terheléssel növelte azt. Itt is azt tapasztaltam, hogy minden esetben az előbefecskendezési szög a szögjeladó felbontásával tért el, addig 75 %-os terhelésen már ennél lényegesen nagyobb mértékben nőtt az előbefecskendezés a dózissal (96. ábra).

A gyulladási idő (97. ábra) viszont elsősorban a metanolbekeverés hatására növekedett. Jól megfigyelhető volt, hogy a gyulladási idő 30 % BioD elegy esetén kisebb, mint 3 %-kal tért el a gázolajhoz képest, egyedül 3000 1/perc fordulatszámon, 100 %-os terhelésen nőtt meg jelentősen, de itt is az eltérés kisebb volt, mint 0,6°. Addig a 30 % BioD - 10 % M elegy esetén jelentős volt az eltérés. Eltekintve a 75 %-os terhelésektől, 3000 1/perc fordulatszámon, 100 %-os terhelésen 18 %-kal nőtt meg. Trendet nem lehet felfedezni a terhelés és fordulatszám szempontjából, az átlagos növekedés 12,2 % volt.



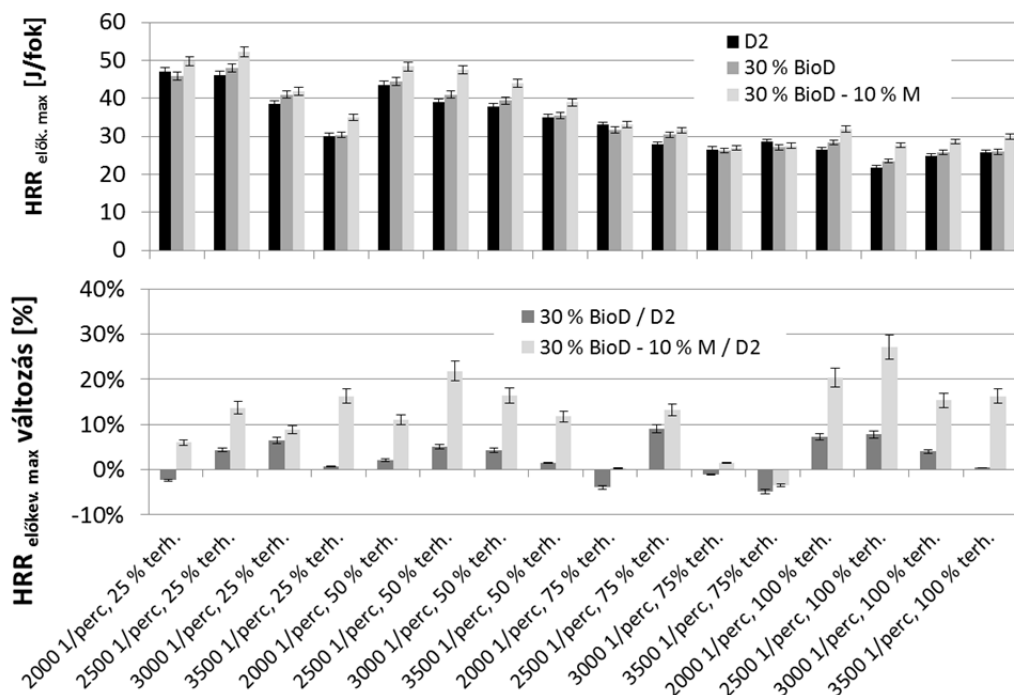
97. ábra A gyulladási idő különböző terheléseken és fordulatszámokon gázolaj (D2), 30 V/V % biodízel (30 % BioD) és 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M) elegyek esetén, valamint a 30 V/V % biodízel (30 % BioD /D2) és a 30V/V % biodízel+10V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M /D2) gyulladási idő változása a gázolajhoz képest [S-13 alapján]

A hasznos hőváltás (HRR) maximum értékei jelentősen 25 %-os és 50 %-os terhelésen tértek el az elegyek esetén (98. ábra). Ez evidens, mivel ezen a két terhelésen az előkevert szakasz hasznos hőváltása volt a nagyobb és erre volt hatással a bekeverés. Ezeken a terheléseken a 30 % BioD elegy esetén a legnagyobb növekedés 3000 1/perc fordulatszámon, 25 %-os terhelésen, 6,5 % volt, az átlagos növekedés 2,8 %. Addig a 30 % BioD - 10 % M elegy esetén jelentős volt a növekedés, a legnagyobb 2500 1/perc fordulatszámon és 50 %-os terhelésen közel 22 %, az átlagos növekedés 13,2 % volt. A 75 %-os és a 100 %-os terheléseken a hasznos hőváltás maximum értékek a diffúz szakaszban voltak, így itt bekeverés hatása nem volt jelentős, de megfigyelhető, hogy 100 %-os terhelésen 30 % BioD - 10 % M elegyek esetén megfigyelhető volt csökkenés, amely a diffúz égési szakasz csökkenését jelezte.



98. ábra A hasznos hőváltozás (HRR) maximumok változása a gázolajhoz képest 30 V/V % biodízel (30 % BioD /D2) és a 30V/V % biodízel+10V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M /D2) esetén [S-13 alapján] ($\delta_{HRR} \pm 2,42$ %)

Ha csak az előkevert szakasz hasznos hőváltozás (HRR) maximum értékeit vizsgáltuk, látható volt, hogy minden terhelésen és fordulatszámmon eltértek (94. ábra és 99. ábra). Megfigyelhető, hogy a 30 % BioD esetén az eltérések nem voltak jelentősek, a legnagyobb –eltekintve a 75 %-os terhelésektől–, 2500 1/perc fordulatszámmon és 100 %-os terhelésen 7,8 %, az átlagos eltérés 3,5 % volt. A 30 % BioD - 10 % M elegy esetén már jelentősek voltak az eltérések, a legnagyobb –eltekintve a 75 %-os terhelésektől–, 2500 1/perc fordulatszámmon, 100 %-os terhelésen 27,1 % volt, az átlagos eltérés 15,1 %.

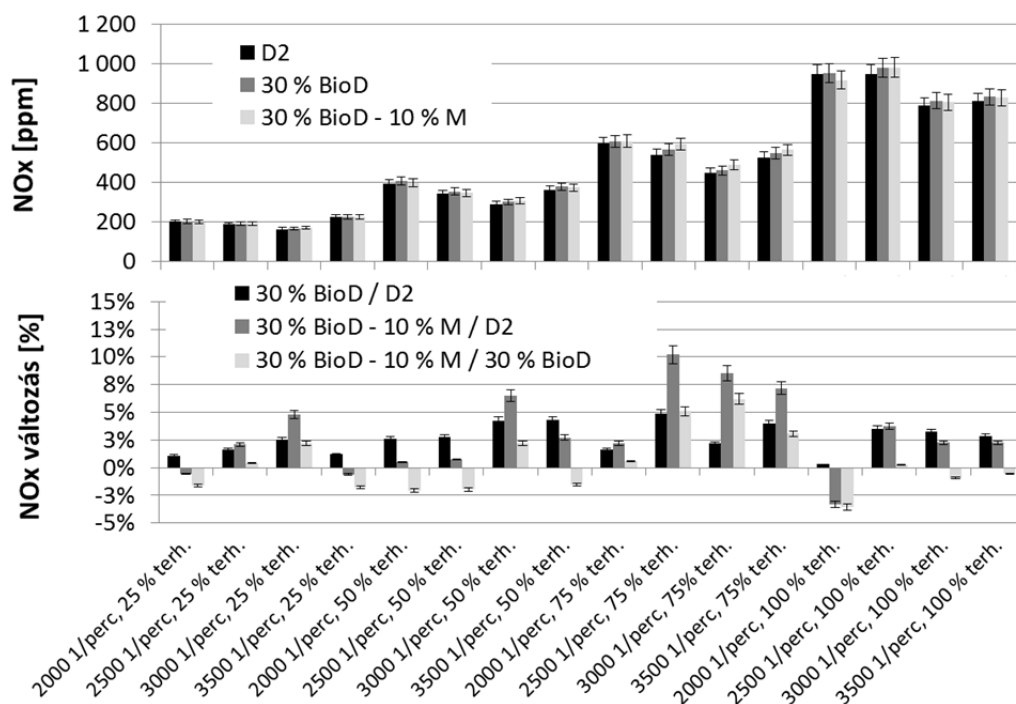


99. ábra Az előkevert szakasz hasznos hőváltozás (HRR) maximuma különböző terheléseken és fordulatszámokon gázolaj (D2), 30V/V % biodízel (30 % BioD) és 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M) esetén, valamint a 30 V/V % biodízel (30 % BioD /D2) és a 30V/V % biodízel+10V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M /D2) változása a gázolajhoz képest [S-13 alapján] ($\delta_{HRR} \pm 5,49$ %)

4.4.1. A BIODÍZEL ÉS A METANOLBEKEVERÉS HATÁSA KÁROSANYAG-KIBOCSÁTÁSRA

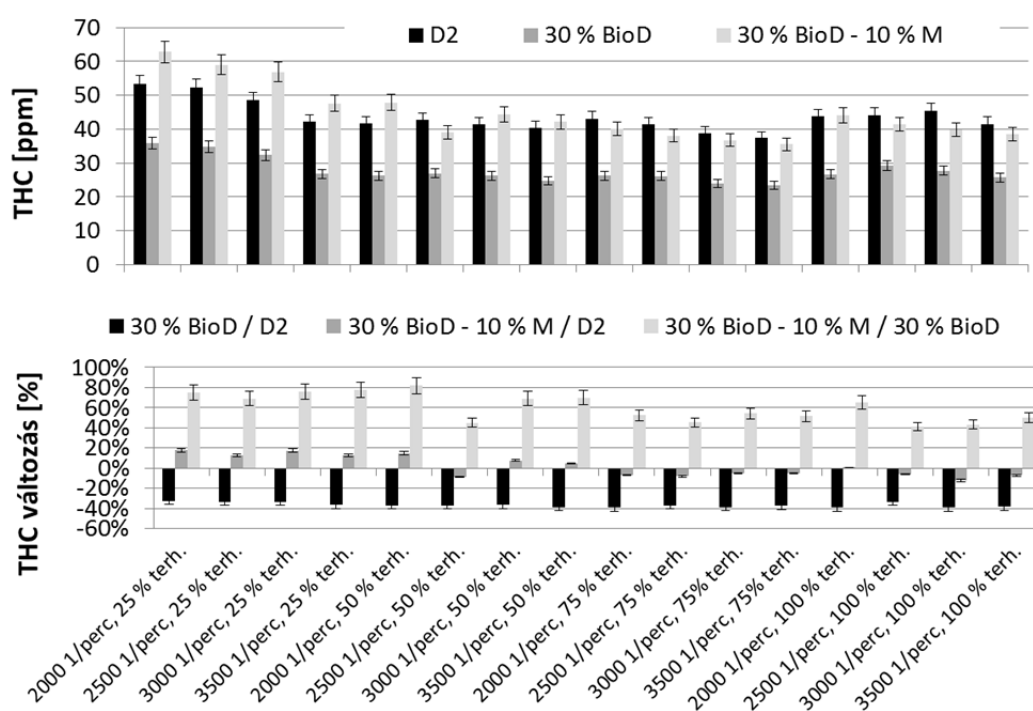
A kibocsátás változást minden esetben három összehasonlítás segítségével vizsgáltam. Első hatásvizsgálat a biodízel és a referencia gázolaj közti változás (30 % BioD/D2), második a metanol és biodízel bekeverés hatásvizsgálata (30 % BioD - 10 % M/D2) és végül csak a metanolbekeverés hatásvizsgálata (30 % BioD - 10 % M /30 % BioD). Ez utóbbi csak a metanolbekeverés hatását emeli ki.

A NO_x-kibocsátás szempontjából megállapítható, hogy a teljesítménnyel nő a kibocsátás, mivel nő az átlaghőmérséklet, csökken a légfelesleg. A fordulatszám növelésének 25 %-os terhelés esetén nem volt jelentős hatása, azonban 50 % és 75 %-os terhelésen 3000 1/perc fordulatszámig csökkent, majd nőtt a NO_x-kibocsátás. Ennek oka elsősorban a fordulatszámmal változó légfelesleg (lásd 85. ábra) és a dózisznövekedés, továbbá a 3500 1/perc fordulatszámon megnövekedő előbefecskendezés volt (96. ábra). Mivel az előbefecskendezésnek jelentős a hatása a NO_x-kibocsátásra [S-2], megállapítható, hogy a bekeveréseknek nincs számottevő eredménye, eltekintve a 75 %-os terhelésektől. A NO_x-kibocsátás átlagos változásai a következők: biodízel bekeverés 2,5 %-kal növelte, a hármas elegy 1,8 %-kal növelte, míg a metanolbekeverés a biodízellel képest 0,7 %-kal csökkentette a NO_x-kibocsátást, figyelmen kívül hagyva a 75 %-os terhelést (100. ábra). Mindez a metanol csökkenő láng hőmérséklete, nagyobb párolgáshője és gyulladási ideje ellenére elsősorban a növekvő előkevert égéssel és a tüzelőanyag növekvő oxigén tartalmával magyarázható.



100. ábra A nitrogénoxid (NO_x) kibocsátás különböző terheléseken és fordulatszámokon gázolaj (D2), 30V/V % biodízel (30 % BioD) és 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M) elegyek esetén, valamint a 30 V/V % biodízel (30 % BioD /D2) és a 30V/V % biodízel+10V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M /D2) változása a gázolajhoz képest, valamint a 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol tartalmazó elegy változása a 30V/V % biodízellel tartalmazó elegyhez képest (30 % BioD - 10 % M/30 % BioD) [S-13 alapján] ($\delta_{NOx} \pm 4,42$ %)

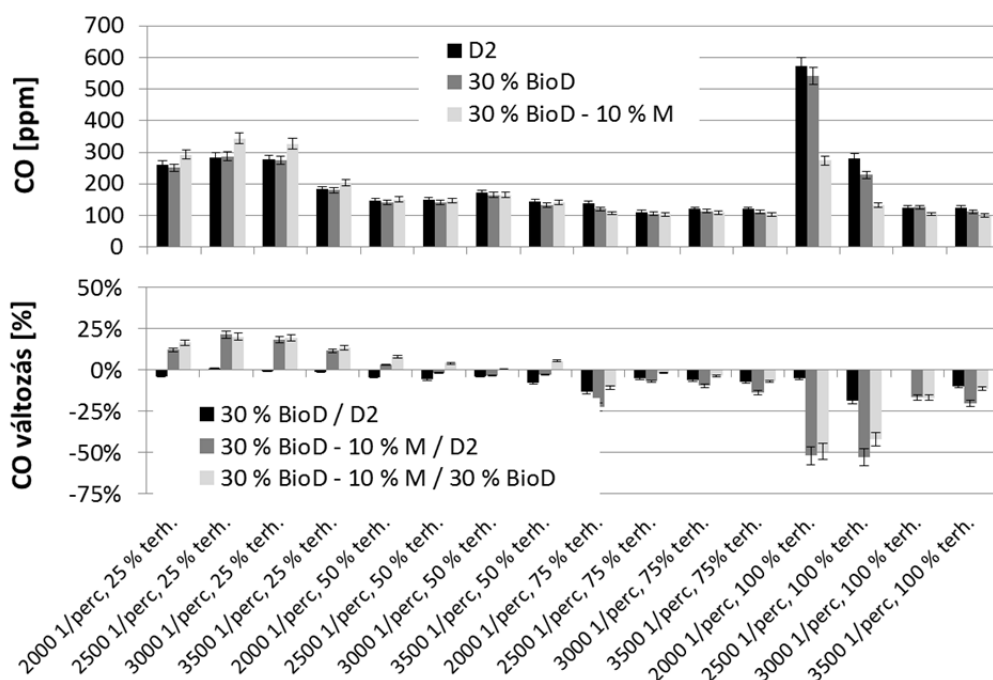
Az el nem égett szénhidrogén (THC) kibocsátás a legnagyobb, 25 %-os terheléstől kis mértékben csökkent, majd teljes terhelésen kismértékben ismét növekedett (101. ábra). A fordulatszám növelésével csökkent a kibocsátás részterheléseken, ami két okra vezethető vissza: egyrészt kis mértékben nőtt a légfelesleg-tényező a javuló feltöltés miatt és a növekvő fordulatszám miatt nőtt az átlaghőmérséklet. Jelentős eltérés nem volt kimutatható a kibocsátásban, gázolaj esetén az átlagos kibocsátás 43 ppm, 25 %-os terhelés esetén 53 ppm, 50 %-os terhelés esetén 41 ppm. Biodízel bekeverés esetén közel 37 %-os volt az átlagos kibocsátás csökkenés, az egyes terheléseken 34 % és 38 % között változott a csökkenés, legnagyobb csökkenés 75 %-os terhelésen volt, legkisebb a csökkenés 25 %-os terhelésen. A metanolbekeverés hatására ismét jelentősen megnőtt a THC-kibocsátás a biodízelhez képest, jelentős növekmény volt tapasztalható elsősorban kis terheléseken (101. ábra, 30 % BioD - 10 % M/30 % BioD). Ennek oka lehetett a metanol gyorsabb kipárolgása és ennek hatására a túl szegény keverék kialakulása, tovább a metanol hőelvonása.



101. ábra Az el nem égett szénhidrogén (THC) kibocsátás különböző terheléseken és fordulatszámokon gázolaj (D2), 30V/V % biodízel (30 % BioD) és 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M) elegyek esetén, valamint a 30 V/V % biodízel (30 % BioD /D2) és a 30V/V % biodízel+10V/V % metanolt tartalmazó elegy változása a gázolajhoz képest, valamint a 30V/V % biodízelt és 10 V/V % metanolt tartalmazó elegy változása a 30V/V % biodízelt tartalmazó elegyhez képest (30 % BioD - 10 % M/30 % BioD). [S-13 alapján] ($\delta_{THC} \pm 4,35 \%$)

A szénmonoxid (CO) kibocsátás a terhelés növelésével csökkent 75 %-os terhelésig majd jelentősen megnőtt teljes terhelésnél (102. ábra). A fordulatszám növelésével 25 % és 50 % terhelésen 3000 1/perc fordulatszámig nőtt a növekvő dózis miatt, majd csökkent, elsősorban a növekvő előbefecskendezés hatására növekvő átlaghőmérséklet miatt. Teljes terhelésen a fordulatszám növekedésével folyamatosan csökkent a CO-kibocsátás a növekvő átlaghőmérséklet növekedése miatt. A biodízel bekeverés hatására csökkent a kibocsátás feltehetőleg az oxigén tartalom növekedése miatt, azonban a metanolbekeverés hatására 25 % terhelésen feltehetőleg a párolgás hőelvonása miatt növekedett a kibocsátás. Közepes és teljes terheléseken ennek a

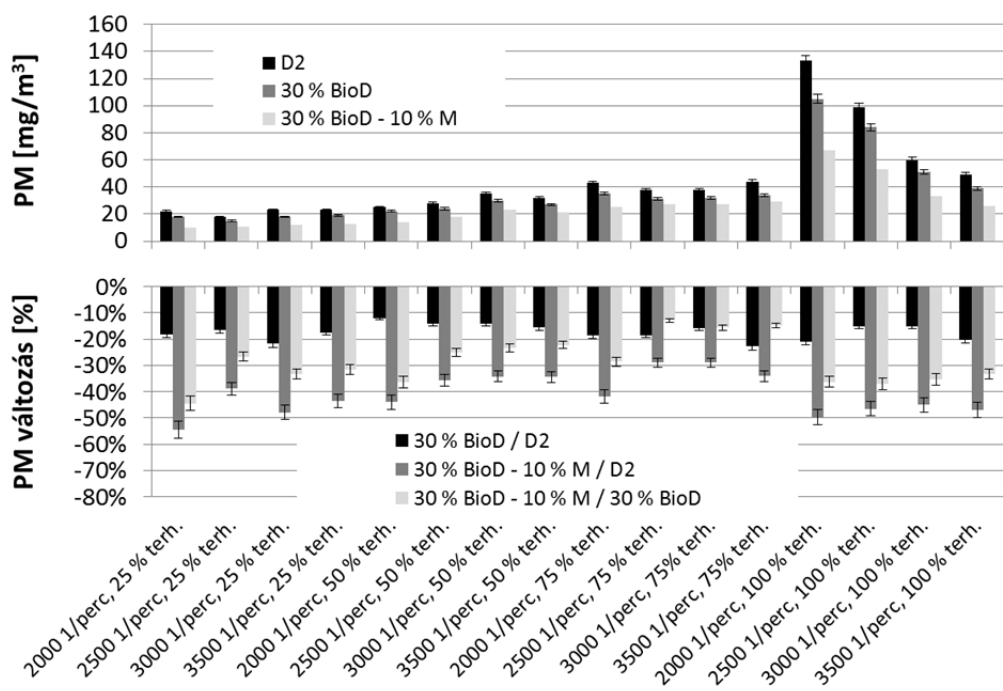
hatása lecsökkent a nagyobb dózis és az intenzív előkevert égés és a keverő komponensek oxigén tartalma miatt, így csökkent a kibocsátás. Teljes terhelésen 3000 1/perc és 3500 1/perc fordulatszámokon is jelentős volt a csökkenés, de mértékében lényegesen kisebb volt, mint alacsonyabb fordulatszámokon. Számszerűsítve az eredményeket a biodízelnél minden esetben kicsi a hatása, átlagosan az összes mérési pontban a CO-kibocsátás 5,8 %-kal csökkent. A metanolbekeverés (B30+M10/B30) kisterhelésen (25%) átlagosan 17,3 %-kal, 50 %-os terhelésen 4,4 %-kal növelte, míg 75 %-os terhelésen 5,8 %-kal és 100 %-os terhelésen 29 %-kal csökkentette a kibocsátást.



102. ábra A szénmonoxid (CO) kibocsátás különböző terheléseken és fordulatszámokon gázolaj (D2), 30V/V % biodízel (30 % BioD) és 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M) elegyek esetén, valamint a 30 V/V % biodízel (30 % BioD / D2) és a 30V/V % biodízel+10V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M / D2) változása a gázolajhoz képest, valamint a 30V/V % biodízelt és 10 V/V % metanolt tartalmazó elegy változása a 30V/V % biodízelt tartalmazó elegyhez képest (30 % BioD - 10 % M / 30 % BioD). [S-13 alapján] ($\delta_{CO} \pm 4,63$ %)

A részecskekibocsátás (PM) az elméleti megfontolásoknak megfelelően alakult, a terhelés növelésével a kibocsátás növekedett a dózis növekedése miatt (103. ábra). A fordulatszám növelésével egyértelmű trend nem volt megfigyelhető, 25 % terhelésen jelentős eltérés nem volt tapasztalható. Az 50 %-os és a 75 %-os terheléseken kismértékben, de nőtt a fordulatszámmal a PM-kibocsátás. Teljes terhelésen 2000 1/perc fordulatszámon a legjelentősebb a PM-kibocsátás, amely a fordulatszám növelésével csökkent, mivel nőtt a feltöltés is. A bekeverés hatására egyértelműen megállapítható volt, hogy mind a biodízel, mind a metanol bekeverése jelentősen csökkentette a PM-kibocsátást. A biodízel bekeverés hatására kisebb volt a csökkenés, átlagosan 16,9 %, az egyes terhelések és fordulatszámok között trend nem volt felfedezhető. Metanol bekeverése további jelentős csökkenést eredményezett, gázolajhoz viszonyítva az átlagos csökkenés több mint 40 % volt. Ez több okra is visszavezethető, egyrészt nőtt az előkevert szakaszban elégő tüzelőanyag és az elegy több oxigént tartalmazott [88] (más megfogalmazással jobb C/O arány); másrészt az alacsonyabb viszkozitás és sűrűség miatt javult a keveredés, harmadrészt az egyenes szénláncok kevésbé hajlamosak PM-kibocsátásra. Legnagyobb volt a csökkenés a

gázolajhoz képest 50 %-os és 100 %-os terheléseken, több mint 46 %, míg a legkisebb 75 %-os terhelésen 33 % volt.



103. ábra A részecske (PM) kibocsátás különböző terheléseken és fordulatszámokon gázolaj (D2), 30V/V % biodízel (30 % BioD) és 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M) elegyek esetén, valamint a 30 V/V % biodízel (30 % BioD / D2) és a 30V/V % biodízel+10V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M / D2) változása a gázolajhoz képest, valamint a 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanolt tartalmazó elegy változása a 30V/V % biodízelt tartalmazó elegyhez képest (30 % BioD - 10 % M / 30 % BioD). [S-13 alapján] ($\delta_{PM} \pm 3,00$ %)

Az egyes kutatók által tapasztalt [89], a metanol párolgásának hűtőhatása miatti növekedés itt nem volt megfigyelhető, feltehetőleg a magas kompresszióviszonynak köszönhetően.

Az átlagos változásokat a gázolajhoz képest a 10. táblázatban adtam meg.

