

MTA DOKTORI PÁLYÁZAT TÉZISFÜZETE

***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 szorosán 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 túrték ezt a közel két évet!

1. BEVEZETÉS

Értekezésemben egyes alkoholok dízelmotoros felhasználásával foglalkozom. 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 egyes vélekedések szerint nem csak a dízelmotorok, de általában a belsőégésű motorok is. Az áttekintett elemzések [1], [2], [3] azt prognosztizálják, hogy 2030-ra az előrejelzések szerint az alternatív hajtásláncok közül a teljesen elektromos hajtás (BEV), a hálózatról tölthető hibrid hajtás (PHEV) és a tüzelőanyag-cellás hajtás (FCV) aránya az új eladások között 52 és 60 % közöttre tehető a belsőégésű motorok szempontjából pesszimistább forgatókönyvek szerint. Az alternatív hajtásláncokon belül a BEV aránya mindössze 12 és 20 % között várható, ennek az arálynak a megközelítését a 2020-as évek közepére várják az elemzők. 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. A Ricardo E&E jelentés [5] szerint a korszerű dízelmotorokban felhasználásra kerülő megújuló (és alternatív) tüzelőanyagok aránya is jelentőssé kell, hogy váljon a CO₂ kibocsátási célok megvalósulása érdekében. A tanulmány szerint a 2050-ben üzemben lévő kistehergépjárművek több, mint 60 %-a dízelmotoros hibrid vagy hálózatról tölthető dízelmotoros hibrid hajtás (HEV és PHEV) lesz. Tehát továbbra is fontos kérdés, hogy tüzelőanyagok mennyire támaszkodnak a fosszilis készletekre és mennyire a megújulókra. Szintén fontos, 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. Továbbá 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-19].

2. CÉLKITŰZÉS

Mivel az előrejelzések alapján fontos feladat lesz a dízelmotorok átállítása minél nagyobb mértékben megújuló tüzelőanyagokra, így a céloom megoldás keresése volt a meglévő dízelmotorok legkisebb átalakításával járó újszerű, megújuló tüzelőanyagok hasznosítására. További céloom 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 célkitűzések megvalósítása érdekében a disszertációm első részében áttekintettem a vizsgált alkoholokkal kapcsolatos szakirodalmi forrásokat.

3. SZAKIRODALMI 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 tekintetem át, amelyek a 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 változására. A harmadik részben az *n*-butanol tartalmú kettős elegyek felhasználásával és azok károsanyag-kibocsátásra gyakorolt hatásaival kapcsolatos szakirodalmat tekintetem 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.

Összefoglalva az első részben áttekintett tanulmányokat megállapítható, hogy a nyersolajok felhasználhatók dízelmotorokban, azonban jelentős problémák tapasztalhatók, melyek előmelegítéssel részben elkerülhetők - elsősorban a nagyobb hőmérsékleten jelentkező alacsonyabb viszkozitás miatt. Az előmelegítéssel javuló üzemi és emissziós paraméterek érhetők el [6], [7], [8]. Az előmelegítés hatása jól megfigyelhető a porlasztási képen is [9]. Ennek alapján ezen a területen a kijelölt kutatási irányom megoldás keresése volt a nyersolajok előmelegítés nélküli felhasználására, mivel előmelegítésre leggyakrabban a már üzemlevegő motor esetén áll rendelkezésre lehetőség.

A második részben a magasabb szénatomszámú alkohol (elsősorban *n*-butanol) – gázolaj elegyek égésével kapcsolatos irodalom áttekintése alapján a következőket tudtam megállapítani. A többkomponensű tüzelőanyag-elegyek esetén az illékonyabb alkoholkomponensek az alacsonyabb forráspontjuk miatt a gázolajhoz képest gyorsabban párolognak ki a cseppekből [10]. A kigőzölgés folyamatos alacsony hőmérsékleten, magasabb hőmérsékleten pedig a kigőzölgés lehet fluktuáló cseppnövekedéses, vagy puffogós, esetleg gőzrobbanással is járhat [11]. Figyelembe véve a dízelmotorok nagy kompresszióviszonyát és a kompresszió okozta magas hőmérsékletet, ez utóbbiak

valószínűsíthetők. Az alkoholok bekeverésének hatására nő a gyulladási idő [12]. A sztöchiometrikus és tüzelőanyagban dús keverékek esetén az *n*-butanol lángterjedési sebessége kisebb, mint a gázolaj lángterjedési sebessége [13]. A metanol, etanol és *n*-butanol adiabatikus lánghőmérséklete kisebb, mint a gázolaj (D2) adiabatikus lánghőmérséklete [14].

