

Helyettesítő modell-tüzelőanyag alkalmazhatóságának értékelése PIV mérések alapján

Evaluation of the applicability of surrogate fuel based on PIV measurements

HIRJÁK Árpád Botond

BME Gépészmérnöki Kar, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék

Abstract

Liquid fuels used in practice have a high number of components. In order to save CPU time in simulations, the original fuel is usually substituted with surrogates that can reproduce fuel characteristics but have lower number of components. I experimentally compared standard diesel oil with dodecane focusing on distributed combustion. The measurements were carried out using PIV, with identical operating conditions for both fuels. The varied operating parameters were the combustion air temperature and atomizing gauge pressure.

Keywords: PIV, distributed combustion, diesel, dodecane

Kivonat

A gyakorlatban alkalmazott folyékony tüzelőanyagok jellemzően nagy komponensszámmal rendelkeznek. Annak érdekében, hogy numerikus szimulációk során csökkenteni lehessen a számítási igényt, csökkentett komponens számmal rendelkező helyettesítő modell-tüzelőanyagokat alkalmaznak. A dolgozatomban szabványos gázolaj és dodekán összehasonlítását tettem meg térfogati tüzelésre vonatkozóan. A méréseket PIV segítségével végeztem el több, azonos mérési tartományon.

Kulcsszavak: PIV, térfogati égés, gázolaj, dodekán

1. Célkitűzés

Az általam elvégzett kutatómunka célja, hogy értékeljem, a numerikus szimulációs gyakorlatban gyakran alkalmazott gázolaj-dodekán helyettesítés létjogosultságát térfogati égés esetén. Ennek érdekében egy tüzelőberendezés és PIV rendszer integrációjával létrejövő kísérleti berendezésen, előre meghatározott paraméterek között kivitelezett térfogati tüzelés sebességviszonyait vizsgálom.

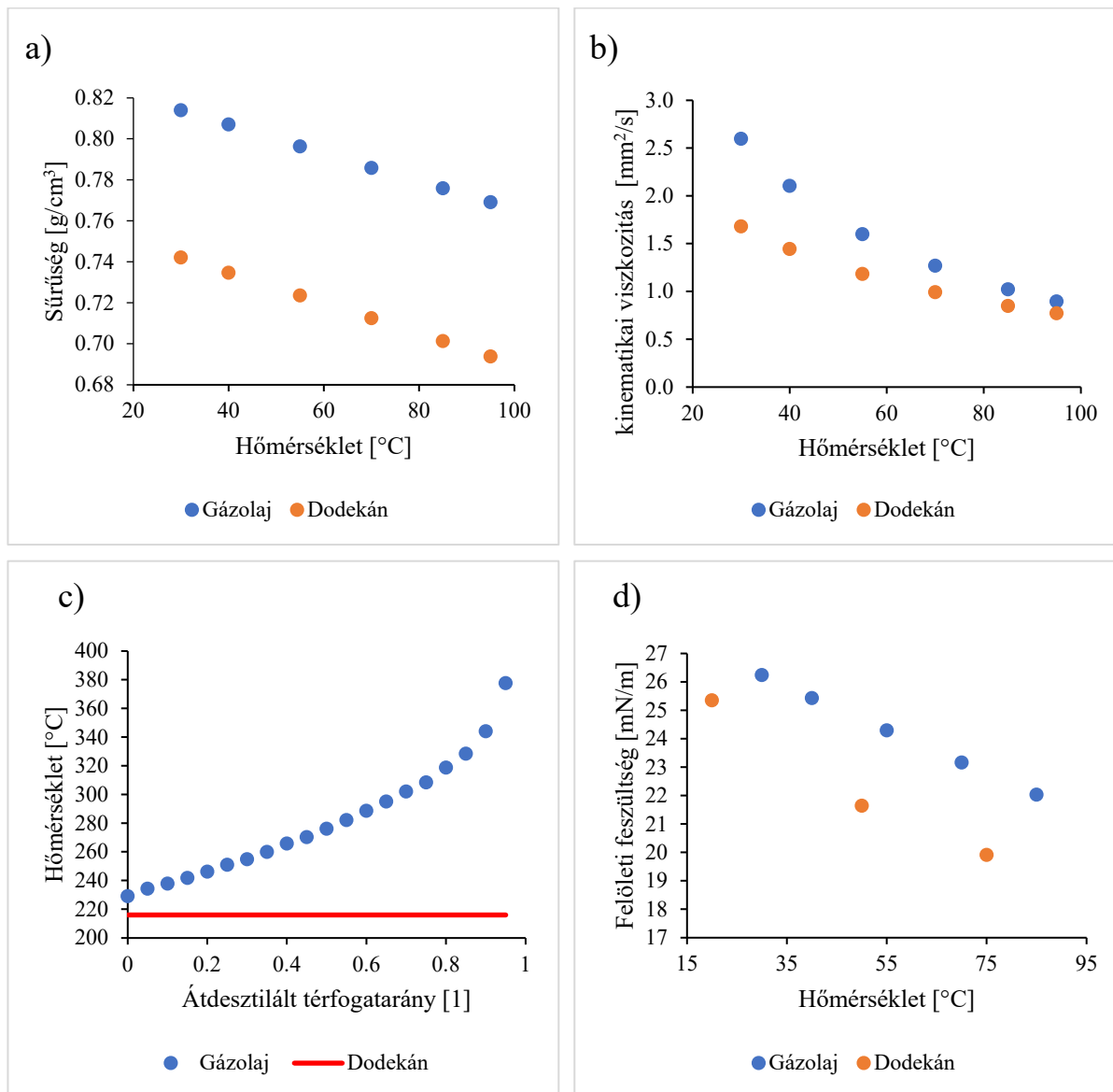
Cél, hogy a gázolajra és dodekánra vonatkozó mérési eredmények összehasonlításával meg tudjam állapítani, hogy mely paraméterek között mutat, és milyen mértékű egyezőséget a két tüzelőanyag esetén vizsgált sebességmező, ezáltal értékelni tudjam a helyettesítő tüzelőanyag szimulációk során történő használatát. Ennek azért van jelentősége, mert a kémiai reakciók során felszabaduló hő hatással van a kialakuló sebességmezőre. Elsődleges szempont, hogy jelentkezik-e a vizsgált paraméter tartományon mindkét anyag esetében a térfogati égés. Ezt követően a teljes sebességmezők, valamint kiválasztott sebességprofilok alapján értékelem az egyezőséget.

