

1-butanol tüzelőanyag és vizsgálata

1-Butanol as a fuel and its testing

BERECZKY Ákos¹, LUKÁCS Kristóf¹, SZABADOS György²

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, GPK, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék,

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, GPK, Mechatronika,

Optika és Gépészeti Informatika Tanszék,

Budapest, Műegyetem rkp. 3, 1111, Telefonszám: (06 1) 463 1111

Abstract

Research and development of alternative and renewable fuels is ongoing in the field of internal combustion engines. In the case of compression-ignition engines, these studies are very important as the reduction of particulate and NOx emissions is a priority. Alcohol is not a common fuel for diesel engines, as the physical and chemical properties of alcohols are closer to those of petrol. In this article, the authors present the literature results related to the use of higher alcohols in compression ignition engines and their emissions. As well as the main chemical and physical properties of 1-butanol among the selected alcohol fuels, highlighting their differences such as lower boiling point and its effect on the combustion process. The results of the literature studies are complemented by own measurements and an evaluation of the results.

Keywords: Renewable fuel, butanol, combustion properties

Kivonat

Az alternatív és megújuló tüzelőanyagok kutatása és fejlesztése folyamatos a belsőégésű motorok területén. A kompressziógyújtású motorok esetén igen fontosak ezek a vizsgálatok, mivel itt a részecske és az NOx kibocsátás csökkentése kiemelt cél. Az alkohol nem gyakori üzemanyag a dízelmotorok számára, mivel az alkoholok fizikai és kémiai tulajdonságai közelebb állnak a benzinéhez. A cikkben a szerzők bemutatják a magasabb alkoholok kompressziógyújtású motoros felhasználásával és károsanyag kibocsátással kapcsolatos szakirodalmi eredményeket. Valamint a kiválasztott alkohol tüzelőanyagok közül az 1-butanol főbb kémiai és fizikai tulajdonságait, hangsúlyozva azok különbségeit, mint például az alacsonyabb forráspontot és annak hatását az égési folyamatra. Az irodalmi vizsgálatok eredményeit saját mérésekkel és az eredmények értékelésével egészítik ki.

Kulcsszavak: megújuló tüzelőanyag, butanol, égési tulajdonság

1 ALTERNATÍV TÜZELŐANYAGOK

Az előrejelzések alapján fontos feladat a dízelmotorok átállítása minél nagyobb mértékben megújuló tüzelőanyagokra, így a célunk megoldás keresése volt a meglévő dízelmotorok legkisebb átalakításával járó újszerű, megújuló tüzelőanyagok hasznosítására [1], [2]. További cél a kiválasztott tüzelőanyag értékelése volt. Ennek megfelelően vizsgáltuk az 1-butanol alkalmazhatóságának lehetőségét.

1.1. Az 1-butanol felhasználás összefoglalása

Az 1-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 volt előállítható.

Napjainkban azonban a modern folyamatok jelentősen javították a butanol hozamot. Az elmúlt évtizedben a *Clostridium* és az *Escherichia coli* baktérium genetikailag módosított törzseinek jelentős fejlesztése zajlott le. A Tajvani Ipari Technológiai Kutató Intézet (ITRI) nemrégiben egy „Butyfix” [3] néven ismert új bio-butanol technológiát mutatott be, amely képes a rendelkezésre álló széntartalom 94 %-át átalakítani. Míg a jelenlegi fermentációs folyamatok az etanol előállítására során 67 %-os maximális szénkonverziós hatásfokot érnek el.

Az 1-butanol számos előnnyel rendelkezik az etanollal szemben [4]:

- az 1-butanol 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 1-butanol mind öt, mind hat szénatomszámú cukorból elő lehet állítani;
- a meglévő etanolos üzemek átalakíthatóak 1-butanol előállítására és a meglévő csővezetékek az 1-butanol szállítására is használhatók;
- az 1-butanol kevesebb energiát igényel az előállításához, mivel a komplex makromolekulák felbomlásának folyamata korábban megállhat és így energiát lehet megtakarítani;
- az 1-butanol alacsonyabb polaritása következtében jól elegyedik gázolajjal;
- az 1-butanol hidrofób és ez jó oldhatóságot biztosít gázolajban;
- az 1-butanol kevésbé korrozív hatású és normál tüzelőanyag tartályokban is tárolható hosszabb ideig.