Az *n*-butanol kettős elegyek felhasználásával és károsanyag-kibocsátásával kapcsolatban számos szakirodalmi közleményt találtam. Két összefoglaló cikk ([15], [16]) 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. Tehát a vizsgálati körülmények és módszerek hatása jelentős eltéréseket eredményezett.

A negyedik részben az előremutató kutatások területén X. Han és munkatársai [17] az *n*-butanollal, mint a dízelmotorok lehetséges következő generációs tüzelőanyagával foglalkoztak. Szerintük kevésbé vizsgált az üzemeltetés tisztán *n*-butanollal. 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, a NO_x- és a PM-kibocsátás is csökkenhet *n*-butanol alkalmazásánál, elsősorban a butanol nagy gyulladási késedelmé miatt kialakuló kései intenzív előkevert égés miatt. A szerzők javaslata alapján tisztán *n*-butanol tüzelőanyag esetén nagy terhelésen az úgynevezett osztott (Split) befecskendezés alkalmazása célszerű, 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 (PCCI) módszerekkel a gázolajos üzemhez hasonló jó hatásfokot lehet megvalósítani a szerzők megállapítása szerint.

Zheng és munkatársai [18] összehasonlító vizsgálatokat végeztek *n*-butanol – biodízel elegyekkel (0 – 80 V/V % bekeverési aránnyal) és ugyanezekkel az elegyekkel végeztek méréseket reakció képesség kontrolált kompresszió gyújtás (RCCI) üzemben, különböző terheléseken. Eredményeik szerint a részecskekibocsátás (PM) a butanol tartalom növelésével csökkent. A NO_x-kibocsátás RCCI üzemben jelentősebben csökkent, viszont a THC- és a CO-kibocsátás jelentősen növekedett.

A modellezéssel kapcsolatban elért eredményekkel a Ma és munkatársai [11] által elvégzett mérések alapján Ni és munkatársai [19] foglalkoztak a kettős tüzelőanyag-elegy (gázolaj és ABE) cseppek párolgási folyamatainak modellezésével. 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.

Huang és munkatársai [20] 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 hőváltozás (HRR) szempontjából a szimulációs és a mérési eredmények jól egyeztek, de a HRR maximumok nagyobbak voltak a kísérleti eredményeknél. Ennek oka a szerzők szerint, hogy az égésterben kialakuló turbulencia, valamint a tüzelőanyag-befecskendezés időbeni lefutása nem volt teljes mértékben figyelembe véve. Sazhin [21] 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) mint a 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.

4. AZ ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK, EREDMÉNYEK ÉS TÉZISEK

Az elvégzett vizsgálatokat a célkitűzéseknek megfelelően négy részre bontottam. Az első részben a nyersolajok hasznosításának lehetőségeit vizsgáltam kettős és hármas elegyekkel. A második részben gázolaj – *n*-butanol kettős elegyeket vizsgáltam három különböző dízelmotorban. Ezután a metanol bekeverésének hatását vizsgáltam szintén nagy kompresszióviszonyú dízelmotorban. Az utolsó részben az alkoholok egy másik lehetséges felhasználási módszerét, az úgynevezett kettős tüzelőanyagú dízelmotorok területén végzett kutatásaimat mutatom be. Ez utóbbi már a motor jelentősebb átalakítását igényli, de egy fontos módszere lehet a jövőben a megújuló tüzelőanyagok dízelmotoros hasznosításának.

4.1. Elvégzett vizsgálatok és elért eredmények a magasabb 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 viszkozusak. A nagy viszkozitás és a rossz párolgási tulajdonságuk nagy kihívást jelent, illetve kizárja felhasználásukat a modern és erre fel nem készített dízelmotorokban.

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. [22] [23] és [24]). A rövid távú vizsgálati eredmények biztatóak voltak, de problémák merültek fel a hosszú távú motortartóssági tesztekben. Ezért növényi olajokat bizonyos arányokat meghaladóan tartalmazó elegyek alkalmazása nem praktikus, 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 fázisszétválás, 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 emulgeátor nélkül. Jelentős részük előállítható biomasszából, melyek alacsony viszkozitással rendelkeznek és így felhasználhatók az elegyek viszkozitásának csökkentésére. Az egyszerű alkoholoknál nagyobb a fűtőértékük, a cetánszámuk, és a viszkozitásuk is.