A mérések elvégzése után az adatok feldolgozását és elemzését Matlab környezetben végeztem, melyet a dolgozatban is bemutatok. A két tüzelőanyag helyettesíthetőségének létjogosultságán felül az általam elvégzett vizsgálatok és az így nyert eredmények közvetlenül használhatóak lesznek numerikus szimulációs modellek validációjára, mely a kutatócsoporton belüli kooperációt is elősegíti.

2. Gázolaj és dodekán

Azért ezen tüzelőanyagok kerültek összehasonlításra, mivel a numerikus szimulációs gyakorlatban elterjedt a gázolaj dodekánval való helyettesítése. A helyettesítő modell-tüzelőanyag lényege, hogy az eredeti tüzelőanyag fizikai és kémiai tulajdonságait minél jobban reprodukáljuk kevesebb komponenssel. A dodekánt

a gázolaj egykomponensű helyettesítőjének használják számos tüzeléses szimulációs vizsgálatnál. A helyettesítő és a valós tüzelőanyag egyezőségét a különböző indikátorjellemzők alapján lehet értékelni, továbbá többkomponensű helyettesítő modell-tüzelőanyag összetételét meghatározni. Ezen indikátorjellemzők folyékony tüzelőanyag esetén olyan jellemzők, amik a porlasztási, párolgási és reakciókinetikai, illetve hőfelszabadulási tulajdonságokat jellemzik. Ilyenek a sűrűség, kinematikai viszkozitás, felületi feszültség, desztillációs görbe, átlagos moláris tömeg, hidrogénatom/szénatom arány, fűtőérték. Ezen jellemzők közül a sűrűség, kinematikai viszkozitás, desztillációs görbe és felületi feszültség kerülnek az 1. ábrán bemutatásra.



1. ábra. Gázolaj és dodekán cseppképződését és párolgását befolyásoló tényezői.

Az 1. ábrán látható a gázolaj és dodekán négy jellemzője a hőmérséklet függvényében. Az 1a ábra a sűrűségüket, az 1b kinematikai viszkozitásukat, az 1c-n a desztillációs görbéjük látható, az 1d-n pedig a felületi feszültség, melyek irodalmi értékek, ezért kerültek a 20, 50 és 75 °C-hoz tartozó értékek ábrázolására [1], [2].

