

HIRJÁK ÁRPÁD BOTOND
OTDK DOLGOZAT

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ENERGETIKAI GÉPEK ÉS RENDSZEREK TANSZÉK



OTDK DOLGOZAT

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ENERGETIKAI GÉPEK ÉS RENDSZEREK TANSZÉK

HIRJÁK ÁRPÁD BOTOND

OTDK DOLGOZAT

Helyettesítő modell-tüzelőanyag alkalmazhatóságának értéke-
lése PIV mérések alapján

Konzulens:

Dr. Mayer Gusztáv
tudományos munkatárs

Témavezető:

~~Témavezető~~ *Dr. Nádor Béla*
belső mérnök

Té

Budapest, 2023

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, Hirják Árpád Botond (QIL7XJ), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt az OTDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2023. január 10.

Hirják Árpád Botond

TARTALOM

Előszó	vii
Köszönetnyilvánítás	vii
Jelölések jegyzéke	viii
1. AbszTrakt.....	1
1.1. Magyar nyelvű	1
1.2. Abstract	2
2. célkitűzés.....	3
3. Bevezetés.....	4
4. A TÉMAkör módszertani áttekintése	6
4.1. Áramlástan sebességmérési módszerek	6
4.1.1. Prandtl és pitot cső	6
4.1.2. Turbinás és hődrótos anemométer	7
4.1.3. Lézeres sebességmérés - LDA	8
4.1.4. Lézeres sebességmérés - PIV	10
4.2. Lángstruktúrák.....	11
4.3. Dízelolaj és dodekán.....	15
5. Mérőberendezés és adatfeldolgozás	18
5.1. Tüzelőberendezés	18
5.2. PIV helyi megvalósítása	19
5.3. Rendszerek integrálása	23
5.4. DaVis programkörnyezet	28
5.5. Matlab programkörnyezet.....	31
6. Eredmények bemutatása	33
7. Összefoglalás.....	45
8. Summary	47
9. Felhasznált források	49

ELŐSZÓ

Az OTDK dolgozatomban dízelolaj és dodekán folyékony tüzelőanyagok térfogati égésének sebességviszonyait vizsgáltam. A mérések PIV rendszerrel kerültek kivitelezésre. A célja az általam elvégzett vizsgálatoknak, hogy előre meghatározott működési paraméterek között megállapítsam, hogy a CFD szimulációs gyakorlatban gyakran alkalmazott dízelolaj-dodekán helyettesítés mennyire biztosít valóságos eredményeket. Ehhez az égési folyamatról több időpillanatban készült felvételpárok segítségével alkotott vektormezők átlagát használtam fel, majd ezen átlagos sebességvektormezők tulajdonságait vizsgáltam. Az általam kapott eredmények alkalmasak CFD szimulációk validálására.

* * *

Köszönetnyilvánítás

Elsősorban szeretném megköszönni témavezetőmnek, Csemány Dávidnak, hogy szakmai tudásával, tapasztalataival fáradhatatlanul támogatott dolgozatom elkészítése során. Kérdésimre 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, Rácz Erika, Vass Bertalan és jómagam. Végül szeretném megköszönni a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéknek, hogy beszerezte a mérésekhez szükséges tüzelőanyagokat.

Budapest, 2023

Hirják Árpád Botond

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
dt	időtartam	μs

Kémiai jelölések

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
CH	szénhidrogén
CO	szén-monoxid
CO ₂	szén-dioxid
NO _x	nitrogén-oxidok
NO ₂	nitrogén-dioxid
NO	nitrogén-oxid
O ₂	oxigén
SO ₂	kén-dioxid
TiO ₂	titán-dioxid

1. ABSZTRAKT

1.1. Magyar nyelvű

A fosszilis tüzelőanyagok az ipari forradalom óta szerves részét képezik a globális gazdaságnak. Számos előnnyel rendelkeznek, melynek köszönhetően sokrétű és elterjedt az alkalmazásuk. A fosszilis tüzelőanyagok használatának a klímaváltozásra gyakorolt káros hatása miatt napjainkban egyre nagyobb hangsúlyt kapnak a villamos hajtású járművek, melyek elterjedését az akkumulátortechnológia fejlődése is elősegíti [1]. Habár városokban és rövidebb távokon ezek megfelelően alkalmazhatóak, hosszú távokon, jellemzően légi közlekedés, valamint szárazföldi és tengeri szállítmányozás kapcsán továbbra is felhasználunk folyékony tüzelőanyagokat a jövőben a kedvező energiasűrűség miatt. Az ezen energiahordozókat felhasználó iparágak számottevő károsanyag kibocsátással rendelkeznek, így kiemelten fontos a kibocsátás-csökkentő technológiák kidolgozása.

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Combustion Research Group kutatócsoportja által kidolgozott újszerű, úgynevezett Keverék Hőmérséklet-szabályozott tüzelés segítségével térfogati tüzelés valósítható meg további oxidálószer bevezetése nélkül [2]. Ennek a módszernek a kiemelt előnye, hogy az égés során nem alakulnak ki lokális hőmérsékletcsúcsok, így jelentős az NO_x kibocsátás csökkenése, mely az egyre szigorodó klíma- és környezetvédelmi szabályozások miatt jelentős. Annak érdekében, hogy ezt a koncepciót kellő mélységben megértsük, szükség van numerikus szimulációkra is a mérési vizsgálatokon felül.

A gyakorlatban alkalmazott folyékony tüzelőanyagok jellemzően nagy komponensszámmal rendelkeznek. Annak érdekében, hogy numerikus szimulációk során csökkenteni lehessen a számítási igényt, az eredeti tüzelőanyag tulajdonságaival megegyező, de csökkentett komponens számmal rendelkező helyettesítő modell-tüzelőanyagokat alkalmaznak. A dolgozatomban szabványos dízelolaj és dodekán összehasonlítását tettem meg térfogati tüzelésre vonatkozóan, mivel utóbbit gyakran alkalmazzák előbbi helyettesítő tüzelőanyagként numerikus szimulációk során [3]. A méréseket azonos működési tartományokra végeztem el mindkét anyagra, a változtatott paraméterek az égéslevegő előmelegítési hőmérséklete és az alkalmazott porlasztónyomás voltak. A térbeli sebességmező mérésére az úgynevezett Particle Image Velocimetry (PIV) módszert alkalmaztam. A helyettesítő tüzelőanyagra vonatkozó eredmények közvetlenül felhasználhatók numerikus szimulációs modellek validációja során. Az anyagok összehasonlításával értékelés fogalmazható meg a modell-tüzelőanyag alkalmazhatóságáról a vizsgált működési tartományon.

1.2. Abstract

Ever since the industrial revolution, fossil fuels are vital part of our global economy. Although they have many advantages, their application is versatile and widespread, they have negative impact on climate change. Therefore, electric vehicles are continuously gaining importance, which is promoted by the development of battery technology [1]. Even though its efficiency is progressing and electric vehicles can be used sufficiently in cities or for shorter distances, long distance transportation like air, maritime, and road freight still require liquid fuels in the future due to their high energy density. Since these industries greatly contribute to the climate change, this urges the development of emission-reducing technologies.

A novel combustion concept, called Mixture Temperature-Controlled combustion has been developed by the Combustion Research Group of Budapest University of Technology and Economics, which allows distributed combustion without further oxidizer dilution [2]. This results in a homogeneous temperature field leading to significant NO_x reduction, which is implied by the tightening emission standards. In order to properly understand this new concept, analysis performed by computational fluid dynamics simulations are required besides experimental tests.

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. In this work, I experimentally compared standard diesel oil with dodecane focusing on distributed combustion since dodecane is frequently used as a single-component surrogate of diesel oil in combustion simulations [3]. The measurements were carried out with identical operating conditions for both fuels. The varied operating parameters were the combustion air temperature and atomizing gauge pressure. To acquire the three-dimensional velocity vector fields, Particle Image Velocimetry (PIV) was used. The results obtained from the measurements concerning the surrogate fuel can be directly used for model validation. Furthermore, the applicability of the single-component surrogate fuel can be evaluated within the analyzed operating conditions.

2. CÉLKITŰZÉS

Az általam elvégzett kutatómunka célja, hogy értékeljem, a numerikus szimulációs gyakorlatban gyakran alkalmazott dízelolaj-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.

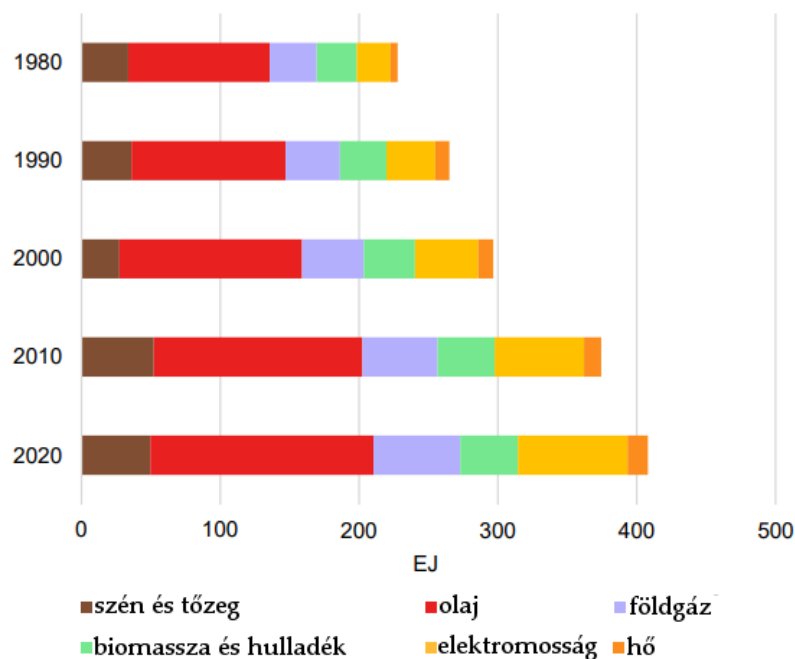
Cél, hogy a dízelolajra és dodekánra vonatkozó mérési eredmények összehasonlításával meg tudjam állapítani, hogy mely paraméterek között mutat, és milyen mértékű egyezőséget a két tüzelőanyag esetén vizsgált sebességmező, ezáltal értékelni tudjam a helyettesítő tüzelőanyag szimulációk során történő használatát. 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 végzem, 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.

3. BEVEZETÉS

A fosszilis tüzelőanyagok környezetre gyakorolt káros hatása köztudott napjainkban. Mivel az ipari forradalom óta szerves részét képezik a globális gazdaságnak, így negatív tulajdonságaik mellett is nélkülözhetetlenek. Kétségtelen előnyük a magas energiasűrűségük és viszonylag egyszerű tárolhatóságuk, valamint szállíthatóságuk. Az egyik terület, ahol jelentős a fosszilis tüzelőanyag-felhasználás az energiatermelő szektor mellett, az a közlekedés. Habár feltörekvőben vannak a villamos hajtású járművek, ez a technológia egyelőre rövidebb távokon alkalmazható magas hatékonysággal [1]. Hosszabb távok esetén, melyek légi közlekedés, szárazföldi és tengeri szállítmányozás kapcsán előfordulnak, továbbra is jelentős folyékony tüzelőanyag felhasználás prognosztizálható. Továbbá az ipar számos területén, mint a fémipar, cementgyártás, kőolaj finomítók, üvegipar, előforduló tüzelőberendezések egyik pillanatról a másikra történő megszűnése elképzelhetetlen jelenleg. A nagyfokú jelenlét következtében kisebb előrelépéseknek is jelentős pozitív hatása lehet, például a károsanyag-kibocsátás csökkentésének szempontjából.

Az energiahordozók tudatos felhasználása az utóbbi években, évtizedben egyre nagyobb hangsúlyt kapott, melyet fokozott a 2022-ben kialakuló energiaválság. Régóta a fosszilis tüzelőanyagok a fő forrásuk a felhasznált végsőenergiának, viszont az 1980-as évektől 2020-ig 74%-ról 67%-ra csökkent részesedésük [4]. A végsőenergia felhasználás forrás szerinti megoszlását mutatja be az 1. ábra.



1. ábra. Végsőenergia forrás szerinti megoszlása [4].

A környezet- és klímavédelmi célok mellett mára különösen jelentőssé vált a költségcsökkentés is. Azonban általánosságban elmondható, hogy ez előbbiekben megfogalmazott ideológiát nagyban támogatják a technológiai fejlesztések és kutatások. Tüzeléstechnika terén az egyik ilyen fejlesztés a Budapesti Műszak és Gazdaságtudományi Egyetem Combustion Research Group kutatócsoportja által kidolgozott Keverék Hőmérséklet-szabályozott tüzelés [2]. A fejlesztett módszer segítségével térfogati égés valósítható meg extra oxidálószer bevezetése nélkül. A térfogati égés azért előnyös, mert ennek során nem alakulnak ki lokális hőmérsékletcsúcsok, homogén hőmérsékletmező biztosítható az égőtérben, ezáltal jelentősen alacsonyabb az NO_x kibocsátás. Az NO_x gyűjtőnév, mely alatt az NO_2 -re és NO -ra utalnak legtöbbször. Ezen vegyületek hozzájárulnak a szmog kialakulásához, valamint savas esőt is eredményezhetnek. Az emberi szervezetre is veszélyesek lehetnek, hosszú távon, nagy koncentráció viszszafordíthatatlanul károsítja a tüdő szöveteit [5].

További segédeszköz, amely által jelentős fejlesztések érhetők el a tüzeléstechnika területén, a numerikus szimuláció. Segítségével a lezajló folyamatok mélységükben elemezhetőek költséges kísérleti berendezések megépítése nélkül. A gyakorlatban alkalmazott folyékony tüzelőanyagok viszont jellemzően nagy komponensszámmal rendelkeznek. Ezek modellkörnyezetbe történő implementációja nagy számításigényt eredményez. Ezért szokás helyettesítő tüzelőanyagok, mint például dízelolaj esetében a dodekán alkalmazása numerikus áramlástan (computational fluid dynamics, CFD) modellezési környezetben. A helyettesítő modell-tüzelőanyag alkalmazásának célja az eredeti fizikai és kémiai tulajdonságok megfelelő reprodukálása lényegesen kevesebb komponens felhasználásával. Ezen modell-tüzelőanyagokat a valóságban azonban gyakran nem állítják elő ténylegesen és a velük történő konkrét szisztematikus tesztmérések is ritkák az irodalomban. Ennek megfelelően kísérleti értékelésük mindenképpen előremutató a kutatás-fejlesztés folyamata szempontjából.

4. A TÉMAKÖR MÓDSZERTANI ÁTTEKINTÉSE

4.1. Áramlástanai sebességmérési módszerek

4.1.1. PRANDTL ÉS PITOT CSŐ

Áramlástanban a sebességmérésnek sok lehetősége van. A legrégebb óta használtak ezek közül a Prandtl és Pitot csövek [6]. Ezek egyszerű működésük miatt elterjedtek, mivel elegendő a méréshez egy az előbb említett csövek közül, egy nyomásátvivő szilikon cső, és egy digitális eszköz a nyomáskülönbségek számszerűsítésére. A különbség a két kellék között, hogy Pitot cső csak össznyomás, a Prandtl pedig statikus nyomás mérésére is alkalmas. A 2. ábrán látható ezek sematikus vázlata, illetve egy jellemző felhasználási terület, a légi járművek. Ebben az esetben sebességmérésen kívül a tengerszint feletti magasság (változásának) mérésére is használják.

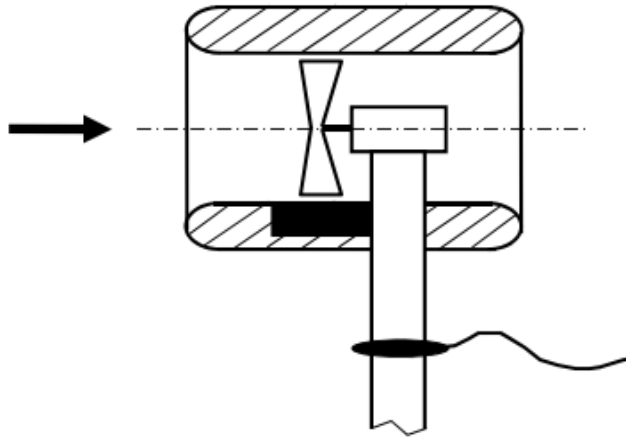


2. ábra. Prandtl és Pitot cső sematikus ábrája (bal oldalon), és egy jellemző felhasználási területük, a repülőgépek (jobb oldalon) [6].

A 2. ábrán látható, hogy a csövek különböző furatolásának köszönhető, hogy képesek mérni össznyomást vagy statikus nyomást. Ezek az eszközök nyomás mérésére alkalmasak, de ismerve a közeg sűrűségét, a dinamikus nyomásból számítható az áramlási sebesség [7].

4.1.2. TURBINÁS ÉS HŐDRÓTOS ANEMOMÉTER

Közvetlenül sebességek mérésére alkalmas eszközök az anemométerek, mint például a turbinás (másik elnevezése mini-air) és hődrótos anemométer. Előbbi eszköznek a működési elve, hogy áramló közegbe helyezve a hengerben elhelyezkedő lapátok forogni kezdenek. A modern műszerek esetén ez a forgómozgás feszültséget generál, így az eszköz valós időben képes megjeleníteni az áramlás sebességét [8]. A nyélen található madzag az áramlási irány meghatározására szolgál, ami a 3. ábrán is megfigyelhető.



