

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

PAPP DÁNIEL MIKLÓS
TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA
Előkevert földgáz és hidrogén együtt tüzelése perdületes égőben

Témavezető:
Dr. Sztankó Krisztián
Egyetemi docens

Budapest, 2024

TARTALOMJEGYZÉK

Tartalomjegyzék.....	ii
Absztrakt.....	iii
Köszönetnyilvánítás.....	iv
Jelölések jegyzéke.....	v
1. Bevezetés.....	1
1.1. Célkitűzések	1
1.2. Áttekintés.....	1
2. Hidrogén.....	3
2.1. Zöld hidrogén	3
2.2. Hidrogén együtt tüzelése	3
3. Gázturbinák	6
3.1. Inercia fontossága	6
3.2. Capstone C30 [6]	7
4. Hidrogén együtt tüzelés	10
4.1. Mérési terv elméleti áttekintése	10
4.2. Tüzelőberendezés kialakítása	14
4.3. Alkalmazott módszerek	16
4.3.1. Emisszió	16
4.3.2. Schlieren.....	17
4.3.3. Képfeldolgozás.....	18
5. Eredmények.....	19
5.1. Emisszió.....	19
5.2. Intenzív zóna.....	25
5.2.1. Intenzív zóna geometriája	25
5.2.2. PIVLAB	31
6. Összefoglalás	34
6.1. Konklúzió	34
6.2. További vizsgálatok.....	35
7. Felhasznált források.....	36
8. Melléklet.....	39

ABSZTRAKT

A villamosenergia-rendszerben, az ipari és háztartási tüzeléstechnikai egységekben jelentős szerepet tölt be a földgáz, mint energiahordozó. Azonban a felhasználása karbon kibocsátással jár, ami a jelenlegi világ szintű dekarbonizációs célokkal nem összeegyeztethető. Ezen okból kifolyólag szükséges az alternatív tüzelőanyagok vizsgálata. A hidrogén egyre nagyobb mennyiségben áll rendelkezésre tekintve, hogy a megújuló, időjárás függő technológiák tárolási megoldásként alkalmazzák. A hidrogén felhasználásával javíthatóak az égési paraméterek, valamint csökkenthető a károsanyag kibocsátás mértéke.

A gázturbinák jelenléte meghatározó a villamosenergia-rendszerekben, mivel gyors teljesítmény változtatási gradienssel rendelkeznek, valamint forgótömeget adnak hozzá a rendszerhez. A gázturbinák jelentőségüket figyelembe véve várhatóan a villamosenergia-rendszer szerves részét fogják képezni még a közel jövőben is, ezáltal szükséges a technológia emissziójának a csökkentése. A károsanyag kibocsátás csökkenthető hidrogén együtt tüzeléssel, továbbá, ha ez zöld hidrogén felhasználásával történik úgy ez fenntartható módon érhető el.

Jelen dolgozatom a hidrogén és a földgáz együtt tüzelésének vizsgálatára fókuszál eltérő hidrogéntartalom, valamint égés levegő szintek mellett. Továbbá kísérletek folyamán a hidrogén bevezetés 3 eltérő átmérőjű fúvóka méret mellett is vizsgálásra került. A mérések egy tüzelőberendezésen kerültek elvégzésre, állandó hőteljesítmény tartása mellett. A tüzelőberendezés levegő bevezetése, valamint a fúvóka geometriája egy valós mikro gázturbina fúvókája szerint lett megtervezve, illetve beépítve. Az égéskamrában zajló folyamatok alaposabb vizsgálatához, megértéséhez Schlieren optikai analízis került alkalmazásra, amely átfogóbb képet nyújt az égőtér magashőmérsékletű intenzív zónájáról. Emellett a kialakuló lángalakok is megfigyelésre kerültek, ezenfelül a tüzelés során kialakuló füstgáz emissziós értékei is mérésre kerültek.

Köszönetnyilvánítás

RRF-2.3.1-21-2022-00009, azonosítószerű, Megújuló Energiák Nemzeti Laboratórium megnevezésű projekt a Széchenyi Terv Plusz program keretében, az Európai Unió Helyreállítási és Ellenállóképességi Eszközének támogatásával valósul meg.

Emellett szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek Dr. Sztankó Krisztiánnak az áldozatos munkájáért, a megannyi tanulságos konzultációs alkalomért és az energia befektetésért, amit arra fordított, hogy szakmailag fejlődhessek.

Budapest, 2024. 11. 05.