A legnagyobb eltérések a sűrűségben adódnak, viszont a kinematikai viszkozitás esetén magasabb hőmérsékleten kellően jó az egyezés. A c) ábrán látható a gázolaj desztillációs görbéje és a dodekán forráspontja. Dodekán esetében, mivel egykomponensű anyag, így desztillációs görbéről nem beszélhetünk. Fontos megjegyezni, hogy a forráspontja, mely 216 °C, a gázolaj desztillációs görbéje alatt helyezkedik el teljes mértékben, ezért ettől a tüzelőanyagtól az várható, hogy illékonyabban fog viselkedni, gyorsabban fog párolgani. Felületi feszültség kapcsán az ábrán láthatóan nagynak tűnnek az eltérések, de meg kell jegyezni, hogy nem teljesen azonos hőmérséklet értékekhez tartozó adatok, értékek vannak feltüntetve, így összekötésre sem kerültek [3].

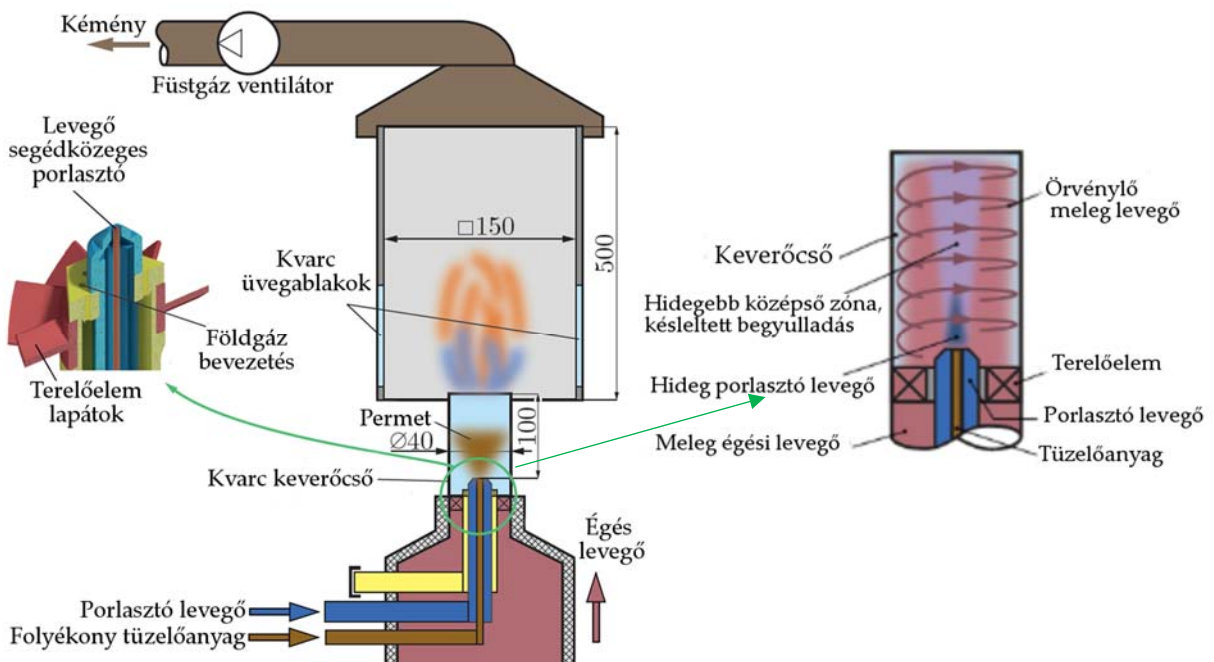
A dodekán moláris tömege 170,34 g/mol, fűtőértéke 44,147 MJ/kg, hidrogénatom/szénatom aránya pedig 2,167. Gázolaj esetében ezen értékek többnyire intervallumokon adhatóak meg, mivel a tüzelőanyag

összetétele változhat. Jellemzően 150-250 g/mol közötti a moláris tömege, fűtőértéke megközelítőleg 43 MJ/kg, hidrogén/szénatom aránya pedig megközelítőleg 2 [4], [5].