	NOx vált. [%]	THC vált. [%]	CO vált. [%]	PM vált. [%]
30 % BioD	2,5 %	-37 %	-6 %	-17 %
30 % BioD - 10 % M	2 %	2 %	-9 %	-41%

10. táblázat A vizsgált emissziós komponensek átlagos változása a gázolajhoz képest ($\delta_{NOx} \pm 4,42$ %, $\delta_{CO} \pm 4,63$ %, $\delta_{THC} \pm 4,35$ %, $\delta_{PM} \pm 3,00$ %)

4.4.2. TÉZIS 6: ÖSSZEFOGLALÁSA A METANOL – BIODÍZEL - GÁZOLAJ ELEGYEKSEL KAPCSOLATOS EREDMÉNYEKNEK

A nagy kompresszió-viszonyú, feltöltött, osztatlan égésterű és egyszeres befecskendezésű dízelmotorban elvégzett vizsgálatok alapján a biodízel–gázolaj és biodízel–gázolaj–metanol elegyekkel kapcsolatban a következő összefüggéseket tudtam megállapítani: a 30 V/V %-ban bekevert repce metil-észter hatására a maximális nyomaték átlagosan nem változott, míg a 30 V/V % repce metil-észtert, 10 V/V % metanolt és 60 V/V % gázolajat tartalmazó elegy hatására a maximális nyomaték 94 %-ra csökkent. Ez elsősorban a biodízel nagyobb és a metanol tartalmú elegy kisebb viszkozitásának és az elegyek kisebb fűtőértékének volt a hatása.

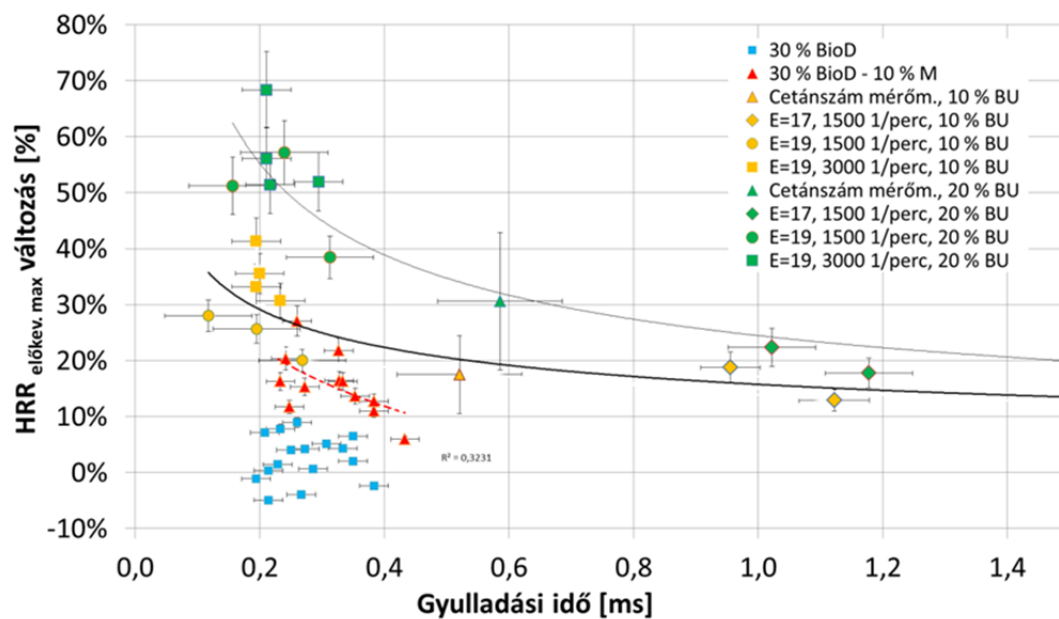
A NO_x-kibocsátására sem a biodízel, sem a metanol bekeverése nem volt jelentős hatással. A változás mértéke a gázolajhoz képest kisebb volt, mint a mérés pontossága. A THC-kibocsátás a biodízel-bekeverés hatására jelentősen, több mint 37 %-kal csökkent, míg ehhez képest a 10 V/V % metanol bekeverése közel 40 %-ra növelte, így a hármas eleggyel kapott THC-kibocsátás közel azonos volt a gázolajével. A CO-kibocsátás kismértékben csökkent biodízel-bekeverés hatására, a metanolbekeverés hatására elsősorban nagy terhelésen csökkent, míg kis terhelésen nőtt a CO-kibocsátás a gázolajhoz képest. A részecske-kibocsátást a biodízel és a metanol bekeverése is jelentősen csökkentette. Ez a biodízel bekeverése hatására átlagosan 17 %-kal, míg a metanolbekeverés hatása jelentősebben, átlagosan több mint 40 %-kal csökkent a gázolajhoz képest.

Összevetve a metanol és a *n*-butanol bekeverésének hatását az égési folyamatra a következőket állapítottam meg:

(6. tétel) A repce biodízel és metanol bekeverése hatására az előkevert égési szakasz változása és a gyulladási idő között a következő összefüggést mutattam ki:

A nagy kompresszióviszonyú, feltöltött, osztatlan égésterű és egyszeres befecskendezésű dízelmotorban történő felhasználás során a mérési eredmények alapján összehasonlítva a 70 V/V % gázolaj és 30 V/V % repce-metilészter elegyének hatását a gázolajjal megállapítható, hogy a gyulladási idő nem változik, az előkevert szakasz hasznos hőváltozásának (HRR) maximuma nem függött a gyulladási időtől és közel változatlan. A 60 V/V % gázolaj, 30 V/V % biodízel és 10 V/V % metanol elegy esetén a gyulladási idő átlagosan több, mint 10 %-kal nőtt meg a gázolajhoz képest. Az előkevert szakasz hasznos hőváltozásának maximuma az *n*-butanol bekeveréshez hasonlóan megnövekedett és ennek a mértéke is függ a gyulladási időtől, de ez a változás lényegesen, átlagosan közel 20 %-kal kisebb, mint 10 V/V % *n*-butanol bekeverése esetén [S-13].

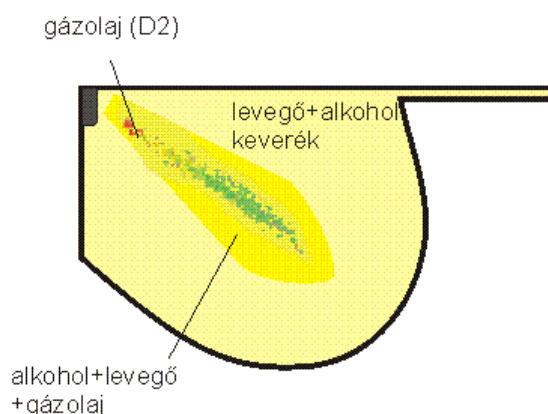
Ennek az az oka, hogy a metanol alacsonyabb hőmérsékleten, tehát korábban kezd el kipárologni, mint az *n*-butanol. Ez jelentősen növelhetné az előkevert szakasz hőváltozásának maximumát, ugyanakkor a metanol mintegy kétszeres párolgáshője és alacsonyabb fűtőértéke miatt a lényegesen kisebb az előkevert szakasz hasznos hőváltozásának (HRR) maximumának növekedése, mint *n*-butanol esetén.



104. ábra Az előkevert szakasz hasznos hőváltás (HRR) maximumának változása a gázolajhoz képest a gyulladási idő függvényében 30 V/V % biodízel (30 % BioD); 30 V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD – 10 % M), valamint 10 V/V % (10 % BU) és 20 V/V % n-butanol (20 % BU) elegyek esetén [S-10 , S-11, S-12 és S-13]

5. KETTŐS TÜZELŐANYAGÚ RENDSZEREK ÉRTÉKELÉSE

Az úgynevezett kettős tüzelőanyagú dízelmotorokban az elsődleges tüzelőanyagot a szívócsőbe fecskendezik be, és annak elpárolgása és az égéstérbe jutása után homogén keverék jön létre, amelyet egy másodlagos tüzelőanyag (pl. gázolaj) megfelelően időzített befecskendezése gyújt be (105. ábra). Az elsődleges tüzelőanyag lehet gáz halmazállapotú (pl. földgáz, biogáz, hidrogén, LPG stb.) vagy folyadék, mint például alkoholok (metanol, etanol, stb.) vagy egyéb elegyek pl. nedves etanol, elő- és utópárlat (pl. rézelő, kozmaolaj stb.) [S-14].



105. ábra A keveredési folyamat kettős tüzelőanyagú rendszer esetén

Az általam alkalmazott rendszert is egy olyan projekt keretében alakítottuk ki, ahol jelentős mennyiségű vizet (40-50 V/V %) tartalmazó alkoholelegy energetikai hasznosítása volt a cél (NKFP3-00006/2005 projekt). Az elért eredményekből egy szabadalom is született (Ügyszám: P0800645, [Sz-1]).

A kettős tüzelőanyagú dízelmotor üzemének fontos jellemzője az elsődleges tüzelőanyag energiatartalma (E_p):

$$E_p = \frac{LHV_p * \dot{B}_p}{LHV_p * \dot{B}_p + LHV_{D2} * \dot{B}_{D2}} \quad 7. \text{ egyenlet}$$

ahol LHV_p az elsődleges tüzelőanyag fűtőértéke, LHV_{D2} a gázolaj fűtőértéke, $\dot{B}_p$ az elsődleges tüzelőanyag tömegárama és $\dot{B}_{D2}$ a gázolaj tömegárama.

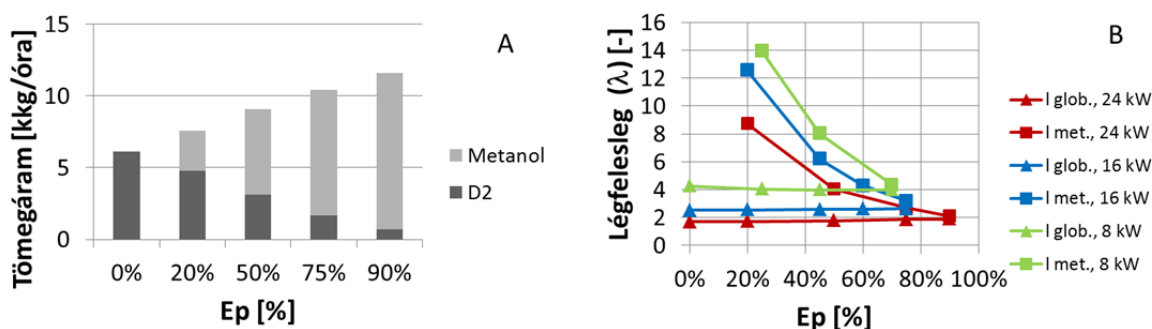
Ez kifejezi, hogy a bevitt hő mekkora része származik az elsődleges tüzelőanyagból, amely a jelen mérési sorozatban a metanol volt.

A jelen vizsgálatokat elvégeztük E85 tüzelőanyaggal is (85V/V % etanol és 15V/V % 95 OZ benzin, elegye) [S-15], de ezzel – mivel nem a témához tartozik – , jelen dolgozatomban nem foglalkozom.

Előzetes elképzelések (hipotézis) szerint az elsődleges tüzelőanyag (metanol) növelésével a motor üzeme, az égési folyamat és a károsanyag-kibocsátás jelentősen megváltozik. A szívócsőbe fecskendezett elsődleges tüzelőanyag jelentős része elpárolog, ezzel hűti a szívó vezetékét, így növeli a töltési fokot. Az égéstérbe jutó el nem gőzölgött elsődleges tüzelőanyag tovább hűtheti az elegyet. Ennek hatására

csökken a kompresszió vég hőmérséklete, ez növeli a gázolaj gyulladási idejét. Az elsődleges tüzelőanyag égési folyamata többféleképpen tud lezajlani:

- I. Kis elsődleges tüzelőanyag energiatartalom esetén az elsődleges tüzelőanyagra vonatkozó nagy légfelesleg miatt, csak az a tüzelőanyag elegy rész tud elérni, amely kapcsolatba kerül az eléggő gázolaj lángfrontjával, ennek hatására az elsődleges tüzelőanyag egy része nem tud tökéletesen elégni, magas THC- és CO-kibocsátás várható.
- II. Nagyobb elsődleges tüzelőanyag energiatartalom esetén az elsődleges tüzelőanyagra vonatkozó kisebb légfelesleg miatt a gázolaj égése indítja az égési folyamatot. Majd az elsődleges tüzelőanyag–levegő keverékben kialakul egy lángfront és ennek hatására ég el az elsődleges tüzelőanyag. Ennek intenzitása függ az elsődleges tüzelőanyag légfelesleg-tényezőjétől és a gyújtó gázolaj égés interakciójától (mekkora felületen gyújtja be az elsődleges elegyet). Ennek hatására csökken a THC- és CO-kibocsátás és a PM- és NO_x-kibocsátást az elsődleges tüzelőanyag égése határozza meg.
- III. Az elsődleges tüzelőanyagra vonatkozó kisebb légfelesleg esetén és kései előbefecskendezés esetén elsődleges tüzelőanyag égési folyamata öngyulladással kezdődik el (hasonlóan mint a HCCI égés).



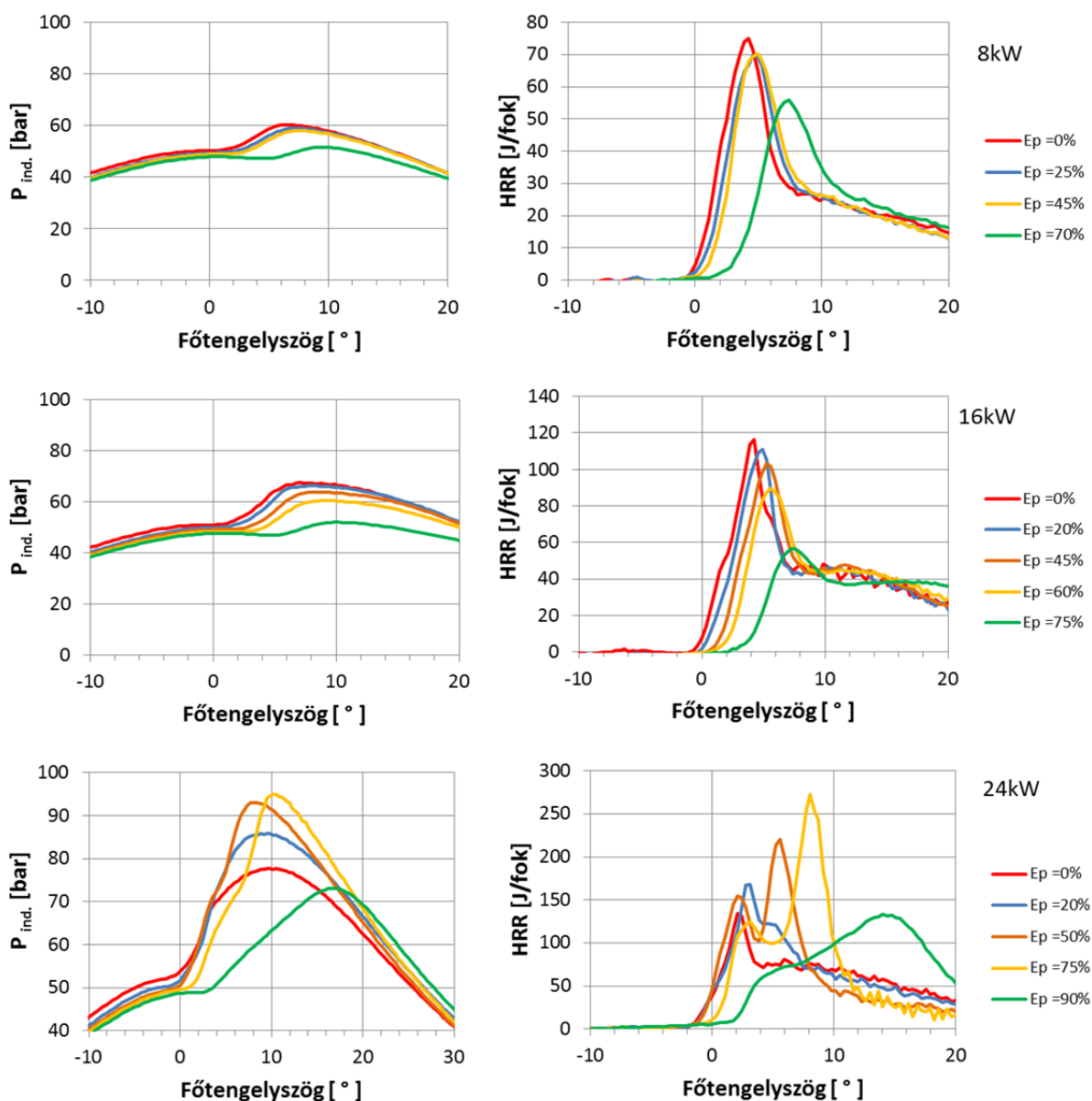
106. ábra A gázolaj (D2) és metanol tüzelőanyagok tömegáramai 24 kW terhelésen (A), és a globális és a metanolra vonatkozó légfelesleg különböző elsődleges tüzelőanyag energiatartalom esetén különböző terheléseken (B) [S-15 alapján]

A bemutatásra kerülő értékelés során három terhelésen végeztem el a vizsgálatokat, teljes terhelésen (24 kW), 2/3 (16 kW) terhelésen és 1/3 terhelésen (8 kW), a motor fordulatszáma állandó 1500 1/perc volt. Az ezekhez a terhelésekhez tartozó effektív teljesítmények a M-7 mellékletben találhatóak. Mivel a kettős tüzelőanyagú rendszerek esetén a cél az elsődleges tüzelőanyag mennyiség növelése volt, így a mérési sorozat során folyamatosan növeltem szerzőtársaimmal a szívócsőbe fecskendezett metanol mennyiségét, ennek hatására a motor adagolószivattyúja állandó terhelés mellett folyamatosan csökkentette a gázolaj mennyiségét a fordulatszám állandó értéken tartásának érdekében (106. ábra, A).

A kettős tüzelőanyagú rendszerek jellegzetessége, hogy lehet definiálni a globális légfelesleg-tényezőt az összes, illetve külön az elsődleges tüzelőanyagra. Jól megfigyelhető volt, hogy a globális légfelesleg-tényező a metanol esetén közel állandó effektív hatásfok esetén (106. ábra, B) az elsődleges tüzelőanyag energiatartalom növekedésével kismértékben nőtt. Ennek oka, hogy a metanol elméleti légfelesleg-tényezője 2,25-töd része a gázolaj elméleti légfelesleg-tényezőjének, míg a fűtőértéke 2,05-öd része a gázolaj fűtőértékének. Ennek a következménye, hogy az egységnyi levegőbe bevezethető hő metanol esetén 102,30 %-a gázolajénak [S-14]. Ezzel szemben a

metanolra vonatkozó légfelesleg az elsődleges tüzelőanyag energiatartalom növelésével csökkent, a legdúsabb elegy esetén, 24 kW terhelésen is csak ~ 2 [-], amely már a gyulladási határ közelében volt. Részterheléseken (8kW és 16 kW) mind a két érték lényegesen nagyobb volt.

Az égési folyamat megértéséhez ebben az esetben is érdemes áttekinteni első lépésben az indikátordiagramokat és a hasznos hőváltozásokat (HRR) a főtengelyszög függvényében (107. ábra). A bemutatott eredmények 24 kW esetén konstans $7,5^\circ$ -os, míg részterhelések esetén 5° -os előbefecskendezési szöghöz tartoztak. Minden indikátor diagramon jól megfigyelhető, hogy a kompresszió során a nyomás értékek az elsődleges tüzelőanyag energiatartalom növekedésével csökkennek. Ennek egyik oka az alkohol párolgásának hőelvonása és a másik politropikus tényező változása a metanol gőz tartalom növekedése miatt.

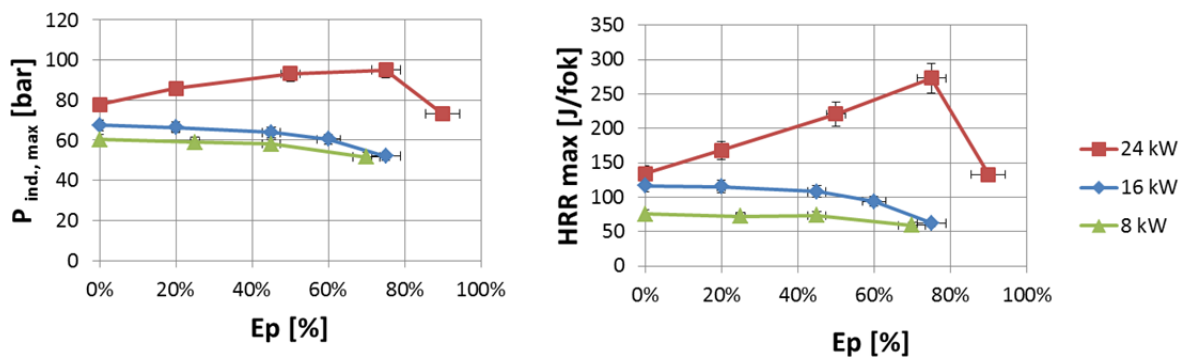


107. ábra Az indikált nyomás (P_{ind}) és a hasznos hőváltozás a főtengelyszög függvényében különböző elsődleges tüzelőanyag energiatartalmak és terhelések esetén ($\delta_{P_i} \pm 3,29\%$, $\delta_{HRR} \pm 7,90\%$) [S-15 alapján]

A 24 kW-os terhelésen a nyomásmaximumok 75 % E_p -ig növekedtek, a maximum értékek viszont egyre hamarabb voltak –közelebb kerültek a felső holtponthoz–, a

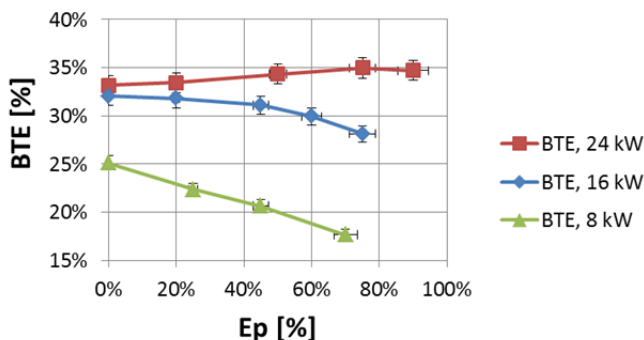
75 %-os E_p -ig, ebben az esetben már későbbre, 10° -ra került a maximum érték. A 90 %-os E_p esetén a nyomásmaximum jelentősen csökken és a maximum érték helye is lényegesen később volt. Ennek okai a HRR függvényeken jól láthatók. A kompresszió vég hőmérséklete csökken, de a gyulladási időben jelentős növekedés nem volt tapasztalható 50 % E_p -ig. Viszont a görbék lefutása jelentősen eltért. A tiszta gázolaj esetén jól megfigyelhető volt a hagyományos előkevert – diffúz égési folyamat. Már 20 % E_p esetén az előkevert szakasz maximuma megnőtt – hasonlóan a diffúz égési szakasz elejéhez. Feltételezhető, hogy itt égett ki a meglehetősen tüzelőanyagban szegény metanol keverék (106. ábra, B.). A metanoltartalom további növelésével (50 % E_p) az égési folyamat ismét jelentősen átalakult, az előkevert szakasz elején beindult a metanol intenzív égése, majd a diffúz szakaszban folytatódott és ott érte el a maximumát a HRR. Tovább növelve a metanoltartalmat (75 % E_p) a gyulladási idő megnőtt. Mivel jelentősen csökkent a bevitt gázolaj, az előkevert szakasz intenzitása csökkent, így ez kevesebb metanolt tudott begyűjtani. A metanol intenzív égése ezután kezdődött és itt is a diffúz szakaszban érte el a maximumát. A 90 %-os E_p esetén az égési folyamat ismét jelentősen változott. A gyulladási idő jelentősen megnőtt, mivel csökkent a hőmérséklet, de továbbra is a gázolaj égése indította el az égési folyamatot, de a metanol kiégése a nagy légfelesleg miatt lassan zajlott le az égéstérben. Ezért a HRR maximum 15° környékén volt. Tehát kis és közepes elsődleges tüzelőanyag energia tartalom esetén a gázolaj égés közvetlenül a környezetében lévő metanol-levegő keveréket gyújtotta be, addig ebben az esetben, már a metanol-levegő keverék égése fenn tudta tartani az égési folyamatot.

A 16 kW-os és a 8 kW-os terheléseken az előzőektől eltérő nyomás lefutásokat és égési folyamatokat lehetett megfigyelni. Mindkét terhelésen a metanol tartalom növelésével a nyomásmaximumok folyamatosan csökkentek és a maximum nyomás szöghelyzete is folyamatosan későbbre került. A hasznos hőváltásokat megvizsgálva látható volt, hogy a gyulladási idő nem jelentősen, de nőtt ($0,6-0,9^\circ$) az elsődleges tüzelőanyag energia tartalom növelésével - eltekintve a legnagyobb metanol arányoktól, ahol ez több fok. A hasznos hőváltások maximum értékei csökkentek és folyamatosan későbbre kerültek (108. ábra). A diffúz égési szakaszban nem változott a hasznos hőváltás, kivéve 16 kW-os terhelés és 45 %-os, 60 %-os E_p esetén. Ebben a két esetben kismértékű növekedés volt tapasztalható. Ezek alapján mindkét terhelés esetében megállapítható volt, hogy elsősorban a gázolaj égés környezetében égett el a nagy légfelesleggel rendelkező elsődleges tüzelőanyag, ahogyan nőtt az elsődleges tüzelőanyag mennyisége, csökkent metanol-levegő keverék légfeleslege, így kismértékben javult az égés. A két legnagyobb E_p esetén (16 kW, 75 % és 8kW, 70 %) jelentősen megnőtt a gyulladási idő. Itt nem volt tapasztalható a 24 kW-os 90 %-os E_p -nél megfigyelhető égéslefutás, tehát elsősorban ebben az esetben is a gázolaj égés környezetében égett el az elsődleges tüzelőanyag.