Papp Dániel Miklós

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

A táblázatban a többször előforduló jelölések magyar és *angol* nyelvű elnevezése, valamint a fizikai mennyiségek esetén annak mértékegysége található. Az egyes mennyiségek jelölése – ahol lehetséges – megegyezik hazai és a nemzetközi szakirodalomban elfogadott jelölésekkel. A ritkán alkalmazott jelölések magyarázata első előfordulási helyükönél található.

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
$\dot{m}$	Tömegáram	kg/s
v	Sebesség	m/s
A	Terület	m ²
F	Fűtőérték	MJ/kg
P	Teljesítmény	kW
Q	Hőteljesítmény	kW
V	Térfogat	m ³
$\dot{V}$	Térfogatáram	m ³ /s

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
λ	Légfelesleg tényező	1
ρ	Sűrűség	kg/m ³

Indexek, kitevők

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
h	Hidrogén
i	Általános futóindex
l	Levegő
ng	Földgáz
elm	Elméleti
$mért$	Mért érték
ref	Referencia érték
$valós$	Valódi érték

1. BEVEZETÉS

1.1. Célkitűzések

A kutatási témám, amelynek eredményeként ezt a dolgozatot megírtam, a hidrogén tüzeléstechnikai felhasználására fókuszál. A dolgozatom célja, hogy a hidrogén és földgáz alapú gázkeverékek együttes tüzelésekor lejátszódó folyamatokat alaposabban feltérképezze minél szélesebb körben. Ezenfelül a vizsgálatok megalapozzák az ismereteket, amelyek a jövőben a hidrogén és földgáz együttes gázturbinában történő biztonságos alkalmazásához szükségesek. A méréseim során kiemelt tekintettel került megfigyelésre a tűztéri hőmérséklet intenzív zónája, a kialakuló lángalakok, valamint a füstgáz emissziós értékei. A kutatásom során ezen paraméterek a gázkeverék változó P% hidrogéntartalma, valamint eltérő oxigén szintjei mellett lettek meghatározva.

1.2. Áttekintés

A dolgozatban elsősorban a hidrogén bekeverés hatásai kerülnek bemutatásra a mérési eredmények kiértékelésén keresztül. A tanulmányban kitérek a hidrogén jelentőségére, mint energiahordozó, amelyre számos területen alapoznak fejlesztési irányzatokat. Ezt követően érintem az átalakuló villamosenergia-rendszert, illetve az inercia szerepét a hálózatban. Későbbiekben a gázturbinák alkalmazásának fontosságára helyeződik a hangsúly, melyet a hidrogén tüzeléstechnikai felhasználása követ.

Napjaink történéseinek, trendjeinek és szakirodalmának áttekintését követően a kutatásom felépítésére tér át a bemutatás. Ezen szakaszon belül összefoglalásra kerül a mérés elméleti háttere, illetve a tervezete. Ezek után a vizsgálathoz használt berendezés felépítése, valamint a releváns részeinek bemutatása következik. Majd a vizsgálat

elvégzéséhez felhasznált módszerek, eljárások ismertetése történik. Végül az eredmények értékelésének bemutatása, összegzése lesz a hangsúlyos. Zárásként a konklúzió levonása, valamint a téma tovább fejlesztési területei kerülnek előtérbe.

2. HIDROGÉN

2.1. Zöld hidrogén

A zöld hidrogén egyre ígéretesebb és megvalósítható megoldásnak tekinthető a dekarbonizációs célok elérésében. Lehetőséget biztosít arra, hogy megújuló energiaforrások felhasználásával szén-dioxid keletkezéstől mentes módon energiahordozót állítsunk elő. [1][2][3] Ellentétben a szürke hidrogénnel, amely fosszilis tüzelőanyagok felhasználásából származik, a zöld hidrogén előállításához megújuló energiaforrásokat alkalmazunk, mint a szél- vagy a napenergia. Ezen forrásokból előállított villamosenergiával üzemeltethetjük az elektrolizálót, mely vízbontáson keresztül hidrogént és oxigént állít elő. [4] A zöld hidrogén előállítási költsége a jelenlegi technológiai és piaci helyzet következtében meghaladja a fosszilis tüzelőanyagokból előállított hidrogénét, ebből az okból kifolyólag elengedhetetlen az eljárás hatékonyságának növelése és a költségek csökkentése a versenyképesség érdekében. [4] A zöld hidrogén költségeinek a csökkenésében számos szempont közre játszik többek között az elektrolizálók optimalizálása és a megújuló energiaforrások jelentős integrációja a villamosenergia-rendszerbe. Tekintve, hogy egyes megújuló energiaforrásoknak, mint a szél- és napenergia jelentős befolyásoltsága van az időjárás által, ezért szükséges a rendszerbe integrálni energiatárolási megoldásokat. [5] A zöld hidrogén előállítás olyan energiahordozót hoz létre, amely képes különböző ipari területeket összekapcsolni és kiszolgálni, mint például a fűtési-, vegyipari, közlekedési- és villamosenergia szektorok. [5] Ez a megoldás jelentős kapacitást képes biztosítani a megújuló energiaforrások számára a tárolás területén. [5]