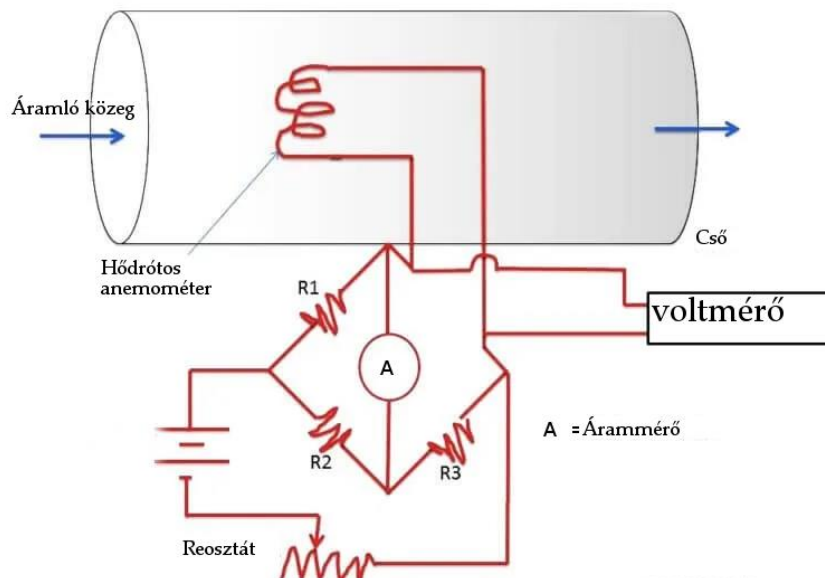
3 ábra. Turbinás anemométer sémarajza [9].

Állandó jellemzőkkel bíró áramlások gyors mérésére alkalmas a fent leírt eszköz, sokszor mégsem alkalmazható, mivel:

- nem alkalmas gyorsan változó sebességű áramlások hiteles mérésére
- nem alkalmas nem egyenletes áramlások vektormezőinek elkészítésére
- viszonylag szűk mérési tartománnyal rendelkezik, amely megközelítőleg 10 m/s nagyságrendű
- hozzá kell férni az áramláshoz, hiszen bele kell helyezni az eszközt, ami tüzeléstechnikai mérés során nem kivitelezhető

A hődrótos sebességmérés működési elve, hogy egy elektromosan fűtött szálát helyeznek az áramlásba, ami a közegben lehűl. A drót hőmérsékletcsökkenésével a vezetőképessége is megváltozik. Ezt a változást mérve lehet következtetni az áramlási sebességekre. Több változata van, lehet az alapján is besorolni őket, hogy az eszközre kapcsolt feszültség van állandó értéken tartva vagy pedig a drót hőmérséklete. Előnye, hogy kicsi a helyigénye, nagy pontossággal mér és viszonylag olcsó. Hátránya, hogy

közvetlen hozzáférést igényel az áramláshoz, és erősen hőmérséklet érzékeny, ami a mérési hibájának fő összetevője [10].



4. ábra. Állandó hőmérsékletű hődrót felépítése [10].

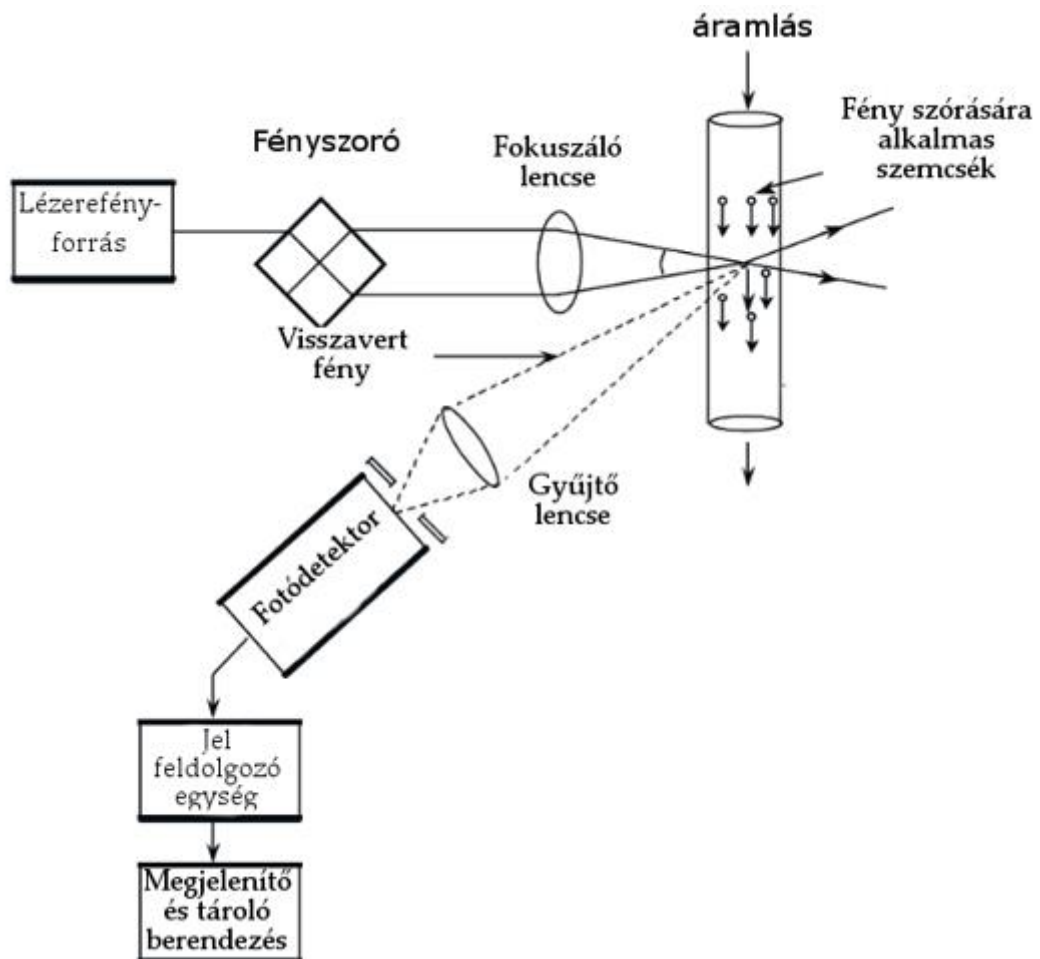
A 4. ábra mutatja be az állandó hőmérsékletű elven működő hődrót felépítését. Ebben az esetben a mérő drót konstans hőmérsékleten tartása a cél, ami csak úgy érhető el, ha a rájuttatott feszültség változik, mivel az hatással van a drót ellenállásán eső hőmennyiségre, ami csökkenne áramlásba helyezve. Megfelelő kalibrációval a szükséges feszültségváltozásból kiindulva számolható a vizsgált áramlás sebessége.

4.1.3. LÉZERES SEBESSÉGMÉRÉS - LDA

Az általam elvégzett tüzeléstechnikai mérések esetében elengedhetetlen, hogy az alkalmazott módszer a tüzelés során létrejövő áramlási viszonyok gyors változását követni tudja, továbbá a tüztérbe és az áramlás útvonalába nem lehet objektumot behelyezni. A fejlődő hő miatt hőmérséklet-változáson alapuló műszer használata sem megoldható. Az ilyen feltételeknek is eleget tudnak tenni bizonyos mérési eszközök, melyek rendszerint lézeroptikai elven működnek.

Az egyik lézeres sebességmérésre alkalmas eszköz az úgynevezett Lézer Doppler Anemométer (Laser Doppler Anemometer, LDA). A berendezés a Doppler effektust használja fel sebességmérésre. A Doppler effektusnak vagy Doppler jelenségnek hívják azt a fizikai jelenséget, miszerint egy áramlás frekvenciájában változás érzékelhető,

ha a megfigyelő és a forrás egymáshoz képest elmozdul. Áramlástan mérés esetén ezt úgy hasznosítják, hogy a vizsgált közeget lézernyalábbal megvilágítva, a közeget alkotó, mozgásban lévő részecskék elmozdulása következtében változik a szemcséken visszaverődő fény frekvenciája, mely detektálható [11].

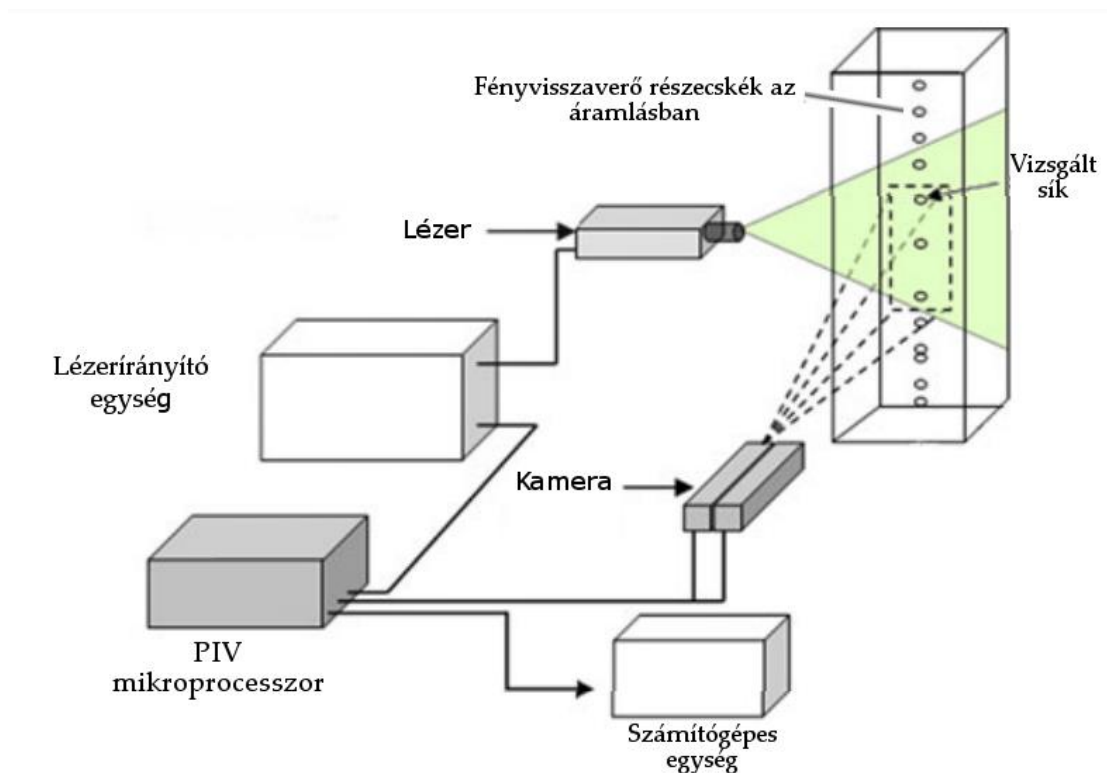


5. ábra. LDA működési elve [12].

LDA-val való mérés során, melynek elvét az 5. ábra mutatja be, a kibocsátott lézernyalábot két részre választják szét, majd a vizsgált területre fókuszálják őket úgy, hogy a vizsgálni kívánt pontban keresztezzék egymást a nyalábok. Ennek következtében az interferencia csíkok detektálhatóak. Amennyiben a vizsgált pontban az áramlásban apró szemcsék, porszemek áramolnak, azok a kibocsátott fényt szórni fogják, ami mérhető változást okoz, melyből számolható a sebesség.

4.1.4. LÉZERES SEBESSÉGMÉRÉS - PIV

Habár az LDA-s módszer lehetőséget nyújt gyorsan változó áramlási viszonyú közegek mérésére is, továbbá nem szükséges a mérési térben mérőeszközt közvetlen behelyezni, térben változó áramlások mérésére nem alkalmas, mivel csak egy pontot képes vizsgálni egy adott időben. Az általam végzett elemzésekhez 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. Az erre alkalmas metódus az úgynevezett Particle Image Velocimetry (PIV), melynek általános felépítése látható a 6. ábrán.



6. ábra. PIV általános működési sémája [13].

A PIV az egyik metódusa a lézeroptikai áramlástan mérésének, segítségével vizualizálni lehet áramlásokat [14]. Előnye, hogy térben nem homogén áramlások vizsgálatára is lehet alkalmazni, illetve, hogy nem csak pontszerű mérésre alkalmas, ellentétben az LDA-val.

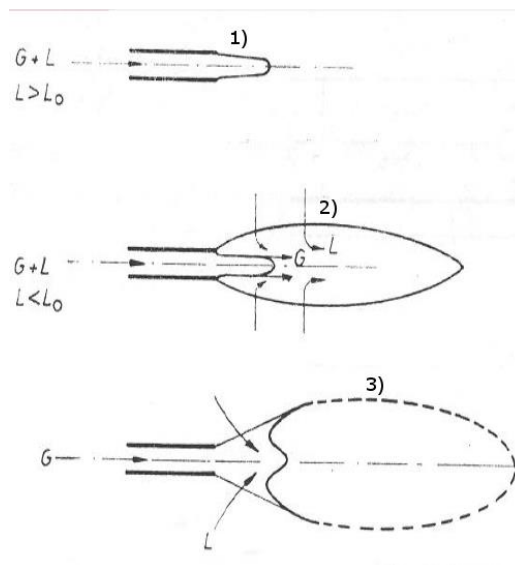
A PIV-s rendszerek alapvető működési elve, hogy egy lézerrel előre beállított időközönként megvilágításra kerül az áramlási tér egy vizsgálni kívánt síkja, ezekkel a

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 szemcse szükséges, ami bejuttatást követően kellő időben le tud fékeződni, 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 dt -nek szoktak 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 dt 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.

4.2. Lángstruktúrák

Égés esetén megkülönböztethetünk előkevert, részlegesen előkevert, és diffúz lángot az oxidálószer (levegő) bekeverésének helye is ideje alapján. A 7. ábra szemlélteti ezeket. Az ábrán látható továbbá, hogy teljes előkeverés során a reakció egy vékony lángfrontban játszódik le, sokkal koncentráltabb az égés [15]. Nem-előkevert égésről akkor beszélünk, ha a tüzelőanyag és az égési levegő az égési térben keveredik el. Ilyen típusú égést alkalmaznak autogén hegesztés során is. Ezenkívül megkülönböztethetünk lamináris és turbulens lángot az égés áramlástani jellemzői alapján.

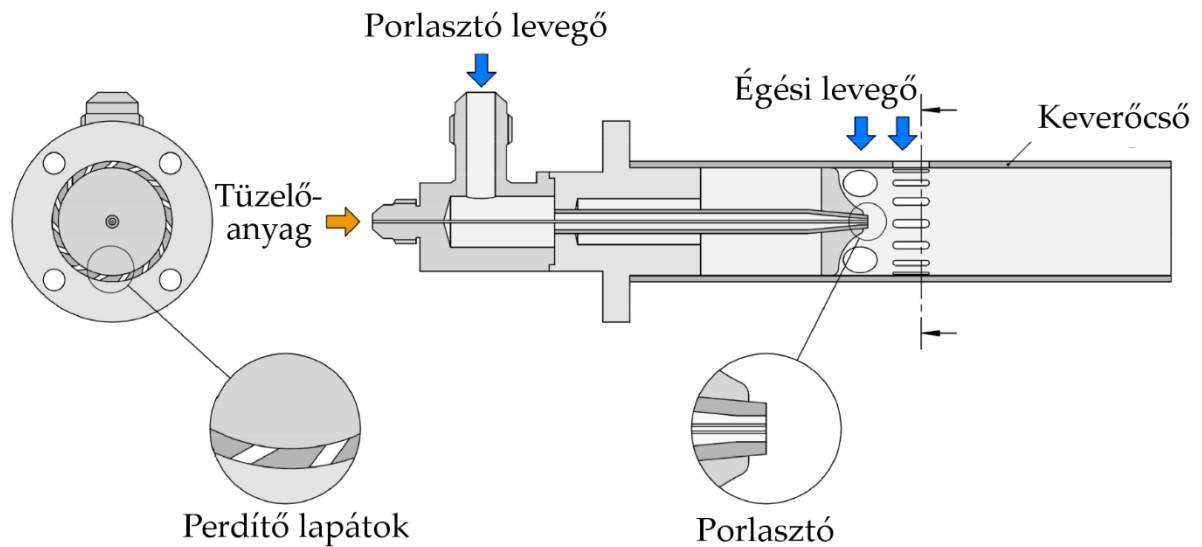


7. ábra. Előkeverés hatása a lángalakokra.

- 1) teljes előkeverés – kinetikus láng, 2) részleges előkeverés – kinetikus / diffúz láng, 3) előkeverés nélkül – diffúz láng [15]

Az előkeverésnek jelentős hatása van a láng alakjára és színére is, valamint a láng-hőmérsékletre. Metán esetén, ami a földgáz fő alkotóeleme, rendszerint a diffúz égés során citrom- és narancssárga színt tapasztalhatunk, míg előkevert égés során kék és türkiz színekben világít a láng. Első esetben a színt az izzó koromszemcsék adják, míg második esetben a gerjesztett állapotból alacsonyabb energiaszintre jutó CO_2 és CH részecskék foton sugárzása játszik szerepet. Továbbá a láng-hőmérsékletek között is jelentős eltéréseket lehet tapasztalni. Előkeverés nélkül az égés jellemzően nem tökéletes, így magasabb a károsanyag kibocsátás is [15].

Ezek alapján a modern tüzelőberendezésekben előkeverést valósítanak meg, melynek egyik lehetséges megoldása a perdületes égők alkalmazása. A perdületes égők terelőelemek segítségével forgó, kavargó mozgást biztosítanak az égési levegőnek, aminek köszönhetően az elkeveredik a tüzelőanyaggal a reakciók lezajszódása előtt. Ez elősegíti a gyulladást és az égési folyamat fenntartását. Perdületes előkeveréses égőre mutat példát a 8. ábra.



8. ábra. Perdületes előkeveréses égő metszeti ábrája [16].