108. ábra Az indikált nyomásmaximumok és a hasznos hőváltozás maximuma az elsődleges tüzelőanyag energia tartalomnak függvényében különböző terheléseken ($\delta_{P_i} \pm 3,29 \%$, $\delta_{HRR} \pm 7,90 \%$) [S-15 alapján]

Az indikált nyomásmaximumok és a hasznos hőváltozás maximuma esetén hasonló eredményt tapasztaltunk, mint az az előző leírás alapján várható volt. A 24 kW-os terhelés esetén az elsődleges tüzelőanyag energiatartalom növelésével a metanol égésének intenzitása nőtt a csökkenő légfelesleg miatt. A legnagyobb, 90 %-os E_p esetén az égésben nagyrészt a metanol-levegő keverék vett részt, amely lényegesen lassabb volt a nagy légfelesleg miatt, így itt mindkét paraméter csökkent. Közepes és kis terhelésen az elsődleges tüzelőanyag energiatartalmának növelésével az égési folyamat romlott, így ebben az esetben mindkét paraméter csökkent, legjelentősebben a legnagyobb E_p esetén (108. ábra).



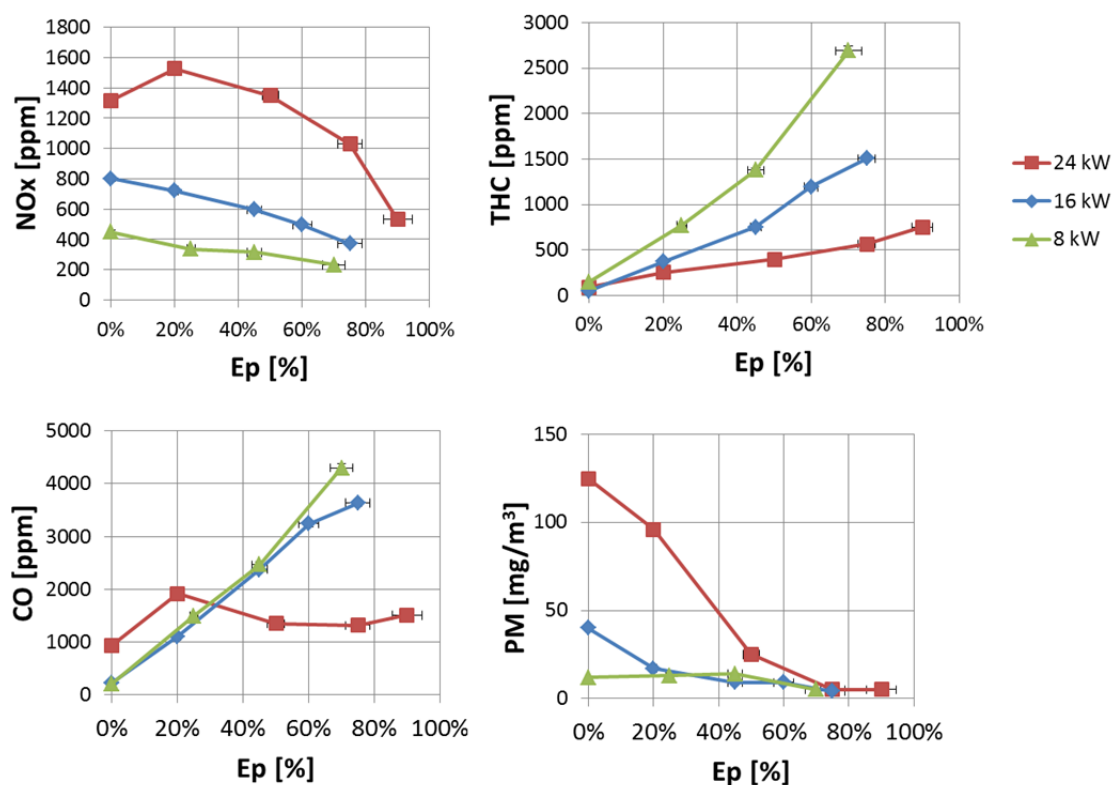
109. ábra Az effektív hatásfok (BTE) az elsődleges tüzelőanyag energiatartalmának függvényében különböző terheléseken [S-15 alapján] ($\delta_{BTE} \pm 1,65 \%$)

Az effektív hatásfok és károsanyag-kibocsátás vizsgálata esetén nem állandó előbefecskendezést, hanem olyan értékeket alkalmaztam, ahol jó hatásfok mellett alacsony NO_x-kibocsátás volt tapasztalható. Az effektív hatásfok (BTE) szintén eltérően változott teljes terhelésen és a részterheléseken (109. ábra). A teljes terhelésen megfigyelhető volt, hogy a metanoltartalom növelésével egészen 90 %-os E_p -ig a nyomásmaximum nőtt, annak maximuma későbbre tolódott, de ezt a veszteséget kompenzálni tudta a kompressziómunka csökkenése, így kismértékben nőtt a BTE. A 90 %-os E_p esetén már romlott az effektív hatásfok. A részterheléseken szintén csökkent a kompressziómunka, viszont a nyomásmaximumok csökkentek és szintén későbbre tolódtak, így a hatásfok csökkent.

5.1.1. A KETTŐS TÜZELŐANYAGÚ METANOLBEKEVERÉS HATÁSA KÁROSANYAG-KIBOCSÁTÁSRA

A NO_x-kibocsátás teljes terhelésen 20 % E_p-ig közel 20 %-kal nőtt, majd csökkent az E_p növelésével (110. ábra). Ennek legfontosabb oka, hogy nőtt az előkevert szakaszban eléggő tüzelőanyag mennyisége 20 % E_p-ig. Tovább növelve az elsődleges tüzelőanyag energia tartalmát, a kibocsátás csökkent. Ennek okai, hogy az előkevert égési szakasz egyre nagyobb része került az expanzióba és nőtt a metanol hűtő hatása. A légfelesleg csökkenése ebben az esetben nem játszott jelentős szerepet. Részterheléseken a kibocsátás az E_p növelésével folyamatosan csökkent. Ennek oka az előkevert égési szakasz intenzitásának csökkenése, az expanzióba kerülése és emiatt a hőmérséklet csökkenése.

Az el nem égett szénhidrogén (THC) kibocsátás minden terhelésen emelkedett az elsődleges tüzelőanyag energia tartalom növelésével. Meglátásom szerint ennek oka elsősorban a több metanol el nem égése, azaz az alkoholtartalom növelésével egyre több metanol nem égett el, legfontosabb ok a nagy légfelesleg, valamint fal lángkioltó hatása.



110. ábra Az NO_x-, THC-, CO- és PM-kibocsátás az elsődleges tüzelőanyag energiataralmának függvényében különböző terheléseken ($\delta_{NO_x} \pm 4,42\%$, $\delta_{CO} \pm 4,63\%$, $\delta_{THC} \pm 4,35\%$, $\delta_{PM} \pm 3,00\%$) [S-15 alapján]

A dízelmotoroknál a CO-kibocsátás elsősorban a lokális oxigén hiány hatására keletkezik, így az oxigént tartalmazó komponensek bekeverése csökkenti a CO-kibocsátását (lásd pl. 102. ábra). Ebben az esetben viszont nagy terhelésen a CO-kibocsátás 20 % E_p-nál több, mint kétszeresére megnőtt, nagyobb E_p-nál 40-45 %-kal nőtt, majd 90 %-os E_p esetén növekedett 60 %-kal a gázolajhoz képest, ennek feltételezhető oka, hogy az alkohol égése során a CO égése nem zajlott le teljes mértékben. A két vizsgált részterhelésen az égés minősége jelentősen romlott, így a CO-kibocsátás drasztikusan megnőtt.

A részecskekibocsátás az alkohol bekeveréssel jelentősen csökkent, teljes terhelésen 90 %-os E_p esetén alig 4 %-ra csökkent a tiszta gázolajos méréshez képest, ennek elsődleges oka a csökkenő gázolajtartalom.

5.1.2. TÉZIS 7: ÖSSZEFOGLALÁSA A KETTŐS TÜZELŐANYAGÚ METANOLBEKEVERÉSSSEL KAPCSOLATOS EREDMÉNYEKNEK

Az elvégzett vizsgálatok eredményei alapján a következőket állapítottam meg:

(7. tézis) Kettős tüzelőanyagú dízelmotoros felhasználás során metanol elsődleges tüzelőanyaggal összefüggést találtam az elsődleges tüzelőanyagra jellemző légfelesleg-tényező és a motorparaméterek, valamint a károsanyag-kibocsátás között:

Az általam vizsgált motor esetén metanol külső keverékképzés és gázolaj másodlagos tüzelőanyag felhasználása esetén nagy terhelésű esetekben nagy elsődleges tüzelőanyag-energiatartalom és a gázolaj-befecskendezés megfelelő időzítése esetén jó hatásokkal lehet a metanolt hasznosítani alacsony NO_x - és részecskekibocsátás mellett, miközben az el nem égett szénhidrogén és a CO kibocsátása megnövekedett, mivel ezekben az esetekben az elsődleges tüzelőanyag légfeleslege az éghető tartományban volt. Azokban az esetekben, amikor a metanol-levegő keverék túl szegény volt tüzelőanyagban, a keverék elsősorban a gázolaj-láng környezetében tudott csak elégni. Így a THC- és CO-kibocsátás igen jelentősen növekedett, míg a NO_x -kibocsátás mérséklődött és a PM-kibocsátás pedig jelentősen csökkent. ([S-14], [S-15] és [S-16])

A fenti eredmények alapján a hagyományos kettős tüzelőanyagú rendszerek nagy terhelésen megfelelően alkalmazhatók az általam alkalmazott megoldásokkal, ezért ezek állandó terhelésű energiatermelő rendszerekben, vagy olyan hibrid megoldások esetén alkalmazhatók, ahol a dízelmotor nagy terhelésen üzemel. Ezekben az esetben a NO_x - és a PM-kibocsátás is jelentősen csökkenthető.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Disszertációmban egyes megújuló tüzelőanyagok újszerű hasznosítására kerestem megoldásokat, amelyek a meglévő dízelmotorok lehető legkisebb átalakításával járnak. Ennek érdekében első részben nagyobb szénatomszámú alkoholok (propanol és izomerjei; butanol és izomerjei) és nyers repceolaj elegyeit vizsgáltam. Az eredmények alapján megállapítottam, hogy 20 V/V % alkohol bekeverés esetén az elegyek viszkozitása továbbra is lényegesen nagyobb, mint a gázolaj ($2,0\text{--}4,5\text{ mm}^2/\text{s}$, EN 590:1999), illetve biodízel ($3,5\text{--}5\text{ mm}^2/\text{s}$, EN 14214) szabványok viszkozitással szembeni követelményei. Ezért a továbbiakban hármass elegyekkel foglalkoztam, és a vizsgált nyersolajok körét kibővítettem Európában kevésbé ismert és alkalmazott olajokkal is, együttműködve dél-afrikai partnerekkel. Ezek az olajok a kroton-, a kókusz- és a jatrophaolajok voltak. A nyers növényolajok vizsgálata során elért eredményeket (viszkozitás, sűrűség, fűtőérték, cetánszám, elemi összetétel és TG/DTG mérések) összefoglaltam, továbbá a négy vizsgált olajból készített biodízelek fizikai és kémiai tulajdonságait is bemutattam.

A vizsgált hármass elegyekről (15 V/V % nyers krotonolaj, 5 V/V % *n*-butanol és 80 V/V % gázolaj; 10 V/V % nyers krotonolaj, 10 V/V % *n*-butanol és 80 V/V % gázolaj) megállapítottam, hogy teljesítik az EN 590:1999 és EN 14214 szabványok követelményeit a kinematikai viszkozitás szempontjából. Az elért eredmények iránymutatók az elsősorban magas viszkozitású tüzelőanyagok hasznosításának területén.

A kettős- és a hármass elegyek felhasználását vizsgáltam dízelmotorokban. Amíg a kettős elegyekkel végzett tesztek szerint azok nem hasznosíthatók tüzelőanyagként, addig a hármass elegyek használhatók a motor üzemi, égési folyamata, károsanyag-kibocsátásával kapcsolatos vizsgálati eredményei alapján és a környezet terhelés szempontjából.

Vizsgáltam a gázolaj – *n*-butanol kettős elegyeket is úgy, hogy a méréseket három különböző motorban végeztem el. A vizsgálatok során tapasztaltak alapján három tézist fogalmaztam meg: megállapítottam, hogy az *n*-butanol bekeverésének hatására az előkevert szakasz hasznos hőváltozása (HRR) maximuma a referencia gázolajhoz képest nő az *n*-butanol bekeveréssel és a növekmény csökken a gyulladási idővel. A szabályozott károsanyag komponensek keletkezése motoronként eltérő az *n*-butanol bekeverésének hatására. A THC-kibocsátás gázolajhoz viszonyítva kis gyulladási idő esetén nőtt, nagy gyulladási idő esetén csökkent, a változás függ *n*-butanol bekeveréstől és az logaritmikusan csökkent a gyulladási idő függvényében kis légfelesleg esetén, nagy légfelesleg esetén összefüggés nem mutatható ki. A PM-kibocsátás csökkent *n*-butanol gázolajba történő bekeverésével és annak mértéke logaritmikusan csökken a gyulladási idővel. Ezért az *n*-butanol bekeverése további lehetőségeket teremt a motorfejlesztés számára, mivel a csökkenő részecskékibocsátás miatt lehetővé válik különböző további NO_x-kibocsátás csökkentési technológiák alkalmazása.

További vizsgálatokat végeztem el metanollal: egy kettős és egy hármass elegyet vizsgáltam nagy kompresszióviszonyú dízelmotorban. Megállapítottam, hogy 30 V/V %

repce metil-észtert, 10 V/V % metanolt és 70 V/V % gázolajat tartalmazó elegy alkalmazásakor a gázolajhoz képest a maximális nyomaték csökkent. A metanol bekeverésének nem volt jelentős hatása az effektív hatásfokra. Az égési folyamat szempontjából 10 V/V % metanol bekeverésének hatására az előkevert szakasz hasznos hőváltásának (HRR) maximuma több, mint 10 %-kal nőtt, de átlagosan közel 20 %-kal kisebb, mint 10 V/V % *n*-butanol bekeverése esetén. A NO_x-kibocsátásra sem a biodízel, sem az alkohol bekeverés nem volt jelentős hatással, a THC-kibocsátás változatlan maradt, a CO-kibocsátás átlagosan kismértékben csökkent, míg a részecskekibocsátás a metanol bekeverése hatására jelentősebben, átlagosan több mint 40 %-kal csökkent a gázolajhoz képest.

Végezetül a metanol felhasználását vizsgáltam kettős tüzelőanyagú motorban. A vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy nagy terheléseken az elsődleges tüzelőanyag nagy energiatartalma és a gázolaj befecskendezésének megfelelő időzítése esetén jó hatásfokkal lehet a metanolt hasznosítani alacsony NO_x- és részecskekibocsátás mellett, miközben az el nem égett szénhidrogén és CO-kibocsátás növekszik. Kisebb elsődleges tüzelőanyag-energiatartalom és részterhelések esetén az elsődleges tüzelőanyag-keverék olyan szegénnyé válhat, hogy a felhasználás már nem hatékony. Ezért ez a megoldás elsősorban állandó nagy terhelés és nagy elsődleges tüzelőanyag-energiatartalom esetén alkalmazható hatékonyan. Részterheléseken és alacsony elsődleges tüzelőanyag-energiatartalom esetén további lehetőségeket ad az optimalizálásra az RCCI és a többszörös (Split) befecskendezés alkalmazása [12], valamint a beszívott levegő mennyiségének szabályozása [Sz-1]. Viszont ezeknek a módszereknek az alkalmazása és vizsgálata további kutatásokat igényel.

Budapest, 2020. március 30.

MELLÉKLETEK

M-1. HIVATKOZOTT FORRÁSOK

- [1] D. Helbig, D. Sandau és J. Heinrich, „The Future of the Automotive Value Chain 2025 and beyond,” 2017.
- [2] X. Mosquet, H. Zablit, A. Dinger, G. Xu, M. Andersen és K. Tominaga, „The Electric Car Tipping Point,” Boston Consulting Group (BCG), 2018.
- [3] N. Hill és J. Bates, „Europe’s Clean Mobility Outlook: Scenarios for the EU light-duty vehicle fleet, associated energy needs and emissions, 2020-2050,” 2018.
- [4] R. Field, H. W. Green, C. R. Armstrong, S. Paltsev, M. Ben-Akiva, B. Reimer és J. Heywood, „Insights into Future Mobility,” Massachusetts Institute of Technology Energy Initiative, Cambridge, 2019.
- [5] N. Hemmerlein, V. Korte és H. Richter, „Performance, exhaust emission and durability of modern diesel engines running on rapeseed oil,” *SAE paper 910848*, 1991.
- [6] M. L. Schlick, M. A. Hanna és J. L. Schinstock, „Soybean and Sunflower Oil Performance in a Diesel Engine,” *ASAE*, kötet: 31, szám: 5, pp. -, 1988.
- [7] A. Demirbas, „Biodiesel: a realistic fuel alternative for diesel engines,” *Springer Verlag*, 2008.
- [8] A. C. Pinto, L. L. N. Guarieiro, M. J. C. Rezende, N. M. Ribeiro, E. A. Torres, W. A. Lopes, P. A. d. P. Pereira és J. B. d. Andrade, „Biodiesel: an overview,” *Journal of the Brazilian Chemical Society*, kötet: 16, pp. 1313-1330, 2005.
- [9] R. Altin, S. Çetinkaya és H.S. Yücesu, „The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines,” *Energy Conversion and Management*, kötet: 42, szám: 5, pp. 529-538, 2001.
- [10] A. Corsini, A. Marchegiani, F. Rispoli, F. Sciull és P. Venturini, „Vegetable oils as fuels in Diesel engine. Engine performance and emissions,” *Energy Procedia*, kötet: 81, pp. 942 – 949, 2015.
- [11] A. Sapit, M. A. Razali, M. F. Hushim, M. F. M. Ali, A. Khalid és B. Manshoor, „Study on Spray Characteristics and Spray Droplets Dynamic Behavior of Diesel Engine Fueled by Rapeseed Oil,” *MATEC Web of Conferences*, kötet: 13, 2014.
- [12] X. Han, Z. Yang, W. Meiping, T. Jimi and Z. Ming, „Clean combustion of n-butanol as a next generation biofuel for diesel engines,” *Applied Energy*, vol. 198, p. 347–359, 2017.
- [13] Y. Liu, W. L. Cheng, M. Huo, C.F.Lee és J. Li, „Effects of Micro-Explosion on Butanol-Biodiesel-Diesel Spray and Combustion,” *ILASS-Americas 22nd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Cincinnati, OH, May 2010.
- [14] M. Xiaokang, Z. Fujun, H. Kai, Y. Bo és S. Guoqian, „Evaporation characteristics of acetone–butanol–ethanol and diesel blends droplets at high ambient temperatures,” *Fuel*, kötet: 160, pp. 43-49, 2015.
- [15] C. Shen, W. L. Cheng, K. Wang és C. C. F. Lee, „Estimating the Secondary Droplet Size Distribution after Micro-Explosion of Bio-Fuel Droplets,” *ILASS-Americas 22nd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Cincinnati, OH, May 2010.
- [16] M. M. Avulapati, L. C. Ganippa, J. Xia és A. Megaritis, „Puffing and micro-explosion of diesel–biodiesel–ethanol blends,” *Fuel*, kötet: 166, pp. 59-66, 2016.
- [17] M. Lapuerta, J. J. Hernande, D. Fernandez-Rodríguez és A. Cova-Bonillo, „Autoignition of blends of n-butanol and ethanol with diesel or biodiesel fuels in a constant-volume combustion chamber,” *Energy* 118, pp. 613-621, 2017.
- [18] H. Liu, C.-F. Lee, M. Huo és M. Yao, „Comparison of Ethanol and Butanol as Additives in Soybean Biodiesel Using a Constant Volume Combustion Chamber,” *Energy Fuels* 25 (4), p. 1837–1846, 2011.
- [19] A. Murugesan, C. Umarani, R. Subramanian és N. Nedunchezian, „Bio-diesel as an alternative fuel for diesel engines - A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, kötet: 13, szám: 3, pp. 653-662, 2009.
- [20] M. T. Chaichan, „Practical Measurements Of Premixed Laminar Burning Velocities And Markstein Numbers Of Iraqi Diesel-Oxygenates-Air Blends,” *The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering*, kötet: 13,

szám:2, 2013.

- [21] M. T. Chaichan, „Measurements of Laminar Burning Velocities and Markstein Length for LPG–Hydrogen– Air Mixtures,” *International Journal of Engineering Research and Development*, kötet: 9, szám: 3, pp. 1-9, 2013.
- [22] P. S. Veloo, Y. L. Wang, F. N. Egolfopoulos és C. K. Westbrook, „A comparative experimental and computational study of methanol, ethanol, and n-butanol flames,” *Combustion and Flame*, kötet: 157, p. 1989–2004, 2010.
- [23] Beeckmann, L. Cai és H. Pitsch, „Experimental investigation of the laminar burning velocities of methanol, ethanol, n-propanol, and n-butanol at high pressure,” *Fuel*, kötet: 117, p. 340–350, 2014.
- [24] G. Pierre-Alexandre, F. René, B. Roda és M. Michel, „Adiabatic flame temperature from biofuels and fossil fuels and derived effect on NOx emissions,” *Fuel Processing Technology*, kötet: 91, p. 229–235, 2010.
- [25] S. G. Law és C. K. Davis, „Determination of and Fuel Structure Effects on Laminar Flame Speeds of C1 to C8 Hydrocarbons,” *Combust. Sci. and Tech.*, kötet: 140, pp. 427-449, 1998.
- [26] M. Babu, K. M. Madhu és G. A. P. Rao, „Butanol and pentanol: The promising biofuels for CI engines – A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, kötet: 78, p. 1068–1088, 2017.
- [27] R. Kumar és S. Saravanan, „Use of higher alcohol biofuels in diesel engines: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, kötet: 60, pp. 84-115, 2016.
- [28] Industrial Technology Research Institute (ITRI), „Carbon Neutral Cellulosic Butanol Production Technology,” [Online]. Available: <https://www.itri.org.tw/eng/Content/MsgPic01/Contents.aspx?SiteID=1&MmmID=620651711540203650&MSId=621024013455343177>. [Hozzáférés dátuma: 18 02 2019].
- [29] M. Karabektas és M. Hosoz, „Performance and emission characteristics of a diesel engine using isobutanol– diesel fuel blends,” *Renew Energy*, kötet: 34, szám: 6, pp. 1554-1559, 2009.
- [30] A. Ozsezen, A. Turkcan, C. Sayin és M. Canakci, „Comparison of performance and combustion parameters in a heavy-duty diesel engine fueled with iso-butanol/diesel fuel blends,” *Energy Exploration & Exploitation*, 29(5): pp: 525–41., 2011.
- [31] O. Doğan, „The influence of n-butanol/diesel fuel blends utilization on a small diesel engine performance and emissions,” *Fuel*, kötet: 90, szám: 7, pp. 2467-2472, 2011.
- [32] X. Gu, G. Li, X. Jiang, Z. Huang és C. F. Lee, „Experimental study on the performance of and emissions from a low-speed light-duty diesel engine fueled with n-butanol–diesel and isobutanol–diesel blends,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, kötet: 227, szám: 2, p. 261–271., 2013.
- [33] H. Liu, S. Li, Z. Zheng, J. Xu és M. Yao, „Effects of n-butanol, 2-butanol, and methyl octynoate addition to diesel fuel on combustion and emissions over a wide range of exhaust gas recirculation (EGR) rates,” *Appl Energy*, kötet: 112, p. 246–256, 2013.
- [34] Z. Zheng, C. Li, H. Liu, Y. Zhang, X. Zhong és M. Yao, „Experimental study on diesel conventional and low temperature combustion by fueling four isomers of butanol,” *Fuel*, kötet: 141, pp. 109-119, 2015.
- [35] D. Rakopoulos, C. Rakopoulos, R. Papagiannakis és D. Kyritsis, „Combustion heat release analysis of ethanol or n-butanol diesel fuel blends in heavy-duty DI diesel engine,” *Fuel*, kötet: 90, szám: 5, pp. 1855-1867, 2011.
- [36] M. I. Al-Hasan és M. Al-Momany, „The effect of iso-butanol-diesel blends on engine performance,” *Transport*, kötet: 23, szám: 4, pp. 306-310, 2008.
- [37] M. Yao, H. Wang, Z. Zheng és Y. Yue, „Experimental study of n-butanol additive and multi-injection on HD diesel engine performance and emissions,” *Fuel*, kötet: 89, szám: 9, pp. 2191-2201, 2010.
- [38] S. Miers, R. Carlson, S. McConnell és N. H.K., „Drive cycle analysis of butanol/diesel blends in a light-duty vehicle,” *SAE Technical Paper Series*, 22008-01-2381., 2008.
- [39] D. Rakopoulos, C. Rakopoulos, E. Giakoumis, A. Dimaratos és D. Kyritsis, „Effects of butanol–diesel fuel blends on the performance and emissions of a high-speed DI diesel engine,” *Energy Convers Manag*, kötet: 51, szám: 10, pp. 1989-1997, 2010.
- [40] C. Rakopoulos, A. Dimaratos, E. Giakoumis és R. D.C., „Study of turbocharged diesel engine operation, pollutant emissions and combustion noise radiation during starting with bio-diesel or n-butanol diesel fuel blends,” *Appl Energy*, kötet: 88, szám: 11, pp. 3905-3916, 2011.
- [41] O. Armas, R. García-Contreras és Á. Ramos, „Pollutant emissions from engine starting with ethanol and butanol diesel blends,” *Fuel Process Technol*, kötet: 100, pp. 63-72, 2012.
- [42] Z. Chen, J. Liu, Z. Han, B. Du, Y. Liu és C. Lee, „Study on performance and emissions of a passenger-car diesel engine fueled with butanol–diesel blends,” *Energy*, kötet: 55, pp. 638-646, 2013.