A Kumar és Saravanan cikke [4] 26 irodalmat dolgoz fel butanol – gázolaj elegyek károsanyag-kibocsátása és effektív hatásfok szempontjából. Ezek alapján a következőket lehet megállapítani a [4] alapján: 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.

A szerzők [5] és [4] a következő eredményeket vonták le a feldolgozott irodalmak alapján:

- A elegyek 1-butanol tartalmának növelésével az alacsonyabb cetánszámú 1-butanol hatására növekszik a gyulladási idő;
- Az égési csúcsnyomás és a hasznos hőráta (HRR) enyhén emelkedik az 1-butanol hozzáadása következtében a megnövekedett előkevert égés hatására, melyet a nagyobb gyulladási idő okoz;
- Az effektív hatásfok általában növekszik az elegyben lévő 1-butanol tartalom növekedésével;
- A butanol oxigéntartalma javítja az égést, különösen a diffúziós égési fázis során;
- A fajlagos fogyasztás nő a elegyekben lévő 1-butanol tartalom növekedésével. Az 1-butanol fűtőértéke megközelítőleg 21-23 %-kal alacsonyabb, mint a gázolajé, ezért a motor nagyobb mennyiségű tüzelőanyagot igényel megegyező nyomaték esetén;
- A füstkibocsátás csökken az 1-butanol tartalom növelésével. A nagyobb oxigéntartalom és az 1-butanol kisebb szénatom tartalma, különösen a lokálisan tüzelőanyagban dús zónákban javítja az égési folyamatot, ami alacsonyabb füstkibocsátást eredményez;
- Az el nem égett szénhidrogén (THC) kibocsátás nő az 1-butanol bekeveréssel;
- Gázolajba akár 40 V/V % 1-butanol is bekeverhető, és lehetséges a dízelmotorokban történő alkalmazása jobb tüzelőanyag átalakítási hatékonysággal és alacsonyabb károsanyag-kibocsátással.

A fentiek alapján jól látható, hogy a károsanyag kibocsátás és az üzemi paraméterek szempontjából ellentmondásos hatással van az 1-butanol bekeverése, ezért érdemes megvizsgálni, hogy milyen fizikai és kémiai tulajdonság eltérések figyelhetők meg.

2. Az 1-butanol főbb tulajdonságai összehasonlítása

Amint az a 1. táblázatban megfigyelhető az 1-butanol forrás pontja alacsonyabb a gázolaj forráspontjánál, itt érdemes megemlíteni, hogy a gázolajra megadott forráspont csak a kezdeti forráspont, mivel a gázolaj elegy, így széles forrási hőmérséklettartomány jellemző rá. Ennek a tulajdonságnak a hatásait többen vizsgálták. Ma és munkatársai [6] 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 az ABE cseppek élettartama minden kísérleti körülmény között rövidebb, mint a gázolajé, valamint az ABE és a gázolaj cseppek élettartama a környezeti hőmérséklet növekedésével csökkent. Viszont elegyek esetén, magasabb hőmérsékleteken ettől jelentősen eltérő párolgási folyamatokat tapasztaltak. 623 K kamrahőmérsékleten az ABE – gázolaj elegy cseppek párolgásának egy térfogatnövekedési és -zsugorodási (fluktuáló) fázisa van. 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 és 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, azaz a gőzrobbanáshoz. Miután az ABE komponensek kigőzölögtek, a csepp átmérője már a gázolajéhoz hasonlóan csökken.

1. táblázat A vizsgált tüzelőanyagok főbb paraméterei

Tüzelőanyag tulajdonság	1-butanol	gázolaj (D2)
Kémiai képlet	C ₄ H ₉ OH	C ₁₄ H ₃₁
Forráspont [°C]	117.7	~180
Cetánszám [-]	~25	51
Lobbanáspont [°C]	29	> 55
Öngyulladás hőmérséklet [K]	628	503
Cetánszám [-]	~25	51
Kinematikai viszkozitás [mm ² /s] (25 °C)	3.73	2-4.5
Sűrűség [kg/m ³] (15°C)	809.8	830.0
Fűtőérték [MJ/kg] (LHV)	33.07	> 43

A befecskendezés kezdet és a gyulladás közti időtartamot nevezzük gyulladási időnek (késelemnek). Ennek vizsgálatára végeztek kísérleteket Lapuerta és munkatársai [7] állandó térfogatú kísérleti berendezésben különböző nyomásokon és hőmérsékleteken, többek között gázolaj és 1-butanol, valamint gázolaj és etanol elegyekkel, 1-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 CR befecskendező rendszerrel 1000 bar rail nyomáson 2,5 ms befecskendezési idővel végezték, ezt később csak a légfelesleg-tényező 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 alkoholrésarány 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 5 - 20 V/V % 1-butanol bekeverési arányok esetén a nyomásmaximum megnövekedett, de csak 1-butanol elegyeknél. Ezt a megnövekedett égési sebességgel indokolták.