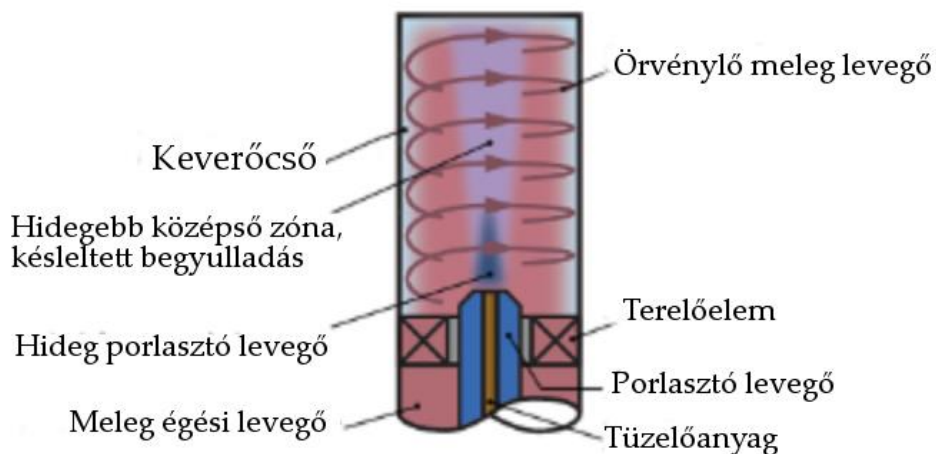
A 8. ábrán is látható égővel felszerelt tüzelőberendezéssel megvalósítható folyadék tüzelőanyagok égetése is. A konstrukcióval tüzelőanyagban szegény keverék állítható elő. A porlasztó úgynevezett levegősegedközeges porlasztó, melynek lényege, hogy a folyadéksugárral koncentrikusan nagysebességű porlasztólevegő áramlik, mely apró cseppekre bontja a folyadékot, aminek köszönhetően megnő a tüzelőanyag felülete, ezzel elősegítve a gyorsabb párolgást. A keverőcsőre azért van szükség, hogy a cseppek párolgására kellő idő álljon rendelkezésre. A fejlődő gőz keveredik a perdületes égéslevegővel, így megfelelően homogén levegő-tüzelőanyag keverék éri el a lángfrontot, melynek következtében nem alakulnak ki magas hőmérsékletű zónák, ami kedvezne az NO_x képződésének.

A továbbiakban perdületes égővel felszerelt tüzelőberendezésen megvalósítható lánalakokat hasonlítok össze röviden, fókuszban a térfogati égéssel. A 9. ábra mutatja be a megvalósítható stabil lánalakokat.



9. ábra. Fő lángalakok [17].
bal – egyenes; középső – V alakú, jobb - térfogati

A 9. ábrán látható lángalakok között az átmenet pillanatszerű, a tüzelési paraméterek függvényében változhatnak, de mindegyik stabil. A három lángalak között eltérések tapasztalhatók károsanyag-kibocsátás és akusztikai téren is. Károsanyag-kibocsátás kapcsán elmondható, hogy egyenes láng esetén mérhetőek a legmagasabb NO_x értékek, mivel itt a hő egy kisebb térrészbe koncentrálódik. V-alakú láng és térfogati égés során már alacsonyabb ez az érték, legalacsonyabb térfogati égés esetén, beállítástól és égési paramétereiktől függően akár 2-3-szor kevesebb. Korábbi kutatások[2] kimutatták, hogy gázolaj és biodízelek esetén is megvalósítható a térfogati égés, kevesebb mint 20 ppm NO_x kibocsátással 4,2%-os füstgáz O_2 szint mellett. Itt érdemes megjegyezni, hogy az NO_x keletkezése erősen összefügg az égési hőmérséklettel és a lángalakok esetén megfigyelhető az adiabatikus lánghőmérséklet csökkenése ahogy egyenestől haladunk térfogati égés felé. A CO kibocsátások mind a három lángalak esetében kellően alacsonynak mondhatóak, tehát a tüzelőanyag az alacsonyabb hőmérséklet ellenére is elég, nem kell kompromisszumot kötni a CO és NO_x kibocsátás között [2]. Ez adja a Keverék Hőmérséklet-szabályozott tüzelés igazi relevanciáját a modern tüzelőberendezésekben. A koncepció lényege, hogy a perdületes égési levegőhöz képest alacsonyabb hőmérsékletű porlasztólevegő késlelteti a tüzelőanyag gőz és levegő keverékének gyulladását, ezért a reakciók az égőtér felső tartományában egy nagyobb térfogatban játszódnak le. A láng ennek megfelelően nem az égőszájon helyezkedik el [2].



10. ábra. A keverőcsőbe áramló közegek [18].

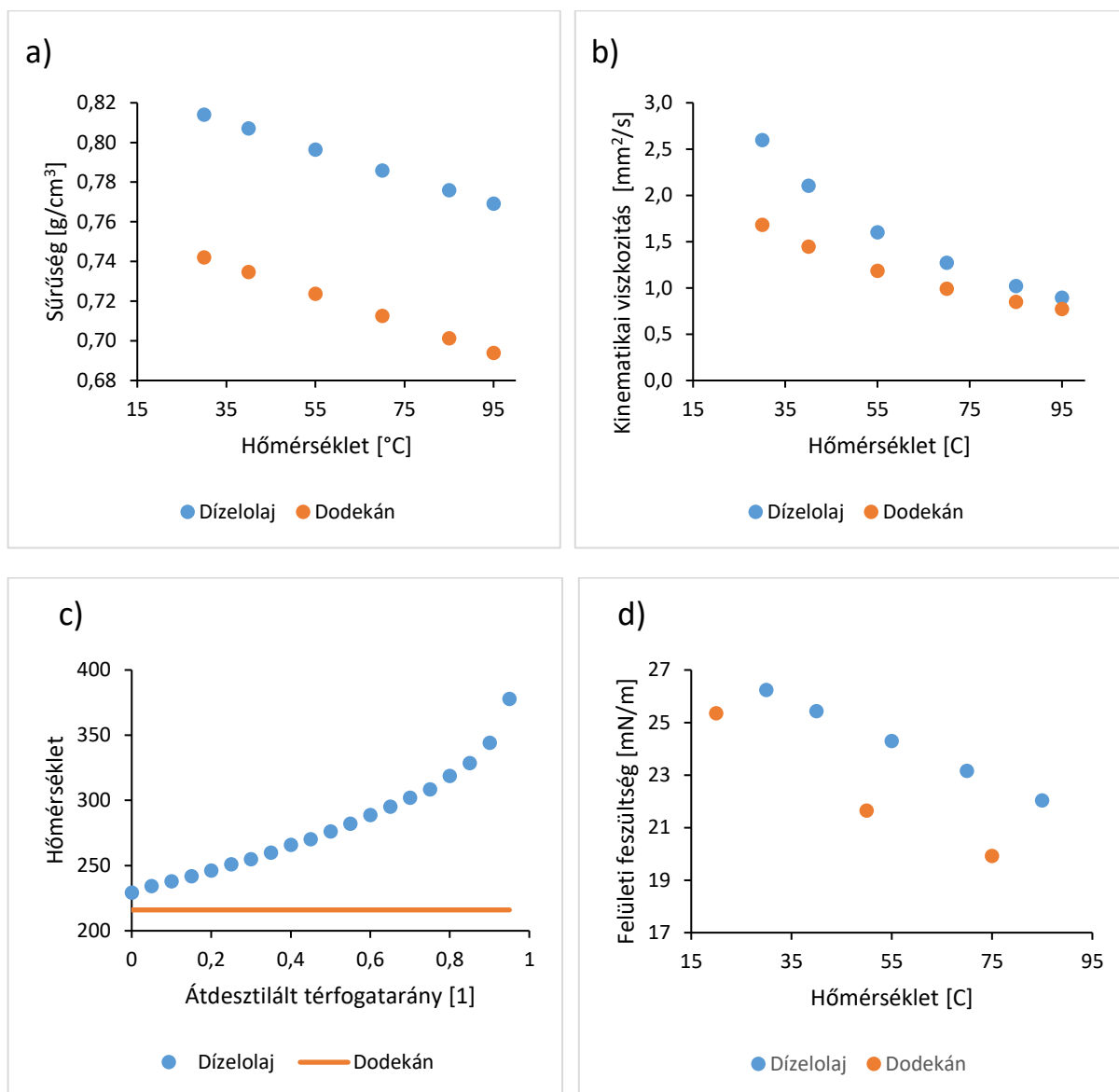
A 10. ábrán látható, hogy a keverőcső külső részén perditőelemen keresztül halad, ezért perdülettel rendelkező előmelegített égési levegő halad. Középen, hideg porlasztólevegő kerül bevezetésre, mely valamelyest visszahúti az égési levegő és tüzelőanyag gőz keverékét. Ennek a hőmérséklet-csökkenésnek 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 bejuttatott tüzelőanyag is képes kellően elkeveredni, közel homogén elegyet alkotni a levegővel. Ennek eredményeképpen térfogati égés valósítható meg, további oxidálószer bevezetése nélkül. A teljes mérőberendezés részletes bemutatását a dolgozat következő fejezetében teszem meg.

Az elméleti háttér mélyebb megértése azonban további mérési vizsgálatokat követel meg. Végeredményben tehát elmondható, hogy minél homogénebb egy keverék, annál kedvezőbbek a kibocsátási értékek, mind szennyezőanyagok mind pedig zaj kibocsátás terén.

4.3. Dízelolaj és dodekán

Az előző alfejezetben kifejtett porlasztás és párolgás azért fontos, mivel az vizsgált tüzelőanyagok folyékony halmazállapotúak. Azért ezen tüzelőanyagok kerültek összehasonlításra, mivel a numerikus szimulációs gyakorlatban elterjedt a dízel dodekánvaló helyettesítése. A helyettesítő modell-tüzelőanyag lényege, hogy az eredeti tüzelőanyag fizikai és kémiai tulajdonságait minél jobban reprodukáljuk kevesebb komponenssel. A dodekánt a dízel egykomponensű helyettesítőjének használják számos tüzelési 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 a 11. ábrán bemutatásra.



11. ábra. Dízelolaj és dodekán cseppképződését és párolgását befolyásoló tényezői.

A 11. ábrán látható a dízelolaj és dodekán négy jellemzője a hőmérséklet függvényében. Az a) diagram a sűrűségüket, a b) kinematikai viszkozitásukat, a c)-n a desztillációs görbéjük látható, a d)-n pedig a felületi feszültség. Utóbbira nem találtam az irodalmakban adatot egzakt az általam vizsgált hőmérséklet tartományra, ezért kerültek csak a 20, 50 és 75 °C-hoz tartozó értékek ábrázolásra [19], [20].

A legnagyobb eltérések a sűrűségben adódnak, viszont a kinematikai viszkozitás esetén magasabb hőmérsékleten kellően jó az egyezés. A c) ábrán látható a dízel desztillációs görbéje és a dodekán forráspontja. Dodekán esetében, mivel egykomponensű anyag, így desztillációs görbéről nem beszélhetünk. Fontos megjegyezni, hogy a forráspontja, mely kb. 216 °C, a dízelolaj desztillációs görbéje alatt helyezkedik el teljes mértékben, ezért ettől a tüzelőanyagtól azt várjuk, hogy illékonyabban fog viselkedni, gyorsabban fog párologni. Felületi feszültség kapcsán az ábrán láthatóan nagynak tűnnek az eltérések, de ehhez az ábrázolásmód is hozzájárul, mivel nem azonos hőmérsékletre tartozó értékek vannak feltüntetve [21].

A dodekán moláris tömege 170,34 g/mol, fűtőértéke 44,147 MJ/kg, hidrogénatom/szénatom aránya pedig 2,167. Dízelolaj 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 2 körüli [22], [23].

A fentiek alapján látható, hogy a dízelolaj-dodekán helyettesítés megalapozott, mivel minden jellemzőjük azonos nagyságrendben és értékek körül mozog. Habár moláris tömegben és sűrűségben vannak nagyobb eltérések, de a hőmérséklet emelkedésével a kinematikai viszkozitás közel azonossá válik, továbbá a hidrogénatom/szénatom arányok és a fűtőértékek szinte azonosak.

A tüzelőberendezés alkalmas folyékony és gáz halmazállapotú tüzelőanyag elégetésére is, akár vegyes tüzelésben is. A piros színű perdítőelem biztosítja a megfelelő keveredést. Gáztüzelés esetén a sárga színnel jelölt elemen keresztül halad a tüzelőanyag, amely a szolgáltató által biztosított földgázhálózatról érkezik. Folyékony tüzelőanyag, például dízel esetén pedig a barnával jelölt tűn áramlik be. A folyékony tüzelőanyagok porlasztása szükséges, ehhez nagysebességű porlasztó levegő áramlik ki a kék színnel jelölt elemen. Ennek a porlasztó levegőnek gyengítő hatása van a perdítőelem által kialakított perdületes áramlásra. A berendezés nagyfokú felműszerezettséggel rendelkezik. A rögzített jellemzők között megtalálható többek között a(z)

- égéslevegő nyomás és hőmérséklet
- porlasztólevegő nyomás
- perdület beállító levegő nyomás
- gáz nyomás
- füstgázhőmérséklet a füstgázventilátor tetején, illetve az égőtér tetején
- porlasztólevegő hőmérséklet
- környezeti levegő hőmérséklet
- emissziós mérések

A füstgáz komponensei közül az O_2 , CO_2 , CO , NO és SO_2 mérésére van lehetőség. A berendezéssel megfelelő beállításokkal három stabil lángalak valósítható meg, egyenes, V alakú, illetve térfogati égés. A kvarcüveg ablakoknak köszönhetően, melyek a tüzelőtér három oldalán helyezkednek el, lehetséges különböző optikai mérések elvégzése. A keverék tüzelőtérbe juttatása egy szintén kvarc üvegcső segítségével történik [17].

Az előbb leírt mérési berendezés került kiegészítésre Központi Fizikai Kutatóintézet (KFKI) által biztosított PIV berendezéssel. Az optikai mérőberendezés integrálása a tüzelőberendezéshez némi átalakítás, a megfelelő elrendezés megtalálása pedig kísérletezést és próbaméréseket igényelt.

5.2. PIV helyi megvalósítása

Mint korábban említésre került, a tanszéken folyó mérésekhez a PIV-hez szükséges berendezéseket, a lézert, kamerákat, a számítógépet és kiegészítőit a KFKI adta kölcsön számunkra. A 14-18. ábrákon ezek kerülnek bemutatásra.



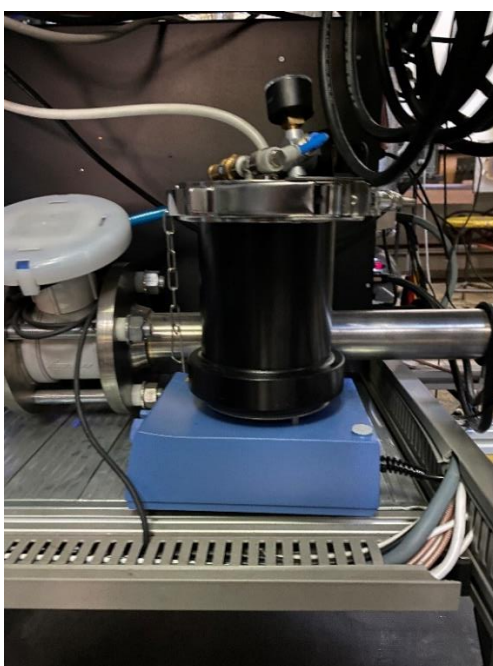
14. ábra. A lézer (jobb) és hozzátartozó hűtőegység (bal).

A lézer megközelítőleg fél méter hosszú berendezés, négy nanoszekundum felvillanási ideje, mely alatt maximum 800 mJ energiát bocsát ki, a kibocsátott fény hullámhossza pedig 532 nm. A végén a lézersík fókuszálásához és szögállításhoz szükséges optika található. Tekintve, hogy ez magas intenzitású impulzust bocsájt ki a megfelelő megvilágítás érdekében, egyrészt szükséges védőszemüveg használata a mérésen résztvevőknek, továbbá szükséges a lézer folyamatos hűtése, melyet a 14. ábrán a bal oldalon látható berendezés biztosít kezelt hűtővíz áramoltatásának segítségével. Ezek fizikailag egymás alatt helyezkednek el viszonylag közel.



15. ábra. A két kamera (bal) és a kamerák betekintése a tüzelőtérre (jobb).

A felvételek készítését a 15. ábrán látható kamerák teszik lehetővé. 2360x1776 pixel felbontású képeket képesek készíteni, egy pixel mérete 5,5 μm . A minimum dt , amivel alkalmazhatóak 250 ns. Ezeken a lézerhez való, zöld színtartományra érzékeny szűrő található, hogy a lézer zöld fényére legyenek érzékenyek. Annak köszönhetően, hogy kettő darab van belőlük, illetve azok egymáshoz képest szögben látnak a vizsgált térre, lehetséges háromdimenziós vektormezők előállítása is. A kamerák a lézerre merőlegesen vannak elhelyezve. A tartójuk kialakításának köszönhetően minden szögben dönthetőek, habár nem emelhetőek önmagukban. Továbbá található rajtuk vízszintezést szolgáló vízmérték is.



16. ábra. A TiO_2 adagoló.