2.2. Hidrogén együtt tüzelése

Napjainkban a legszéleskörűbben és legelterjedtebben hasznosított tüzelőanyag a földgáz, melynek felhasználása jelentős mértékű mind a háztartásoknál, mind az ipari fogyasztóknál, mind a villamosenergia-termelő erőművekben, fűtőerőművekben. A

földgáz felhasználás meghatározó mértékű szén-dioxid kibocsátást eredményez a fent említett területek összeségét tekintve. A környezetvédelmi célok elérése érdekében szükséges a fosszilis tüzelőanyagok részbeni, illetve teljes kiváltása. Ebből adódóan elengedhetetlen alternatív tüzelőanyagokra irányuló kutatásokat folytatni. Emellett Európában a közelmúltban megváltozott politikai viszonyok miatt a tüzelőanyagok diverzifikációja sem elhanyagolható szempont. [6] A szigorú emissziós szabályozások a kutatókat és fejlesztőket abba az irányba mozdítja, hogy új, alternatív tüzelőanyagokat vizsgáljanak tüzeléstechnikai felhasználásra miközben fenntartják a magas elégetési hatásfokot. [7] A zöld hidrogén rendkívül ideális megoldás figyelembe véve, hogy az előállítása fenntartható módon történik, valamint az elégetésekor nem keletkezik szén-dioxid, csak vízgőz. [7] Azonban megemlítendő, hogy a hidrogén térfogatra arányosított fűtőértéke alacsonyabb, mint a földgázé. [8][9]

Hidrogén tüzeléshez való hozzáadásával a lánghőmérséklet, illetve a tűztéri nyomás megnő. [8] Ezentúl a hidrogén növelésével a gázkeverékben begyújtási hőmérséklete csökken, a láng sebessége pedig növekszik. [9] Ezenkívül egy kutatás azt találta, hogy a hidrogénarány növelése hozzájárul a turbulens áramlás intenzitásához. [9] Továbbá nem elhanyagolható, hogy a hidrogén felhasználásával azt találták, hogy javul az égés hatásfoka. [9] Ezen tények összeségében számos kutatás arra a megállapításra jutott, hogy a hidrogén együtt tüzelés kedvező hatással van a földgáz-levegő alapú tüzelőanyagok elégetésére. [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14]

Emissziós értékek tekintetében a hidrogén arány növelésével a szén-dioxid tartalma a füstgáznak csökken, mivel a bevezetett tüzelőanyagban alacsonyabb a fosszilis tartalom és az azt kiváltó hidrogén égésekor nem keletkezik. [9] A szén-monoxid esetében előfordulhat, hogy tökéletlen égés következtében a gázkeverék földgáz tartalmából minimális mennyiségű megjelenik a füstgázban, valamint esetenként növekmény is tapasztalható. [6], [9] A nitrogén-oxidok tekintetében a hidrogéntartalom emelése a nitrogén-oxid képződést is elősegíti, az oka a jelenségnek, hogy a hidrogén adiabatikus lánghőmérséklete magasabb, mint a földgázé és megnő a tűztéri magashőmérsékletű

zóna, amely többlet nitrogén-oxid keletkezést tesz lehetővé. [7], [9], [14] Kutatás eredményei azt mutatják, hogy az előkevert levegő alkalmazása növelheti az előkevert gáz sebességét, valamint fokozatosan javítja a gáznak az axiális és radiális expanzióra való képességét. Ennek következményeként megfigyelték, hogy a recirkulációs terület bővülése stabilizáló hatást gyakorol az égési folyamatra. Hőmérsékleti szempontból a többletlevegő csökkenti az égőtér maximális hőmérsékletét, ugyanakkor fokozatosan növeli a magasabb hőmérsékletű zónát. [14]