A vizsgálatok első részében négy nyers növényi olaj: krotonolaj (CRO), kókuszolaj (COO), jatrophaolaj (JAO) és repceolaj (RSO) kettős (magasabb szénatom-számú (C3-C4) alkoholok – nyers növényi olajok) és hármas (*n*-butanol – nyers krotonolaj – gázolaj) elegyeivel foglalkoztam.

A hipotézisem szerint az általam vizsgált magasabb szénatom-számú alkoholok, elsősorban az *n*-butanol megfelelő keverőkomponens növényi olaj – gázolaj elegyek számára ([S-6], [S-7], [S-8] és [S-9]). 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. 1. 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

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

Első lépésben összefoglaltam a megvizsgált nyers növényi olajok egyes fizikai és kémiai jellemzőit, és ennek alapján a következőket fogalmaztam meg:

A kiválasztott négy nyers növényi olaj az általam megvizsgált fizikai és kémiai tulajdonságaik alapján nem alkalmas felhasználásra egy nem átalakított dízelmotorban a következők miatt:

A megvizsgált krotonolaj, kókuszolaj, jatrophaolaj és repceolaj esetén a kinematikai viszkozitás 40 °C-on a gázolaj-szabvány által megadott határértéknek több mint hétszerese. A minták közti eltérés nem jelentős: kisebb, mint 5 %. A vizsgált nyersolajok sűrűsége 28 °C-on 10-15 %-kal nagyobb, mint 28 °C-on a vizsgált gázolaj sűrűsége és a minták közti eltérés szintén nem jelentős, kisebb mint 5 %. Megállapítottam, hogy a vizsgált nyers növényi olajok fűtőértéke 14-18 %-kal alacsonyabb, mint a gázolaj fűtőértéke. A minták közötti eltérés itt 5 % körüli. A cetánszámok alacsonyabbak, de ez a kókuszolaj esetén közel megegyezik a gázolajével, a többi minta esetén azonban jelentős (17-20 %) a cetánszám csökkenés. A termogravimetriás elemzések alapján megállapítható, hogy a nyers növényi olajok párolgása 130–190 °C-on kezdődik és az elsődleges bomlás 400–460 °C-ig tart, míg a gázolaj esetén a párolgás 59 °C-on kezdődik és 210 °C-ig tart. A mért paraméterek alapján a megvizsgált nem előmelegített nyersolajok felhasználása nem átalakított dízelmotorban gázolaj-elegyek formájában sem célszerű, mivel várhatóan rosszabb a porlasztási kép, megnő a gyulladási idő.

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 viszkozitás-határértékének 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*-butanolt 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], [S-9] és [S-10]).

Ez alapján két *n*-butanol tartalmú hármas elegy vizsgálatát végeztem el egy dízelmotorban és a mérések alapján a következőket állapítottam meg:

(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 hármassal elegy felhasználása az általam vizsgált motorban és üzemi tartományban a környezetterhelés szempontjából kedvező. ([S-9] és [S-10])

4.2. Az *n*-butanol - gázolaj tüzelőanyag elegyek értékelése

Az irodalmi és az előző részben bemutatott eredmények alapján megállapítható, hogy nem csak a nyers növényi olaj – *n*-butanol elegyekkel érdemes foglalkozni, hanem a gázolaj (D2) – *n*-butanol kettős elegyekkel is, mivel ezen elegyek alkalmazásának több szempontból is kedvező hatása várható.

Hipotéziseim szerint az irodalomkutatás és az előző részben végzett vizsgálatok alapján feltételezhető, hogy 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. 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 a 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. 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 túlzott mértékben az expanzióba.

A hipotéziseim vizsgálatára 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 ($\varepsilon=19$) turbótöltött járműmotoron készült vizsgálatok eredményeit mutatom be.