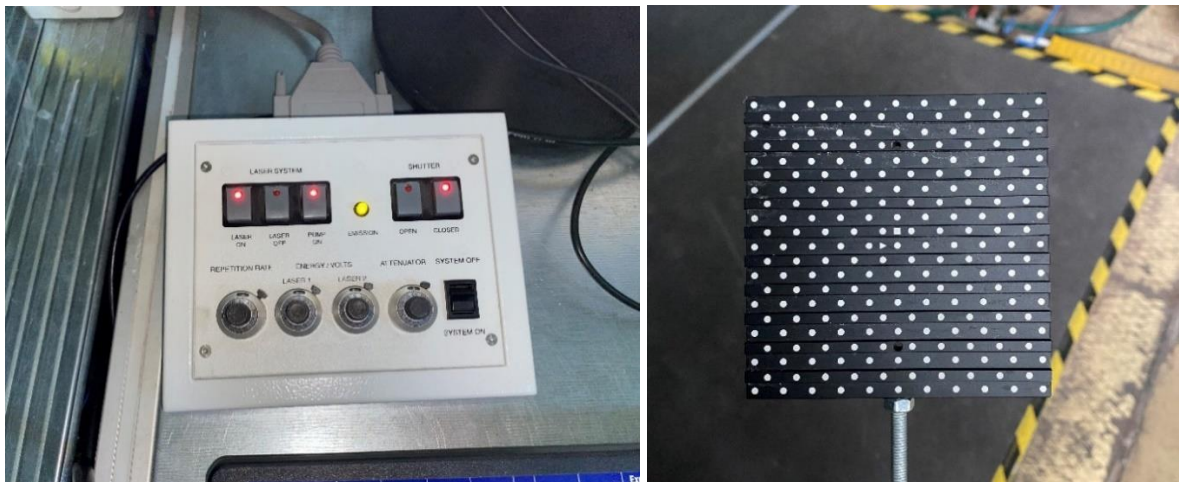
Korábban említésre került, hogy annak érdekében, hogy az áramlási jelenségek megfelelően detektálhatók legyenek, szennyezni kell az áramlást. Jelen esetben ez a 16. ábrán látható adagoló berendezés (seeder) és TiO_2 segítségével történik meg. Ebben egy forgó mágneses mező forgat egy mágnesezhető hengert, mely keveri a részecskéket, melyeket nagynyomású levegővel juttatunk a tűztérbe. A TiO_2 egy nagyon apró szemű fehér por, mely kibírja a tüzelés közben jelenlevő magas hőmérsékleteket. Megtévesztő lehet, hogy amikor ezen szemcsék a tüzelőtérbe kerülnek, akkor a láng színe megváltozik. Ez nem azért van, mert kémiai reakció lép fel, hanem ezért, mert a meleg hatá-

sára elkezdenek izzani a részecskék. Korábban már ki lett fejtve, hogy ilyen vizsgálatok esetén fontos a megfelelő szemcseméretű szennyező megválasztása. A TiO_2 szemcsék rendkívül finom pora fehér színű.



17. ábra. Számítógép és hozzátartozó perifériák.

A rendszer működéséhez szükséges a megfelelő szoftveres háttér, mely egyrésztől kapcsolatot nyújt a különböző alkotóelemek között és biztosítja a közöttük lévő szinkronizációt, másrésztől innen irányítható a mérés. Maga a számítógép, melyet hővédelem miatt egy fémlappal takartunk el a tüzelőberendezés elől, a kamerák alatt helyezkedik el, míg a monitor, kezelőpult és billentyűzet a kameráktól jobbra található. A számítógépen megtalálható a szükséges DaVis szoftver, melynek segítségével elvégezhetőek a kalibrációk és mérések, valamint megjelenítésre kerülhetnek az eredmények.



18. ábra. Kezelő pult közelebbről (bal) és kalibrációs tábla (jobb).

A 18. ábrán bal oldalt látható a kezelőpult, mellyel többek között lehet állítani a lézer intenzitását, bekapcsolni azt és indítani a hűtését. A jobb oldalon pedig az úgynevezett kalibrációs tábla látható, amelyre egyrészt azért van szükség, hogy a két kamera által kapott képek információi összehangolhatóak legyenek, illetve a pixel/távolság viszony meghatározásában is szerepet játszik, mivel ismert a rajta lévő pontok pozíciója.

5.3. Rendszerek integrálása

Ahhoz, hogy a meglévő tüzelőberendezésen mérni lehessen a fentebb említett eszközökkel, a következő módosítások elvégzésére volt szükség:

- új tartó elemek beépítése (kameráknak és lézernek)
- meglévő eszközök (pl.: üzemanyag tartály) áthelyezése
- korábbi, két ablakot tartalmazó tűztér cseréje az új háromablakos tűztérre
 - ehhez tartozó üveghűtés kialakítása
- a különböző vezetékek, kábelek elvezetése és csatornázása

Az eredeti elképzelés szerinti elrendezéssel voltak problémák, amit az első próbamérések felszínre is hoztak. Az egyik legnagyobb problémát a nem kívánatos tükröződések jelentették. A lézer által kibocsátott fény ideális esetben csak a TiO_2 -ról verődne vissza, illetve semmilyen egyéb fényforrásból nem érkezne fény a kamerákba. A mérések során viszont azt tapasztaltuk, hogy a kvarc keverőcső, illetve a tüzelőtér fala és alja is reflektál. Ezek ellehetetlenítik a mérés kiértékelését. Az ilyesfajta reflektálódásra mutat példát a 19. ábra.



19. ábra. Mérési kép a próbamérésről.

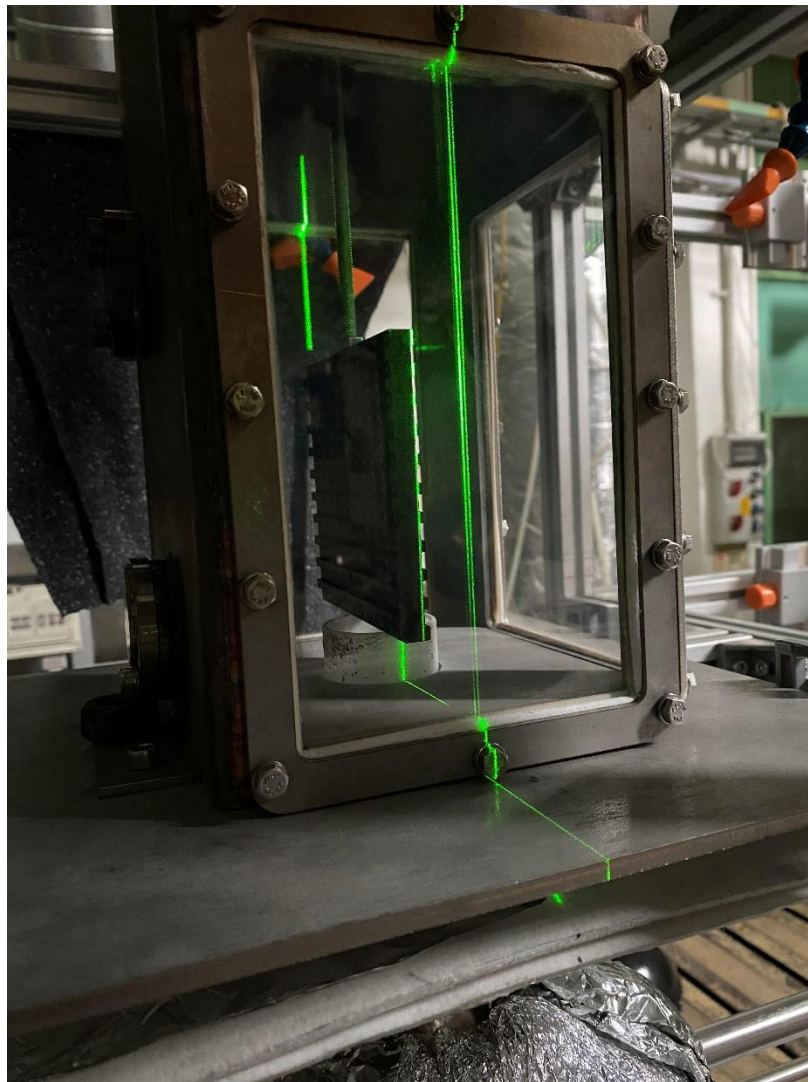
A 19. ábrán megfigyelhető az előbb leírt jelenség. Egyrészt a keverőcső két szélén lévő kék csúcsok, továbbá a kép jobb oldalán a kvarc üvegablakon látható kék folt a fényvisszaverődések eredménye. Mindkettő hátráltatja a kiértékelést. Megfigyelhető, hogy a keverőcső be lett vonva egy fekete színű anyaggal. Ez az anyag kerámia tartalmú kipufogó tömítő, mely ellenáll a magas hőmérsékletnek, és segítségével próbáltuk a visszaverődést megszüntetni. Ez az egyik kamera esetén megoldásnak bizonyult, de a második kamera esetén a 19. ábrán látható csillogások jelennek meg továbbra is. Így a végső megoldása a problémának az lett, hogy csupán a keverőcső felett vizsgálódunk. Ennek az a hátránya, hogy a keverőcső mellett kialakuló áramlásokról nincs információ. Ez egy elkerülhetetlen kompromisszumnak bizonyult. Szerencsére térfogati égés esetén a fő jelenségek a keverőcső feletti térrészbe koncentrálnak. Szintén probléma, hogy a TiO_2 bejuttatása során bizonyos mértékben szivárgott, finom port juttatva a közvetlen környezetbe, illetve túl nagy volt az axiális sebessége, de ez megoldásra került a befűtés 90 fokos elforgatásával. Illetve ez a finom por képes megtapadni az üvegablakok belső falán is. Ez ronthatja a felvételek minőségét. Ez a 20. ábrán megfigyelhető. Ezen jelenség következtében korlátozódik az egy mérési alkalom során elvégezhető mérések száma. Ennek letakarítása nem bonyolult feladat, a tüzelőtér eltávolításával könnyen megoldható, viszont tüzelés közben a tűztér intenzíven felmelegszik, így egy nap maximum csak egyszer tudunk mérési sorozatot készíteni, egy sorozat pedig körülbelül hat mérési üzemállapotot tartalmaz.



20. ábra. A tűztér kvarc üveglakai, TiO₂-dal a belső felületükre tapadva.

A tűzelőtér ablakaira tapadt TiO₂ szemcséken kívül a 20. ábrán látható az üvegfelületek hűtésére szolgáló rendszer (narancssárga polimer fúvókák fent) is. Ezek folyamatosan sűrített levegőt fújnak a felületekre, ezzel biztosítva, hogy nem melegednek túl, nem rongálódnak meg a nagy hőteljesítmények hatására.

A korábban leírtak alapján minden mérést megelőz egy tisztítás és kalibrálás. A tűzelőtér ablaküvegeinek tisztítása a teljes tűzelőtér eltávolításával jár, és habár meghatározott helye van, valamint a keverőcső nem kerül elmozdításra, a precizitás végett minden esetben kalibrálásra is sor került. Az üveglakok tisztítása során a por letörésre kerül, majd az esetleges ráégett szennyeződések alkohol segítségével kerülnek eltávolításra. Az égőtér visszahelyezése után felülről behelyezésre kerül a kalibrációs tábla az 21. ábra szerinti helyzetbe. Látható, hogy a lézer által megvilágított sík a keverőcső közepén helyezkedik el, ez az általunk vizsgált sík, az égőtér középsíkja.



21. ábra. Kalibrációs tábla a tüzelőtérben, lézersík.

A 21. ábrán látható a kalibrációs folyamat egyik lépése. Ilyenkor a berendezés úgynevezett adjust mode-ban van, aminek köszönhetően annyira alacsony a lézerintenzitás, hogy védőszemüveg használata nélkül is megfigyelhető. A kalibrációs tábla úgy kerül behelyezésre, hogy a lézersíkkal legyenek egyvonalban a táblán látható bordák. Továbbá ilyenkor megtörténik annak az ellenőrzése is, hogy nem mozdult-e el a lézersík bármilyen okból kifolyólag, illetve, a kamerák a fókuszájának ellenőrzése is. A kalibráció során a táblán látható pontokat érzékelik a kamerák, melyeknek a szoftver tudja a méreteit (a táblán lévő azonosító sorszám alapján), a pontok egymástól való távolságait, így megállapításra kerülnek a valós térbeli távolságok, amik segítségével a sebességek is valós mértékegységben származtathatók.

A mérések mindig egy előre meghatározott mérési menetrend szerint történnek. A teljes rendszernek szükséges a bemelegítése, majd a megfelelő üzemállapot elérése

után a TiO_2 részecskék bejuttatására kerülnek egy csap megnyitásával, ahogy az a 22. ábrán látható és elkészülnek a felvételek. A TiO_2 részecskék kizárólag a felvétel készítés során vannak jelen a rendszerben annak érdekében, hogy ne legyen a ténylegesen szükséges mennyiségnél több elhasználva. Mivel ezen szemcsék sűrített levegő segítségével jutnak el az égőtérbe, ezért az ezzel bejuttatott többlet levegővel korrigálni kell az előzetes füstgáz oxigénszint számításokat. Továbbá az is fontos, hogy ez a levegőmennyiség ne lendítse át egyik stabil állapotból a másikba az égést.

A mérések során üzemállapotonként 300 időpillanathoz kép készült 15 Hz-es frekvenciával, a dt 20 mikroszekundum volt.

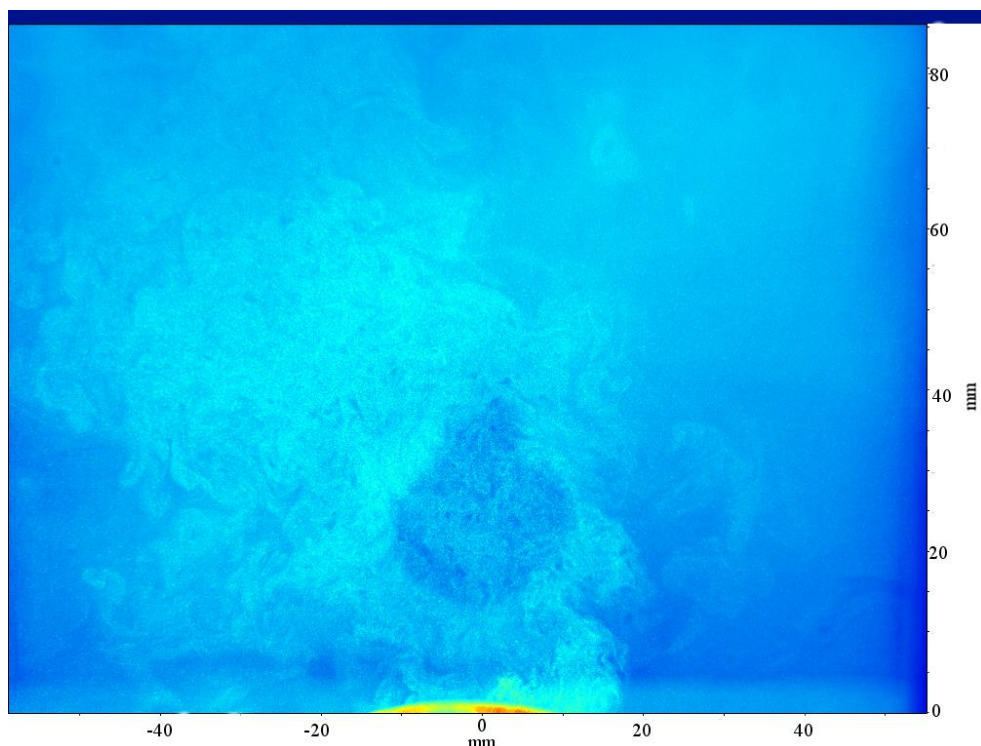


22. ábra. A TiO_2 szemcsék kontrollált bejuttatására szolgáló rendszer.

A csappal ellátott rendszer azért került kialakításra, mivel az általunk vizsgált esetekben a bejuttatandó tracer mennyiség, ami alapvető szempont a feldolgozható mérési eredmények kapcsán, közel azonos. Túl kevés szemcse esetén nem lesz kellően részletes a kapott áramlási kép, túl kevés esetén pedig összemosódnak az áramlási vonalak. A 22. ábrán látható elrendezés segítségével egy előre beállított nyomású levegő van a seederbe juttatva, ami közel állandó mennyiségű részecskét visz be az égőtérbe. Ezáltal nincs szükség minden mérés esetén ismételt beállítani a szükséges levegőmennyiséget a megfelelő részecskesűrűséghez.

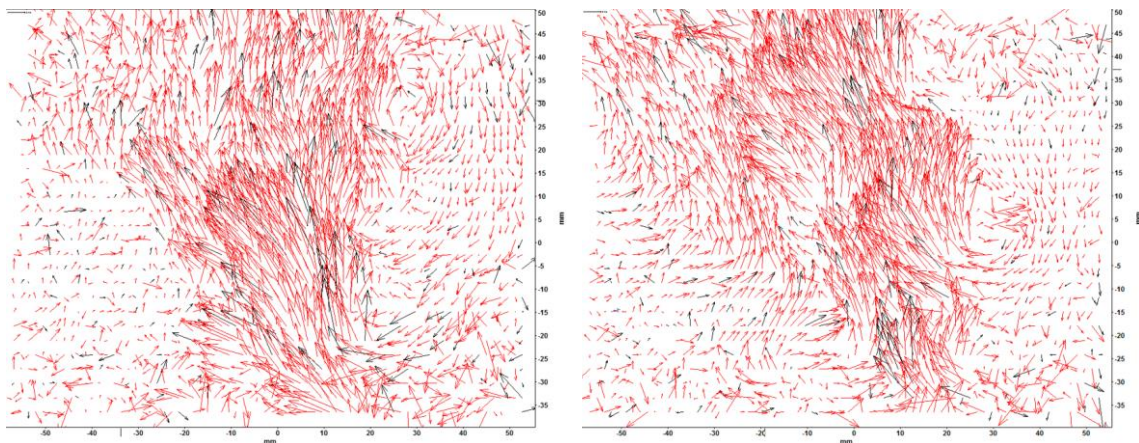
5.4. DaVis programkörnyezet

Miután az adott tüzelési állapotnak megfelelő optikai beállításokat elértük, háromszáz felvételt készítettünk a tüzelésről az adott állapotban, ami alapján vizsgáltuk a sebességmezőket. A végleges felvételek előtt próbafelvételt készítettünk, melyek arra szolgáltak, hogy megbizonyosodjunk a TiO_2 kellő sűrűségéről, valamint arról, hogy az általunk választott dt megfelelő nagyságú. A készült felvételekre mutat példát a 23. ábra. Az adatfeldolgozás két részre bontható, bizonyos jellemzők közvetlenül exportálhatók a DaVis programból, továbbá Matlab környezetben is végeztem utólagos feldolgozást. Ezen folyamat ismertetése a dolgozat egy későbbi szakaszában található.



23. ábra. Dízelolaj „nyers” felvétel eredménye.