- [43] B. Choi, Y. Kim, G. Jung, C. Lee, X. Jiang és I. Choi, „Effect of diesel fuel blend with biobutanol on the emission of turbocharged CRDI diesel engine.,” *Energy Procedia*, kötet: 61, pp. 2145-2148, 2014.
- [44] S. Merola, C. Tornatore, S. Iannuzzi, L. Marchitto és G. Valentino, „Combustion process investigation in a high speed diesel engine fuelled with n-butanol diesel blend by conventional methods and optical diagnostics.,” *Renew Energy*, kötet: 64, pp. 225-237, 2014.
- [45] Z.-H. Zhang és R. Balasubramanian, „Influence of butanol–diesel blends on particulate emissions of a non-road diesel engine.,” *Fuel*, kötet: 118, pp. 130-136, 2014.
- [46] B. Choi és X. Jiang, „Individual hydrocarbons and particulate matter emission from a turbocharged CRDI diesel engine fueled with n-butanol/diesel blends,” *Fuel*, kötet: 154, pp. 188-195, 2015.
- [47] B. Choi, X. Jiang, Y. Kim, G. Jung, C. Lee, I. Choi és C. Song, „Effect of diesel fuel blend with n-butanol on the emission of a turbocharged common rail direct injection diesel engine.,” *Applied Energy*, kötet: 146, pp. 20-28, 2015.
- [48] Z. Şahin és O. N. Aksu, „Experimental investigation of the effects of using low ratio n-butanol/diesel fuel blends on engine performance and exhaust emissions in a turbocharged DI diesel engine,” *Renewable Energy*, kötet: 77, pp. 279-290, 2015.
- [49] G. Valentino, F. Corcione, S. Iannuzzi és S. Serra, „Experimental study on performance and emissions of a high speed diesel engine fuelled with n-butanol diesel blends under premixed low temperature combustion.,” *FUEL*, kötet: 1, pp. 295-307, 2012.
- [50] G. Valentino, F. Corcione és S. Iannuzzi, „Effects of gasoline-diesel and n-butanol-diesel blends on performance and emissions of an automotive direct-injection diesel engine.,” *Int. J. Engine. Res.*, kötet: 13, szám: 3, pp. 199-215, 2012.
- [51] C. Tornatore, L. Marchitto, A. Mazzei, G. Valentine, F. Corcione és S. Merola, „Effect of butanol blend on in-cylinder combustion process, Part 2: Compression ignition engine,” *J KONES Powertrain Transp*, kötet: 18, szám: 2, pp. 473-489, 2011.
- [52] G. Chen, Y. Shen, Q. Zhang, M. Yao, Z. Zheng és H. Liu, „Experimental study on combustion and emission characteristics of a diesel engine fueled with 2,5-dimethylfuran–diesel, n-butanol–diesel and gasoline–diesel blends,” *Energy*, kötet: 54, pp. 333-342, 2013.
- [53] Z. Chen, Z. Wu, J. Liu és C. Lee, „Combustion and emissions characteristics of high n-butanol/diesel ratio blend in a heavy-duty diesel engine and EGR impact.,” *Energy Convers Manag*, kötet: 78, pp. 787-795, 2014.
- [54] S. Pan, X. Li, W. Han és Y. Huang, „An experimental investigation on multi-cylinder RCCI engine fueled with 2-butanol/diesel,” *Energy Conversion and Management*, kötet: 154, p. 92–101, 2017.
- [55] Z. Zheng, M. Xia, H. Liu, R. Shang, G. Ma és M. Yao, „Experimental study on combustion and emissions of n-butanol/biodiesel under both blended fuel mode and dual fuel RCCI mode,” *Fuel* 226, kötet: 226, pp. 240-253, 2018.
- [56] Z. Ni, K. Han, C. Zhao, H. Chen és B. Pang, „Numerical simulation of droplet evaporation characteristics of multicomponent acetone-butanol-ethanol and diesel blends under different environments,” *Fuel*, kötet: 230, pp. 27-36, 2018.
- [57] P. Dagaut és C. Togbé, „Experimental and Modeling Study of the Kinetics of Oxidation of Butanol-n-Heptane Mixtures in a Jet-stirred Reactor,” *Energy & Fuels*, kötet: 23, pp. 3527-3535, 2009.
- [58] S. Sarathy, M. Thomson, C. Togbé, P. Dagaut, F. Halter és C. Mounaim-Rousselle, „An experimental and kinetic modeling study of n-butanol combustion,” *Combustion and Flame* 156, kötet: 156, pp. 852-864, 2009.
- [59] H. Wang, R. Reitz, M. Yao, B. Yang, Q. Jiao és L. Qiu, „Development of an n-heptane-n-butanol-PAH mechanism and its application for combustion and soot prediction.,” *Combust Flame*, kötet: 160, szám: 3, pp. 504-523, 2013.
- [60] S. M. Sarathy, S. Vranckx, K. Yasunaga, M. Mehl, P. Oßwald, W. K. Metcalfe, C. K. Westbrook, W. J. Pitz, K. Kohse-Höinghaus, R. X. Fernandes és H. J. Curran, „A comprehensive chemical kinetic combustion model for the four butanol isomers,” *Combustion and Flame*, kötet: 159, szám: 6, pp. 2028-2055, 2012.
- [61] H. Huang, J. Zhu, Z. Zhu, H. Wei, D. Lv, P. Zhang és H. Su, „Development and validation of a new reduced diesel-n-butanol blends mechanism for engine applications,” *Energy Conversion and Management*, kötet: 149, pp. 553-563, 2017.
- [62] J. J. Hernandez, M. Lapuerta és A. Cova-Bonillo, „Autoignition reactivity of blends of diesel and biodiesel fuels with butanol isomers,” *Journal of the Energy Institute*, p. In Press, 2018.
- [63] S. S. Sazhin, „Modelling of fuel droplet heating and evaporation: Recent results and unsolved problems,” *Fuel*, kötet: 196, p. 69–101, 2017.
- [64] M. Balat és H. Balat, „A critical review of bio-diesel as a vehicular fuel,” *Energy Conversion and Management*, kötet: 49, pp. 2727-2741, 2008.
- [65] A.K. Agarwal, „Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines.,” *Progress in Energy and Combustion Science*, kötet: 33, szám: 3, pp. 233-271, 2007.

- [66] A.S.Ramadhas, S.Jayaraj és C.Muraleedharan, „Use of vegetable oils as I.C. engine fuels--A review.,” *Renewable Energy*, kötet: 29, szám: 5, pp. 727-742, 2004.
- [67] L. Meher, D. V. Sagar és S. Naik, „Technical aspects of biodiesel production by transesterification--a review.,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, kötet: 10, szám: 3, pp. 248-268, 2006.
- [68] A. Demirbas, „Progress and recent trends in biodiesel fuels.,” *Energy Conversion and Management*, kötet: 50, szám: 1, pp. 14-34, 2009.
- [69] S. Haldar, B. Ghosh és A. Nag, „Utilization of unattended Putranjiva roxburghii non-edible oil as fuel in diesel engine.,” *Renewable Energy*, kötet: 34, pp. 343-347, 2009.
- [70] S. Bajpaia, P. Sahoo és L. Das, „Feasibility of blending karanja vegetable oil in petro-diesel and utilization in a direct injection diesel engine,” *Fuel*, kötet: 88, pp. 705-711, 2009.
- [71] K.Pramanik, „Properties and use of jatropha curcas oil and diesel fuel blends in compression ignition engine.,” *Renewable Energy*, kötet: 28, pp. 239-248, 2003.
- [72] I. Barabás, J. Csibi-Vencel és É. Barabás, „Alternatív motorhajtó anyagok I. A repceolaj.,” *Műszaki szemle*, kötet: 20, pp. 3-10, 2002.
- [73] G. Kafuku, H. Rutto és M. Mbarawa, „Biodiesel production from croton megalocarpus oil as a non edible feedstock.,” in *9th International conference on heat engines and environmental*, Budapest, 2009.
- [74] A. Ramadhas, S. Jayaraj és C. Muraleedharan, „Use of vegetable oils as I.C. engine fuels—a review.,” *Renew Energy*, kötet: 29, szám: 5, p. 727–742, 2004.
- [75] X. Shi, Y. Yu, H. He, S. Shuai, J. Wang és R. Li, „Emission characteristics using methyl soyate–ethanol–diesel fuel blends on a diesel engine,” *Fuel*, kötet: 84, p. 1543–1549, 2005.
- [76] H. X., Y. Y., H. H., S. S., D. H., L. R. és ., „Combination of biodiesel–ethanol–diesel fuel blend and SCR catalyst assembly to reduce emissions from,” *J. Environ. Sci.*, kötet: 2008, p. 177–182, 2008.
- [77] L. Zhu, C. C.S., Z. W.G. és H. Z.H., „Emissions characteristics of a diesel engine operating on biodiesel and biodiesel blended with ethanol and methanol.,” *Science of The Total Environment*, kötet: 408, p. 914–921., 2010.
- [78] J. Huang, Y. Wang, S. Li, A. Roskilly, H. Yu és H.Li, „Experimental investigation on the performance and emissions of a diesel engine fuelled with ethanol–diesel blends,” *Appl. Therm. Eng.*, kötet: 29, p. 2484–2490, 2009.
- [79] T. Ezeji, N. Qureshi és H. Blaschek, „Bioproduction of butanol from biomass: from genes to bioreactors.,” *Curr. Opin. Biotechnol.*, kötet: 18, szám: 3, pp. 220-227, 2007.
- [80] N. Qureshi, N. Saha és M. Cotta, „Butanol production from wheat straw by simultaneous saccharification and fermentation using *Clostridium beijerinckii*: Part II--Fed-batch fermentation,” *Biomass and Bioenergy*, kötet: 32, szám: 2, pp. 176-183, 2008.
- [81] E. Thaddeus, E. N. Qureshi és H. Blaschek, „Butanol production from agricultural residues: Impact of degradation products on *Clostridium beijerinckii* growth and butanol fermentation,” *Biotechnology and Bioengineering*, kötet: 97, szám: 6, pp. 1460-1469, 2007.
- [82] U. Duda, M. Kühnle, A. Lenke, H. Linja és L. Sieglén, „Verfahren zur Oxidation von Kohlenwasserstoffen unter Verwendung von Mikroorganismen”. Szabadalom száma: DE10033098, 2001.
- [83] „ASTM D240 (2007), “Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter,” ASTM International.”.
- [84] G. Knothe, „Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters,” *Fuel Process Technology*, kötet: 86, p. 1059–1070, 2005.
- [85] R. P. Hellier, The Molecular Structure of Future Fuels, PhD thesis, University of London, 2013.
- [86] X. Shi, X. Pang, Y. Mu, H. He, S. Shuai, J. Wang és H. Chen, „Emission reduction potential of using ethanol-biodiesel-diesel,” *Atmos. Environ*, kötet: 40, szám:14, p. 2567–2574., 2006.
- [87] S. Pinzi, M. Redel-Macías, D. Leiva-Candia, J. Soriano és M. Dorado, „Influence of ethanol/diesel fuel and propanol/diesel fuel blends over exhaust and noise emissions,” *Energy Procedia.*, kötet: 142, pp. 849-854, 2017.
- [88] S. Kumar, J. Cho, J. Park és I. Moon, „Advances in diesel–alcohol blends and their effects on the performance and emissions of diesel engines.,” *Renew Sustain Energy Rev*, kötet: 22, pp. 46-72, 2013.
- [89] A. Jamrozik, W. Tutak, M. Pyrc, M. Gruca és M. Kočiško, „Study on co-combustion of diesel fuel with oxygenated alcohols in a compression ignition dual-fuel engine,” *FUEL*, kötet: 221, pp. 329-345, 2018.

- [90] S. Figliola és D. Beasley, Theory and Design for Mechanical Measurements, John Wiley & Sons, Inc, 2011.
- [91] H. Coleman és G. Steele, Experimentation and Uncertainty analysis for Engineers., John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [92] G. Halász és A. Huba, Műszaki mérések., Műegyetemi Kiadó, 2003.
- [93] S. Loreface és F. Saba, „The Italian primary kinematic viscosity standard: The viscosity scale,” *Measurement*, kötet: 112, pp. 1-8, 2017.
- [94] M. Zoldy, A. Hollo és A. Thernes, „Butanol as a Diesel Extender Option for Internal Combustion Engines,” *SAE Technical Paper 2010-01-0481*, 2010.
- [95] I. Barabás, A. Molea és R. Suci, „Fuel Properties of Diesel-Ethanol-Tetrahydrofuran Blends: Experimental and Theoretical Approaches,” in *Proceedings of the 4th International Congress of Automotive and Transport Engineering (AMMA 2018)*, Springer International Publishing, 2018, pp. 197-209.
- [96] T. Adrian, M. Andreia és B. István, „Predicting the Temperature and Composition-Dependent density and Viscosity of Diesel Fuel–Ethanol Blends,” *Periodica Polytechnica Chemical Engineering, ONLINEFIRST*, pp. 1-8, 2019.
- [97] W. Boie, „Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Dresden.,” 1952.
- [98] S. Channiwala és P. Parikh, „A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels,” *Fuel*, kötet: 81, szám:8, pp. 1051-1063, 2002.
- [99] A. Yates, C. Viljoen és O. Metcalf, „An Accurate Determination of the Cetane Number Value of GTL Diesel,” *SAE Technical Paper Series*, pp. 2007-01-0026, 2007.
- [100] X. Q. & C.-f. F. L. Xiaojie Bi, „Combustion and soot emission characteristics of soybean,” *ENERGY SOURCES, PART A: RECOVERY, UTILIZATION, AND ENVIRONMENTAL EFFECTS*, VOL. 38, NO. 6, p. 842–849, 2016.
- [101] R. Altın, S. Cetinkaya és H. S. Yücesu, „The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines,” *Energy Conversion and Management*, kötet: 42, pp. 529-538, 2001.
- [102] EURÓPAI_BIZOTTSÁG, „FEHÉR KÖNYV, Útiter az egységes európai közlekedési térség megvalósításához – Úton egy versenyképes és erőforrás-hatékony közlekedési rendszer felé,” 2011.

M-2. SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

- [S-1] Dr. Penninger Antal, Dr. Bereczky Ákos, Groniewsky Axel, Laza Tamás. „BIOENKRF projekt, 2.3. feladat: Az olajnövény préselés (napraforgó-repce) és az olajészterezés hatásvizsgálata,
- [S-2] Bereczky, A.: Parameter analysis of NO emissions from spark ignition engines. *Transport*, 27(1), pp. 34-39, (2012)
- [S-3] T Laza, R Kecskés, Á Bereczky, A Penninger: Examination of burning processes of regenerative liquid fuel and alcohol mixtures in diesel engine, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 50 (1), pp. 11-29, 2006
- [S-4] Laza Tamás – Bereczky Ákos: „Magasabb rendű alkohol hatása dízelmotorban lejátszódó égési folyamatokra repceolaj tüzelőanyag esetén,” *ENERGIAGAZDÁLKODÁS*, 50 (6), 19-24, 2009.
- [S-5] Laza, Bereczky, Influence of Higher Alcohols on the Combustion Pressure of Diesel Engine Operated with Rape Seed Oil, *ACTA MECHANICA SLOVACA* 13:(3) pp. 54-61., 2009
- [S-6] Tamás Laza and Ákos Bereczky , Basic fuel properties of rapeseed oil-higher alcohols blends, *FUEL* 90 : 2 pp. 803-810. , 8 p. (2011)
- [S-7] F. Lujaji, A. Bereczky, L. Janosi, Cs. Novak, M. Mbarawa., Cetane number and thermal properties of vegetable oil, biodiesel, 1-butanol and diesel blends.” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 102,(3.) pp. 1175–1181,

- [S-8] Frank Lujaji, Akos Bereczky, Makame Mbarawa, Performance Evaluation of Fuel Blends Containing Croton Oil, Butanol, and Diesel in a Compression Ignition Engine. *Energy Fuels* 24 pp. 4490–4496,
- [S-9] Frank Lujaji, Lukács Kristóf, Akos Bereczky, Makame Mbarawa., Experimental investigation of fuel properties, engine performance, combustion and emissions of blends containing croton oil, butanol, and diesel on a CI engine., *Fuel* 90 pp. 505–510. (2011)
- [S-10] Siwale, Lennox ; Lukács, Kristóf ; Torok, Adam ; Bereczky, Akos ; Mbarawa, Makame ; Penninger, Antal ; Kolesnikov, A: „Combustion and emission characteristics of n-butanol/diesel fuel blend in a turbo-charged compression ignition engine.” *FUEL*, pp. 409-418.(2013)
- [S-11] Attila Dobai and Dr. Ákos Bereczky: Investigation of Diesel – *n*-Butanol Fuel Blend in the Function of Pre-Injection Angle, VEA-2018, Proceedings of the 2nd VAE2018, Miskolc, Hungary, pp. 3-13. , 11 p.
- [S-12] Dr. Ákos Bereczky és Attila Dobai: Butanol bekeverés égési folyamatának vizsgálata változtatható kompresszió viszonyú diesel motorban, OGET 2018
- [S-13] Žaglinskis J, Lukács K, Bereczky Á: Comparison of properties of a compression ignition engine operating on diesel–biodiesel blend with methanol additive, *FUEL* 170: pp. 245-253. 2016)
- [S-14] Bereczky Á., Lukács K.: Magas szeszfokú nyersszesz, energetikai célú hasznosítása kisteljesítményű kettős tüzelőanyagú kompresszió gyújtású-motorban, *ENERGIAGAZDÁLKODÁS*,50:(4) pp. 17-21., 2009
- [S-15] Tutak, Wojciech ; Lukács, Kristóf ; Szwaja, Stanisław ; Bereczky, Ákos: Alcohol–diesel fuel combustion in the compression ignition engine, *FUEL* 154 pp. 196-206. , 11 p. (2015)
- [S-16] Tutak W, Jamrozik A, Bereczky Ákos, Lukács Kristóf: Effects of injection timing of diesel fuel on performance and emission of dual fuel diesel engine powered by diesel/E85 fuels., *TRANSPORT (VILNIUS)* 33:(3) pp. 633-646. 2018
- [S-17] Horváth András, Jakabfalvy Zoltán, Bereczky Ákos és Kovács Károly: A hazai dízelmotor fejlesztés legújabb eredményei, *VASÚTGÉPÉSZET* 2017/3, pp. 25-30. 2017.
- [S-18] Szilágyi Artúr, Bereczky Ákos: Az akkumulátoros elektromos személygépjárművek környezeti hatásainak értékelése a teljes életciklus figyelembevételével – hol az igazság?, *Magyar Tudomány*, megjelenés alatt.

Szabadalmak:

- [Sz-1] Dr Bereczky Ákos, Brüller Péter, Lukács Kristóf, Dr Meggyes Attila, Könczöl Sándor, Bocsi András, Dr Nagy Imre, Benkő László: Eljárás főként megújuló forrásokból nyert kis fűtőértékű tüzelőanyag, mint elsődleges tüzelőanyag hasznosítására kompressziógyújtású dugattyús belső égésű motorban, 2008, P0800645
- [Sz-2] Jakabfalvy Zoltán, dr. Bereczky Ákos, Lukács Kristóf, Járai Péter Pál, Nagy János, Opauszki Mihály, Horváth András; Kompressziógyújtású változó geometriájú előkamrás motor szerkezeti kialakítása, 2016, P1600249 (PCT/HU2017/050046, Ideiglenes szabadalmi oltalom alatt áll)

M-3. FOGALMAK

Tüzelőanyag: A tüzelőanyag elnevezés alatt az üzemanyagok egy fajtáját értem, amelyet az üzemelés során a motor égésterében eltüzelnek, elégetnek. A motor üzemanyag elnevezés esetében a motor üzemeltetéséhez szükséges összes anyagot értem; tüzelőanyag, kenőolaj, hűtőfolyadék, stb.

Biodízel: A munkában – az egyszerűség érdekében – az esetemben vizsgált növényi olajokból készített metil-észterek egyszerűsítő elnevezése, tudván azt, hogy több esetben nem csak a növényi olaj metil-észtereket nevezik biodízelnak.

Diesel-motor: Az elfogadott helyesírási szabályok szerint a dízelmotor elnevezést használjuk ellentétben a pl. Otto-motortól, Wankel-motortól, ezt elfogadva a dolgozatomban ezt használom.

Gázolaj: A dízelmotorok tüzelőanyagának elnevezése a dolgozatban, pontosítva: dízelgázolaj, az ábrákon rövidítve a D2 elnevezést használom, ez az amerikai szabványokra vezethető vissza (2-middle distillate diesel fuel), a szakirodalomban ez a bevett jelölése.

Hasznos hőváltozás vagy hasznos hő ráta (HRR): A kompresszió folyamán a hő a kompresszió kezdetén gáz halmazállapota miatt alacsonyabb hőmérsékletű, (ami lehet levegő vagy tüzelőanyag-levegő keverék) mint a fal (átlag) hőmérséklete. A faltól hőt vesz fel, majd ahogy a kompresszió során nő a hőmérséklete, úgy a hőátadás iránya megváltozik: a gáz hőt ad le a fal irányában. Ez egészen addig tart, míg az égési folyamat el nem kezdődik, ekkor az égés során felszabaduló hő egy jelentős része a gáz belső energiáját kezdi növelni, így a hasznos hőváltozásában kialakul egy lokális minimum, amit égéskezdetnek definiálok –hasonlóan másokhoz. Ezután növekszik a gázban hasznosuló hő, azonban ekkor is az égés során felszabaduló hő egy része a fal irányába távozik, így csak a maradék hő lesz a hasznos hő. Az égési folyamat vége után a gáz hőt ad le a fal irányába. A HRR meghatározására 1 zónás modellt használok, és a „Birgman” – féle számítási eljárás alapján:

$$\frac{dQ_{h,\varphi}}{d\varphi} = \frac{1}{\kappa_\varphi - 1} \left(V_\varphi \frac{dP_\varphi}{d\varphi} + \kappa_\varphi P_\varphi \frac{dV_\varphi}{d\varphi} \right) \quad (M3-1)$$

Ennek számítása során jelentős nehézséget okoz a nyomás megváltozás számítása, erre a célra alul áteresztő digitális szűrőt alkalmaztam. A κ közelítésére a Heywood által javasolt értéket használtam. Az angol kifejezés Heat Release Rate pontos fordítása „hő bevetés ráta” a meglátásom szerint nem teljesen pontos, mert nem veszi figyelembe, hogy az égés során bevezetett hő egy része távozik a falon át.

Légfelesleg, vagy légfelesleg-tényező: Az elnevezés ez égési folyamathoz rendelkezésre álló valós levegő és az egy adott tüzelőanyaghoz tartozó égéshez szükséges elméleti levegő hányadosa, melyre – főleg az irodalommal foglalkozó szakaszban – két jelölést használok (λ , ϕ). Ezek definíciója az előzőek szerint:

$$\lambda = \frac{1}{\phi} = \frac{m_{lev}}{B\mu_{L,B}} = \frac{\dot{m}_{lev}}{\dot{B}\mu_{L,B}} \quad \phi = \frac{B\mu_{L,B}}{m_{lev}} \quad (M3-2)$$

Ahol B az adott tüzelőanyag mennyisége, $\mu_{L,B}$ az adott tüzelőanyag elméleti égési levegőigénye és m_{lev} az égéshez rendelkezésre álló levegő mennyisége. Ha $\lambda < 1$ akkor tüzelőanyagban dús keverékről beszélünk (égési levegőben szegény keverék), ha $\lambda > 1$ tüzelőanyagban szegény keverékről beszélünk.

ABE A *Clostridium acetobutylicum* baktériumot acetone, butanol, és etanol előállítására hasznosítják, melynek (fő) terméke az ABE (acetone-butanol-etanol 3:6:1 térfogat arányú elegye)

Változás, paraméterek változása: A mérési hiba vizsgálatok nélkül a kutató hajlandó egy paraméter változásával foglalkozni (pl. X változás Y -hoz képest = $(X-Y)/Y$), de ez jelentős hibát is eredményezhet, ezért a dolgozatomban arányokkal dolgoztam, pl. X változása Y -hoz képest = $X/Y-1$. Mindenhol feltüntettem, hogy milyen arányt mutatok be, de legtöbb esetben a referencia gázolajhoz (D2) képesti aránnyal foglalkoztam.