Gázolaj-alkoholok elegyeinek lángterjedési sebességéről kevés adatot lehet találni, az irodalomkutatás során mindössze egy ilyen irodalmat sikerült találni. Chaichan [8] egy hengeres, állandó térfogatú tartályban végzett vizsgálatokat, a hengerben a különböző elegyeket elektródák segítségével gyújtotta meg, majd termoelemek eredményei alapján határozta meg a lángterjedési sebességet. 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 % beoldódást segítő adalékot és cetánszám növelőt alkalmazott. A mérési eredményei alapján megállapítható, hogy metanol bekeverés 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 találni, így itt az 1-butanol – metanol – etanol kapcsolatos összehasonlító eredmények alapján tudunk feltételezésekkel élni. Veloo és munkatársai ikerláng-módszerrel (counterflow) végeztek méréseket mindhárom alkohollal légköri nyomáson [9]. Eredményeik alapján megállapítható, hogy tüzelőanyagban szegény keverék esetén legnagyobb lángterjedési sebessége az 1-butanolnak van, de ez közel megegyezik az etanol lángterjedési sebességével és a metanolé a legkisebb. Sztöchiometrikus esetben közel megegyezik az etanol és az 1-butanol lángterjedési sebessége, míg a metanolé kismértékben nagyobb. A tüzelőanyagban dús keverékek esetén a metanolnak a legnagyobb lángterjedés sebessége és a 1-butanolnak a legkisebb.

További fontos paraméter az adiabatikus lánghőmérséklettel kapcsolatban Glaude és munkatársai jelentettek meg publikációt [10], melyben többek között különböző nyersanyagokból előállított biodízeleket (zsírsav metil-észterek (FAME)) és fosszilis tüzelőanyagokat vizsgáltak kiegészítve egykomponensű megújuló tüzelőanyagokkal, mint például az alkoholok. 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 hatását az eredmények nem tartalmazzák.

A szakirodalom áttekintése alapján az 1-butanol égési tulajdonságaival kapcsolatban a következők állapíthatók meg:

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 pufogásos, esetleg „gőzrobbanással” is járhat. Figyelembe véve a dízelmotorok nagy kompresszió viszonyát és a kompresszió okozta magas hőmérsékletet, ez utóbbiak valószínűsíthetők. Ez a jelenség viszont kisebb cseppméretet és jobb keveredést is eredményezhet, ami 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 párolgási fázis, sem a pufogás, vagy gőzrobbanás.

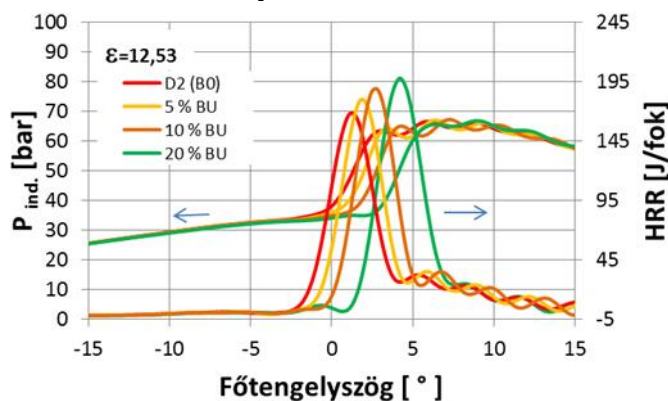
Továbbá az alkoholok bekeverésének hatására nő a gyulladási idő. Az irodalomkutatási eredmények alapján megállapítható, hogy várhatóan sztöchiometrikus és tüzelőanyagban dús keverékek esetén az 1-butanol – gázolaj elegyek lángterjedési sebessége kisebb, mint a gázolaj lángterjedési sebessége. Az alkoholok (metanol, etanol és 1-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- és a részecskekibocsátás.