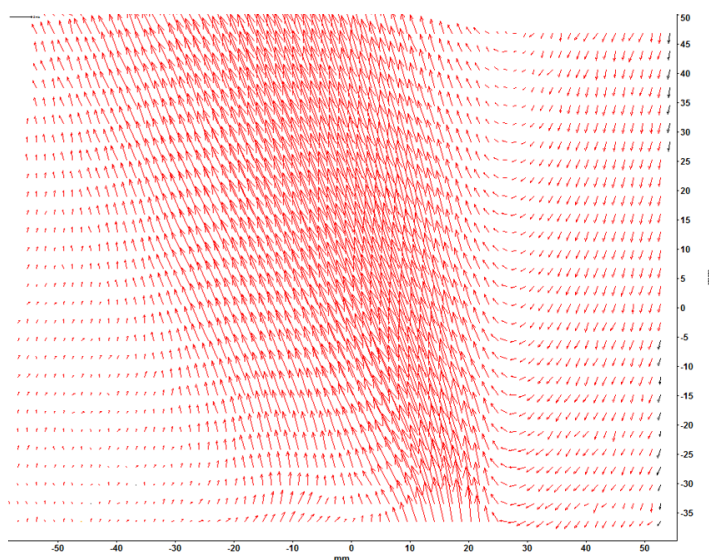
A 23. ábrán látható kép a felső elhelyezkedésű kamera által készített felvétel. Látható rajta alul egy sárgás színű körszelet, ami a $[-15, 10]$ intervallumon helyezkedik el, ez a keverőcső, mely nincs tökéletesen középen a kamerák szemszögéből. Ilyen képekből készült kettő, dt eltéréssel, amelyek alapján számítja a program a vektormezőket. A DaVis programon belül lehetőség van egyéni felvételek vizualizálására, valamint a teljes felvétel sorozat bizonyos megválasztott jellemzőinek vizsgálatára is. Alább, a 24. ábra mutat be két különböző időpillanathoz tartozó sebességmezőt ugyanazon munkapontban készült térfogati égés esetén. Ezek az ábrák jól mutatják a térfogati égés sztochasztikus viselkedését.



24. ábra. Két pillanatnyi vektormező dízelolaj térfogati égése során.

A 24. ábrán a piros vonalak vektorok, melyet úgy alkot a program, hogy megvizsgál kettő, a 23. ábrán látható képhez hasonló képet, majd megpróbál összetartozó részecskéket keresni, melyek elmozdulása alapján megalkotja a vektormezőket. Fontos a kiértékeléskor megfelelően megválasztott vizsgálati ablak mérete, mivel túl kicsi ablak esetén kilép a vizsgálati területről a részecske, túl nagy esetén pedig a párosítás nem lesz megfelelő. A megfelelő beállítások előzetes próbamérések során kapott eredmények segítségével kerültek definiálásra.

Habár egy fő irány látható a 24. ábra képein is, miszerint egy középről a bal felső irányba tartó áramlás a domináns, szükséges az összes felvétel analizásása, a vektormezők átlagának megalkotása. Ez problémákhoz vezethet, mivel az átlagolás képes fontos jellemzőket eltüntetni, ezért szükséges a 300 felvételen is végig menni, nem elegendő az átlagukkal töténő elemzés.

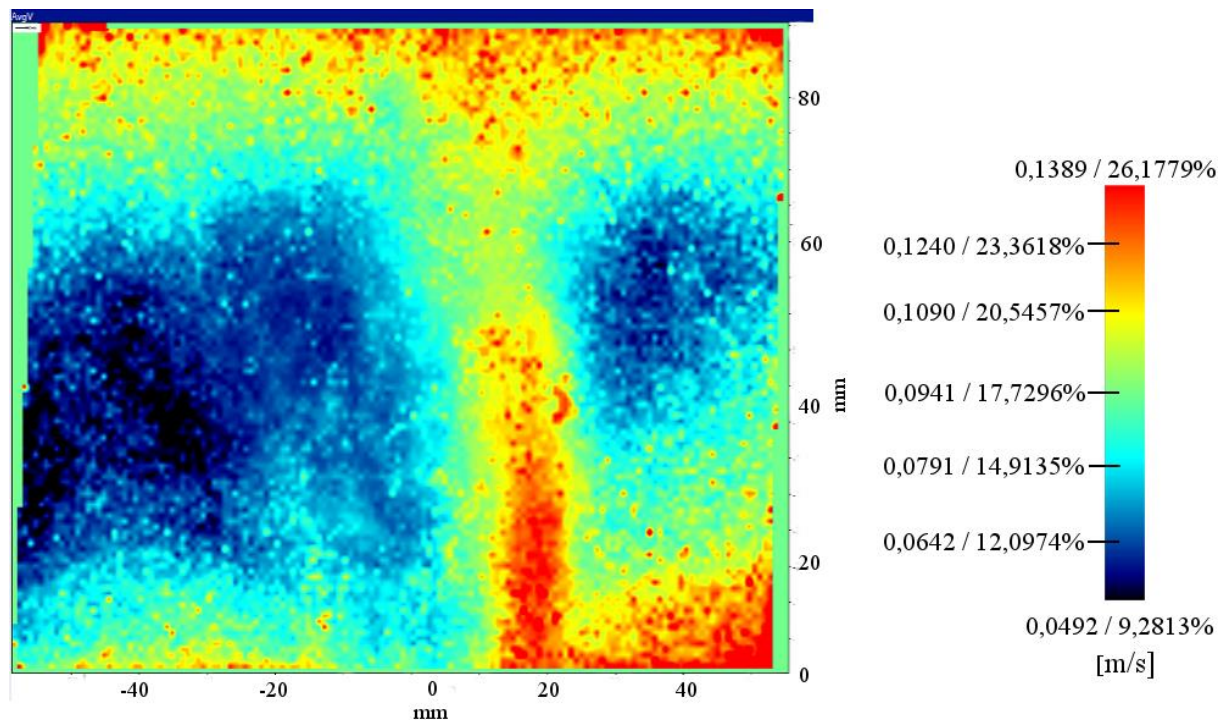


25. ábra. Dízelolaj térfogati égés vektormezői alkotta átlagos vektormező.

A 25. ábrán látható vektormező több vetkormező alkotta átlag. Itt is megfigyelhető az előzőleg már megállapított domináns áramlási irány, de sokkal egyértelműbb és letisztultabb képet ad. Látható, hogy nem teljesen szimmetrikus az áramlás, van benne egy kis eltolódás. Ez annak köszönhető, hogy a porlasztó kissé ferde, ezért a bevezetett porlasztó levegő megnyomja oldalra az áramlást.

A DaVis programban lehetőség van háromdimenziós vektormezők megtekintésére is. Itt azon felül, hogy lehetőség van különböző tengelyek mentén forgatni az áramlást, adott tulajdonság, például abszolút sebesség szerint színezhethők a vektorok. Háromdimenziós vektormezők esetében fontos kijelölni a koordináta rendszer tengelyeinek irányát. x tengelynek választottuk a lézer fényének síkjába eső vízszintes irányt, függőlegesen felfelé mutat az y tengely, ezekre merőlegesen vízszintes irányban pedig a z tengely. Ideális esetben azt várnánk, hogy egy közel szimmetrikus áramlást kapunk. Mivel esetünkben a porlasztó ferdesége miatt jelentkezik aszimmetria, így itt csak az elvárható, hogy az z irányú sebességek nagyságrendileg megegyeznek az x irányú sebességekkel.

Ide kapcsolódik, hogy a program által alkotott vektormezőkhöz tartozik valamilyen szintű bizonytalanság. A program tulajdonos ipari titoknak tekinti ennek számítását, így a bizonytalanság számításának módszere nem ismert, csupán annyi, hogy összefüggésben van többek között a részecske sűrűséggel is. A programban elérhető számos releváns jellemzője a vektormezőknek, mint például a bizonytalanság, szórás, turbulens kinetikus energia, melyek kimentésre kerültek.



26. ábra. Dízelolaj, 7% füstgáz O_2 szint, 200 °C, 0,6 bar porlasztónyomáson mért képek átlag vektormező y irányú sebességeinek bizonytalansága.

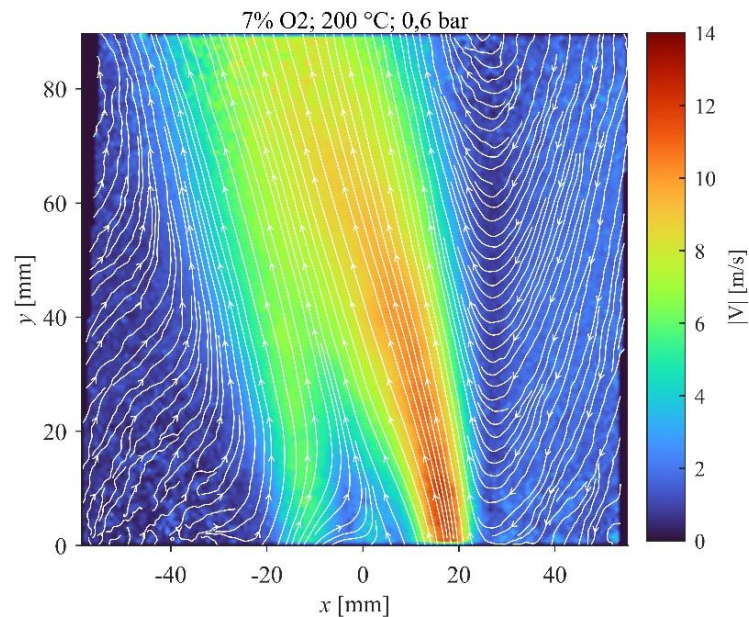
A 26. ábra mutatja be az egyik mérési pont vektormezőjének y irányú sebességének bizonytalanságát. Az ábra színezése a globális minimum és maximum értékek szerint történt, a csatolt színskálán láthatóak az értékek abszolút és százalékos mennyiségben. Látható, hogy a legnagyobb bizonytalanság a magas sebességű részhez tartozik, illetve a szélső részekhez.

Fontos megjegyezni, hogy amennyiben a két különböző tüzelőanyagra vonatkozó, de azonos paraméterekkel (füstgáz oxigénszint, porlasztónyomás, égéslevegő hőmérséklet) rendelkező mérési pontok esetén mindkettő kapcsán alacsony bizonytalanság tapasztalható, akkor a két tüzelőanyag viselkedésének összehasonlításából levont következtetések kellően megalapozottnak tekinthetők.

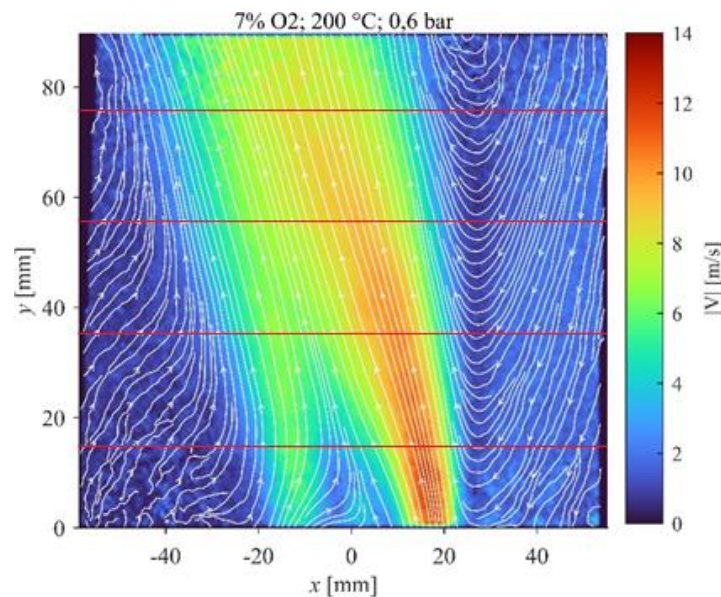
5.5. Matlab programkörnyezet

Ahhoz, hogy Matlab környezetben is vizsgálni tudjam a kapott eredményeket, szükség volt a PIVMat függvénycsomag használatának megismerésére, mely egy kifejezetten PIV eredmények feldolgozására kidolgozott eszköztár [24]. A DaVis programból VC7 kiterjesztésű fájlokat a „loadvec” paranccsal beolvasva struktúra jön létre, mely tartalmazza az átlag vektormező vektorjainak x , y , z komponensű sebességeit mátrix alakban. Az adatok beolvasása után Pitagorasz-tételt használva kerültek az abszolút

sebességek meghatározásra, majd ábrázolásra skálármezőként. Annak érdekében, hogy láthatóak legyenek az áramvonalak, a „streamslice” beépített függvényt használtam. Az ezen megoldással készített ábrákra mutat példát a 27. ábra. Továbbá a sebesség profilok elkészítése is Matlab környezetben történt. Ekkor a keverőcső szájától mért 15, 35, 55, 75 mm függőleges távolságban (y irány) kerültek kigyűjtésre és ábrázolásra az adott sebesség komponensek. A magasságokat jelöli a 28. ábra.



27. ábra. Áramvonalakkal ellátott skálármező, 250 °C-os előmelegítési hőmérséklet-hez és 0,6 bar porlasztónyomáshoz tartozó dízelolajos tüzelés átlagolt sebességvektorainak felhasználásával.



28. ábra. A sebesség profilok vizsgálatokor figyelembe vett magasságok piros vonalakkal jelölve.

6. EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

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.

1. táblázat. A hat mérési pont releváns tüzeléstechnikai paramétereit.

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

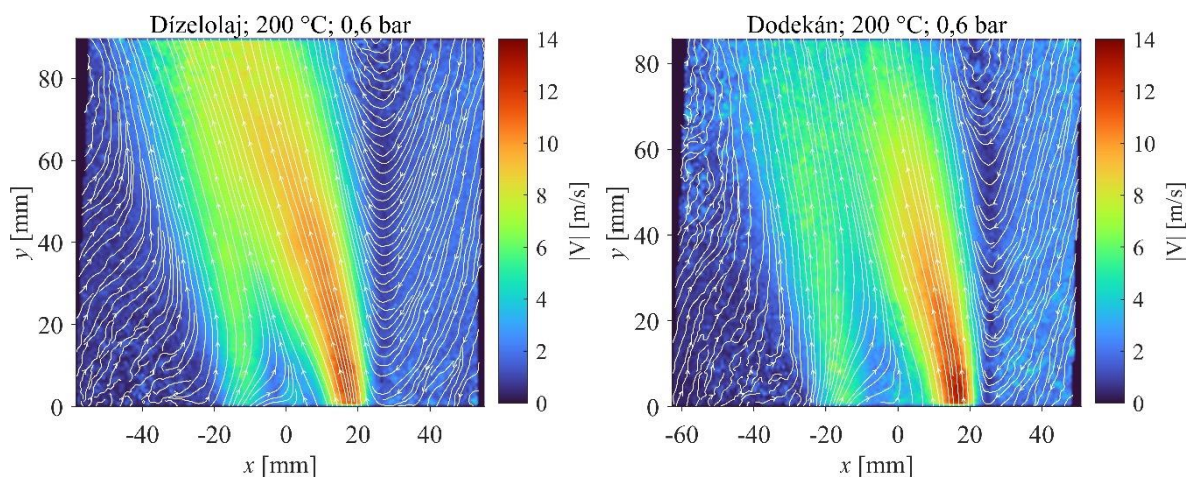
Az elvégzett mérések során a térfogati égés minden esetben megvalósult, dízelolajjal és dodekánnal történő tüzelés esetén egyaránt. Ez már önmagában jelentős eredmény, hiszen lángalak szempontjából alátámasztja a dodekánnal való helyettesítés létjogosultságát szimulációk során. A lángalakokról láthatóak képek dízelolajos mérés esetén a 29. ábrán.



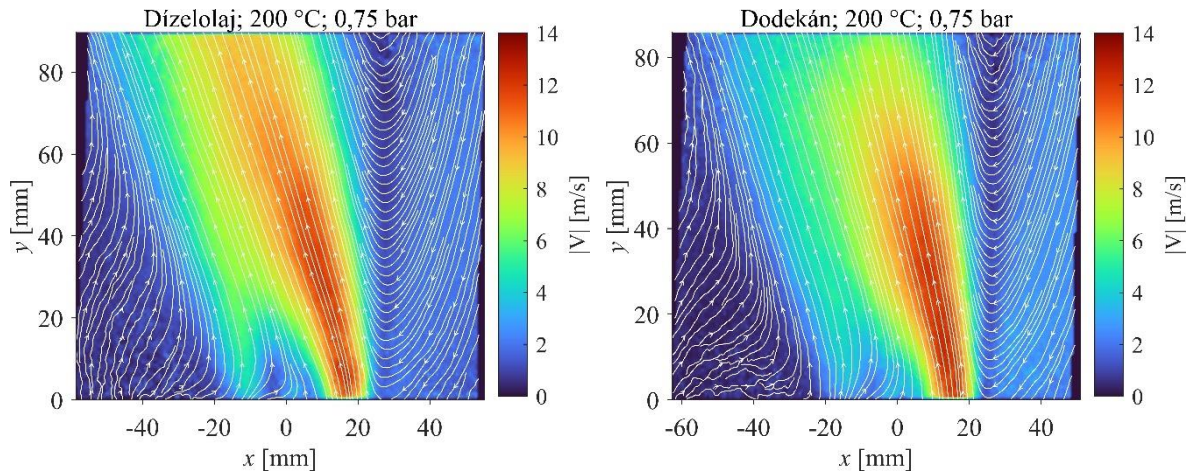
29. ábra. Pillanatképek dízelolajos térfogati égésről.

A 29. ábrán a felső sorban látható képek a 200 °C levegő előmelegítéshez, az alsó sorban lévők 250 °C levegő előmelegítéshez tartoznak. A porlasztó nyomás a bal oldali képeken 0,6 bar, a középsőkön 0,75 és a jobb oldalikon 0,9 bar. Fontos megjegyezni azonban, hogy a 250 °C levegő előmelegítési hőmérsékleten 0,6 és 0,9 bar porlasztónyomás mellett a dodekán égése időközönként pillanatszerűen átváltott egyenes lángalakra. Ez az előmelegítési hőmérsékletnek köszönhető valószínűsíthetően, mivel ahogy a tüzelőanyagok fizikai jellemzőinek vizsgálatánál bemutattam, a dodekán forráspontja a dízelolaj desztillációs görbéje alatt helyezkedik el, ami nagyobb illékony-ságot, gyorsabb párolgást eredményez. Ezért a magasabb előmelegítési hőmérséklet esetén előfordulhat, hogy már a keverőcsőből való kilépéskor begyullad a keverék, nem késleltethető a gyulladás, mely egyenes alakú lángot eredményez. A hőmérséklet növelésének hatását ennek alapján a jövőben érdemes összehasonlítani CFD számítások eredményeivel.