M-4. RÖVIDÍTÉSEK

ABE	(Acetone–Butanol–Ethanol)	aceton – butanol – etanol 3:6:1 térfogat arányú elegye
BEV	(Battery Electric Vehicle)	(teljesen) elektromos hajtás
CCM	(Conventional Combustion Mode)	hagyományos égésű módszer, vagy hagyományos kompresszió gyújtás
CFPP	(Cold Filter Plugging Point)	hidegszűrhetőségi határhőmérsékletet
CNG	(Compressed Natural Gas)	nagynyomású földgáz
COME	(Coconut Oil Methyl Esther)	kókuszolaj metil-észter (biodízel)
COO	(Coconut Oil)	(nyers) kókuszolaj
CRME	(Croton Oil Methyl Esther)	kroton olaj metil-észter (biodízel)
CRO	(Croton Oil)	(nyers) kroton olaj
D2	((Middle Distillate) Diesel Fuel)	töltőállomásokon beszerezhető (dízel)gázolaj
ETC	(European Transient Cycle)	európai tranziens ciklus
FAME	(Fatty Acid Methyl Esther)	zsírsav-metil- észter, a biodízel általános neve
FCEV	(Fuel Cell Electric Vehicle)	tüzelőanyag cellás hajtás
GHG (ÜHG)	(Greenhouse Gases)	üvegházhatású gáz
HCCI	(Homogeneous Charge Compression Ignition)	homogén keverékű kompresszió gyújtás
HEV	(Hybrid Electric Vehicle)	hibrid hajtáslánc,
HRR	(Heat Release Rate)	hasznos hőváltozás
JAME	(Jatropha Oil Methyl Esther)	jatrophaolaj metil-észter (biodízel)
JAQ	(Jatropha Oil)	(nyers) jatrophaolaj
LHV	(Lower Heating Value)	fűtőérték
LPG	(Liquefied Petroleum Gas)	autógáz
MIT	(Massachusetts Institute of Technology)	Massachusettsi Műszaki Egyetem
PHEV	(Plug-In Hybrid Electric Vehicle)	hálózatról tölthető hibrid hajtás
PPCI	(Partially Premixed Compression Ignition)	részlegesen előkevert kompresszió gyújtás

RCCI	(Reactivity Controlled Compression Ignition)	reakció képesség kontrolált kompresszió gyújtás
RDE	(Real Driving Emissions)	valós vezetési körülmények között tapasztalt kibocsátás
REE	(Ricardo Energy & Environment)	Ricardo Energy & Environment
REX	(Range Extended (Vehicle))	hatótáv növelt villamos hajtás
RME	(Rape Seed Methil Esther)	repceolaj metil-észter
RPM	(Round Per Minutes)	fordulatszám [1/perc]
RSO	(Rape Seed Oil)	(nyers) repceolaj
SME	(Soy Methil Esther)	szójaolaj metil-észter
WHTC	(World Harmonised Transient Cycle)	világszinten harmonizált átmeneti menetciklus
δ	(Uncertainty (error) of measurement)	relatív hibakorlát
σ	(Absolute error of measurement)	abszolút hibakorlát

M-5. FELHASZNÁLT BERENDEZÉSEK ÉS SZÁMÍTOTT PARAMÉTEREK MÉRÉSI BIZONYTALANSÁGAI

A jelen mellékletben bemutatom a felhasznált berendezések, a mért és a számított paraméterek mérési hibakorlátjait. A paraméterek ismertetését a munkában szereplő sorrendben végeztem. A hibakorlát meghatározásokat a következő források felhasználásával végeztem: [90], [91], [92]. Ahol a mérési bizonytalanságot a reprezentatív és véletlenszerűen kiválasztott mérési adatsorok alapján határoztam meg, ott a 95%-os mérési bizonytalansághoz tartozó eljárást ($m \pm 2\sigma$) alkalmaztam.

Viszkozitás mérése

A kinetikai viszkozitás méréseket a MSZ ISO 3105:1998 előírás szerint végeztem MSZ ISO 3256-1:1980 szerinti Ostwald-Fenske – féle üvegkapillárisos viszkoziméterrel (gyártó: KUTESZ–MTA), amely egy Thermostat-D Type 674-ben volt elhelyezve (gyártó: KUTESZ–MTA Co.). A szakirodalmi adatok alapján a viszkoziméter relatív hibakorlátja $\pm 0,2\%$, kedvező esetekben a reprodukálhatóság $\pm 0,02\%$ -ig javítható. S. Loreface, F. Saba [93] szerint a Ostwald-Fenske – féle üvegkapillárisos viszkoziméter tipikus mérési hibája 1-10 mm²/s közti viszkozitású folyadékok esetén $\pm 0,02\%$, 10-188 mm²/s közti viszkozitású folyadékok esetén $\pm 0,1\%$. Figyelembe véve a tüzelőanyag-elegyek területén megjelent publikációkat (pl.: [94], [95], [96]) az értékelésnél a δ_{viszk} **$\pm 0,35\%$** relatív hibakorlátot fogadtam el.

Lobbanáspont vizsgálatok

A tüzelőanyagok lobbanáspontjainak meghatározására kétféle módszer használatos. Az ún. nyílttéri vagy nyílt téglyes módszer szerinti méréseket egy Petrotest CLA2 típusú készüléken végeztem a MSZ 21978-46:1990 szerint. Az ún. zárt तरी vagy zárt téglyes módszer szerinti mérések egy Petrotest PMP2 típusú készüléken folytak a MSZ EN 22719:1995 szerint. A berendezések pontossága a gyártó katalógusa alapján **$\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$** .

Sűrűség mérése

A sűrűség vizsgálatok az MSZ ISO 3675:2000 szerint areométeres módszerrel készültek. Az előírás által kért 15°C (pl. EN 590) helyett, mivel a mérések egy része nyáron készült, a hűtési lehetőség hiánya és a kókuszolaj dermedési hőmérséklete miatt 28°C-on, ezért az areométert előzőleg átkalibráltuk. A mérési módszer elfogadott abszolút hibakorlátja $\pm 0,002\text{ g/ml} = \pm 2\text{ kg/m}^3$, illetve [96] alapján a relatív hibakorlát a $\delta_{\text{sűrűség}}$ **$\pm 0,02\%$** .

Fűtőérték vizsgálatok

Az égéshő illetve a fűtőérték meghatározására számos módszer ismert [97], [98]. Az égéshő (HHV) meghatározása az akkori FVM Mezőgazdasági Gépesítési Intézetének tulajdonában levő, akkreditált IKA C2000 basic automata kaloriméterrel történt, melynek relatív hibakorlátja kisebb, mint $\pm 0,44\%$ a gépkönyv szerint. Az égéshőből a fűtőérték (LHV) meghatározása a [83] szerinti (M5-1) képlettel történt:

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 0,2122 \cdot H \text{ [m/m\%]} \quad (\text{M5-1})$$

Ehhez szükség van a tüzelőanyag minták H tartalmának meghatározására. Ezt a mérést szintén a Mezőgazdasági Gépesítési Intézetben végezték el az MSZ EN

15104:2011 „Szilárd bio-tüzelőanyagok. Az összes szén,- hidrogén- és nitrogéntartalom meghatározása. Műszeres módszer” szabványban foglaltaknak megfelelően. Az elemösszetétel mérésének relatív hibakorlátja vario MACRO CN berendezés gépkönyve szerint kisebb, mint 0,5%.

Így az abszolút és relatív hibakorlátok:

$$\sigma_{LHV} = \sqrt{\sigma_{HHV}^2 + 0,2122^2 \sigma_H^2}$$

$$\delta_{LHV} = \frac{2\sigma_{LHV}}{LHV} = \pm 0,88\%$$
(M5-2)

Cetánszám vizsgálatok

A cetánszám –mint mérőszám– a különböző gázolajok öngyulladás tulajdonságait jellemzi. A vizsgálatok a vonatkozó MSZ EN ISO 5165:1999 „A gázolajok égési tulajdonságainak meghatározása. Cetánmotormódszer” rendelet szerinti CFR F-5-ös, a cetánszám meghatározó eljárásához kifejlesztett berendezéssel történt, a vizsgálat abszolút hibakorlátja $\pm 1,5$ [-]. Meg jegyzendő, hogy ennek a berendezésnek a pontosságával foglalkozó publikáció szerint nagyobb cetánszámok esetén, pl. 60- az abszolút hibakorlát megnő [99].

Elegyek összetétele

A elegyek vizsgálata során a bemutatott tüzelőanyag minták elemi összetételének meghatározását a gödöllői, akkori Mezőgazdasági Gépesítési Intézetben végezték el az MSZ EN 15104:2011 „Szilárd bio-tüzelőanyagok. Az összes szén,- hidrogén- és nitrogéntartalom meghatározása. Műszeres módszer” és az MSZ EN 15289:2011 „Szilárd bio-tüzelőanyagok. Az összes kén- és klórtartalom meghatározása” szabványoknak megfelelően. A már említett vario MACRO CN berendezést alkalmazva a relatív hibakorlátok a következők:

$$\delta_C = \delta_H = \delta_N = \delta_S = \delta_O = \pm 0,5\%$$
(M5-3)

Fékpadi mérőrendszer elemeinek mérési hibakorlátjai

Jelen részben azon mérőrendszerek elemeit mutatom be, melyek a motor mérések során felhasználásra kerültek. A berendezések külön mellékletben (M6) kerülnek bemutatásra.

Nyomaték mérése

Féknymaték mérése: a motor fékezésére szolgáló Borghi-Saveri FE 350 S típusú fékgép állórészét rögzítő Kaliber 8961-500 kg típusú erőmérő cella és annak jelét fogadó és digitalizáló Kaliber N 320 típusú műszer segítségével történik. A fékpád fejlesztése során számos olyan megoldást alkalmaztunk, amivel a nyomaték mérési relatív hibakorlátja csökkenthető, például digitális jelfeldolgozás és adat továbbítás, mérőcella hőmérséklet stabilitása, többpontos kalibrálás. A cella és a feldolgozó elektronika pontossága a végértékre vonatkoztatva a gyártói adatlap szerint:

- Pontosság: 0,05%;
- Cellatényező: 0,10%;

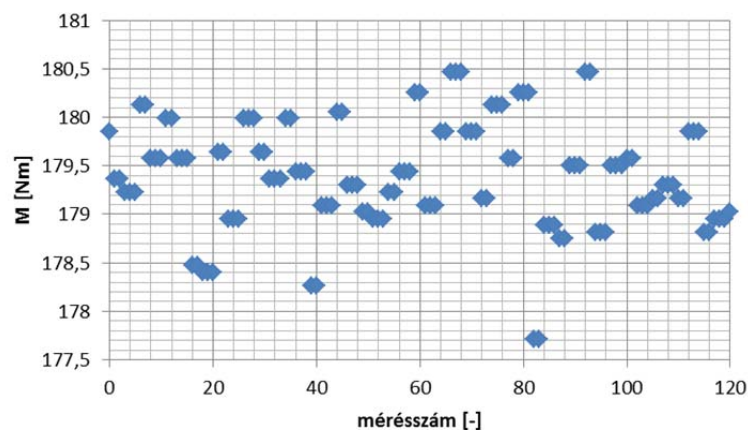
- Nullhelyzet: 1%;
- Nullhelyzet hőmérsékletfüggés: 0,05%;
- Cellatényező hőmérsékletfüggés: 0,05%;
- Hiszterézis: 0,05%;
- Ismétlési hiba: 0,03%;
- Kúszás 30 perc alatt: 0,04%;
- N 320: 0,10%.

$$\sigma_{M,m} = \sqrt{\sigma_{\text{pont.}}^2 + \sigma_{\text{cellat.}}^2 + \sigma_{\text{null}}^2 + \sigma_{\text{nullat.hőm.}}^2 + \sigma_{\text{cellat.hőm.}}^2 + \sigma_{\text{hiszt.}}^2 + \sigma_{\text{ism.}}^2 + \sigma_{\text{kúsz.}}^2 + \sigma_{N320}^2}$$

$$\delta_{M,m} = \frac{2\sigma_M}{M} = 1,06\% \quad (\text{M5-4})$$

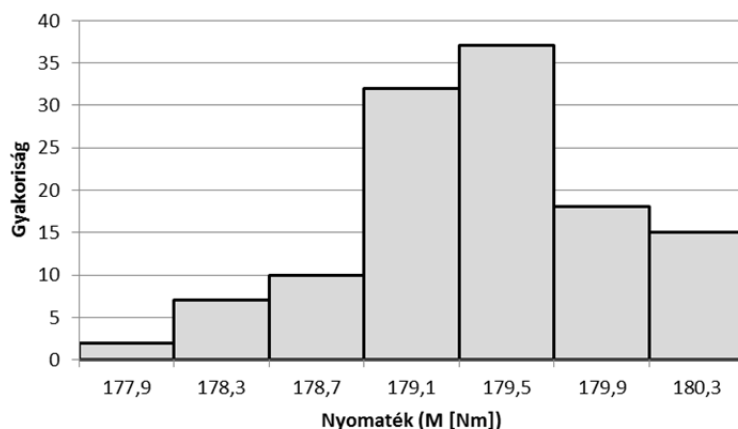
ezek alapján a mérőberendezés számított relatív hibakorlátja: $\pm 1,06\%$.

A mért nyomaték nem csak a mérőrendszer hibájától, de a fékgép szabályozástól is függ, ezért az ebből származó tapasztalati bizonytalanságot is meg kell vizsgálni. A mérések során a saját fejlesztésű mérésvezérlő és adatgyűjtő rendszer segítségével a mért nyomaték folyamatosan megjelenítésre került (idősorban). Ábrázoltam ezen kívül a hisztogramokat (tapasztalati sűrűség függvények) is, automatikus változtatott osztályközökkel (k) (legkisebb k , amelyre igaz $2^k > N$). Ez alapján akkor került elfogadásra egy mérési pont, ha megfelelő eloszlást látunk –ez természetesen nem csak a nyomatékra, hanem a többi mért paraméterrel is igaz kell, hogy legyen, pl. emisszió. Egy konkrét üzemi pont esetén (2500 1/perc., 100% terhelés, D2 tüzelőanyag) ez a következő (M5-1 ábra):



M5-1. ábra A nyomaték mérés időszora (2500 RPM, 100% terhelés, D2 tüzelőanyag)

Ez ehhez tartozó tapasztalati sűrűség függvény (M5-2 ábra):



M5-2. ábra A nyomaték mérés tapasztalati sűrűség függvénye (2500 RPM, 100% terhelés, D2 tüzelőanyag)

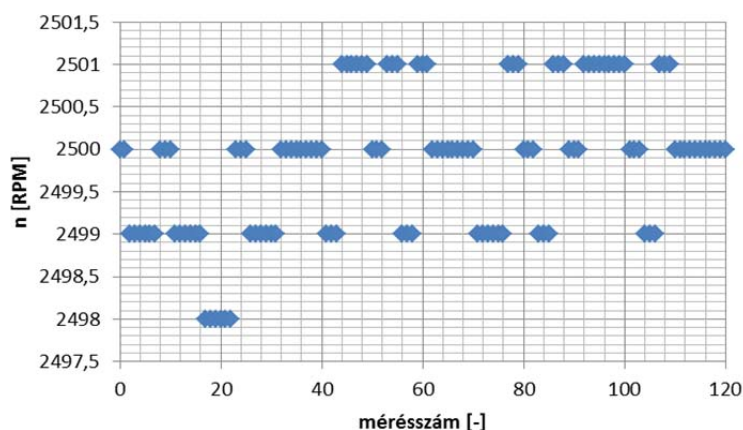
Anderson-Darling próba értéke 0,603, a 95%-os szinthez tartozó kritikus érték 0,747, így a tapasztalati sűrűség függvény normalitását elfogadom. A 2σ értéke 1,11 Nm, a nyomaték átlaga 179,35 Nm, így a relatív tapasztalati hibakorlát $\delta_{M,t} = \pm 0,62\%$. Felhasználva, hogy az eredő relatív hibakorlát:

$$\delta_{M,e} = \sqrt{\delta_{M,m}^2 + \delta_{M,t}^2} = \pm 1,23\% \quad (M5-5)$$

Fordulatszám mérése

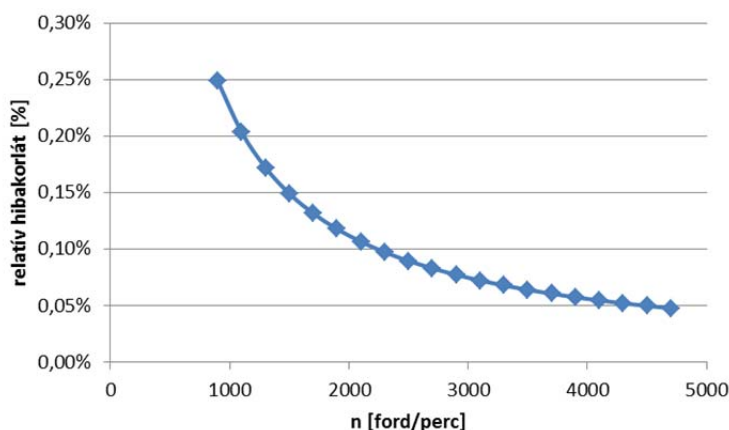
Motor fordulatszám mérésére a motor terhelésére (fékezésére) szolgáló Borghi - Saveri FE 350 S típusú fékgépen elhelyezett 60 jel/fordulat tárcsa segítségével I-7080D típusú számlálóval történik, így a mérőberendezés pontossági korlátja: ± 1 ford/perc.

Ennél a mért paraméternél is figyelembe kell venni a fékgép szabályzásának és motor üzempontjának stabilitását. A fenti gondolatmenetnek megfelelően az előző mérési pontban a mért fordulatszám időszora a M5-3 ábrán látható:



M5-3. ábra A fordulatszám mérés időszora (2500 RPM, 100% terhelés, D2 tüzelőanyag)

Jól megfigyelhető az M5-3 ábrán, hogy ez a paraméter diszkrét értékeket tud csak felvenni, de megállapítható, hogy mérés és a mérőrendszer szabályzásának bizonytalansága ± 2 ford/perc. Szintén felhasználva a M5-4 összefüggést, az eredő relatív hibakorlát ($\Delta n/n$) változik a fordulatszám függvényében (M5-4 ábra).



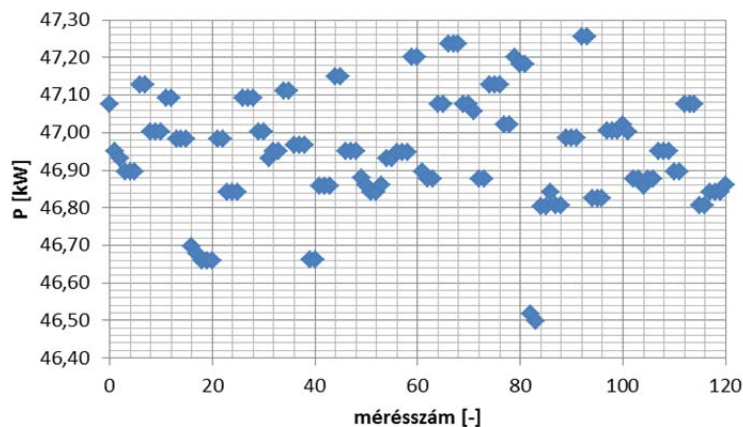
M5-4. ábra A fordulatszám mérés relatív hibakorlátja ($\delta_n [\pm\%]$) a fordulatszám függvényében

Teljesítmény mérése

A teljesítménymérő rendszer relatív hibakorlátja meghatározható a nyomaték és a fordulatszámmérés relatív hibakorlátjából, ez 2500 1/perc fordulatszámon:

$$\delta_{P_e, n=2500, m} = \sqrt{\delta_{n=2500}^2 + \delta_M^2} = \pm 1,23\% \quad (\text{M5-6})$$

Egy kiválasztott mérési pontban a teljesítmény 100 mért pontban az M5-5 ábrán látható.



M5-5. ábra Az effektív teljesítmény mérés időszora (2500 RPM, 100% terhelés, D2 tüzelőanyag)

A teljesítménymérés relatív hibakorlátja meghatározható a nyomaték és a fordulatszámmérés pontatlanságából, azonban feltételezhető, hogy a nyomaték fordulatszámtól is függ, így:

$$\delta_{P_e, t}^2 = \left(\frac{\partial P_e}{\partial M}\right)^2 \delta_M^2 + \left(\frac{\partial P_e}{\partial n}\right)^2 \delta_n^2 + 2 \left(\frac{\partial P_e}{\partial M}\right) \left(\frac{\partial P_e}{\partial n}\right) COV(M, n) = \pm 0,63\% \quad (\text{M5-7})$$

ahol

$$COV(M, n) = E(Mn) - E(m)E(n) \cong \frac{1}{120} \sum_{j=1}^{120} M_j n_j - \bar{n} \bar{M} \quad (M5-8)$$

Szintén felhasználva, hogy az eredő relatív hibakorlátját a mérőrendszer és a tapasztalati hibakorlát relatív hibakorlátja határozza meg, így

$$\delta_{Pe,e} = \sqrt{\delta_{Pe,m}^2 + \delta_{Pe,t}^2} = \pm 1,38\% \quad (M5-9)$$

Tüzelőanyag-fogyasztás mérése

A motor fogyasztásának mérésére egy tömegmérés elvén működő (gravimetrikus) AVL- 7131-12 berendezést alkalmaztunk. A berendezés kapacitív elven méri a speciálisan kialakított és csatlakoztatott mérőtartály tömeg változását a beállított mérési idő alatt, ennek segítségével a berendezés közvetlenül a tüzelőanyag-fogyasztást jelzi ki. A mérőberendezés pontossága – a gyári adatok szerint – a mérés során beállított idő alatt elfogyasztott tüzelőanyag tömege (Δm) függvényében:

Δm [g]	2,5	5	10	25	50	100	250	500	1000
Pontosság [%]	4,52	2,32	1,22	0,56	0,34	0,23	0,16	0,14	0,13

M5-1. táblázat Az AVL- 7131-12 berendezés pontossága a gyári adatok szerint (ahol Δm : a mérés alatt elfogyott tüzelőanyag tömege)

A mérés során a tömeg változás mérésének idejét úgy állítottam be, hogy a tüzelőanyag fogyás minimum 100 g legyen, viszont ennél a mérésnél a gyakran hosszú várakozási idő miatt nem kerültek az adatok rögzítésre az adatgyűjtő rendszerrel, viszont mindig több mérést (legalább három) végeztünk és meggyőződünk a megfelelően kis eltérésről, ezek alapján így a relatív hibakorlát $\delta_B = \pm 0,23\%$.

Származtatott mennyiségek relatív hibáinak meghatározása

A továbbiakban bemutatom a számított paraméterek relatív hibakorlátjainak meghatározását:

Az effektív hatásfok (BTE) relatív hibakorlátja:

$$\delta_{BTE} = \sqrt{\delta_B^2 + \delta_{LHV}^2 + \delta_{Pe}^2} = \pm 1,65\% \quad (M5-10)$$

A fajlagos fogyasztás (BSFC) relatív hibakorlátja:

$$\delta_{BSFC} = \sqrt{\delta_B^2 + \delta_{Pe}^2} = \pm 1,40\% \quad (M5-11)$$

Égéstérnyomás mérése

A munkám fontos része az égéstérben lezajló folyamatok vizsgálata, így ez külön figyelmet érdemel. A három motor mérésénél más-más indikáló rendszert használtam, amelyek a következők voltak:

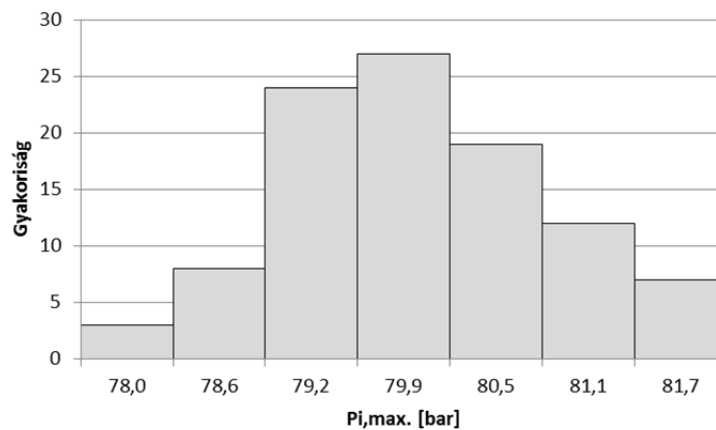
előkamrás motor mérőrendszere esetén:

- piezó-elektromos jeladó: AVL 6QP500 (FSO $\pm 1\%$);
- töltés erősítő: Kistler KIAG 5001 (FSO $\pm 1\%$);
- adatgyűjtő rendszer: NI USB-6251 (FSO $\pm 0,03\%$).

$$\sigma_{Pi,m} = \sqrt{\sigma_{jeladó}^2 + \sigma_{töltés\ erősítő}^2 + \sigma_{A/D}^2}$$

$$\delta_{pi,m} = \frac{2\sigma_{Pi}}{P_{Pi}} = \pm 2,83\%$$
(M5-12)

A mért adatokat figyelembe véve egy jellemző mérési pont adatainak a tapasztalati sűrűség függvénye a M5-6 ábrán látható.