A fentiek alapján látható, hogy a gázolaj-dodekán helyettesítés megalapozott, mivel a bemutatott jellemzőik azonos nagyságrendben és értékek mentén alakulnak. Habár moláris tömegben és sűrűségben vannak nagyobb eltérések, de a hőmérséklet emelkedésével a kinematikai viszkozitás közel azonosává válik, továbbá a hidrogénatom/szénatom arányok és a fűtőértékek szinte azonosak.

3. Mérőberendezés és adatfeldolgozás

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszékének laboratóriumában található egy perdítőelemmel rendelkező tüzelőberendezés, mely kialakításának köszönhetően alkalmas modern optikai kutatóeszközök bevonására a különböző égési jelenségek vizsgálatához. Ez egy stacionárius üzemű, félépítési kialakítású 30 kW tüzelési teljesítménnyel rendelkező berendezés, melynek felépítése, illetve az égője a 2. és 3. ábrán láthatóak.



2. ábra. Tanszéki tüzelőberendezés felépítése [6], [7].

A tüzelőberendezés alkalmas folyékony és gáz halmazállapotú tüzelőanyag elégetésére is, akár vegyes tüzelésben is. A piros színű perdítőelem biztosítja a megfelelő keveredést az égéslevegővel. Gáztüzelés esetén a sárga színnel jelölt elemen keresztül halad a tüzelőanyag, amely a szolgáltató által biztosított földgázhálózatról érkezik. Folyékony tüzelőanyag, például gázolaj esetén pedig a barnával jelölt tűn áramlik be. A berendezés további részletes bemutatása a [6]-ban olvasható. A berendezéssel megfelelő beállításokkal három stabil lángalak valósítható meg, egyenes, V alakú, illetve térfogati égés, mely a 3. ábrán látható.



3. ábra. Pillanatképek gázolaj térfogati égéséről.

Ezek kialakulása a 2. ábrán jobb oldalt látható részlet segítségével magyarázható. Az ábrán látható, hogy a keverőcső külső részén perdítőelemen keresztül haladó, ezért perdülettel rendelkező előmelegített égési levegő halad. Középen, hideg porlasztólevegő kerül bevezetésre, mely valamelyest visszahűti az égési levegőt és tüzelőanyag gőz keverékét. Ennek a hőmérséklet-csökkenésnek az eredménye, hogy késleltetett a gyulladás, ami így nem alakul ki az égőnél, csupán az égőtér felsőbb tartományában. Mivel az előmelegített égési levegő perdületes, így a bejutott tüzelőanyag is képes kellően elkeveredni, közel homogén elegyet alkotni a levegővel. Ennek eredményeképpen térfogati égés valósítható meg, további oxidálószer bevezetése nélkül. A kvarcüveg ablakoknak köszönhetően, melyek a tüzelőtér három oldalán helyezkednek el, lehetséges különböző optikai mérések elvégzése.

A kialakult állapotok vizsgálata Particle Image Velocimetry alkalmazásával (PIV) történt, mivel az elvégzett mérések értékeléséhez olyan mérőberendezés szükséges, amivel lehetőség van egyidőben térbeli áramlások vizsgálatára, kettő- és háromdimenziós vektormezők megalkotására egy gyorsan változó áramlási viszonyú közegben anélkül, hogy megzavarnánk eszköz behelyezésével az áramlást. A PIV az egyik módszere a lézeroptikai áramlástan mérésének, segítségével vizualizálni lehet áramlásokat [8].

A PIV-s rendszerek alapvető működési elve, hogy egy lézerrel előre beállított időközönként megvilágításra kerül az áramlási tér egy vizsgálni kívánt síkja, ezekkel a felvillanásokkal összhangban egy vagy akár kettő kamera képeket készít. Annak érdekében, hogy a készült felvételeken látható legyen az áramlás, azt szennyezni kell megfelelő méretű nyomkövető (tracer) részecskékkel. Ezeknek a szerepe, hogy együtt „utazva” a vizsgált közeggel, lekövezzék annak áramlását. Amikor a lézer megvilágítja a részecskéket, azok reflektálják annak fényét, amit az optikai eszközök rögzíteni tudnak. A megfelelő anyag megválasztása követő részecskének kulcsfontosságú kérdés, mivel, ha túl nagy vagy nehéz, akkor tehetetlenségéből kifolyólag nem tudja lekövetni megfelelően az áramlási vonalakat. Például előkeveréses tüzelőberendezések esetén recirkulációs zónák közvetlen a keverőcső mellett is kialakulnak, így olyan szemcsékre van szükség, ami bejutást követően kellő időben le tud fékezni, hogy azokat le tudja követni. Túl kicsi méret esetén azonban csökken a szemcsék fényvisszaverő felülete, így előfordulhat, hogy nem elégséges a visszavert fényintenzitás a kamerák számára.