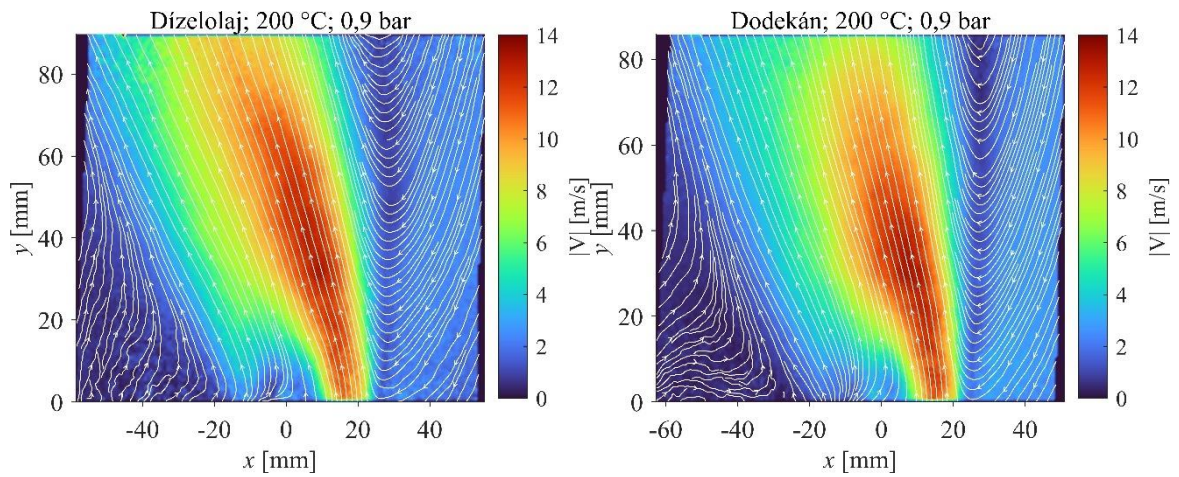
A következőkben bemutatom a mérési eredmények alapján, az 5.5 alfejezetben kifejtett módszerrel meghatározott átlagos sebességmezők skalármezőit. Mivel az összes mérés 7 V/V% füstgázoxigénszint mellett történt, így a továbbiakban ezt az ábrákon nem tüntetem fel, kizárólag a tüzelőanyag típusát, az előmelegítési hőmérsékletet és a porlasztónyomást.



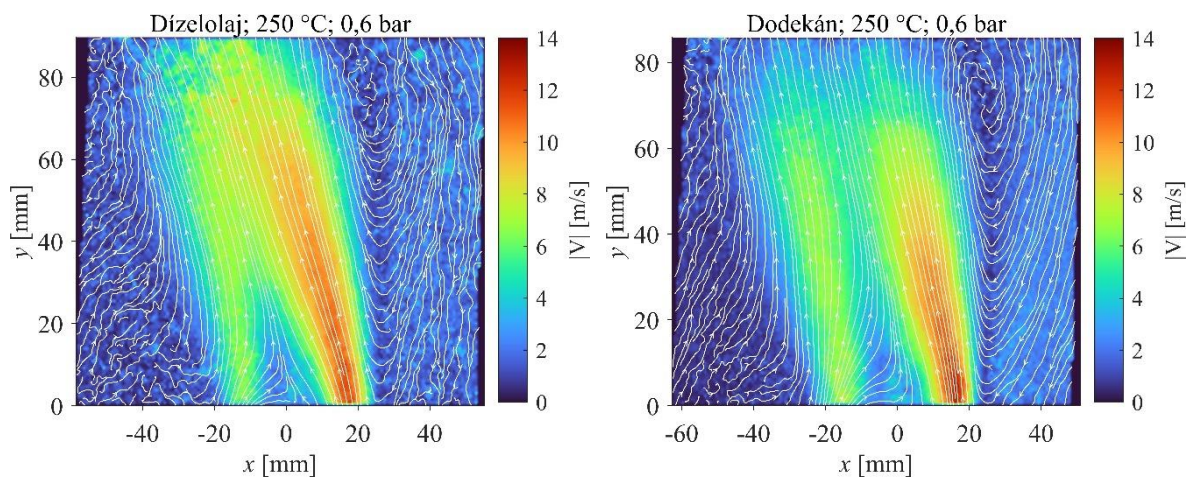
30. ábra. Dízelolaj (balra) és dodekán (jobbra) sebességmezője 200°C-os levegő előmelegítési hőmérséklet és 0,6 bar porlasztónyomás esetén.



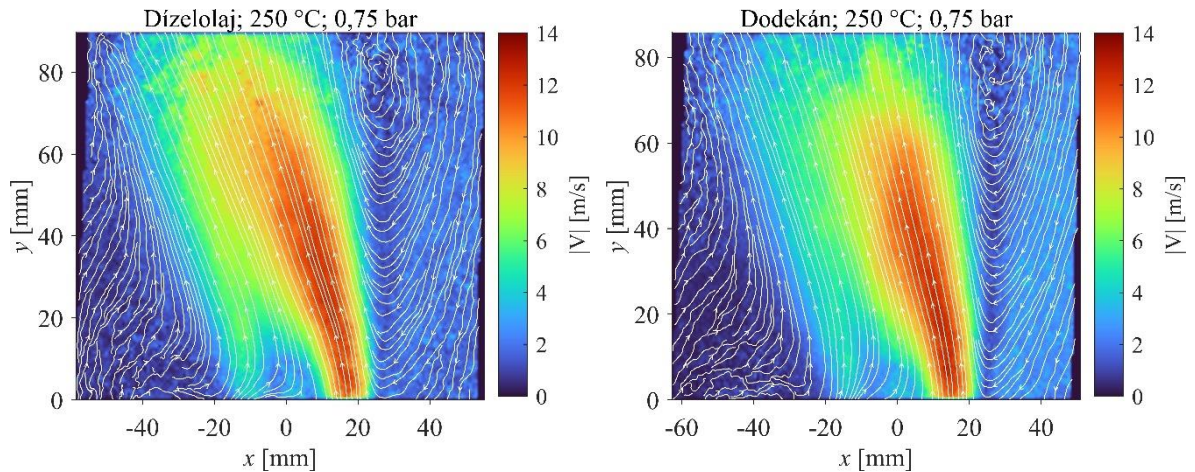
31. ábra. Dízelolaj (balra) és dodekán (jobbra) sebességmezője 200°C-os levegő előmelegítési hőmérséklet és 0,75 bar porlasztónyomás esetén.



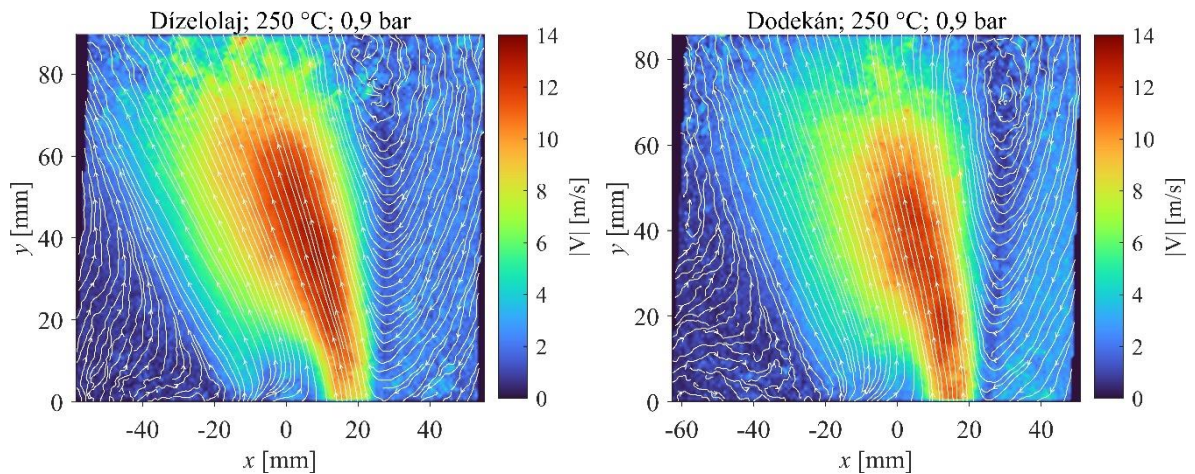
32. ábra. Dízelolaj (balra) és dodekán (jobbra) sebességmezője 200°C-os levegő előmelegítési hőmérséklet és 0,9 bar porlasztónyomás esetén.



33. ábra. Dízelolaj (balra) és dodekán (jobbra) sebességmezője 250°C-os levegő előmelegítési hőmérséklet és 0,6 bar porlasztónyomás esetén.



34. ábra. Dízelolaj (balra) és dodekán (jobbra) sebességmezője 250°C-os levegő előmelegítési hőmérséklet és 0,75 bar porlasztónyomás esetén.



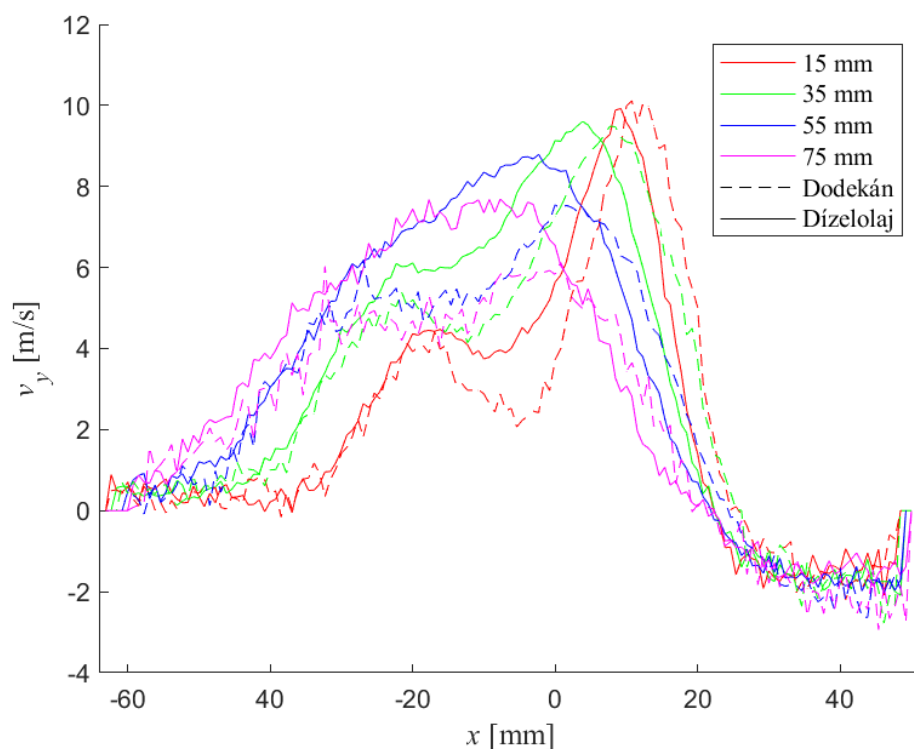
35. ábra. Dízelolaj (balra) és dodekán (jobbra) sebességmezője 250°C-os levegő előmelegítési hőmérséklet és 0,9 bar porlasztónyomás esetén.

A 30-35. ábrákon láthatóak a mérések kiértékelése során meghatározott átlagolt sebességvektorok segítségével alkotott skalármezők, melyek tartalmazzák az áramvonalakat, párba állítva az azonos mérési paraméterekhez tartozó dízelolajos és dodekános tüzeléseket. Jellegre az ábrák jó egyezést mutatnak. Ideális esetben kettő, egyforma felszálló sugárszeletet látnánk melyek szimmetria tengelye a keverőcső közepe lenne. A mérési elrendezéssel sajnos ezeket nem lehet reprodukálni, mivel a porlasztó levegő bevezetése nem tökéletesen középen és függőlegesen történik, ezért megnyomja az egész áramlást, ez okozza az ábrákon látható ferdeségeket.

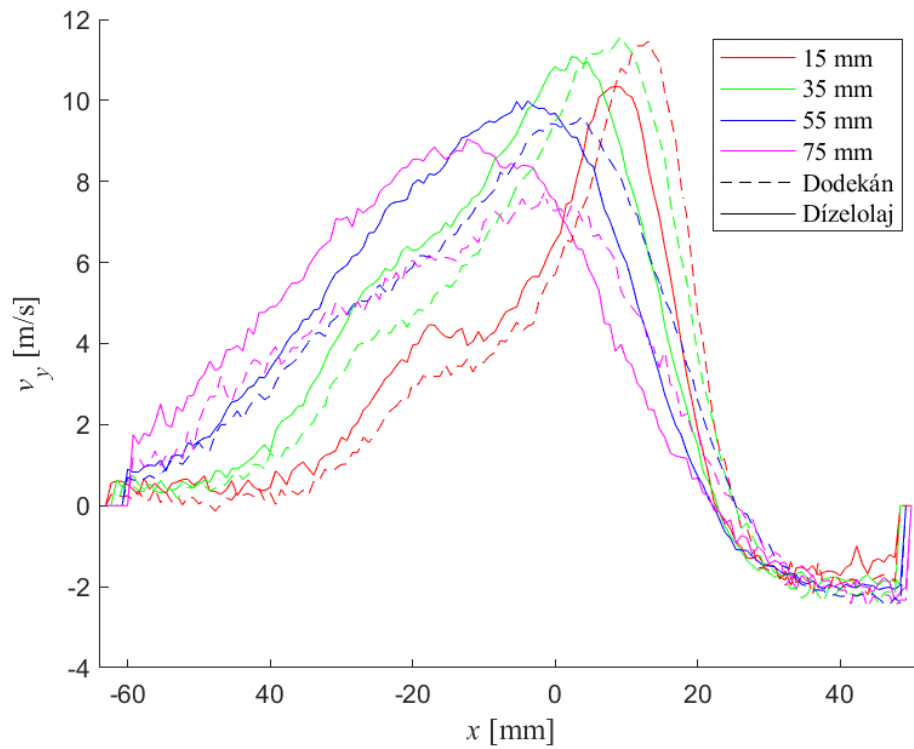
Az ábrákon továbbá megfigyelhető, hogy a porlasztónyomás növekedésével növekszik az abszolút sebesség, ami megfelel az elvárásainknak. Továbbá a porlasztott le-

vegő bejuttatása hatással van az égési levegő perdületességére, a nagyobb nyomás jobban csökkenti az égési levegő perdületét, ezért kisebb nyomásoktól a nagyobbak felé haladva megfigyelhető a bal oldali ág visszaszorulása is. Nagy különbség nem figyelhető meg a paraméterek változtatása esetén, ami pozitív tulajdonság, mivel azt mutatja, hogy az égés stabil állapotú, nem esik ki könnyen ezen egyensúlyi helyzetéből. Habár a 250 °C levegő előmelegítési hőmérsékleten 0,6 és 0,9 bar porlasztónyomás esetén a dodekán véletlenszerű időközönként átváltott térfogati égésből pillanatszerűen egyenes alakú lángba, a 300 időpillanat alkotta átlag képeken ez nem jelenik meg. Összességében fontos tehát kiemelni, hogy a vizsgált mérési pontokban a két tüzelőanyag esetében a kialakuló maximális sebességek is jó egyezést mutatnak.

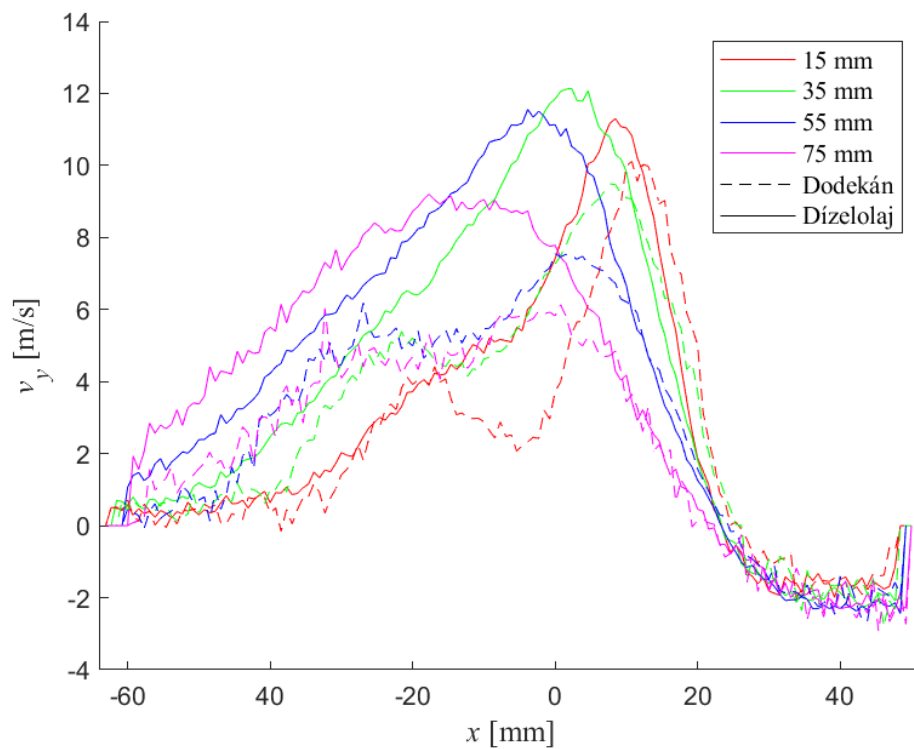
Az átlagos sebesség-vektormezőkön kívül az 5.5 fejezetben leírtak szerint megvizsgáltam az y irányú sebességkomponensek profiljait.