M5-6. ábra Az indikált nyomásmaximum értékek tapasztalati sűrűség függvénye ($\varepsilon=15,27$, D2 tüzelőanyag)

A 100 mért ciklus alapján a 2σ értéke 1,8 bar, az indikált nyomásmaximumok átlaga 79,9 bar, a tapasztalati relatív hibakorlát $\delta_{pi,elők} = \pm 2,21\%$.

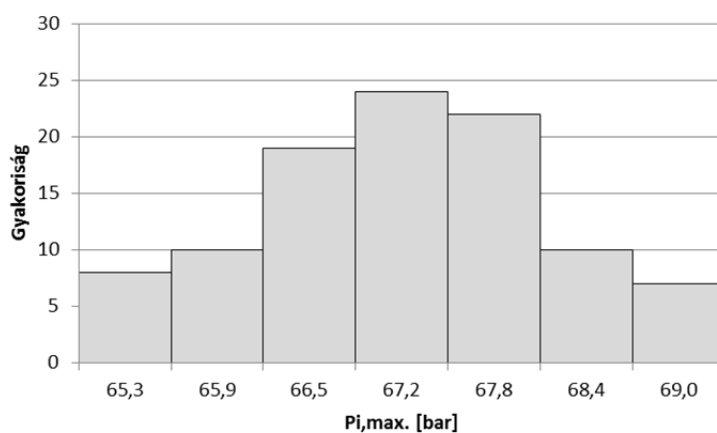
Kis kompresszióviszonyú ($\varepsilon=17$) motor mérőrendszere esetén:

- piezó-elektromos jeladó: Kistler KIAG 6005 (relatív hibakorlát $\pm 0,8\%$);
- töltés erősítő: Kistler 5018A1000 (relatív hibakorlát $\pm 0,01\%$);
- adatgyűjtő rendszer: NI USB-6251 (relatív hibakorlát $\pm 0,03\%$).

$$\sigma_{Pi,m} = \sqrt{\sigma_{jeladó}^2 + \sigma_{töltés\ erősítő}^2 + \sigma_{A/D}^2}$$

$$\delta_{pi,m} = \frac{2\sigma_{Pi}}{P_{Pi}} = \pm 1,60\%$$
(M5-13)

A mért adatokat figyelembe véve egy jellemző mérési pont adatainak tapasztalati sűrűség függvénye az M5-7 ábrán látható.



M5-7. ábra Az indikált nyomásmaximum értékek tapasztalati sűrűség függvénye (20 kW terhelés, 8°-os előbefecskendezés, D2 tüzelőanyag)

A 100 mért ciklus alapján a 2σ értéke 1,92 bar, az indikált nyomásmaximumok átlaga 67,1 bar, így a tapasztalati relatív hibakorlát $\delta_{pi,E=17} = \pm 2,87\%$.

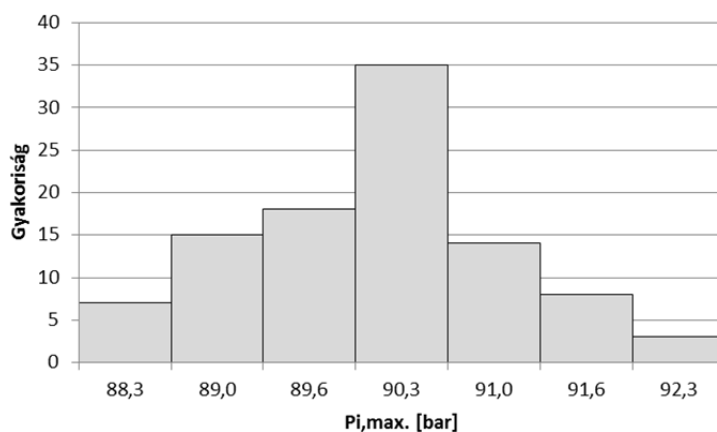
Nagy kompresszióviszonyú ($\varepsilon=19$) motor:

- piezó-elektromos jeladó: Kistler KIAG 6005 (relatív hibakorlát $\pm 0,8\%$);
- töltés erősítő: Kistler KIAG 5001 (relatív hibakorlát $\pm 0,05\%$);
- adatgyűjtő rendszer: NI USB-6251 (relatív hibakorlát $\pm 0,03\%$).

$$\sigma_{Pi} = \sqrt{\sigma_{\text{jeladó}}^2 + \sigma_{\text{töltés erősítő}}^2 + \sigma_{A/D}^2}$$

$$\delta_{pi} = \frac{2\sigma_{Pi}}{P_{Pi}} = \pm 1,60\% \quad (\text{M5-14})$$

A mért adatokat figyelembe véve egy jellemző mérési pont adatainak tapasztalati sűrűség függvényét az M5-8 ábra mutatja be.



M5-8. ábra Az indikált nyomásmaximum értékek tapasztalati sűrűség függvénye (3000 RPM, 75% terhelés, D2 tüzelőanyag)

A 100 mért ciklus alapján a $2\sigma = 1,91$ bar, az indikált nyomásmaximumok átlaga 90,1 bar, így a tapasztalati relatív hibakorlát $\delta_{pi,E=19} = \pm 2,13\%$.

Az M5-2 táblázatban jól megfigyelhető, hogy a mérő lánc pontosságából megállapított relatív hibakorlát ($\delta_{pi,m}$) – eltekintve az előkamrás motortól – kisebb, mint a mérésből meghatározott tapasztalati relatív ($\delta_{pi,t}$) hibakorlát.

	$\delta_{pi,m}$	$\delta_{pi,t}$	$\delta_{pi,e}$
előkamrás motor	$\pm 2,83\%$	$\pm 2,21\%$	$\pm 3,59\%$
$\varepsilon=17$ motor	$\pm 1,60\%$	$\pm 2,87\%$	$\pm 3,29\%$
$\varepsilon=19$ motor	$\pm 1,60\%$	$\pm 2,13\%$	$\pm 2,66\%$

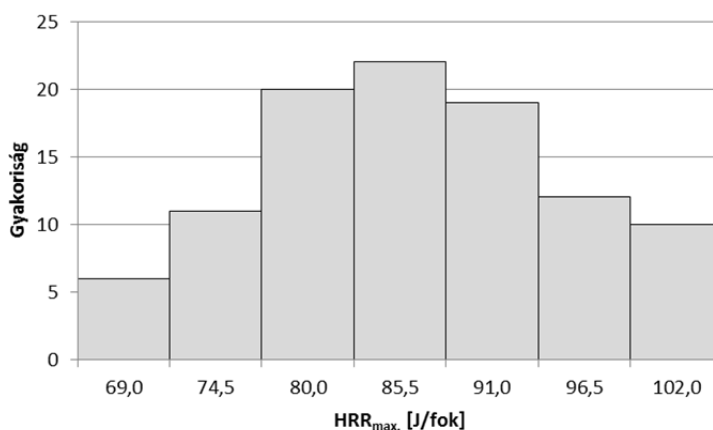
M5-2. táblázat Az indikált nyomásmaximumok a mérőlánc, a tapasztalati és az eredő relatív hibakorlátjai

A méréssel történt hiba meghatározás azonban egy fontos jelenségre hívja fel a figyelmet. Mérés során a hiba két részből tevődik össze: egyrészt a mérési pont bizonytalanságából (nyomaték ($\pm 1,38\%$) és fordulatszám ($\pm 0,25\% - \pm 0,05\%$)), másrészt abból, hogy nem egy állandó értéket akarunk méréssel meghatározni, hanem az égési folyamat nyomásmaximumát, amely ciklusról-ciklusra változik. Itt elegendő csak például a maradék gáz mennyiségére gondolni, ami nem állandó, hanem szintén ciklusonként változik, ezáltal jelentősen befolyásolja a folyamatokat. Megfigyelhető továbbá számos indikátor diagramon egy kis amplitúdójú nyomáslengés is.

Hasznos hőváltozás maximum meghatározása (HRR)

A számolt hasznos hőváltozás (HRR) maximumának hibakorlátjának meghatározása során a tapasztalati módszert használtam. Így különböző motoroknál a hasznos hőváltozás maximumának (HRR) tapasztalati hibakorlátjai a következők:

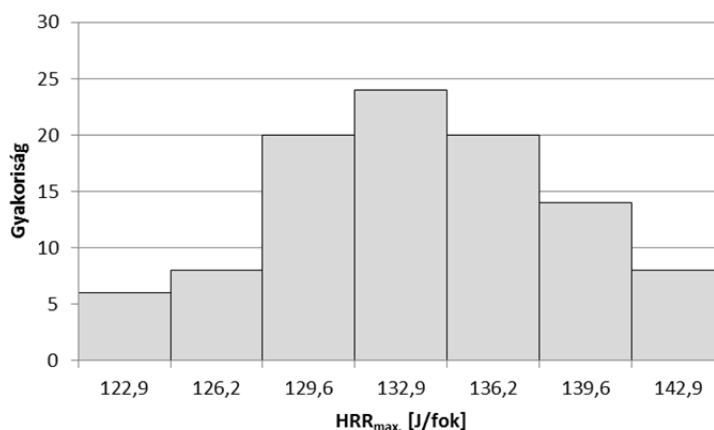
Az előkamrás motornál mért adatokat és egy jellemző mérési pont adatait figyelembe véve a tapasztalati sűrűség függvénye a M5-9. ábrán látható.



M5-9. ábra A hasznos hőváltozás (HRR) maximum értékek tapasztalati sűrűség függvénye ($\varepsilon=15,27$, D2 tüzelőanyag)

A 100 mért ciklus alapján a 2σ értéke 18,6 J/fok, a hasznos hőváltozás maximum értékek átlaga 85,8 J/fok, így a tapasztalati relatív hibakorlát $\delta_{pi,elők} = \pm 21,6\%$.

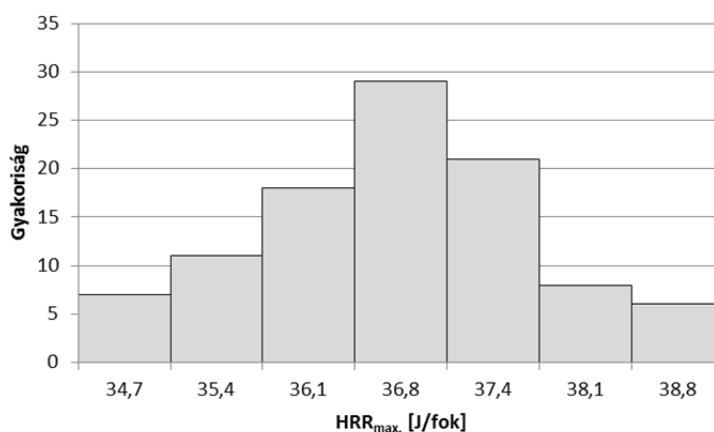
Az $\varepsilon=17$ motornál mért adatokat figyelembe véve, egy jellemző mérési pont adatainak a tapasztalati sűrűség függvénye a M5-10 ábrán látható.



M5-10. ábra A hasznos hőváltozás (HRR) maximum értékeinek tapasztalati sűrűség függvénye (20 kW terhelés, 8°-os előbefecskendezés, D2 tüzelőanyag)

A 100 mért ciklus alapján a 2σ értéke 10,54 J/fok, a hasznos hőváltozás maximum értékek átlaga 133,57 J/fok, így a tapasztalati relatív hibakorlát $\delta_{pi,elők} = \pm 7,9\%$.

Az $\varepsilon=19$ motornál mért adatokat figyelembe véve egy jellemző mérési pont adatainak a tapasztalati sűrűség függvénye a M5-11 ábrán látható.



M5-11. ábra A hasznos hőváltozás (HRR) maximum értékek tapasztalati sűrűség függvénye (3000 RPM, 75% terhelés, D2 tüzelőanyag)

A 100 mért ciklus alapján a 2σ értéke 1,00 J/fok, a hasznos hőváltozás maximum értékek átlaga 36,71 J/fok, így a tapasztalati relatív hibakorlát $\delta_{pi,elők} = \pm 5,49\%$.

i	$\delta_{HRR \max.,mért,i}$
előkamrás motor	$\pm 21,66\%$
$\varepsilon=17$ motor	$\pm 7,90\%$
$\varepsilon=19$ motor	$\pm 5,49\%$

M5-3. táblázat hasznos hőváltozás (HRR) maximum értékek tapasztalati relatív hibakorlátjai

A M5-3 táblázat alapján jól megfigyelhető, hogy az előkamrás motor esetén igen nagy a hasznos hőváltozás (HRR) maximum értékek tapasztalati relatív hibakorlátja. A két nem előkamrás motornál ezek az értékek jelentősen kisebbek, amely visszavezethető az égési folyamatra.

Károsanyagok mérése

A károsanyagok mérésére felhasznált berendezések:

A CO-, NOx- és a THC-kibocsátások mérésére a HORIBA MEXA-8120 F mérőrendszert alkalmaztam, ezt nehézüzemű Otto-motorok és személygépjármű Diesel-motorok folyamatos és direkt emisszió mérésére fejlesztették ki US szövetségi regiszter Vol. 42 No. 174 (1977) szabványának megfelelően. Azóta a mérőrendszert és annak kialakítását elfogadja az ENSZ EGB 49.03 sz. előírás illetve az ESC (EEC Directive 88/77, EEC Journal Officiel L36, 8 Feb. 1988) vizsgálat is.

A berendezés jelenlegi kiépítettségében 4 csatornás, a CO-, CO₂-, THC- és NO/NOx-kibocsátás mérésére alkalmas.

A mérőberendezés hibakorlátja a berendezés gépkönyve szerint az egyes csatornák esetén kisebb, mint 2%, a méréseknél használt ICP-DAS 7017 A/D átalakító pontossága a berendezés gépkönyve szerint elemeknél kisebb, mint 0,1%, így:

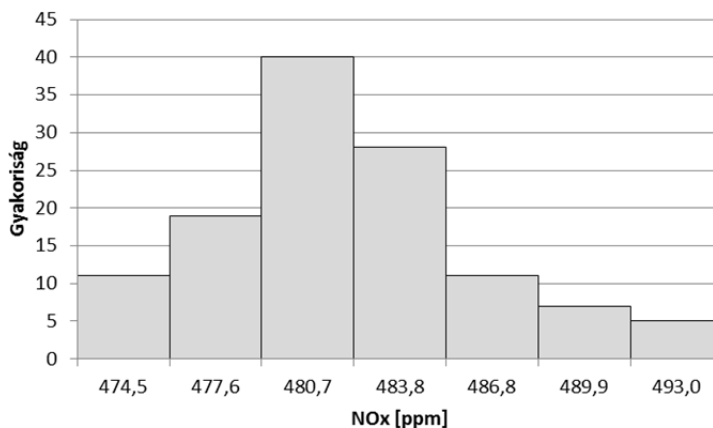
$$\sigma_{c,i} = \sqrt{\sigma_{c,i}^2 + \sigma_{A/D}^2}$$

$$\delta_{c,i} = \frac{2\sigma_{c,i}}{C_i} = \pm 4,00\%$$
(M5-15)

Ahol i=NOx, THC és CO

Nitrogénoxidok (NO_x) mérése

A mért adatokat figyelembe véve egy jellemző mérési pont adatainak a tapasztalati sűrűség függvénye a M5-12 ábrán látható.

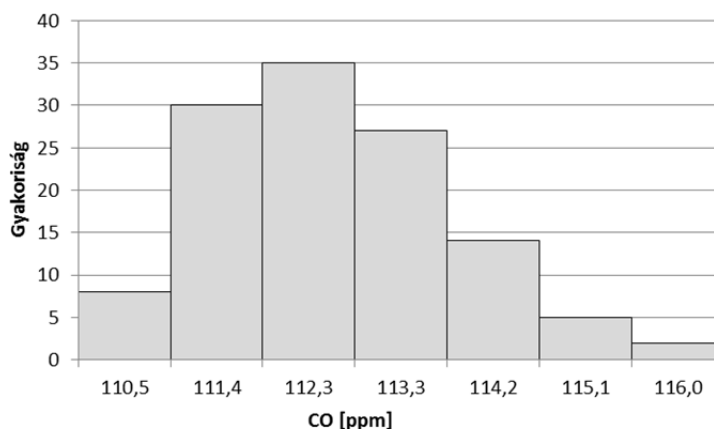


M5-12. ábra Az NOx-kibocsátás értékek tapasztalati sűrűség függvénye (3000 RPM, 75% terhelés, B20M10 tüzelőanyag)

A mérési eredmények alapján a 2σ értéke 9,06 ppm, az átlag NOx koncentráció 481,95 ppm, így a relatív hibakorlát $\delta_{NOx} = \pm 1,88\%$.

Szénmonoxid (CO) mérése

A mért adatokat figyelembe véve egy jellemző mérési pont adatainak a tapasztalati sűrűség függvénye az M5-13 ábrán figyelhető meg.

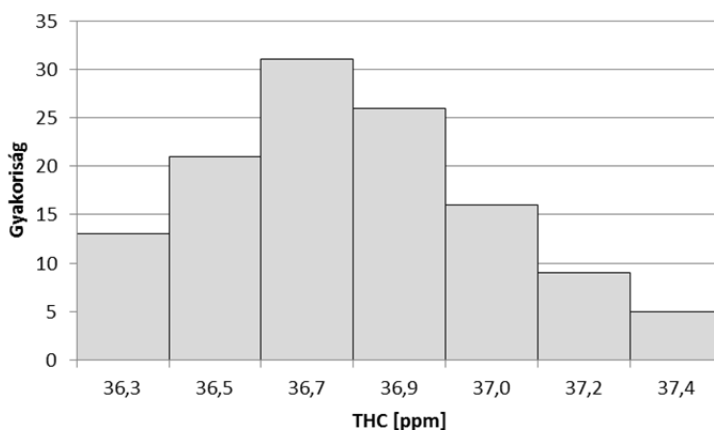


M5-13. ábra A CO-kibocsátás értékek tapasztalati sűrűség függvénye (3000 RPM, 75% terhelés, B20M10 tüzelőanyag)

A mérési eredmények alapján a 2σ értéke 2,62 ppm, az átlag CO koncentráció 112,63 ppm, így a relatív hibakorlát $\delta_{CO} = \pm 2,33\%$.

El nem égett szénhidrogének (THC) mérése

A mért adatokat figyelembe véve egy jellemző mérési pont adatainak a tapasztalati sűrűség függvénye az M5-14 ábrán látható.



M5-14. ábra A THC-kibocsátás értékek tapasztalati sűrűség függvénye (3000 RPM, 75% terhelés, B20M10 tüzelőanyag)

A mérési eredmények alapján a 2σ értéke 0,63 ppm, az átlag THC kibocsátás 36,73 ppm, így a relatív hibakorlát $\delta_{THC} = \pm 1,72\%$.

Ebben az eredő relatív hibakorlátok (M5-4 táblázat).

	$\delta_{I,m}$	$\delta_{I,t}$	$\delta_{I,e}$
NOx	$\pm 4,0\%$	$\pm 1,88\%$	$\pm 4,42\%$
CO	$\pm 4,0\%$	$\pm 2,33\%$	$\pm 4,63\%$
THC	$\pm 4,0\%$	$\pm 1,72\%$	$\pm 4,35\%$

M5-4. táblázat Az emissziómérő rendszer a mérőlánc, a tapasztalati és az eredő relatív hibakorlátjai

PM-kibocsátás mérése

A felhasznált AVL 415-ös mérőműszer az úgynevezett szűrőpapír elfeketedés módszerét használja. Egy adott speciális szűrőpapíron a berendezés adott mennyiségű

füstgáz mintát szív keresztül, ennek hatására a szűrőpapír színe megváltozik (elfeketedik), amely elfeketedésének mértékét egy optikai érzékelő méri. Az átszívott füstgáz mennyiségéből és az elfeketedésből a műszer egy úgynevezett FSN-t (Filter Smoke Number-t) határoz meg, majd ebből számítja a részecske-kibocsátást mg/m^3 mértékegységben.

- Mérési tartomány: 0 - 31999 mg/m^3 ; 0..9,99 FSN;
- Felbontás: 0,01 FSN, 1 mg/m^3 ;
- Relatív hibakorlát kisebb, mint 3% ($\delta_{\text{PM}} = \pm 3,00\%$).

A füstölésmérő által szolgáltatott adatokat mg/m^3 -ben regisztráltuk.

M-6. A MÉRÉSEKHEZ HASZNÁLT BERENDEZÉSEK LEÍRÁSA

Fékgép

Méréseink során egy Borghi - Saveri típusú örvényáramú féket használtunk, melynek legfőbb előnye az elektromos szabályzás és az összeköttetés a mérést vezérlő PC-vel. Lehetőség nyílik különböző fékezési üzemmódok kialakítására. M=áll. üzemmód esetén állandó nyomaték mellett lehet mérni a motor fordulatszámától függetlenül. Az n=áll. üzemmódnál a beállítható állandó fordulatszám mellett lehet mérni a motor nyomatékától függetlenül. Az Mn^2 üzemmód pedig a járművek esetén fellépő terhelést szimulálja.

Fék jellemzői:

- Típus: Borghi - Saveri FE 350 S;
- Működési elv: örvényáramú fék;
- Üzemmódok: n=állandó, M=állandó, Mn^2 ;
- Fordulatszám tartomány: 100-8000 1/perc;
- Maximális teljesítmény: 257 kW;
- Maximális nyomaték: 1400 Nm.

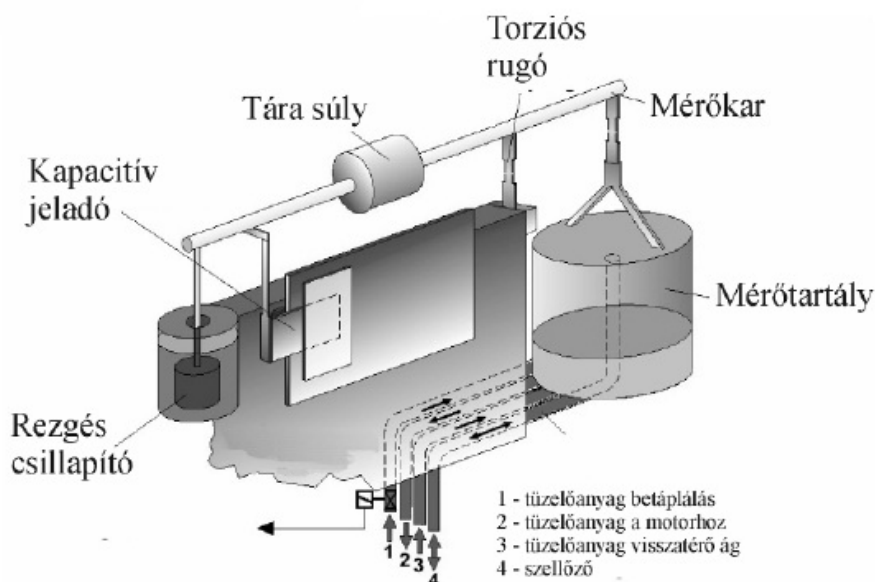
Féknyomaték mérése: a motor fékezésére szolgáló Borghi - Saveri FE 350 S típusú fékgép állórészét rögzítő Kaliber 8961-500 kg típusú erőmérő cella és annak jelét fogadó és digitalizáló Kaliber N 320 típusú műszer segítségével történik.

Tüzelőanyag-fogyasztás mérő

A motor fogyasztásának mérésére egy tömegmérés elvén működő (gravometrikus) AVL- 7131-12 berendezést alkalmaztunk, melynek jellemzői a következők:

- Típus: AVL- 7131-12;
- A tömegmérő cella terhelhetősége: 1200 g;
- Mérés tartomány: 0 - 100 kg/óra;
- Tüzelőanyag hőmérsékletének mérési tartománya: 0 - 60 °C.

A műszer működése közben egy edénybe tüzelőanyagot enged egy mágnes szelepen keresztül. Amikor a tüzelőanyag elérte a megfelelő szintet, a bemenő szelep elzár, a motor az edényből fogyaszt. Az edény tömegét kapacitív cella segítségével méri, az eltelt idővel együtt. Két alapvető mérési módszer segítségével lehet a mérést végrehajtani: adott idő alatt elfogyasztott tüzelőanyag tömegét, vagy egy adott tömeghez tartozó fogyasztás idejét határozza meg a berendezés vezérlőegysége. Mindkét módszer esetén a fogyasztást kg/h-ban jelzi ki. Felépítését a következő ábra mutatja.



M6-1. ábra A fogyasztásmérő felépítése

Emisszió mérőrendszer

A HORIBA MEXA-8120 F mérőrendszert nehézüzemű Otto-motorok és személygépjármű Diesel-motorok folyamatos és direkt emissziómérésére fejlesztették ki US szövetségi regiszter Vol. 42 No. 174 (1977) szabványának megfelelően. Azóta a mérőrendszert és annak kialakítását elfogadja az ENSZ EGB 49.03 sz. előírás illetve az ESC (EEC Directive 88/77, EEC Journal Officiel L36, 8 Feb. 1988) vizsgálat is.