Mindazonáltal a hidrogén alkalmazása során figyelembe kell venni egyéb tényezőket is. Többek között a visszaégés lehetőségét, amely a hidrogén esetében valós kockázat, mivel egy nagyságrenddel magasabb a lángterjedési sebessége a földgázénál és szélesebb tartományban képes égni. [7] Ezenfelül amennyiben gázturbinában történő alkalmazásra gondolunk figyelembe kell venni a lapátok bevonatát, hűtését, illetve anyagminőségét, mivel nagyobb szintű hőterhelést kell elviselniük kiemelten az első fokozatoknak. [7]

3. GÁZTURBINÁK

3.1. *Inercia fontossága*

A villamosenergia napjaink szerves részét képezi, az ellátásbiztonság és a minőségileg megfelelő villamosenergia megközelítőleg létfontosságú a fejlett társadalmakban. A villamosenergiát kezdetben 3 fő dimenzióval jellemezték, amelynek meg kellett felelnie. Az eleinte meghatározott tényezők a minőség, a gazdaságosság és az ellátásbiztonság, ezek egészültek ki plusz egy dimenzióval, ami a környezeti hatások. [6] Az első dimenzió a minőség, amely alá fizikai paraméterek tartoznak, mint a feszültség és a frekvencia megfelelő értéken tartása, ami a Magyarországi hálózaton és az egyesített európai hálózaton 50 Hz. [6] A villamosenergia-rendszer üzembiztos működésének alapvető feltétele a frekvencia stabil szinten tartása. [15] Ehhez egy frekvenciaváltozást kiváltó eseményt követően szükséges a frekvenciaváltásnak a mielőbbi megakadályozása és az üzemi szintre történő visszaállítása. [15] Az esemény bekövetkeztekor a rendszerben található forgó tömeg azonnal reagál, ami az inercia válaszreakcióját jelenti. [15] Az átalakuló energiamixek következtében a forgó tömeggel rendelkező technológiákat, amelyek jelenleg fosszilis tüzelőanyaggal működtetünk felváltják a megújuló villamosenergia-termelők. [16] A legtöbb megújuló rendszer teljesítmény elektronikán keresztül csatlakozik a hálózatra, ezáltal nem rendelkeznek inerciával tehát ily módon nem képesek hatékonyan támogatni a frekvencia szabályozást. [16] Ennek eredményeként a villamoshálózat inerciája lecsökken. [17] A probléma megoldására megjelentek egyéb szabályozási formák, mint a virtuális inercia, azonban ezeknek nagyobb időegységre van szükségük, amíg reagálni tudnak. [18] Ezen okokból kifolyólag a villamosenergia-rendszernek továbbra is szüksége van a forgó tömegre, azonban ezt alacsony vagy szén-dioxid kibocsátástól mentes módon kell biztosítani. Megoldásként szolgálhat az atomenergia hasznosítása gőz körfolyamat segítségével, [19] illetve a gázturbinák alkalmazása alternatív karbonsemleges tüzelőanyaggal történő üzeme mellett. A hidrogén, mint tüzelőanyag optimális megoldásnak ígérkezik, amelyben nagy potenciál rejlik. Ennek az oka, hogy javítja az égési tulajdonságokat és kiterjeszti

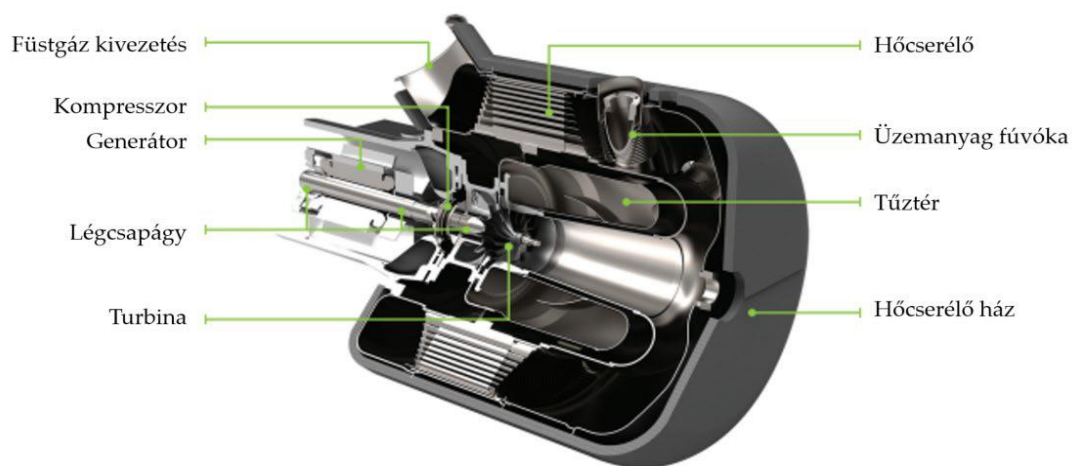
az égési tartományt, valamint amennyiben zöld hidrogén kerül alkalmazásra ez fenntartható és karbonsemleges energiát biztosít.