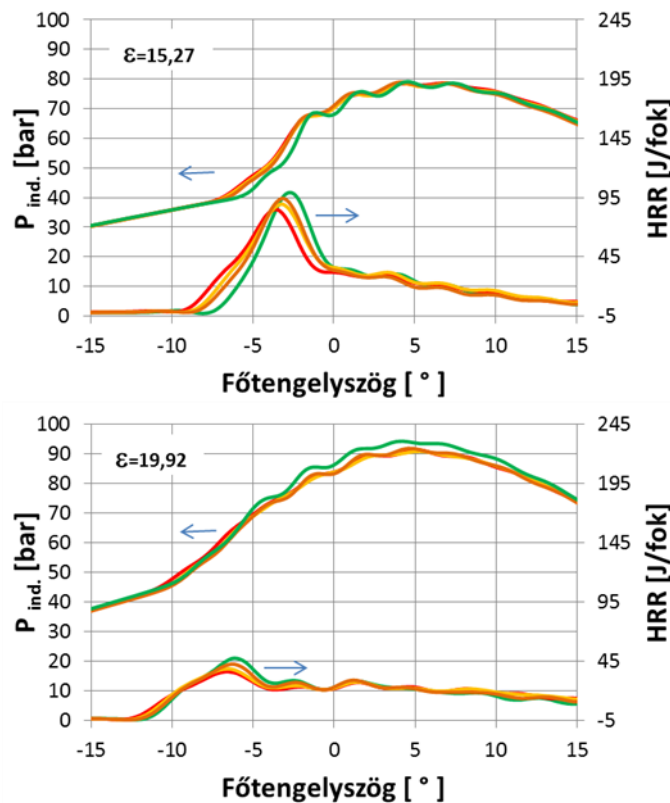
3. Változtatható kompresszióviszonyú motoron végzett vizsgálatok

Az 1-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 rendelkezésünkre álló cetánszám mérőmotoron végzett vizsgálatokat mutatjuk be. Ennek a motornak két fontos tulajdonsága az előkamrás égéstér és az előkamra térfogatának megadásával a változtatható kompresszióviszony. Megjegyzendő, hogy ténylegesen az előkamra közelebb áll a perdítő kamrához, mivel a fő égéstér és az előkamrát összekötő csatorna tangenciális kialakítású.

Ennél a motornál a befecskendező 120 bar nyitónyomáson a tüzelőanyagot elsősorban a kompresszióállító dugattyú falára és az előkamra falára fecskendezi. Három kompresszióviszony esetén végeztünk méréseket (19.92, 15.27 és 12.53 [-]), a tüzelőanyag-fogyasztást 13 ml/perc értéken, míg az előbefecskendezési szöget 18 °-ra állítottuk a jobb kezelhetőség miatt.

A mért indikált nyomások és az abból számolt hasznos hőváltások (HRR) az 1. ábrán láthatóak. Minden esetben jól megfigyelhető a hasznos hőváltás jelentős ingadozása és az indikált nyomás ingadozása, amely feltehetőleg az előkamra és a nyomásjeladó beépítés következtében alakult ki. Ettől eltekintve megfigyelhető az 1. ábrán, hogy a kompresszióviszony emelésével a nyomásmaximumok növekedtek, viszont erre az alkoholorészarány változása nincs jelentős hatással. Egyedül a 19.92 [-] kompresszióviszony esetén növekedett a csúcshőváltás.





1. ábra Az indukált nyomás és az abból számolt hasznos hőváltás (HRR) a főtengelyszög függvényében különböző kompresszióviszonyok és 1-butanol részarányok esetén, (δ_{P_i} , $\pm 3,59\%$, δ_{HRR} , $\pm 21,66\%$)

A kompresszióviszony növelésével, azaz a befecskendezés-időpontjában az égéstérnyomás és hőmérséklet növelésével csökkent a gyulladási idő, viszont az alkohol részarány növekedésével nőtt a gyulladási idő. A 19.92 [-] kompresszióviszony esetén a gyulladási idő kicsi volt, az alkohol részarány növelésével a hasznos hőváltás maximumának növekedése miatt kismértékben növekedett a csúcshőnyomás értéke. Ebben az esetben változott legjobban a hasznos hőváltás (HRR) maximuma az 1-butanol arányának növelésével (1. ábra), mivel kezdetben jelentős volt az 1-butanol kigőzölgése. A kompresszióviszony csökkentésével a gyulladási idő nőtt, így nem csak az 1-butanol tudott távozni az elegyből, hanem a gázolaj is, így 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 szakasz intenzitás növekedés már nem tudta kompenzálni az expanzió hatását, ezért a csúcshőnyomás értéke kismértékben csökkent az alkohol bekeveréssel.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Előkamrás motornál, állandó tüzelőanyagterefogat-áram és állandó előbefecskendezési szög esetén a gyulladási idő nőtt az 1-butanol részarányával, a növekedés viszont fordítottan függött a kompresszióviszonytól. A hasznos hőváltás maximuma is magasabb lett az 1-butanol részarányával, melynek mértéke nőtt a kompresszióviszony növelésével. A két hatás képes kiegyenlíteni egymást, aminek következtében a csökkenő fűtőérték ellenére az égési csúcshőnyomás közel állandó volt, illetve kismértékben növekedett 1-butanol bekeverésével.