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

CO elemző: AIA-23 (HORIBA)

- Mérési elv: NDIR (nem-diszperzív infravörös);
- Mérési tartományok: 0-0,1 és 0-0,5 [v/v %];

CO₂ elemző: AIA-23 (HORIBA)

- Mérési elv: NDIR (nem-diszperzív infravörös);
- Mérési tartományok: 0-8 és 0-16 [v/v %];

THC elemző: FIA-22 (HORIBA)

- Mérési elv: H FID (fűtött lángionizáció);
- Mérési tartományok: 0-10, 0-20, 0-50, 0-100, 0-200, 0-500, 0-1000, 0-2000 és 0-5000 [ppm];

NO/NO_x elemző: CLA-53

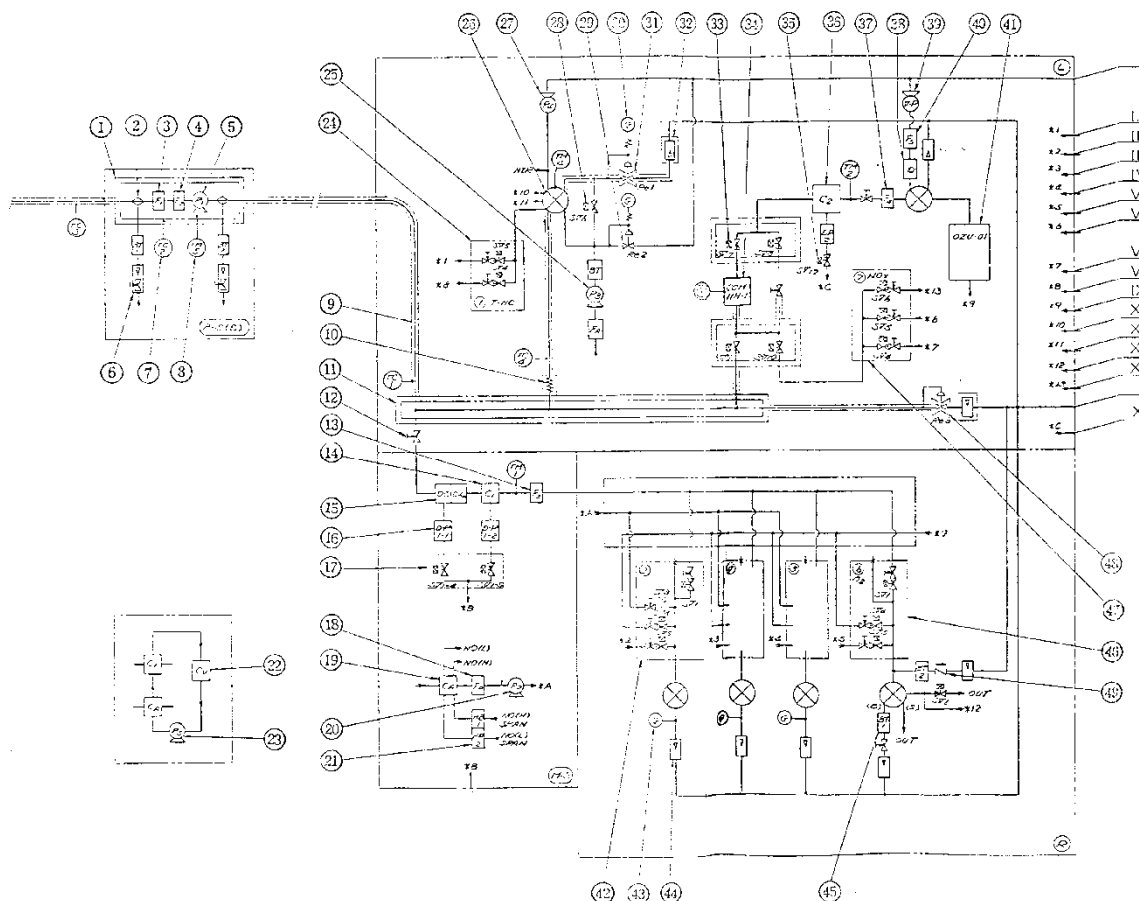
- Mérési elv: H CLD (kemiluminescens);
- Mérési tartományok: 0-10, 0-20, 0-50, 0-100, 0-200, 0-500, 0-1000, 0-2000 és 0-5000 [ppm].

Főbb paraméterek:

- Minta térfogatáram: 15 l/perc;

- Fűtött elemek hőmérséklete: 190 °C;
- Bemelegedési idő: 2 óra;
- Beállási idő: 5 s (5 méteres mintavevő vezeték esetén);
- Minta hűtési hőmérséklete: 5 °C (NDIR elemzők);
- Elektromos hűtés (CLD): 7 °C.

A mérések során a THC elemző 500 ppm-es és a NOx elemző 2000 ppm-es mérési tartományban üzemelt.



M6-2. ábra A HORIBA MEXA-8120 F emisszió mérőrendszer felépítése

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

I. THC Kalibráló gáz, II. CO Kalibráló gáz, III. 0, IV. CO2 Kalibráló gáz, V. 0, VI. NOx Kalibráló gáz, VII. Nullagáz (N2), VIII. Nullagáz (HC), IX. O2 (óziongenerátorhoz), X. Szint. levegő (THC), XI. H2 (HC), XII. N2, XIII. NO-NOx konverter ellenőrző bemenet, XIV. Kondenz kilépés.

A berendezés a mintát először az előfűtött mintavevőcsövön (pre-sample) a magas hőmérsékletű kamrába szívja, ahol két szűrő után jut a mintaszállító szivattyúba. Innen jut a mérőrendszerbe fűtött mintavevő vezetéken keresztül. Itt szintén a fűtött minta elosztóvezetékéből négy irányban halad tovább; az NDIR érzékelők hűtő hőcserélőjébe, fűtött kapillárison a H FID érzékelőhöz, és a H CLD érzékelő irányába a NO/NO_x konverter választó szelepeihez. A felesleg a by-pass ágon a nyomásszabályzó után a füstgázágban távozik.

A NDIR (CO, CO₂) ág egy további szűrő után az érzékelők minta, nulla- és kalibráló gáz kiválasztó és szabályzó szelepei után jut az érzékelőkhöz. Innen a csatornák mennyiség ellenőrző rotaméterei után jut a gyújtó füstgázágba és távozik a rendszerből.

A HCLD (NO/NO_x) ág a konverter és annak kiválasztó szelepei (NO vagy NO_x) után az elektromos hűtő és egy szűrő után jut az érzékelőbe, ahol reagál az ózongenerátorból érkező O₃-al. A mérés után a vákuumszivattyú juttatja a mintát a gyújtó füstgázágba. Az ellenőrző rotaméter a by-pass ágba van építve.

A HFID (HC) ág egy további fűtött mintavevő vezetéken keresztül jut az érzékelőhöz, innen egy nyomásszabályzó és az ellenőrző rotaméter után távozik a gyújtó füstgázágba.

A HC komponenst C₃H₈ (propán) egyenértékben adjuk meg.

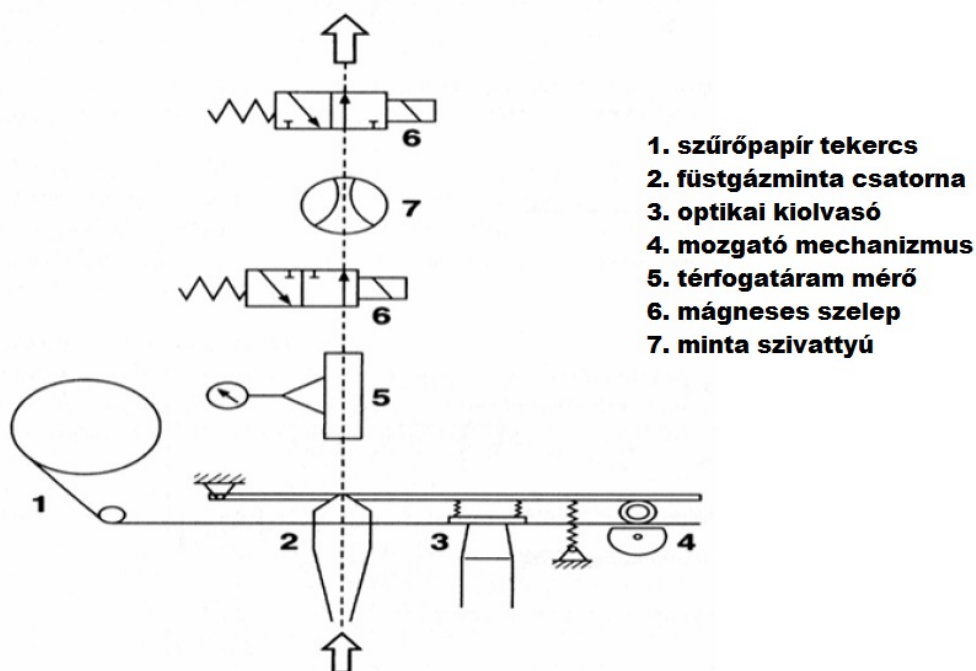
A füstgáz oxigéntartalmát Maihak-Sick S-710 paramágneses műszer segítségével mértük. A mérőberendezés pontossága: 0,125 V/V%.

A részecsk kibocsátás (PM) mérő:

Az AVL 415-ös –nemzetközileg elfogadott- füstölés mérőműszer az úgynevezett szűrőpapír elfeketedés módszerét használja. Egy adott speciális szűrőpapíron a berendezés adott mennyiségű füstgáz mintát szív keresztül, ennek hatására a szűrőpapír színe megváltozik (elfeketedik), amely elfeketedésének mértékét egy optikai érzékelő méri. Az átszívott füstgáz mennyiségéből és az elfeketedésből a műszer egy úgynevezett FSN-t (Filter Smoke Number-t) határoz meg, majd ebből számítja a részecsk kibocsátást mg/m³ mértékegységben.

- Mérési tartomány: 0 - 31999 mg/m³; 0..9,99 FSN;
- Felbontás: 0,01 FSN, 1 mg/m³;
- Beállási idő: 1 s;
- Mérési idő: 6 s;
- Minta térfogat áram: 1 liter/perc.

A füstölésmérő által szolgáltatott adatokat mg/m³-ben regisztráltuk.



M6-3. ábra Füstölésmérő működése

M-7. VIZSGÁLT MOTOROK

Nagy kompresszióviszonyú ($\epsilon=19$) motor

A méréseket egy VW-AUDI 1.9 TDI motoron végeztük. Felépítését tekintve egy négyhengeres, nyolcszelepes, közvetlen befecskendezésű (direkt befecskendezésű) feltöltött dízelmotor, töltőlevegő-hűtővel, kipufogógáz-visszavezetéssel és elosztórendszerű befecskendezővel.

Ez a motorcsalád –kisebb változtatásokkal- egészen a PD, illetve a Common-Rail rendszerű befecskendezés elterjedéséig gyártásban maradt.

Főbb paraméterei:

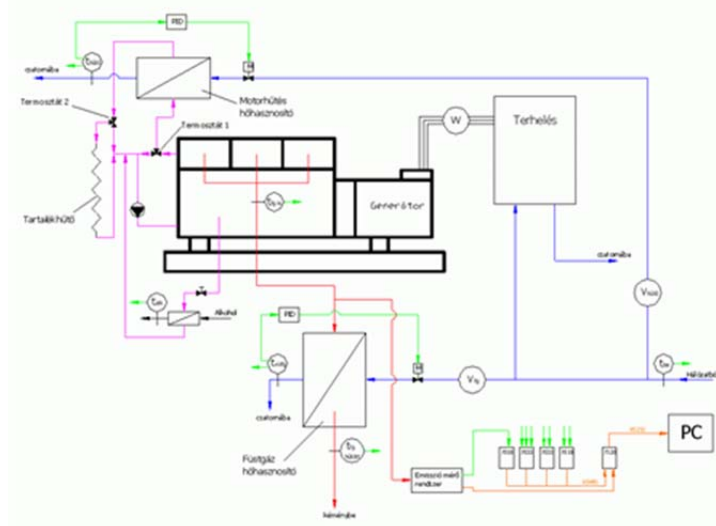
- Hengerűrtartalom: 1896 cm³;
- Dugattyúátmérő: 79,5 mm;
- Dugattyúlöklet: 95,5 mm;
- Hajtókar hossza: 119 mm;
- Kompresszióviszony: 19,5 : 1.

Kis kompresszióviszonyú ($\epsilon=17$) motor

A „NKFP3-00006/2005, Biomasszára alapozott, komplex, kapcsolt hő- és villamosenergia előállítási technológia” című projekt keretén belül egy olyan rendszer kialakítására volt szükség, amely által az alkohol előállítási technológia során keletkező magas szeszfokú nyersszeszt energetikai célra (villamos- és hőenergia termelésre) tudjuk alkalmazni.

A kialakításra kerülő berendezésben az erőgép feladatát egy IVECO AIFO 2,9 literes, közvetlen befecskendezésű, szívó Diesel-motor látja el, ezt egy M8B 160 generátor hajtja meg. A gépcsoport segéd áramfejlesztő célra készült, így hőhasznosítással nem rendelkezik. Ezért erre a célra egy külön rendszert kellett kialakítani az alap gépcsoporthoz.

Füstgáz hőcserélő céljára egy csőköteges, vízköpenyes hőcserélőt használtunk fel. A motorhűtés hőhasznosítását lemezes hőcserélővel oldottuk meg.



M7-1. ábra Kis kompresszióviszonyú ($\epsilon=17$) motor. A rendszer hőkapcsolása

Az alkohol bejuttatását a motorba hengerenkénti szívócső befecskendezéssel végeztük. A befecskendező sorok motorra történő telepítéséhez új szívócsövet kellett készíteni. A szívócső rozsdamentes acél patentívekből és a fúvókák befogadására alkalmas forgácsolt darabokból hegesztéssel készült. A rendszert úgy alakítottuk ki, hogy a fúvókák az tüzelőanyagot a szívószelepekre porlasszák, minél kevésbé érintve a szívóvezeték falát a kondenzáció elkerülése céljából. Az előzetes vizsgálatok alapján az alkohol előmelegítése szükséges a porlasztási kép javítására, erre a célra a motor hűtővizébe épített hőcserélőt alkalmaztunk.

Az alkohol bekeverés és annak aránya jelentősen befolyásolja az optimális égéskezdet időpontját. Ennek vizsgálatához és a motor beállításához szükséges a másodlagos tüzelőanyag befecskendezés időzítésének változtatása. A motor fordulatszám szabályzásáról továbbra is a Diesel-motor eredeti gázolaj-befecskendező szivattyúja gondoskodik.

A hidegindítást gázolajjal kell megvalósítani. Ugyanis az alkohol nagy párolgáshője miatt nagy a szívócsatornában és a hengerfalon történő kondenzáció veszélye, ami tökéletlen égést és korróziót eredményez. A leállítás szintén gázolajüzemben történik, hogy ne maradjon alkohol a motorban, ami ebben az esetben is korróziót okozhat és a következő indításnál is problémát jelenthet.

Mivel a motor effektív teljesítményét a kazán veszi fel a generátoron keresztül, a kazán teljesítményéből visszaszámolható a motorunk teljesítménye. Ezt úgy tudjuk megtenni, ha mérjük a víznek átadott hőáramot, melyből így megkapjuk a generátor hatásos teljesítményét. A generátor hatásfokának ismeretében pedig számítható a motorunk effektív teljesítménye.

Hőteljesítmény:

$$\dot{Q}_{v\acute{z}} = \dot{V}_{v\acute{z}} \cdot \rho_{v\acute{z}} \cdot c_{p,v\acute{z}} \cdot (t_{v\acute{z}ki} - t_{v\acute{z}be}) \quad (M7-1)$$

Motor effektív teljesítménye:

$$P_{eff} = \frac{\dot{Q}_{v\acute{z}}}{\eta_{gen}} \quad (M7-2)$$

Így a motornak két teljesítmény értéke lesz: egyik a névleges teljesítménye, amely a kazán hőteljesítményének felel meg, a másik pedig a számított effektív teljesítménye. Ezen értékeket az egyes teljesítmény szintekre az M7-1 táblázatban láthatjuk.

Kapcsolók száma	Motor névleges teljesítménye [kW]	Effektív teljesítmény [kW]
4	16	17,2
5	20	21,5
6	24	25,8

M7-1. táblázat: A motor névleges és effektív teljesítményének kapcsolata

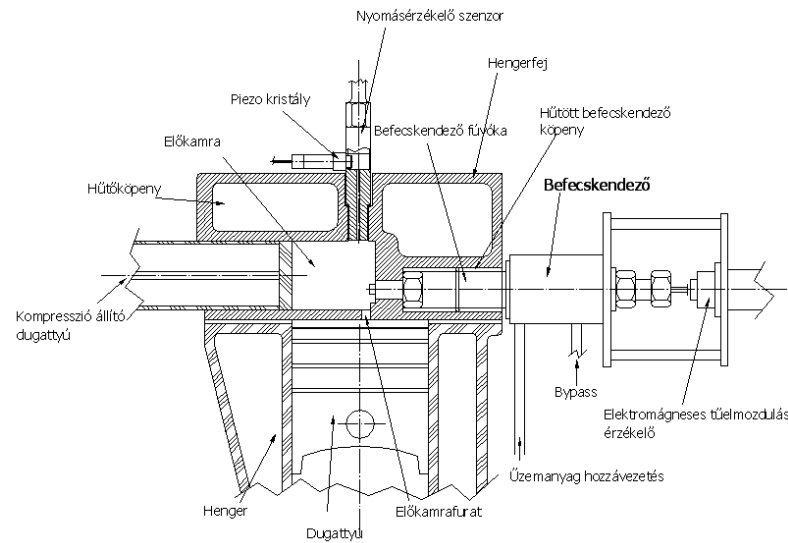
Előkamrás motor

Az alkalmazott előkamrás motor egy egyhengeres, négyütemű, Diesel-körfolyamatú belsőégésű motor. A teljes berendezés „ASTM-CFR” motorként ismeretes, amelyet az Amerikai Anyag- és Mérésügyi Testület (ASTM), valamint az Tüzelőanyag Kutató Testület (CFR) fejlesztett és elismer MSZ EN ISO 5165:1999. A CFR F-5-ös a diesel tüzelőanyagok cetánszámát meghatározó eljáráshoz kifejlesztett berendezés egy egyhengeres, négyütemű, Diesel-körfolyamatú belsőégésű motor. A teljes berendezés „ASTM-CFR” motorként ismeretes, amelyet az Amerikai Anyag- és Mérésügyi Testület (ASTM), valamint az Tüzelőanyag Kutató Testület (CFR) fejlesztett és elismer. A motor kialakításánál elsődleges szempont volt, hogy a Diesel-gázolaj minták gyulladási tulajdonságait laboratóriumi körülmények között lehessen vizsgálni. A berendezés különlegessége a hengerfejen kialakított előkamrás égéstér, amely térfogatát (ezáltal a motor kompresszió-viszonyát) változtatni lehet akár a motor üzeme közben is. A berendezés alapjaként a CFR-48D gyári kódú platformrendszer áll. Ez magában foglalja a berendezés belső hajtásrendszerét és a Diesel motorhoz ékszíjakkal kapcsolt speciális indító, fékező (energia felvevő) háromfázisú aszinkronmotort is. Az aszinkronmotor azon túl, hogy a belsőégésű motor által leadott teljesítményt fölveszi, képes annak fordulatszámát állandó, a szabvány által meghatározott értéken tartani.

Az előkamrás vizsgálómotor felépítése

Az előkamra és a hengertér (másodlagos égéstér, vagy fő égéstér) között egy furat (úgynevezett előkamra furat) biztosít kapcsolatot (M7-2. ábra). A befecskendező fúvóka tüzelőanyagot porlaszt az előkamrába, melyet az ellentétes oldalról a kézikerékkel állítható dugattyú-rendszer határol. A dugattyú ki és be mozgatható az előkamra-furatban, amellyel üzem közben is lehet a kompresszióviszonyt állítani. A befecskendezés időpontját a befecskendező szivattyún található kézikerékkel változtatjuk meg, amely pontosan beállíthatóvá teszi a befecskendezés kezdetét. A berendezés számításainak alapjául az égésből származó nyomásváltozás (dp/dt) jeladó, a befecskendező tüelmozdulás jeladó és a főtengely szögelfordulását érzékelő referencia jeladók szolgálnak. A mérés során a gyulladási idő pillanatnyi értéke

főtengelyfokban leolvasható a berendezés gyulladási idő kijelzőjéről (Ignition Delay). Az égési folyamat vizsgálatára egy piezo jeladóval egészítettük ki a rendszert.



M7-2. ábra Előkamrás motor CFR-F5 égéstere

Cetánszám meghatározása

Habár a pontos összefüggés a cetánszám skála és a motorok jellemzői között egyelőre nem ismeretes, jó néhány összefüggés kimutatható, többek között a motorok hidegindíthatóságában, a gyulladás intenzitásában és az égés kimaradásában. A mérési elv meghatározza a dízel olajok osztályozhatóságát egy – tapasztalati megfontolásból – 0-100-ig osztott ún. cetánszám skálán.

A gyulladási idő és az előbefecskendezési idő együttes beállítással határozzák meg a befecskendezés kezdetétől a gyulladás kezdetéig eltelt időt.

A motor meghatározott, állandó üzemi körülmények között üzemel (hőmérsékletek, fordulatszám). Így három változó paraméter határozza meg az tüzelőanyag égési tulajdonságait (kompresszió, gyulladási idő, befecskendezés kezdete). A berendezés digitális mérőegysége a felső holtponthoz képest mutatja a gyulladási időt és a befecskendezés kezdetét.

A minta cetánszámának megállapításakor két referencia-tüzelőanyag által meghatározott kompresszió állító kézikerék állást hasonlítunk össze a mintánál mért kézikerék-állásához. A mérendő tüzelőanyag eltüzelésekor a kézikerék állás leolvasásával, majd lineáris interpolációval állapítjuk meg a cetánszámát.