A három, meglehetősen eltérő égésterű és keverékképzésű motoron elvégzett mérések alapján a következőket állapítottam meg:

(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 expanzióba. [S-11, S-12 és S-13]

A mérési eredményeim alapján a következő számszerű összefüggéseket tudtam meghatározni:

- 10 V/V % *n*-butanol elegy esetén;

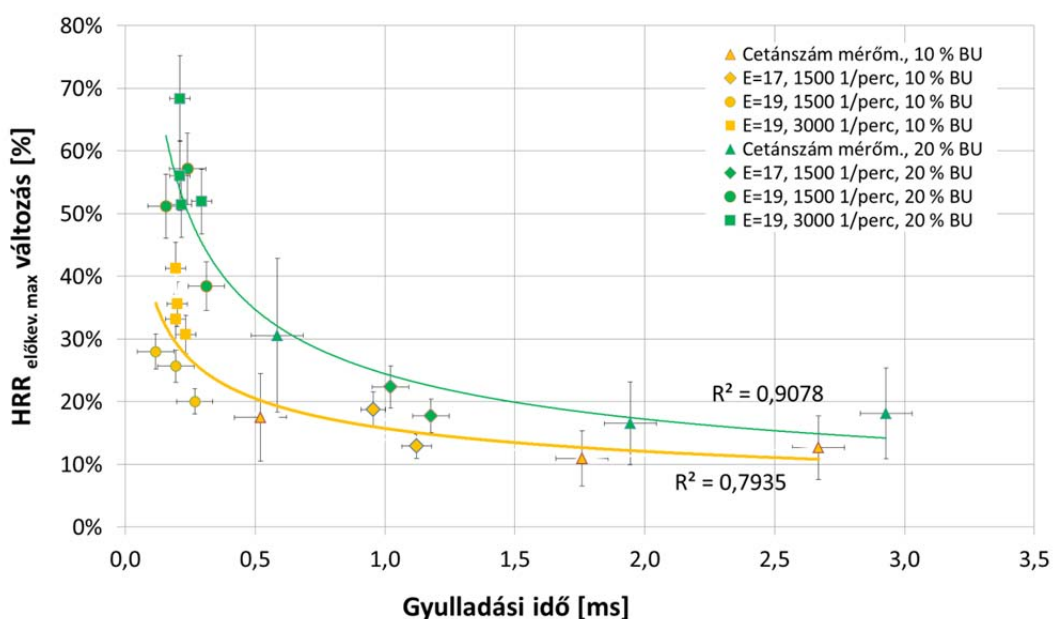
$$\text{HRR}_{\text{max, elők. B10}} / \text{HRR}_{\text{max elők. gázolaj}} + 1 = 0,1576 * \tau_{\text{gyulladási idő}} [\text{ms}]^{-0,582} \quad (R^2 = 0,79)$$

(1. egyenlet)

- 20 V/V % *n*-butanol elegy esetén;

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

(2. egyenlet)



1. ábra Az előkevert szakasz hasznos hőváltozása (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-11, S-12 és S-13]

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 (1. ábra).

Megvizsgáltam, hogy a különböző körülmények között elvégzett vizsgálatok alapján a károsanyag-kibocsátás mennyire függ az *n*-butanol bekeveréstől:

(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-11, és S-12].

Amint azt láthattuk, az *n*-butanol hatása az égési folyamatra nagymértékben függ az *n*-butanol tartalomtól és a gyulladási időtől, ezért megvizsgáltam és a mérési eredmények alapján értékeltem a bekeverés mértéke 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-11, és S-12].

4.3. Metanol bekeverésének összehasonlító vizsgálat eredményei és azok értékelése

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 mérési adatokat az *n*-butanolhoz képest. Erre a célra a választásom a metanolra esett [S-14]. 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) hármas elegyét alkalmaztam. A keverési arányok a referenciaelegy esetén 70 V/V % gázolaj és 30 V/V % biodízel, illetve a vizsgált hármas elegy 60 V/V % gázolaj, 30 V/V % biodízel és 10 V/V % metanol volt.