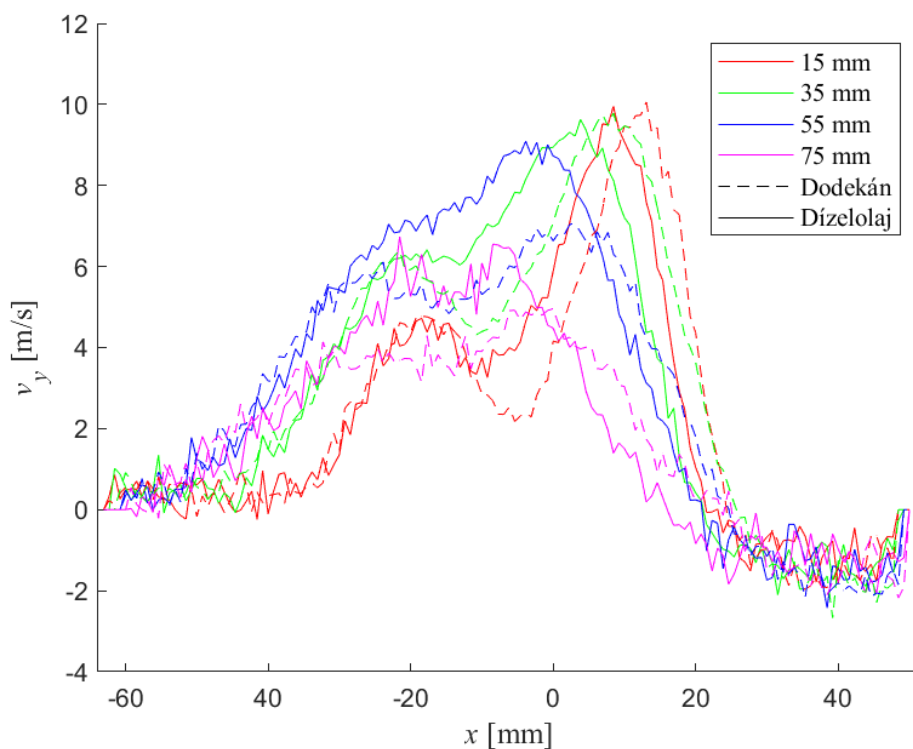
36. ábra. 200 °C levegő előmelegítési hőmérséklethez és 0,6 bar porlasztónyomáshoz tartozó y komponensű sebességprofilok négy magasságban a keverőcső szájától.



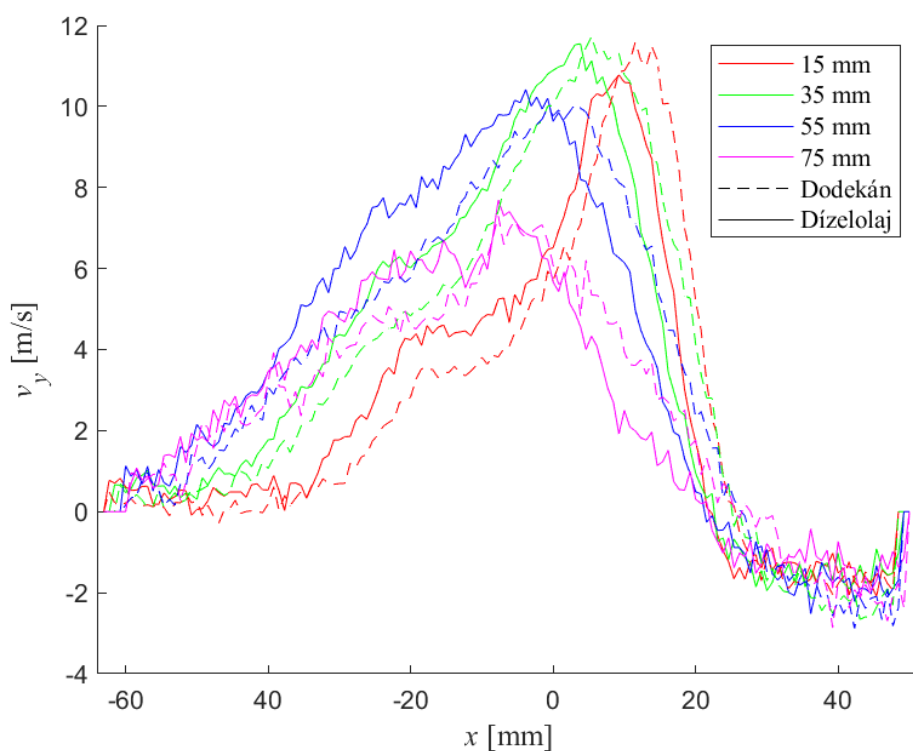
37. ábra. 200 °C levegő előmelegítési hőmérséklethez és 0,75 bar porlasztónyomáshoz tartozó y komponensű sebességprofilok négy magasságban a keverőcső szájától.



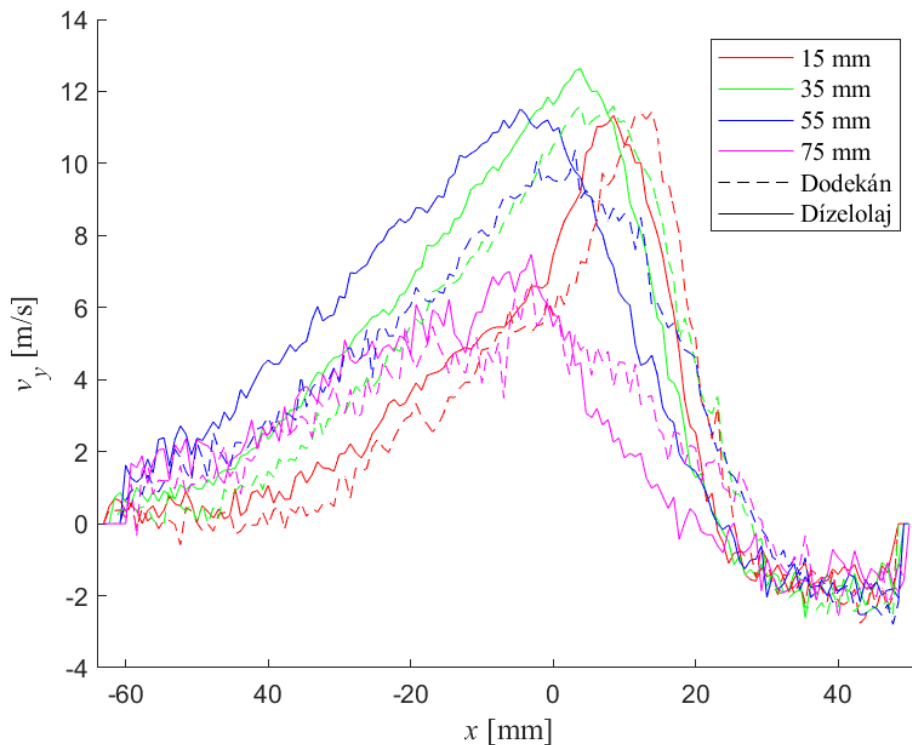
38. ábra. 200 °C levegő előmelegítési hőmérséklethez és 0,9 bar porlasztónyomáshoz tartozó y komponensű sebességprofilok négy magasságban a keverőcső szájától.



39. ábra. 250 °C levegő előmelegítési hőmérsékletéhez és 0,6 bar porlasztónyomáshoz tartozó y komponensű sebességprofilok négy magasságban a keverőcső szájától.



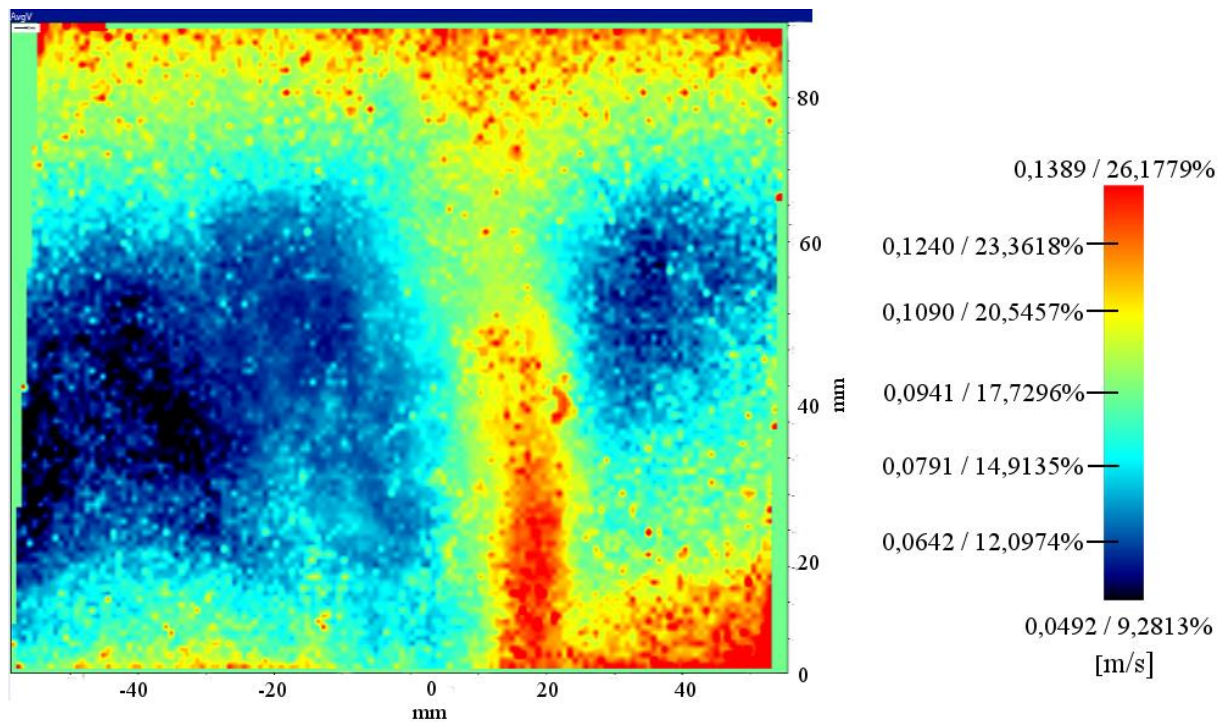
40. ábra. 250 °C levegő előmelegítési hőmérsékletéhez és 0,75 bar porlasztónyomáshoz tartozó y komponensű sebességprofilok négy magasságban a keverőcső szájától.



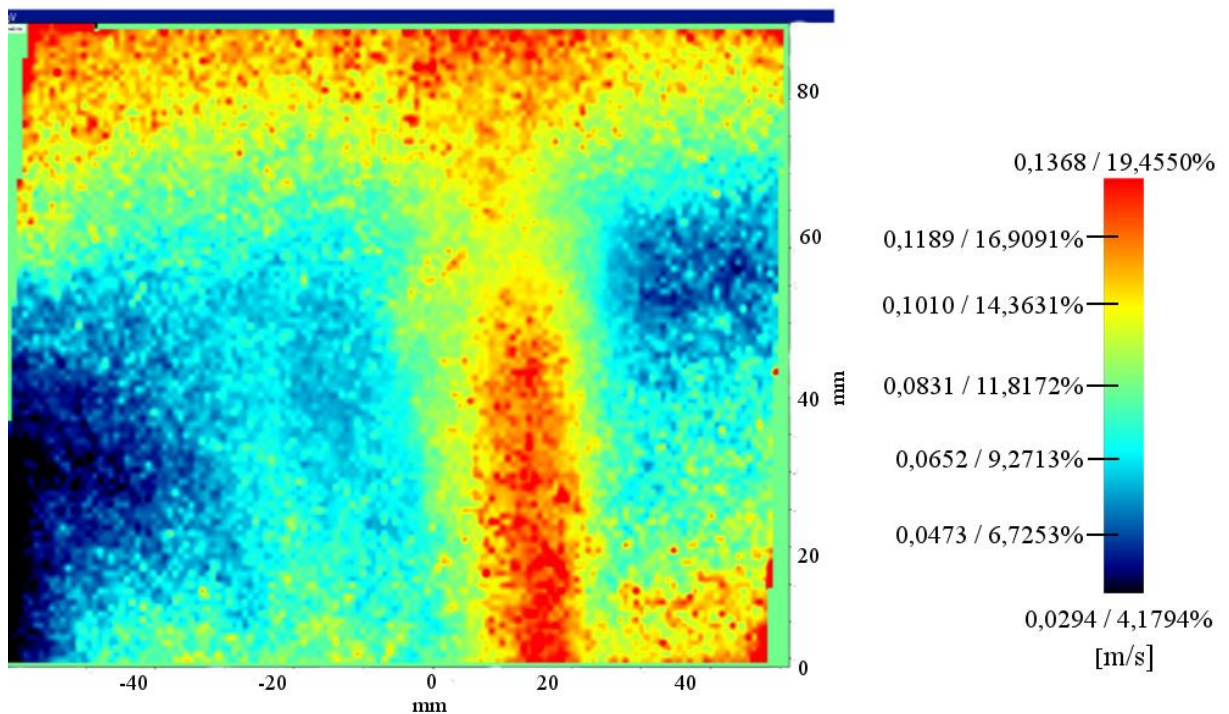
41. ábra. 250 °C levegő előmelegítési hőmérséklethez és 0,9 bar porlasztónyomáshoz tartozó y komponensű sebességprofilok négy magasságban a keverőcső szájától.

A 36-41. ábrákon láthatóak az y irányú sebességek profiljai 15, 35, 55, és 75 mm magasságban különböző színekkel, valamint a dízelolajra vonatkozó mérések során kapott átlag vektormezők értékei folytonos, a dodekánra vonatkozó méréseké pedig szaggatott vonallal jelölve. Azért ezen komponens került elemzésre, mert az áramlási irány szempontjából ez a legdominánsabb. Látható, hogy sok esetben közel együtt futnak az azonos színű vonalak, jó egyezést mutatnak, különösen a +10 mm-es x irányú távolság körüli csúcsosodás után, ahol a visszaáramlás és a nyíróréteg található. A tüzelőtér bal oldalában szintén visszaáramlás található, amely negatív előjelű y irányú sebességkomponenseket eredményez.

Fontos megjegyezni, hogy a sebesség értékek bizonyos bizonytalansággal kerülnek meghatározásra, ezért amikor a profilok egyezőségét vizsgáljuk, figyelembe kell venni, hogy adott mérési eredményekhez milyen bizonytalanság tartozik a különböző vizsgált magasságokban. A 42. ábrán látható a 200 °C levegő előmelegítési hőmérséklethez és 0,6 bar porlasztónyomáshoz tartozó mérési eredmény átlagmátrixának y irányú komponenseinek bizonytalansága. A 43. ábrán ugyanezen paraméterek melletti dodekánra vonatkozó mérésre látható ezen eredmény.



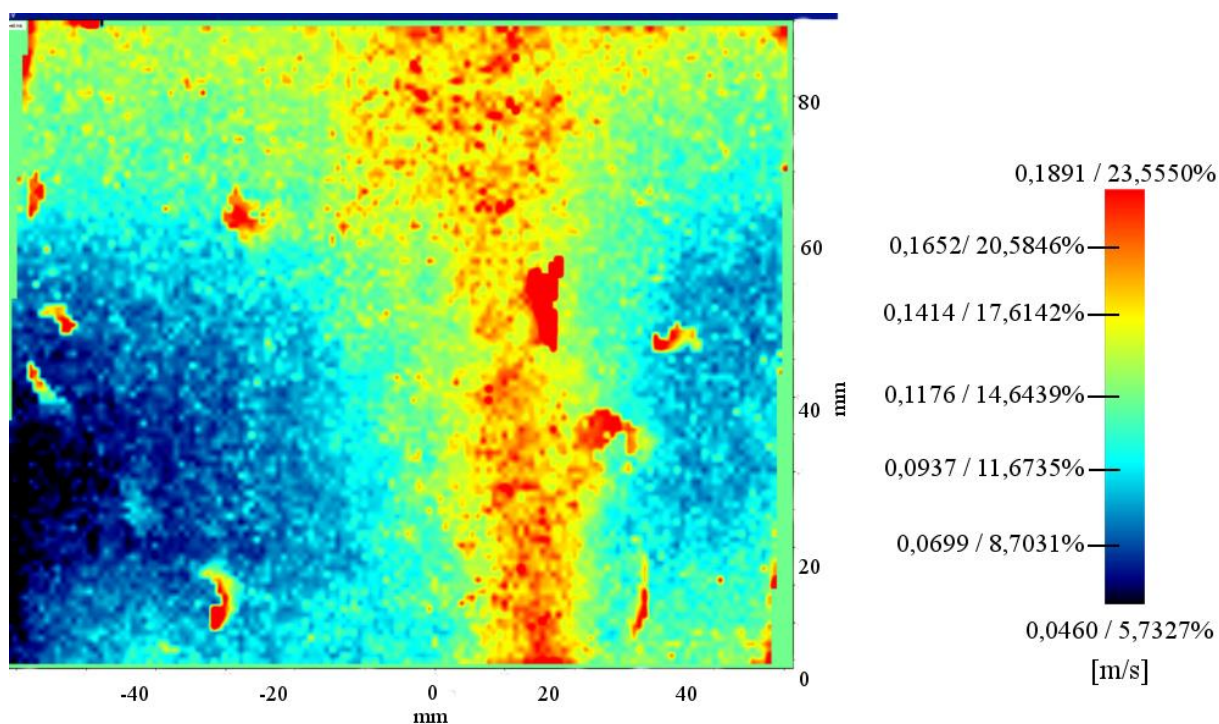
42. ábra. 200 °C levegő előmelegítési hőmérséklethez és 0,6 bar porlasztónyomáshoz tartozó dízelolajra vonatkozó mérési eredmény átlagmátrixának y irányú sebességkomponenseinek bizonytalansága.