M-8. ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra A Boston Consulting Group (BCG) előrejelzése európai gépjármű eladásokra és a hajtás láncokra [2].....	6
2. ábra A REE előrejelzése az európai személy- (balról) és kistehergépjármű (jobbról) állományokra és a hajtásláncokra a különböző előrejelzések szerint [3]	7
3. ábra A nyers repceolaj (RO) és a gázolaj (GO) tüzelőanyagok porlasztási képe 0,5 ms-kel a befecskendezés után $T_0 = 298\text{ K}$ és 700 K esetén ($P_{\text{bef}} = 700\text{ bar}$, $P_0 = 10\text{ bar}$) [11]	13
4. ábra A tiszta gázolaj (Diesel) és a tiszta n-butanol porlasztási képe ($P_{\text{bef}} = 1200\text{ bar}$, $P_0 = 40\text{ bar}$, $T_0 = \text{szobahőmérséklet}$) [12]	14
5. ábra A BOS20D80, B5S15D80 és B10S10D80, tüzelőanyag-elegyek behatolási mélysége a kezdeti hőmérséklet függvényében [13]	14
6. ábra A normalizált cseppátmérő négyzet a különböző tüzelőanyagok esetén a normalizált idő függvényében különböző hőmérsékleteken ((a)ABE, (b) gázolaj) [14]	15
7. ábra A normalizált cseppátmérő négyzet a különböző tüzelőanyag elegyek és gázolaj (Diesel) esetén normalizált idő függvényében különböző keverési arányok esetén 623 K és 823 K kamrahőmérsékleten [14]	16
8. ábra Pufogás és gőzrobbanás repce metil-észter – gázolaj – etanol elegy esetén [16]	17
9. ábra A mért nyomásértékek különböző n-butanol bekeverés esetén [17]	18
10. ábra Mért nyomásértékek és a hasznos hőfelszabadulás sebesség (HRR) különböző n-butanol bekeverés esetén [18]	18
11. ábra A Chaichan által alkalmazott mérőrendszer [21]	19
12. ábra A Chaichan által alkalmazott mérőrendszerrel mért lángterjedési sebesség és az irodalmi adatok metanol-levegő keverékekre [20]	19
13. ábra A iraki gázolaj (D2), 20 V/V % metanol (M20), 20 V/V % etanol (E20) és a 20 V/V % biodízel (B20) lángterjedési sebességei, $T_u = 353\text{ K}$ hőmérséklet és $P_0 = 1\text{ bar}$ nyomás esetén a légfelesleg-tényező függvényében [20].	20
14. ábra Veloo és munkatársai által mért lángterjedési sebesség metanol-levegő, etanol-levegő és n-butanol levegő keverékek esetén a légfelesleg-tényező függvényében ($T_u = 343\text{ K}$, $P = 1\text{ bar}$) [22]	20
15. ábra Beeckmann és munkatársai által mért lángterjedési sebesség metanol-levegő, etanol-levegő, n-propanol-levegő és n-butanol levegő keverékek esetén a légfelesleg-tényező függvényében ($T_u = 343\text{ K}$, $P = 1$ és 10 bar) [23]	21
16. ábra Az adiabatikus láng hőmérséklet a molekulák C atom tartalmának függvényében ($T_u = 300\text{ K}$, $P = 1\text{ bar}$) [24]	21
17. ábra Különböző tüzelőanyagok adiabatikus láng hőmérsékletének tartománya (a világos szín az egyes tüzelőanyagokban található teljes fajtacsoportok által lefedett tartomány, a sötétszürke a legfeladatosabb komponens által lefedett tartományt jelzi, $T_u = 300\text{ K}$, $P = 1\text{ bar}$) [24]	22
18. ábra A mért indikált nyomás és hőfelszabadulás sebessége (HRR) gázolaj befecskendezés (bef. időpontja, 338 és 353 ft°) és n-butanol esetén (bef. időpontja, 338 ft°) [12]	25
19. ábra A tiszta n-butanol tüzelőanyag égéstér nyomása és a hőfelszabadulási sebesség (HRR) a fő tengelyszög függvényében HCCI and PPCI – és a két osztott befecskendezés esetén 8,2-8,1 bar effektív középnyomás esetén [12]	26
20. ábra A részecskeszám a részecskeméret függvényében 2800 1/perc fordulatszámon és 25 %, 50 %, 75 % és 100 %- terheléseken gázolaj (CCM) és 35% és 45% két elsődleges 2-butanol energia tartalom (E_p) esetén RCCI üzemben [54]	27
21. ábra A normalizált cseppátmérő négyzet ABE20 elegy esetén az idő függvényében 523 K és 723 K hőmérsékleteken [56]	28

22. ábra A mért és számított indikált nyomás és a hasznos hőfelszabadulás sebesség (HRR) a főtengeleyszög függvényében gázolaj (D100) és 30V/V % butanol (B30) esetén [61]	29
23. ábra A számított és a mért gyulladási idő értékek a butanol tartalom függvényében különböző izomerek esetén [62].....	29
24. ábra A repceolaj és az öt különböző vizsgált alkohol kinematikai viszkozitása 40 °C-on különböző bekeverési arányokban [S-6] ($\delta_{\text{viszk}} \pm 0,35 \%$).....	34
25. ábra A repceolaj kinematikai viszkozitása a hőmérséklet függvényében n-butanol bekeverési arányok esetén [S-6] ($\delta_{\text{viszk}} \pm 0,35 \%$)	35
26. ábra A nyers növényi olajok (repce, krotón, kókusz, jatropha), azokból készült metil-észterek és nyers növényi olajok – gázolaj – n-butanol elegy kinematikai viszkozitása 40 °C hőmérsékleten [S-6, S-7 és S-8] alapján ($\delta_{\text{viszk}} \pm 0,35 \%$).....	35
27. ábra A kettes és hármas krotónolaj (CRO) elegyek, valamint a keverőkomponensek kinematikai viszkozitása 40 °C-on [S-8] alapján ($\delta_{\text{viszk}} \pm 0,35 \%$)	36
28. ábra A repceolaj és 2-propanol, izobutanol és n-butanol különböző elegyeinek hidegszűrhetőségi határhőmérsékletei (CFPP) [S-6] ($\sigma_{\text{CFPP}} = \pm 2 \text{ °C}$)	37
29. ábra A zárt terű lobbanáspont értékek az öt különböző vizsgált alkohol és nyers repceolaj esetén, különböző bekeverési arányokban [S-6], ($\sigma_{\text{lobbanásp.}} = \pm 2 \text{ °C}$).....	38
30. ábra A sűrűség 28°C-on a nyers növényi olajok (repce, krotón, kókusz, jatropha), azokból készült metil-észterek és nyers növényi – gázolaj – n-butanol elegy esetén [S-6, S-7 és S-8], ($\sigma_{\text{sűrűség}} = \pm 2 \text{ kg/m}^3$)	38
31. ábra A kettes és hármas krotónolaj (CRO) elegyek, valamint a keverőkomponensek sűrűségei [S-8] ($\sigma_{\text{sűrűség}} = \pm 2 \text{ kg/m}^3$)	39
32. ábra A fűtőérték (LHV) a vizsgált négy nyersolaj és az ezekből készült biodízelek esetén [S-6 és S-7] ($\delta_{\text{LHV}} \pm 0,88 \%$).....	40
33. ábra A kettes és hármas krotónolaj (CRO) elegyek, valamint a keverőkomponensek fűtőértékei (LHV) [S-7 és S-8] ($\delta_{\text{LHV}} \pm 0,88 \%$).....	40
34. ábra Nyers növényi olajok (repce, krotón, kókusz, jatropha) és az azokból készült metil-észterek cetánszámai [S-6 és S-7] ($\sigma_{\text{cetánszám}} = \pm 1,5$ -)	41
35. ábra A cetánszámok alakulása az öt különböző vizsgált alkohol és nyers repceolaj esetén különböző bekeverési arányokban [S-6] ($\sigma_{\text{cetánszám}} = \pm 1,5$ -)	41
36. ábra A kettes és hármas krotónolaj (CRO) elegyek, valamint a keverőkomponensek cetánszámai [S-7 és S-8] ($\sigma_{\text{cetánszám}} = \pm 1,5$ -).....	42
37. ábra A krotón-, a jatropha- és kókusz- (CRO, COO, JAO) olajok TG (termogravimetriás) eredményei [S-7].....	43
38. ábra A gázolaj (D2) és az n-butanol (n-But) TG (termogravimetriás) és DTG (derivatív termogravimetria) eredményei [S-7] alapján	43
39. ábra A 10 % CRO- 10 % BU-80 % D2 hármas elegy olajok TG (termogravimetriás) és DTG (derivatív termogravimetria) eredményei [S-7].....	44
40. ábra A krotón, a jatropha és kókusz metil-észterek (CRME, COME, and JAME) TG (termogravimetriás) eredményei [S-7]	44
41. ábra Három különböző kettes és hármas krotónolaj elegy, valamint a keverőkomponensek C, H és O tartalma [S-7 és S-8] ($\delta_{\text{C, H, O}} \pm 0,5 \%$)	45
42. ábra Az indikált nyomás gázolaj, nyers repceolaj (RSO) és 10 V/V % és 20 V/V % n-butanol bekeverés esetén [S-5], ($\delta_{\text{pind}} \pm 3,59 \%$)	46
43. ábra A hármas elegyek és gázolaj esetén mért teljesítmény különböző terheléseken és 3000 1/perc fordulatszámon [S-9] , ($\delta_{\text{Peff}} \pm 1,38 \%$).....	47
44. ábra A hármas elegyek effektív hatásfokai (BTE) 3000 1/perc fordulatszámon különböző terhelések esetén [S-8, S-9], ($\delta_{\text{BTE}} \pm 1,65 \%$)	48
45. ábra A hármas elegyek fajlagos fogyasztása (BSFC) 3000 1/perc fordulatszámon különböző terhelések esetén [S-8, S-9] ($\delta_{\text{BSFC}} \pm 1,40 \%$)	48
46. ábra Az indikátordiagramok maximum értékei 3000 1/perc fordulatszámon különböző terhelések és tüzelőanyag-elegyek esetén [S-9] ($\delta_{\text{pi}} \pm 2,66 \%$).....	49

47. ábra A hármass elegyek és a referencia gázolaj (D2) égéstérnyomása és a hasznos hő változása (HRR) a főtengelyszög függvényében különböző elegyek és terhelések esetén [S-9], ($\delta_{p_i} \pm 2,66 \%$, $\delta_{HRR} \pm 5,49 \%$)	50
48. ábra A hasznos hőváltozás maximum és az előkevert szakasz maximum értékei 3000 1/perc fordulatszámon különböző terhelések és tüzelőanyag-elegyek esetén [S-8, S-9] ($\delta_{HRR} \pm 5,49 \%$).....	50
49. ábra A hármass elegyek és a referencia gázolaj (D2) nitrogénoxid (NO _x) kibocsátása 3000 1/perc fordulatszámon, különböző terhelések esetén [S-9] ($\delta_{NOx} \pm 4,42 \%$).....	51
50. ábra A hármass elegyek és a referencia gázolaj (D2) el nem égett szénhidrogén (THC) kibocsátása 3000 1/perc fordulatszámon, különböző terhelések esetén [S-9] ($\delta_{THC} \pm 4,35 \%$) ..	52
51. ábra A hármass elegyek és a referencia gázolaj (D2) szénmonoxid (CO) kibocsátása 3000 1/perc fordulatszámon különböző terhelések esetén [S-9] ($\delta_{CO} \pm 4,63 \%$).....	52
52. ábra A hármass elegyek és a referencia gázolaj (D2) részecske (PM) kibocsátása 3000 1/perc fordulatszámon különböző terhelések esetén [S-9], ($\delta_{PM} \pm 3,00 \%$)	53
53. ábra A keveredési folyamat gázolaj és gázolaj – n-butanol elegy esetén (a csepp sebességek CFD modell eredmények alapján gázolajra készültek az [S-16 alapján])	57
54. ábra Az indikált nyomás és az abból számolt hasznos hőváltozás (HRR) a főtengelyszög függvényében különböző kompresszióviszonyok és n-butanol részarányok esetén, ($\delta_{p_i} \pm 3,59 \%$, $\delta_{HRR} \pm 21,66 \%$) [S-12 alapján]	59
55. ábra Az indikált nyomás maximuma és a nyomásváltozási sebesség maximuma különböző kompresszióviszonyok és n-butanol részarányok esetén [S-12 alapján] ($\delta_{p_i} \pm 3,59 \%$)	60
56. ábra A hasznos hőváltozás (HRR) maximuma és a gyulladási idő különböző kompresszióviszonyok és n-butanol részarányok esetén [S-12 alapján] ($\delta_{HRR} \pm 21,66 \%$)	60
57. ábra A hasznos hőváltozás (HRR) maximumának és a gyulladási idő változása a gázolajhoz (0V/V % n-butanol) képest, különböző kompresszióviszonyok és n-butanol részarányok esetén [S-12 alapján]	61
58. ábra A tüzelőanyag-fogyasztás 20 kW teljesítmény esetén az előbefecskendezés függvényében különböző 1-butanol részarányok esetén (B0 = 0 %, B5 = 5 %, B10 = 10 % és B20 = 20 V/V % n-butanol) ($\delta_B \pm 0,23 \%$) [S-11 alapján]	62
59. ábra Az effektív hatásfok (BTE) 20 kW teljesítmény esetén az előbefecskendezés függvényében különböző n-butanol részarányok esetén (B0 = 0 %, B5 = 5 %, B10 = 10 % és B20 = 20 V/V % n-butanol) ($\delta_{BTE} \pm 1,65 \%$) [S-11 alapján].....	63
60. ábra Az indikált nyomás ($P_{ind.}$) és a hasznos hőváltozás a főtengelyszög függvényében különböző előbefecskendezések esetén, 1500 1/perc fordulatszámon és D2 tüzelőanyag esetén ($\delta_{p_i} \pm 3,29 \%$, $\delta_{HRR} \pm 7,90 \%$).....	64
61. ábra A valódi befecskendezési szög, az égéskezdet, a befecskendezés vége és a gyulladási idő az előbefecskendezés függvényében ($\sigma \pm 0,70$).....	64
62. ábra Az indikált nyomás ($P_{ind.}$) és a hasznos hőváltozás a főtengelyszög függvényében különböző előbefecskendezések, n-butanol részarány esetén, 1500 1/perc fordulatszámon és 20 kW terhelésen [S-11 alapján] ($\delta_{p_i} \pm 3,29 \%$, $\delta_{HRR} \pm 7,90 \%$)	65
63. ábra Az indikált nyomás és a nyomás változás sebességének maximumai az előbefecskendezés függvényében 20 kW terhelésen különböző n-butanol elegyek esetén (D2 = 0 %, 10 % BU = 10 V/V % és 20 % BU = 20 V/V % n-butanol) [S-11 alapján] ($\delta_{p_i} \pm 3,29$).....	66
64. ábra A hasznos hőváltozás maximuma és az idő késedelem az előbefecskendezés függvényében 20 kW terhelésen különböző n-butanol elegyek esetén [S-11 alapján] ($\delta_{HRR} \pm 7,90 \%$).....	66
65. ábra A hasznos hőváltozás maximumának változása és a gyulladási idő változása a gázolajhoz képest az előbefecskendezés függvényében 20 kW terhelésen különböző n-butanol elegyek esetén	67
66. ábra A NO _x -, el nem égett szénhidrogén (THC), a CO- és a részecske-kibocsátás (PM) az előbefecskendezés függvényében 20 kW terhelésen különböző n-butanol elegyek esetén [S-11 alapján] ($\delta_{NOx} \pm 4,42 \%$, $\delta_{CO} \pm 4,63 \%$, $\delta_{THC} \pm 4,35 \%$, $\delta_{PM} \pm 3,00 \%$).....	68

67. ábra A tüzelőanyag cseppek sebessége és az égési hőfelszabadulás a felső holtpont esetén, AVL Fire CFD számítási eredmény, 8 fokos előbefecskendezés, D2 tüzelőanyag esetén	68
68. ábra A hasznos hőváltozás maximuma (HRR) és a hasznos hőváltozás maximuma az AVL Boost BURN program csomagja alapján (ROHR) B10 tüzelőanyag esetben az előbefecskendezés függvényében [S-11 alapján]	69
69. ábra A teljes terhelésen mért effektív teljesítmény különböző elegyek esetén 1500 és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10] (δ_{peff} , $\pm 1,38$ %)	70
70. ábra A tüzelőanyag-fogyasztás (B) különböző elegyek és terhelések esetén 1500 és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10] (δ_B , $\pm 0,23$ %)	70
71. ábra Az effektív hatásfok (BTE) különböző elegyek és terhelések esetén 1500 és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10] (δ_{BTE} , $\pm 1,65$ %)	70
72. ábra A befecskendezés kezdet, égéskezdet, befecskendezés vége és a gyulladási idő gázolaj esetén különböző terheléseken 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon	71
73. ábra Az indukált nyomás ($P_{ind.}$) és a hasznos hő változása a főtegelyszög függvényében különböző terheléseken és n-butanol részarány esetén 1500 1/perc fordulatszámon [S-10] (δ_{pi} , $\pm 2,66$ %, δ_{HRR} $\pm 5,49$ %)	72
74. ábra Az indukált nyomás ($P_{ind.}$) és a hasznos hőváltozás a főtegelyszög függvényében különböző terheléseken és n-butanol részarány esetén 3000 1/perc fordulatszámon [S-10] (δ_{pi} , $\pm 2,66$ %, δ_{HRR} $\pm 5,49$ %)	73
75. ábra A befecskendezés kezdet különböző terheléseken és n-butanol részarányok esetén 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10 alapján]	73
76. ábra Az indukált nyomás (P_i) maximumok különböző terheléseken és n-butanol részarányok esetén 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10 alapján] (δ_{pi} , $\pm 2,66$ %)	74
77. ábra Az indukált nyomásváltozás maximumai különböző terheléseken és n-butanol részarányok esetén 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10 alapján]	74
78. ábra A gyulladási idő különböző terheléseken és n-butanol részarányok esetén 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10 alapján] (σ_{fi} $\pm 0,72$ °)	75
79. ábra A hasznos hőváltozás (HRR) maximuma (felül) és az előkevert szakasz hasznos hőváltozása maximuma (alul) különböző terheléseken és n-butanol részarányok esetén 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10 alapján] (δ_{HRR} $\pm 5,49$ %)	76
80. ábra Az előkevert szakasz a hasznos hőváltozás (HRR) maximumának változása a gázolajhoz képest különböző terheléseken és n-butanol részarány esetén 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10 alapján] (δ_{HRR} $\pm 5,49$ %)	77
81. ábra A nitrogénoxid (NOx) kibocsátás különböző terheléseken és n-butanol részarány esetén 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10] (δ_{NOx} $\pm 4,42$ %)	77
82. ábra Az el nem égett szénhidrogén (THC) kibocsátás különböző terheléseken és n-butanol részarány esetén 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10] (δ_{THC} $\pm 4,35$ %)	78
83. ábra A szénmonoxid (CO) kibocsátás különböző terheléseken és n-butanol részarány esetén 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10] (δ_{CO} $\pm 4,63$ %)	79
84. ábra A részecske (PM) kibocsátás különböző terheléseken és n-butanol részarány esetén 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon [S-10] (δ_{PM} $\pm 3,00$ %)	79
85. ábra Az oxigén, nitrogénoxid (NOx), el nem égett szénhidrogén (THC), szénmonoxid (CO) és a részecske (PM) kibocsátás különböző fordulatszámokon és n-butanol részarány esetén teljes terhelésen (δ_{NOx} $\pm 4,42$ %, δ_{CO} $\pm 4,63$ %, δ_{THC} $\pm 4,35$ %, δ_{PM} $\pm 3,00$ %)	80
86. ábra Az el nem égett szénhidrogén (THC), a nitrogénoxid (NOx), a szénmonoxid (CO) és a részecske (PM) kibocsátás alajáraton (900 1/perc) különböző n-butanol részarány esetén [S-10] (δ_{NOx} $\pm 4,42$ %, δ_{CO} $\pm 4,63$ %, δ_{THC} $\pm 4,35$ %, δ_{PM} $\pm 3,00$ %)	81
87. ábra A gázolaj (D2) és a n-butanol elegyek gyulladási ideje a kompresszióviszony függvényében	82

88. ábra Az előkevert szakasz hasznos hőváltózás (HRR) maximumának változása a gázolajhoz képest a gyulladási idő függvényében 10 V/V % (10 % BU) és 20 V/V % n-butanol (20 % BU) tartalmú elegyek esetén [S-10, S-11 és S-12]..... 83
89. ábra Az előkevert szakasz hasznos hőváltózás (HRR) maximumának változása a gázolajhoz képest a gyulladási idő függvényében 10 V/V % (10 % BU) és 20 V/V % n-butanol (20 % BU) tartalmú elegyek különböző motorok és üzemi pontok esetén [S-10, S-11 és S-12] 84
90. ábra A NO_x-, THC-, CO- és PM-kibocsátás gázolajhoz viszonyított változása az n-butanol bekeverés hatására különböző vizsgálati körülmények esetén [S-10, és S-11] 84
91. ábra A NO_x-, THC-, CO- és PM-kibocsátások változása a gázolaj kibocsátásához képest a gyulladási idő függvényében 10 V/V % (10 % BU) és 20 V/V % n-butanol (20 % BU) tartalmú elegyek 1500 1/perc és 3000 1/perc fordulatszámokon, különböző felhasználások esetén [S-10, és S-11]..... 85
92. ábra A maximális nyomaték gázolaj (D2), 30V/V % biodízel (30 % BioD) és 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M) esetén különböző fordulatszámokon [S-13 alapján] ($\delta_M, \pm 1,23 \%$) 88
93. ábra Az effektív hatásfok (BTE) gázolaj (D2), 30V/V % biodízel (30 % BioD) és 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol elegy (30 % BioD - 10 % M) esetén különböző fordulatszámokon és 25 %-os és 100 %-os terhelésen [S-13 alapján] ($\delta_{BTE}, \pm 1,65 \%$) 88
94. ábra Az indikált nyomás ($P_{ind.}$) és a hasznos hőváltózás (HRR) a főtengelyszög függvényében különböző terheléseken gázolaj (D2), 30V/V % biodízel (30 % BioD) és 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M) esetén 3000 1/perc fordulatszámokon [S-13 alapján] ($\delta_{pi}, \pm 2,66 \%$, $\delta_{HRR} \pm 5,49 \%$) 89
95. ábra Az indikált nyomásmaximum különböző terheléseken és fordulatszámokon gázolaj (D2), 30V/V % biodízel (30 % BioD) és 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M) esetén, valamint a 30 V/V % biodízel (30 % BioD /D2) és a 30V/V % biodízel+10V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M /D2) változása a gázolajhoz képest [S-13 alapján] ($\delta_{pi}, \pm 2,66 \%$) 90
96. ábra Az előbefecskendezés különböző terheléseken és fordulatszámokon gázolaj (D2), 30V/V % biodízel (30 % BioD) és 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M) tüzelőanyagok esetén [S-13 alapján] 91
97. ábra A gyulladási idő különböző terheléseken és fordulatszámokon gázolaj (D2), 30 V/V % biodízel (30 % BioD) és 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M) elegyek esetén, valamint a 30 V/V % biodízel (30 % BioD /D2) és a 30V/V % biodízel+10V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M /D2) gyulladási idő változása a gázolajhoz képest [S-13 alapján] 92
98. ábra A hasznos hőváltózás (HRR) maximumok változása a gázolajhoz képest 30 V/V % biodízel (30 % BioD /D2) és a 30V/V % biodízel+10V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M /D2) esetén [S-13 alapján] ($\delta_{HRR} \pm 2,42 \%$) 93
99. ábra Az előkevert szakasz hasznos hőváltózás (HRR) maximuma különböző terheléseken és fordulatszámokon gázolaj (D2), 30V/V % biodízel (30 % BioD) és 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M) esetén, valamint a 30 V/V % biodízel (30 % BioD /D2) és a 30V/V % biodízel+10V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M /D2) változása a gázolajhoz képest [S-13 alapján] ($\delta_{HRR} \pm 5,49 \%$) 93
100. ábra A nitrogénoxid (NO_x) kibocsátás különböző terheléseken és fordulatszámokon gázolaj (D2), 30V/V % biodízel (30 % BioD) és 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M) elegyek esetén, valamint a 30 V/V % biodízel (30 % BioD /D2) és a 30V/V % biodízel+10V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M /D2) változása a gázolajhoz képest, valamint a 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol tartalmazó elegy változása a 30V/V % biodízelt tartalmazó elegyhez képest (30 % BioD - 10 % M/30 % BioD) [S-13 alapján] ($\delta_{NOx} \pm 4,42 \%$) 94
101. ábra Az el nem égett szénhidrogén (THC) kibocsátás különböző terheléseken és fordulatszámokon gázolaj (D2), 30V/V % biodízel (30 % BioD) és 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M) elegyek esetén, valamint a 30 V/V % biodízel (30 % BioD /D2) és a 30V/V % biodízel+10V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M /D2) változása a gázolajhoz képest, valamint a 30V/V % biodízelt és 10 V/V % metanolt tartalmazó elegy változása a 30V/V %

biodízel tartalmazó elegyhez képest (30 % BioD - 10 % M/30 % BioD). [S-13 alapján] ($\delta_{THC} \pm 4,35 \%$).....	95
102. ábra A szénmonoxid (CO) kibocsátás különböző terheléseken és fordulatszámokon gázolaj (D2), 30V/V % biodízel (30 % BioD) és 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M) elegyek esetén, valamint a 30 V/V % biodízel (30 % BioD /D2) és a 30V/V % biodízel+10V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M /D2) változása a gázolajhoz képest, valamint a 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanolt tartalmazó elegy változása a 30V/V % biodízel tartalmazó elegyhez képest (30 % BioD - 10 % M/30 % BioD). [S-13 alapján] ($\delta_{CO} \pm 4,63 \%$)	96
103. ábra A részecske (PM) kibocsátás különböző terheléseken és fordulatszámokon gázolaj (D2), 30V/V % biodízel (30 % BioD) és 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M) elegyek esetén, valamint a 30 V/V % biodízel (30 % BioD /D2) és a 30V/V % biodízel+10V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M /D2) változása a gázolajhoz képest, valamint a 30V/V % biodízel és 10 V/V % metanolt tartalmazó elegy változása a 30V/V % biodízel tartalmazó elegyhez képest (30 % BioD - 10 % M/30 % BioD). [S-13 alapján] ($\delta_{PM} \pm 3,00 \%$)	97
104. ábra Az előkevert szakasz hasznos hőváltozás (HRR) maximumának változása a gázolajhoz képest a gyulladási idő függvényében 30 V/V % biodízel (30 % BioD); 30 V/V % biodízel és 10 V/V % metanol (30 % BioD - 10 % M), valamint 10 V/V % (10 % BU) és 20 V/V % n-butanol (20 % BU) elegyek esetén [S-10 , S-11, S-12 és S-13]	99
105. ábra A keveredési folyamat kettős tüzelőanyagú rendszer esetén	100
106. ábra A gázolaj (D2) és metanol tüzelőanyagok tömegáramai 24 kW terhelésen (A), és a globális és a metanolra vonatkozó légfeszültség különböző elsődleges tüzelőanyag energiatartalom esetén különböző terheléseken (B) [S-15 alapján]	101
107. ábra Az indukált nyomás ($P_{ind.}$) és a hasznos hőváltozás a főtengelyszög függvényében különböző elsődleges tüzelőanyag energiatartalmak és terhelések esetén ($\delta_{P_{i,r}} \pm 3,29 \%$, $\delta_{HRR} \pm 7,90 \%$) [S-15 alapján].....	102
108. ábra Az indukált nyomásmaximumok és a hasznos hőváltozás maximuma az elsődleges tüzelőanyag energia tartalomnak függvényében különböző terheléseken ($\delta_{P_{i,r}} \pm 3,29 \%$, $\delta_{HRR} \pm 7,90 \%$) [S-15 alapján].....	104
109. ábra Az effektív hatásfok (BTE) az elsődleges tüzelőanyag energiatartalmának függvényében különböző terheléseken[S-15 alapján] ($\delta_{BTE} \pm 1,65 \%$)	104
110. ábra Az NOx-, THC-, CO- és PM-kibocsátás az elsődleges tüzelőanyag energiatartalmának függvényében különböző terheléseken($\delta_{NOx} \pm 4,42 \%$, $\delta_{CO} \pm 4,63 \%$, $\delta_{THC} \pm 4,35 \%$, $\delta_{PM} \pm 3,00 \%$) [S-15 alapján]	105