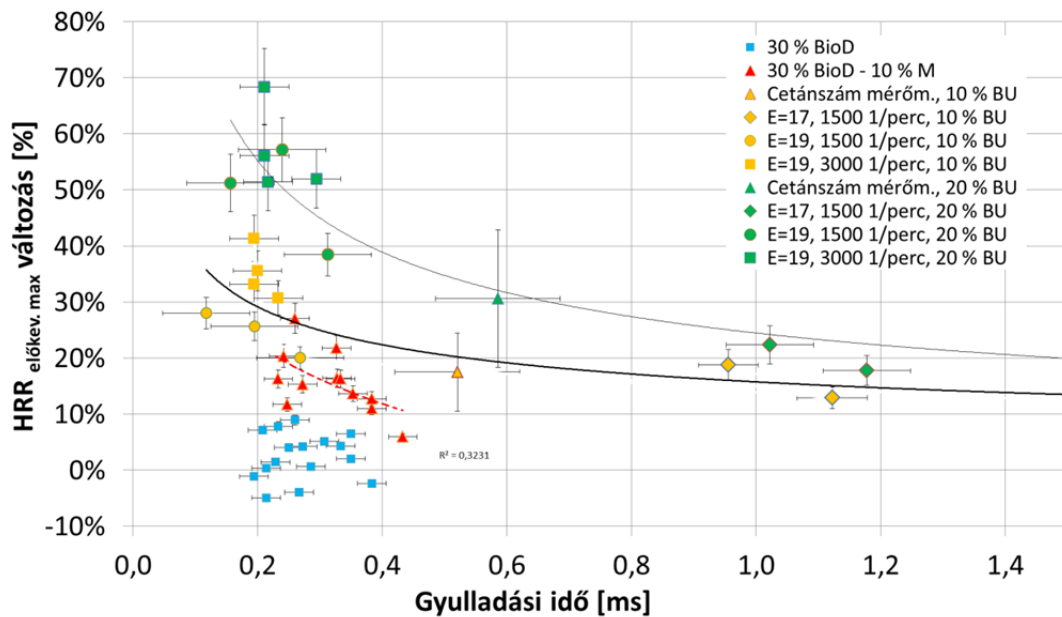
A biodízel–gázolaj és biodízel–gázolaj–metanol elegyekkel kapcsolatban a következő összefüggéseket tudtam megállapítani: a 30 V/V %-ban bekevert repce metil-észter hatására a maximális nyomaték átlagosan nem változott, míg a 30 V/V % repce metil-észtert, 10 V/V % metanolt és 60 V/V % gázolajat tartalmazó elegy hatására a maximális nyomaték 94 %-ra csökkent. Ez elsősorban a biodízel nagyobb és a metanol tartalmú elegy kisebb viszkozitásának hatása volt.

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, átlagosan több mint 37 %-kal csökkent, míg ehhez képest a 10 V/V % metanol bekeverése közel 40 %-ra növelte ezt az értéket, így a hármas eleggyel kapott THC-kibocsátás közel azonos volt a gázolajéval. A CO-kibocsátása átlagosan kismértékben csökkent, elsősorban nagy terhelésen a metanol bekeverése hatására, míg kis terhelésen a metanol bekeverése növelte a CO-kibocsátást a gázolajhoz képest. A részecske-kibocsátást a biodízel és a metanol bekeverése is jelentősen csökkentette. Ez a kibocsátás a biodízel bekeverése hatására átlagosan 17 %-kal, míg a metanol bekeverése hatása jelentősebben, átlagosan több mint 40 %-kal csökkent a gázolajhoz képest.

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

(6. tézis) 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-14].



2. ábra Az előkevert szakasz hasznos hőváltozása (HRR) maximumának változása a gázolajhoz képest a gyulladási idő függvényében 30 V/V % biodízel; 30 V/V % biodízel és 10 V/V % metanol, valamint 10 V/V % és 20 V/V % *n*-butanol elegyek esetén [S-11, S-12 S-13 és S-14]

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 lényegesen kisebb az előkevert szakasz hasznos hőváltozás (HRR) maximumának növekedése, mint *n*-butanol esetén.

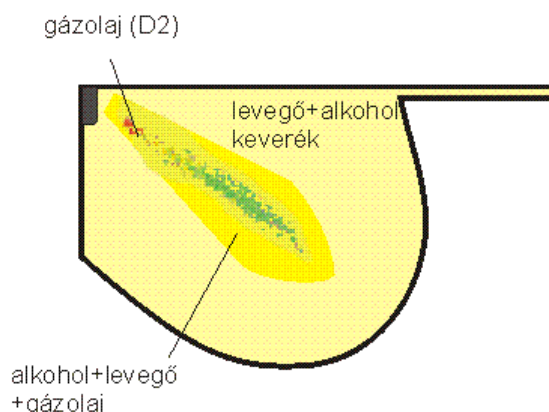
4.4. Kettős tüzelőanyagú rendszerek vizsgálata és az eredmények értékelése

Az úgynevezett kettős tüzelőanyagú dízelmotorokban az elsődleges tüzelőanyagot a szívócsőbe fecskendezik be, és annak elpárolgása után homogén keverék jön létre az égéstérben, amelyet egy másodlagos tüzelőanyag (pl. gázolaj) megfelelően időzített befecskendezése gyújt be (3. 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-3]. 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):

$$E_p = \frac{LHV_p \cdot \dot{B}_p}{LHV_p \cdot \dot{B}_p + LHV_{D2} \cdot \dot{B}_{D2}} \quad \text{3. egyenlet}$$

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.