Szintén a vizsgált motornál, állandó tüzelőanyagterefogat-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 hőváltás maximum értéke is nőtt az 1-butanol részarányával, legintenzívebben nagy kompresszióviszony esetén, kisebb kompresszióviszonyok esetén közel megegyező mértékben változott. Ennek magyarázata, hogy nagy kompresszióviszony esetén a gyulladási idő kisebb, mint $2-3^\circ$, így ebben az esetben a befecskendezés után jelentős mennyiségű 1-butanol párologott el, míg a gázolajnak csak kisebb része. Így itt több 1-butanol – gőz volt a keverékben az égési folyamat elején. Kisebb kompresszióviszony esetén a hosszabb gyulladási idő

során folyamatosan párologott ki a gázolaj és az alkohol is, így itt az égéskezdetkor a gázolaj – 1-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 elpárolgott az égés során, ellentétben pl. a 19.92 [-] kompresszióviszonnyal.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutatás a BME-NVA-02 számú projekt részeként az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatással, a TKP2021 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Zöldy, Máté.: Fuel Properties of Butanol - Hydrogenated Vegetable Oil Blends as a Diesel Extender Option for Internal Combustion Engines., Periodica Polytechnica - Chemical Engineering, pp 205-212. 2020.
- [2] Szabados, György és Bereczky, Ákos.: Economic Evaluation of Renewable Fuels through Pollutants Derived from Internal Combustion Engine, PERIODICA POLYTECHNICA-MECHANICAL ENGINEERING 63 : 1 pp. 33-38. , 6 p. (2018).
- [3] Industrial Technology Research Institute (ITRI). Carbon Neutral Cellulosic Butanol Production Technology. [Online] [Hivatkozva: 2019. 02 18.] <https://www.itri.org.tw/eng/Content/MsgPic01/Contents.aspx?SiteID=1&MmmID=620651711540203650&MSid=621024013455343177>.
- [4] R.Kumar és Saravanan, S.: Use of higher alcohol biofuels in diesel engines: A review. 2016., Renewable and Sustainable Energy Reviews, 60. kötet, old.: 84-115.
- [5] Babu, M.Vinod, Madhu, K. Murthy és Rao, G. Amba Prasad.: Butanol and pentanol: The promising biofuels for CI engines – A review. 2017., Renewable and Sustainable Energy Reviews, 78. kötet, old.: 1068–1088.
- [6] Xiaokang, Ma., és mtsai.: Evaporation characteristics of acetone–butanol–ethanol and diesel blends droplets at high ambient temperatures. 2015., Fuel, 160. kötet, old.: 43-49.
- [7] Lapuerta, Magín, és mtsai.: Autoignition of blends of n-butanol and ethanol with diesel or biodiesel fuels in a constant-volume combustion chamber. Energy 118 (2017) 613e621 : ismeretlen szerző, 2017., Energy 118, old.: 613-621.
- [8] Chaichan, Miqdam T.: Practical Measurements Of Premixed Laminar Burning Velocities And Markstein Numbers Of Iraqi Diesel-Oxygenates-Air Blends. 2, 2013., The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering, 13. kötet.
- [9] Veloo, Peter S., és mtsai.: A comparative experimental and computational study of methanol, ethanol, and n-butanol flames. Veloo, Peter S., és mtsai. 2010., Combustion and Flame, 157. kötet, old.: 1989–2004.
- [10] Pierre-Alexandre, Glaude, és mtsai.: Adiabatic flame temperature from biofuels and fossil fuels and derived effect on NOx emissions. 2010., Fuel Processing Technology, 91. kötet, old.: 229–235.