A PIV-s mérések másik fontos paramétere a lézer felvillanásai között eltelt idő, amit egyszerűen Δt -nek szokták hívni. A vektormezők megalkotása úgy történik, hogy egy algoritmus az elkészült képeken összetartozó szemcséket keres, és azok elmozdulása alapján számol sebességeket és irányokat. Túl nagy Δt azt eredményezi, hogy nagy lesz az elmozdulás két kép között, ami ellehetetleníti az összetartozó szemcsék összepárosítását, míg túl alacsony érték esetén nem lesz számottevő elmozdulás, amit értékelni tudna a program. A rendszert alkotó főbb berendezéseket mutatja be a 4. ábra, balról jobbra haladva: lézer, hűtést szolgáló egység, kamerák és TiO₂ adagoló.



4. ábra. PIV rendszer főbb berendezései.

Az általam alkalmazott PIV rendszer berendezései a Központi Fizikai Kutatóintézet (KFKI) által voltak biztosítva. Az optikai mérőberendezés integrálása a tüzelőberendezéshez némi átalakítás, a megfelelő elrendezés megtalálása pedig kísérletezést és próbaméréseket igényelt.

4. Eredmények

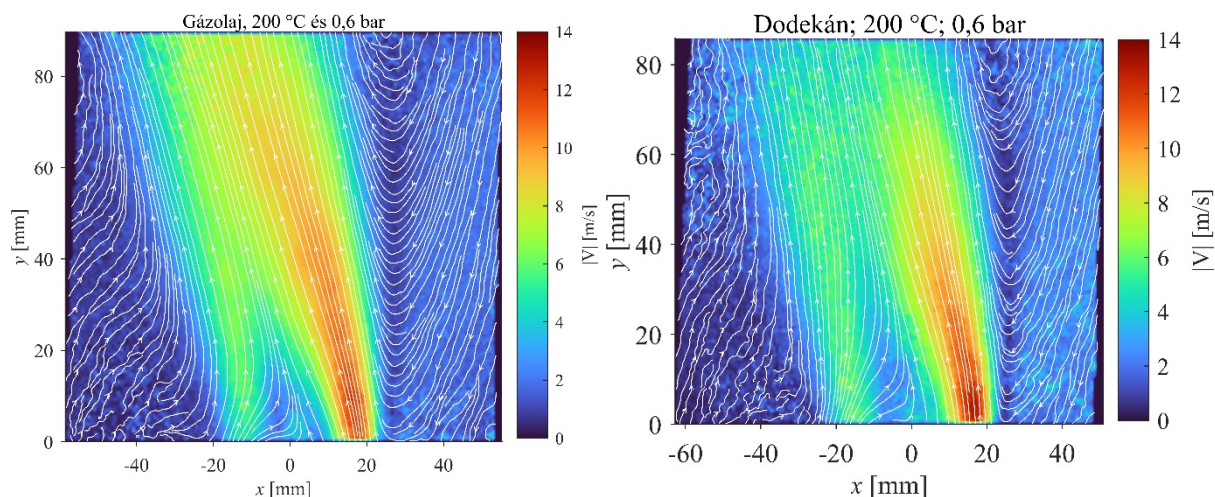
Az elemzések összesen hat mérési pontban elvégzett mérésekhez tartoznak. Ezen mérési pontok paramétereit tartalmazza az 1. táblázat. Mind az előmelegítési hőmérséklet, mind pedig a porlasztónyomás kulcsfontosságú jellemző a térfogati égés kialakulása kapcsán, mivel ezek együttesen szükségesek a késleltetett begyulladásához.

A hat mérési pont releváns tüzeléstechnikai paramétereit.