43. ábra. 200 °C levegő előmelegítési hőmérséklethez és 0,6 bar porlasztónyomáshoz tartozó dodekánra vonatkozó mérési eredmény átlagmátrixának y irányú sebességkomponenseinek bizonytalansága.

Megfigyelhető, hogy a jellegre nagyon hasonlóak az ábrák, ami elmondható a többi mérés esetében is. Az y irányú sebességkomponensek legnagyobb bizonytalansága egyszer a legnagyobb sebességekhez tartozik, továbbá a felső és alsó részekhez. A Da-Vis szoftver fejlesztői know-how-ként tekintenek a mérési bizonytalanság meghatározására, így annak pontos módszertanát nem közlik a felhasználóval. Így a bizonytalanság pontos okára valószínűsíthető, hogy a részecskesűrűséggel összefüggésben van.

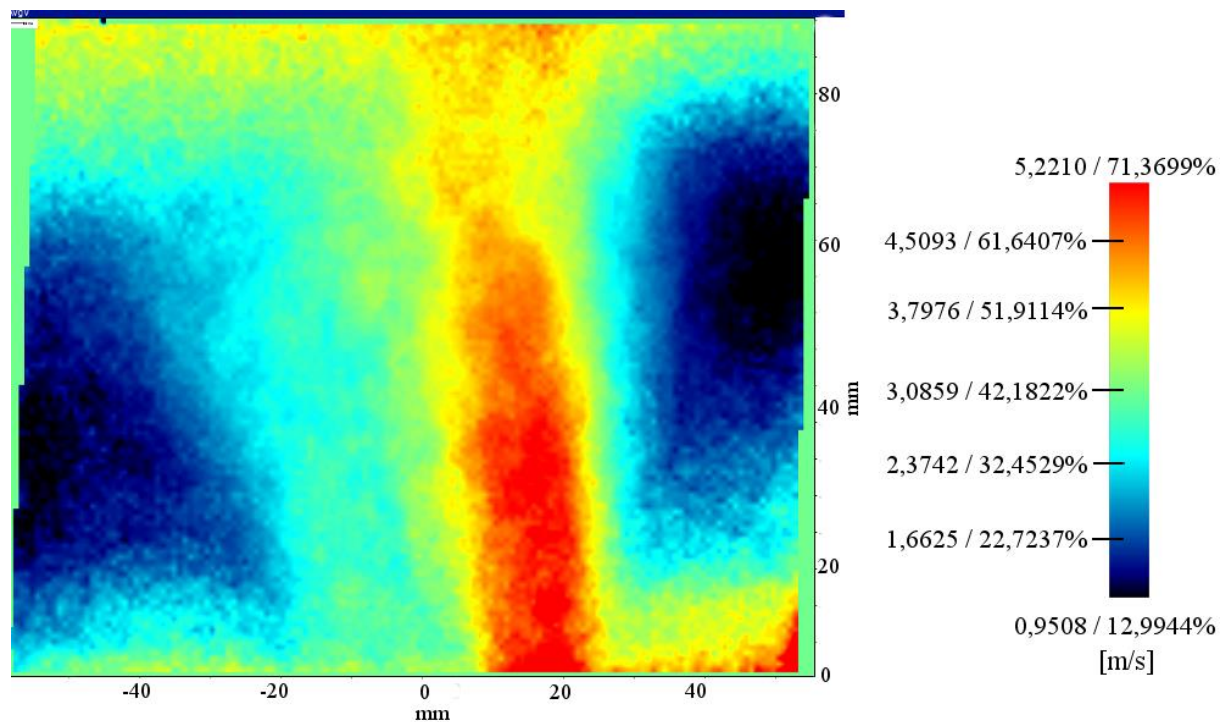
Korábban említésre került, hogy a dodekános mérések során két 250 °C-hoz tartozó mérés esetén ideiglenes átváltások történtek térfogati égésből egyenes lángalakra. Habár ez a kiátlagolt képeken nem mutatkozik meg, de a bizonytalansági ábrákon magas bizonytalanságot reprezentáló foltok jelennek meg. Ezt mutatja be a 44. ábra.



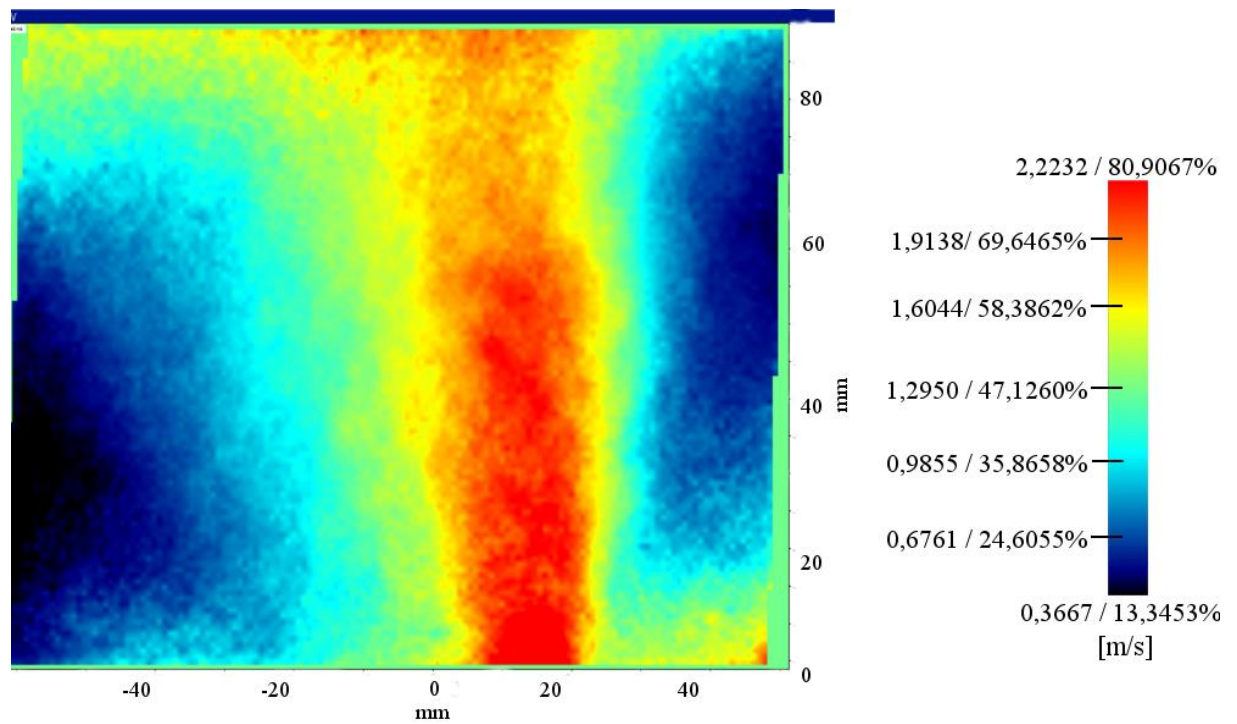
44.. ábra. 250 °C levegő előmelegítési hőmérséklethez és 0,9 bar porlasztónyomáshoz tartozó dodekános mérési eredmény átlagmátrixának y irányú sebességkomponenseinek bizonytalansága.

Összeségében elmondható ezen adatok alapján, hogy a sebességprofilok jó egyezést mutatnak jellegre, viszont értékbeli összehasonlítás esetén figyelembe kell venni az adott pontokhoz tartozó bizonytalanságokat. A sebességmezők és a sebességprofilok jó egyezése alapján kijelenthető, hogy a vizsgált mérési pontokban a két anyag esetében ugyanúgy kialakul a térfogati égés és a reakciózóna jelenléte, valamint annak visz-

szahatása a sebességmezőre nem mutatkozik különbözően a két anyagra. Ezért a do-dekán helyettesítőként való alkalmazása jelen körülmények között szimulációs vizsgálatoknál megalapozott, jól használható tűztértervezési feladatokhoz. A vizsgálataim az átlagolt vektormezőkre fókuszáltak, mivel térfogati égés esetén egy erősen fluktuáló sebességmező alakul ki, ezért a pillanatnyi állapotokat nem célszerű összehasonlítani, átlagolni kell és úgy kell mérést méréssel, valamint mérést számítással összehasonlítani a későbbiekben. A fluktuációra mutatnak példát a 45. és 46. ábrák, melyeken az y irányú sebességkomponens szórása látható, melyek szintén jó egyezést mutatnak a két tüzelőanyagra. Megfigyelhető, hogy a nagyobb sebességű területekhez tartoznak a legnagyobb szórás értékek.



45. ábra. 200 °C levegő előmelegítési hőmérséklethez és 0,75 bar porlasztónyomáshoz tartozó dízelolajos mérési eredmény átlagmátrixának y irányú sebességkomponenseinek szórása.



46. ábra. 200 °C levegő előmelegítési hőmérsékletéhez és 0,75 bar porlasztónyomáshoz tartozó dodekános mérési eredmény átlagmátrixának y irányú sebességkomponenseinek szórása.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozatom célja, térfogati égés során kialakuló sebességmezők kísérleti vizsgálata és összehasonlítása két folyékony tüzelőanyag, a dízelolaj és dodekán esetében. Ennek az elemzésnek a fontosságát az adja, hogy a tanszéki tüzelőberendezésen megvalósítható Keverék Hőmérséklet-szabályozott tüzeléssel létrehozható térfogati égés rendkívül előnyös károsanyag-kibocsátás szempontjából, továbbá ezen megvalósítási mód egyedinek számít jelenleg. Ezt az ígéretes koncepciót tehát szükséges vizsgálni különböző módszerekkel.

A vizsgálati módszerek egyike a CFD szimulációk. Ezen numerikus számítások nagy számítási igénnyel rendelkeznek, aminek csökkentése érdekében gyakori, hogy a többkomponensű tüzelőanyagokat, mint amilyen a dízelolaj is, egy, a fizikai és kémiai tulajdonságaikat jól reprodukáló, alacsony komponensszámú tüzelőanyaggal helyettesítik, amilyen a dodekán is. Ezen okoknál fogva alapos irodalomkutatást végeztem a térfogati égés kialakulása kapcsán, valamint összehasonlítottam a dízelolaj és dodekán cseppképződést, párolgást és reakciókinetikai paramétereket befolyásoló tulajdonságait. Habár eltérések tapasztalhatóak ezen jellemzők között, jellegre és nagyságrendileg megegyeznek olyan mértékben, hogy igazolják ezen egykomponensű helyettesítő tüzelőanyag használatát.

Annak érdekében, hogy össze tudjam hasonlítani az égésük során kialakuló sebességviszonyokat, méréseket végeztem Particle Image Velocimetry (PIV) technikával. A Központi Fizikai Kutatóintézet által rendelkezésre bocsátott PIV rendszert integráltuk a tanszéken megtalálható tüzelőberendezéshez, majd az előzetes tesztmérések elvégzése során szerzett tapasztalatok értékelése után végrehajtottam a méréseket.

Összesen hat mérési pontban, kettő különböző levegő előmelegítési hőmérsékleten és három különböző porlasztónyomás mellett mértem mind a kettő tüzelőanyag esetén úgy, hogy a füstgáz oxigéntartalma 7 V/V% volt. Mindkettő tüzelőanyag esetében sikerült minden mérési pontban megvalósítani a térfogati égést, mely már önmagában is megtámogatja a dodekánnal való helyettesíthetőség létjogosultságát. Ezen felül vizsgáltam a kialakuló átlagos sebességmezők jellemzőit, melyek szintén jó egyezést mutattak. A kialakuló átlagos sebességmezőket áramvonalakkal ellátott skalármezők segítségével hasonlítottam össze, valamint vizsgáltam és összehasonlítottam az égőszájtól adott távolságokban vett y irányú sebességkomponensek profiljait, amik jellegre és számszerűen is közel azonosnak bizonyultak. Mindezeket figyelembe véve kijelent-

hető, hogy a vizsgált paramétertartományon a dízelolaj és a dodekán esetében egyaránt kialakuló térfogati égés során létrejövő reakciózóna gyakorlatilag azonos mértékű visszahatást mutat a sebességmezőre. Ennek értelmében a dodekán, mint egykomponensű dízelolaj-helyettesítő tüzelőanyag kellő megalapozottsággal használható előzetes tűztértervezési feladatokhoz.

Az eddigi eredmények előre mutatók, azonban vannak még továbblépési lehetőségek, mint például a mért értékek mélyebb statisztikai elemzése, valamint további mérések, melyek a z irányú sebességkomponenst helyezik fókuszba. Ezekkel a későbbi numerikus vizsgálatok tovább támogathatók.

8. SUMMARY

The main aim of this research was to analyze and compare the velocity fields during distributed combustion for Diesel oil and dodecane. Distributed combustion in the newly-developed Mixture Temperature-Controlled combustion chamber results in extremely low emission. This is promising concept regarding the usage of fossil fuels. However, continuous analysis is still required.

Combustion process can be analyzed by CFD simulations. Liquid fuels used in practice have a high number of components. In order to save CPU time in simulations, the original fuel, Diesel oil is substituted with surrogates that can reproduce fuel characteristics but have lower number of components. Dodecane is a frequently used single-component surrogate.

Firstly, I carried out a thorough literature review regarding the theoretical background of distributed combustion and compared the properties of Diesel oil and dodecane, affecting droplet formation, evaporation, and reaction kinetic parameters. Although there are differences between these characteristics, they are similar in nature and magnitude to the extent that they justify the use of this single-component surrogate fuel.

In order to be able to compare the velocity conditions during their combustion, I performed measurements using Particle Image Velocimetry (PIV). The PIV system provided by the Központi Fizikai Kutatóintézet was integrated with the combustion test rig in the university department and after evaluating the experience gained during the preliminary test measurements, I carried out the combustion measurements.

I measured a total of six measurement points, two different air preheating temperatures and three different atomizer pressures for both fuels. The oxygen content of the flue gas was 7 V/V%. In the case of both fuels, distributed combustion was achieved at all measurement points, which already supports the substitutability of Diesel with dodecane in simulations. In addition, I examined the characteristics of the average velocity fields, which also showed good agreement. I compared the resulting average velocity fields with the help of scalar fields with streamlines, as well as analyzed and compared the profiles of the y -direction velocity components at given distances from the mixing tube, which turned out to be almost identical in nature and numerically. Taking all of this into account, it can be stated that the reaction zone occurring during distributed combustion for both Diesel oil and dodecane in the investigated parameter range has practically the same effect on the velocity field. Consequently, dodecane, as

a single-component Diesel oil surrogate fuel, can be used with sufficient justification for preliminary combustion chamber design.

The results so far are promising, but there are still possibilities for further progress, such as deeper statistical analysis of the measured values, as well as additional measurements that focus on the velocity component in the z direction. With these, later numerical simulations can be further supported.

9. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] S. Manzetti and F. Mariasiu, "Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51. Elsevier Ltd, pp. 1004–1012, Jul. 27, 2015. doi: 10.1016/j.rser.2015.07.010.
- [2] 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.
- [3] Z. Huang *et al.*, "A six-component surrogate of diesel from direct coal liquefaction for spray analysis," *Fuel*, vol. 234, pp. 1259–1268, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.07.138.
- [4] IAEA, "Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the period up to 2050," 2021st ed., 2021, pp. 17–34.
- [5] <https://www.aeroqual.com/blog/meet-the-nitrogen-oxide-family> utolsó elérés: 2022.11.06.
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Pitot_tube utolsó elérés: 2022.11.06.
- [7] <https://tudasbazis.sulinet.hu/hu/szakkepzes/vegypar/muszaki-ismeretek/torlo-elemes-aramlasmeres/pitot-csoves-meres> utolsó elérés: 2022.11.06.
- [8] Magyar Épületgépészet, LXVII. évfolyam – Amenométer, no. 11. p. 9, 2018.
online elérhető: https://www.epuletgepeszetimuzeum.hu/oldal_elemei/publikacio/epgepmuzeum-publikacio-magyar-epuletgepeszet-2018-11.pdf, utolsó elérés: 2022.11.06.
- [9] Vad János előadása, Áramlástan energetikai alkalmazásai c. tárgy - Áramlástan mérés technika, 2022/23/1 félév
- [10] <https://instrumentationtools.com/hot-wire-anemometer-principle/> utolsó elérés: 2022.11.06.
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_effect utolsó elérés: 2022.11.06.
- [12] <https://electricalworkbook.com/laser-doppler-anemometer/> utolsó elérés: 2022.11.06.
- [13] N. Dietrich, S. Poncin, and H. Z. Li, "Dynamical deformation of a flat liquid-liquid interface," *Exp Fluids*, vol. 50, no. 5, pp. 1293–1303, May 2011, doi: 10.1007/s00348-010-0989-7.
- [14] https://en.wikipedia.org/wiki/Particle_image_velocimetry utolsó elérés: 2022.11.06.
- [15] "Dr. Lezsovits Ferenc - Tüzeléstechnika, kazánok c. tárgy, Égési folyamatok előadás, 2021."
- [16] D. Csemány and V. Józsa, "Fuel Evaporation in an Atmospheric Premixed Burner: Sensitivity Analysis and Spray Vaporization," *Processes*, vol. 5, no. 4, Dec. 2017, doi: 10.3390/pr5040080.
- [17] Dr. Józsa Viktor, "Tüzelőberendezés - Mérési segédlet," 2020.

- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] <https://www.dataphysics-instruments.com/Downloads/Surface-Tensions-Energies.pdf> utolsó elérés: 2022.11.06.
- [21] 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.
- [22] https://www.iea-amf.org/content/fuel_information/diesel_gasoline#:~:text=Diesel%20fuel%20consists%20mainly%20of,170%20and%20360%20%C2%B0C utolsó elérés: 2022.11.06.
- [23] <https://rentar.com/hydrocarbons-hydrocarbons-diesel/#:~:text=%E2%80%9CThe%20average%20chemical%20formula%20for,%2Dto%2D2%20or%20greater> utolsó elérés: 2022.11.06.
- [24] <http://www.fast.u-psud.fr/pivmat/html/vec2scal.html> utolsó elérés: 2022.11.06.