3. ábra A keveredési folyamat kettős tüzelőanyagú rendszer esetén

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 légfesleg-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 hatásfokkal 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 légfeslege 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-15], [S-16] és [S-17])

A fenti eredmények alapján a hagyományos kettős tüzelőanyagú rendszerek nagy terhelésen megfelelően alkalmazhatók az általam bemutatott 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.

5. 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 (2,0-4,5 mm²/s, EN 590:1999), illetve biodízel (3,5-5 mm²/s, EN 14214) szabványok viszkozitással szembeni követelményei. Ezért a továbbiakban hármas 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 hármas 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 hármas elegyek felhasználását vizsgáltam dízelmotorokban. Amíg a kettős elegyekkel végzett tesztek szerint azok nem hasznosíthatók tüzelőanyagként, addig a hármas 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 légfeszesség esetén, nagy légfeszesség 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 hármas 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 hőváltozásának (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 részecskékibocsátás 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 részecskékibocsátás 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 [17], valamint a beszívott levegő mennyiségének szabályozása [Sz-1]. Viszont ezeknek a módszereknek az alkalmazása és vizsgálata további kutatásokat igényel.

Budapest, 2020. március 30.

Idézett forrásmunkák

- [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] F. Randall, G. W. H., A. R. C., P. Sergey, B.-A. Moshe, R. Brian és H. John, „Insights into Future Mobility,” Massachusetts Institute of Technology Energy Initiative, Cambridge, 2019.
- [5] 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.
- [6] N. Hemmerlein, V. Korte és H. Richter, „Performance, exhaust emission and durability of modern diesel engines running on rapeseed oil,” *SAE paper 910848*, 1991.
- [7] S. Bajpaia, P. Sahooa 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.
- [8] 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, p. 942 – 949, 2015.
- [9] 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, p. 02005, 2014.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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, %1. szám2, 2013.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.

- [21] S. S. Sazhin, „Modelling of fuel droplet heating and evaporation: Recent results and unsolved problems,” *Fuel*, kötet 196, p. 69–101, 2017.
- [22] 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.
- [23] K. Pramanik, „Properties and use of jatropha curcas oil and diesel fuel blends in compression ignition engine,” *Renewable Energy*, 28. kötet, pp. 239-248, 2003.
- [24] Barabás, J. Csibi-Vencel és É. Barabás, „Alternatív motorhajtó anyagok I. A repceolaj,” *Műszaki szemle*, kötet: 20, pp. 3-10, 2002

M-2. Hivatkozott 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] TT Kivevele, L Kristóf, Á Bereczky, MM Mbarawa: Engine performance, exhaust emissions and combustion characteristics of a CI engine fuelled with croton megalocarpus methyl ester with antioxidant, *Fuel* 90 (8), pp. 2782-2789,
- [S-10] 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-11] 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-12] 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-13] Dr. Ákos Bereczky és Attila Dobai: Butanol bekeverés égési folyamatának vizsgálata változtatható kompresszió viszonyú diesel motorban, OGET 2018

- [S-14] 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-15] Bereczky Á., Lukács K.: Magas szeszfokú nyersszesz, energetikai célú hasznosítása kisteljesítményű kettős tüzelőanyagú kompresszió gyújtású-motorban, ENERGIAGAZDÁLKODÁS,50:(4) pp. 17-21., 2009
- [S-16] 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-17] 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-18] Horváth András, Jakabfalvy Zoltán, Bereczky Ákos és Kovács Károly: A hazai dízelmotor fejlesztés legújabb eredményei, VASÚTGÉPÉSZET 2017/3, pp. 25-30. 2017.
- [S-19] 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, P0800645/17
- [Sz-2] Jakabfalvy Zoltán, dr. Bereczky Ákos, Lukács Kristóf, Járai Péter Pál, Nagy János, Opauszki Mihály, Horváth András: Kompresszió gyújtású változó geometriájú előkamrás motor szerkezeti kialakítása, 2016, P1600249/19 (PCT/HU2017/050046, Ideiglenes szabadalmi

M-3. Rövidítések

ABE	(Acetone–Butanol–Ethanol)	acetone – 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)
JAO	(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 Methyl Esther)	repceolaj metil-észter
RPM	(Round Per Minutes)	fordulatszám [1/perc]
RSO	(Rape Seed Oil)	(nyers) repceolaj
SME	(Soy Methyl 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