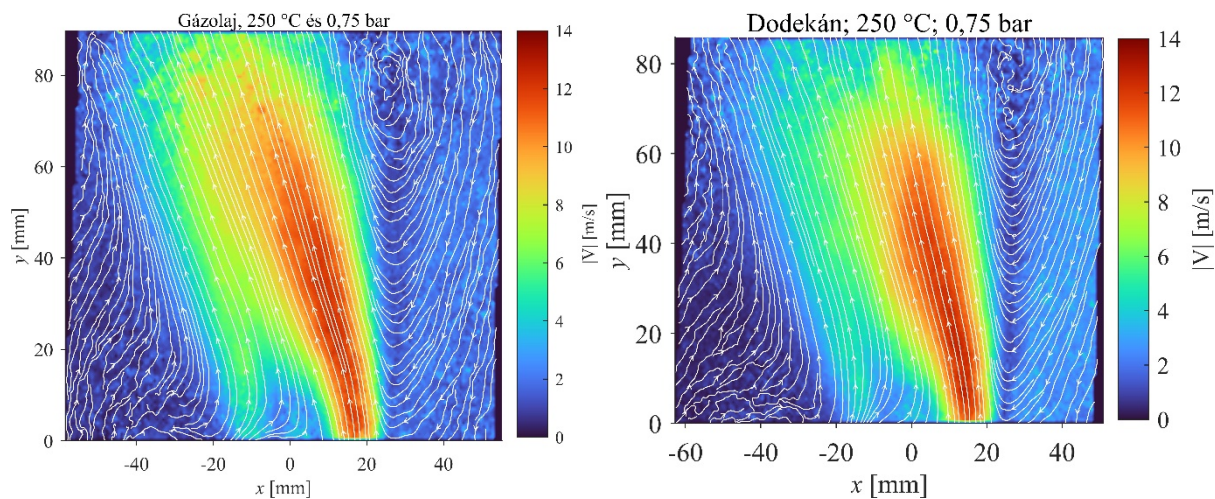
1. táblázat

Előmelegítési hőmérséklet [°C]	Porlasztó nyomás [bar]			Füstgáz oxigénszint [V/V%]
200	0,6	0,75	0,9	7
250	0,6	0,75	0,9	7

Az elvégzett mérések során a térfogati égés minden esetben megvalósult, gázolajjal és dodekánal történő tüzelés esetén egyaránt. Ez már önmagában jelentős eredmény, hiszen lángalak szempontjából alátámasztja a dodekánal való helyettesítés létjogosultságát szimulációk során. Ezen felül vizsgáltam a kialakuló átlagos sebességmezők jellemzőit, melyek szintén jó egyezést mutattak. A kialakuló átlagos sebességmezőket áramvonalakkal ellátott skalármezők segítségével hasonlítottam össze, ezekre mutat példát az 5. ábra és 6. ábra.

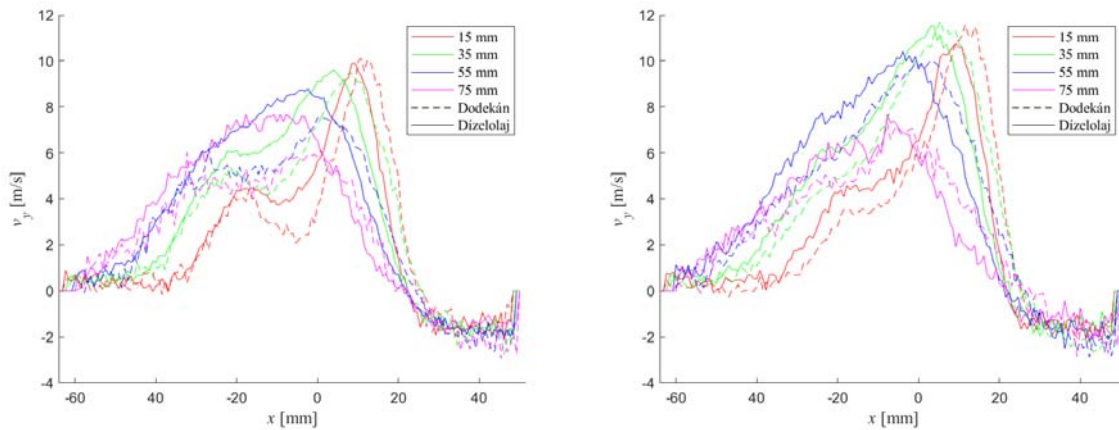


5. ábra. Gázolaj és dodekán térfogati égésének átlagos sebességmezője áramvonalakkal 200°C levegő előmelegítési és 0,6 bar porlasztónyomás esetén.



6. ábra. Gázolaj és dodekán térfogati égésének átlagos sebességmezője áramvonalakkal 250°C levegő előmelegítési és 0,75 bar porlasztónyomás esetén.

Ezen felül vizsgáltam és összehasonlítottam az égőszájtól adott távolságokban vett y irányú sebességkomponensek profiljait, amik jellegre és számszerűen is közel azonosnak bizonyultak. Ezen eredményeket a 7. ábra mutatja be. Az eredmények bemutatása a cikk terjedelmi korlátjai végett nem volt teljesszűren lehetséges, de a példák szemléltetik az egyezéseket.



7. ábra. 200 °C-os levegő előmelegítési és 0,6 bar porlasztónyomáshoz tartozó sebességprofilok (jobb) és 250 °C-os levegő előmelegítési és 0,75 bar porlasztónyomáshoz tartozó sebességprofilok az égőtől négy különböző távolságban.

Mindezeket figyelembe véve kijelenthető, hogy a vizsgált paramétertartományon a gázolaj és a dodekán esetében egyaránt kialakuló térfogati égés során létrejövő reakciózóna gyakorlatilag azonos mértékű visszahatást mutat a sebességmezőre. Ennek értelmében a dodekán, mint egykomponensű gázolaj-helyettesítő tüzelőanyag kellő megalapozottsággal használható előzetes tüztértervezési feladatokhoz.

Köszönetnyilvánítás

Elősorban szeretném megköszönni témavezetőmnek, Csemány Dávidnak, hogy szakmai tudásával, tapasztalataival fáradhatatlanul támogatott dolgozatom elkészítése során. Kérdésemre mindig gyorsan válaszolt, bármikor számíthattam a segítségére. A mérések precíz lebonyolítása kapcsán szeretném megköszönni segítségét és rendelkezésre állását Dr. Józsa Viktornak. Külön köszönet illeti a Központi Fizikai Kutatóintézetet, akik rendelkezésünkre bocsátották a PIV mérőberendezést. Név szerint szeretném kiemelni Dr. Mayer Gusztávot, külsős konzulensemét és Dr. Guba Attilát, akik biztosítottak folyamatos támogatásukról, megosztották velem korábbi tapasztalataikat és időt szántak rá, hogy visszajelzést adjanak munkámról. A tanszéki tüzelőberendezés és a PIV integrálása nem kis feladat volt, melyben sokan részt vettek az egyetemről a korábban említettek mellett, többek között, DarAli Osama, Kun-Balog Attila, Ráczi Erika, Vass Bertalan és jómagam. Végül szeretném megköszönni az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéknek, hogy beszerezte a mérésekhez szükséges tüzelőanyagokat.

Irodalmi hivatkozások

- [1] T. M. Koller et al., “Liquid Viscosity and Surface Tension of n-Dodecane, n-Octacosane, Their Mixtures, and a Wax between 323 and 573 K by Surface Light Scattering,” J Chem Eng Data, vol. 62, no. 10, pp. 3319–3333, Oct. 2017, doi: 10.1021/acs.jced.7b00363.
- [2] <https://www.dataphysics-instruments.com/Downloads/Surface-Tensions-Energies.pdf> utolsó elérés: 2022.11.06..
- [3] D. Csemány, O. DarAli, S. A. H. Rizvi, and V. Józsa, “Density, kinematic viscosity, surface tension, distillation curve, and flash point data of diesel-biodiesel blends,” Aug. 2021, doi: 10.5281/ZENODO.6367766
- [4] https://www.iea-amf.org/content/fuel_information/diesel_gasoline#:~:text=Diesel%20fuel%20consists%20mainly%20of,170%20and%20360%20%C2%B0C utolsó elérés: 2023.04.03.
- [5] <https://rentar.com/hydrocarbons-hydrocarbons-diesel/#:~:text=%E2%80%9CThe%20average%20chemical%20formula%20for,%2Dto%2D2%20or%20greater> utolsó elérés: 2023.04.03.
- [6] Dr. Józsa Viktor, “Tüzelőberendezés - Mérési segédlet,” 2020
- [7] V. Józsa, “Mixture temperature-controlled combustion: A revolutionary concept for ultra-low NOX emission,” Fuel, vol. 291, May 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.120200
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Particle_image_velocimetry utolsó elérés: 2023.04.03.