3.2. Capstone C30 [6]

A dolgozatom célja a hidrogén és földgáz tüzelésének főbb tulajdonságainak feltárása, valamint annak pontos megközelítése, hogy a Capstone C30 mikro gázturbinában milyen viselkedési mintázatot mutatna a gázkeverék. A későbbiekben bemutatott tüzelőberendezés fűvókájának kialakítása az összehasonlíthatóság érdekében minimális eltéréssel követi és jól közelíti a Capstone turbinában alkalmazott fűvóka geometriáját.

A Capstone C30 egy mikro gázturbina, amely tervezési paraméterei szerint 30 kW elektromos teljesítmény leadására képes. Számos tüzelőanyaggal, többek között földgázzal, biogázzal, propánnal és dízellel is üzemeltethető. A turbina kis méretei és magas fordulatszáma miatt nincs lehetőség külön lapáthűtésre, ezt a korlátozást a turbina a megnövelt hűtőlevegő beszívás révén kompenzálja. Földgáz használata esetén ez körülbelül 7-es légfelesleg tényezőt eredményez, ami azt jelenti, hogy a turbinába 7-szer nagyobb levegő mennyiség jut be, mint ami az elméleti levegő igénye a tüzelőanyagnak. A levegő a turbina működésében más szempontból is jelentős szerepet tölt be, mivel a turbina forgórésze nem hagyományos gördülő vagy siklócsapágyakat alkalmaz, hanem légcsapágyazással van ellátva. Ezt a megoldást elsősorban a forgórész alacsony tömege és az üzem közbeni, megközelítőleg 96 000 fordulat/perc magas fordulatszáma teszi lehetővé. A légcsapágyazás előnye, hogy nem igényel kenőanyagot, mivel a kenést a levegő biztosítja. Továbbá, mivel a turbinában egyetlen forgórész található, így a karbantartási igénye minimális a rendszernek. A forgórész egy egyfokozatú centrifugál kompresszort tartalmaz, amelynek kompresszióviszonya 3,1 – 3,7 között van. A berendezés gyűrűs hőcserélőt alkalmaz, amely jelentősen javítja a hatásfokot, miközben kompakt felépítést biztosít azáltal, hogy az égőteret körülveszi. Ebben a hőcserélőben a kompresszorból kilépő levegőt a kilépő füstgáz hőjével előmelegítjük, ezzel csökkentve a kilépő füstgáz hőmérsékletét és növelve a körfolyamati hatásfokot.

[20] A kompaktság érdekében a tűztér gyűrűs elrendezésű. A tűztérbe tangenciálisan elhelyezett fúvókák száma három, amelyek egyenként 35 kW tüzelési teljesítményre képesek. A tangenciális elhelyezése a fúvókáknak elősegíti az égést, mivel a virtuálisan megnöveli a tűztér nagyságát azzal, hogy a láng többszörösen, körbejárja a gyűrűs kialakítású tűzteret és nem egyenesen rövid úton hagyja el. Ezenkívül ez a módszer megnöveli a gázkeverék égőtérben való tartózkodási idejét, ami kedvezően befolyásolja az üzemanyag felhasználást és hozzájárul a tökéletes égés eléréséhez. Az égőtérből kilépő füstgáz a turbinába jut, ahol expanzió következik be, ami lehetővé teszi a kinetikus energia forgási energiává való átalakítását. Ezt követően a füstgáz belép a hőcserélő házba, ahol a korábban említett hőcserélőn keresztül leadja a hője egy részét a komprimált levegőnek.



1. ábra: Capstone C30 mikro gázturbina felépítése [21]

Az utolsó villamosenergia-termelést végző alegység a generátor, amelyben az állandó mágneses rész a forgórészhez kapcsolódik, míg a tekercserelés az állórészen helyezkedik el. Tehát a forgás következtében tekercsben feszültség indukálódik. A fentieket összefoglalva az 1. ábrán látható a Capstone C30-as mikro gázturbina felépítése.

A Capstone C30 számos előnyös tulajdonsággal rendelkezik, mint például az alacsony károsanyag kibocsátás, amely magába foglalja a nitrogén-oxidokat, a szén-monoxidot és különböző részecskéket. Emellett a zajszintje viszonylag alacsony más gázturbinákhoz képest, ami széleskörű alkalmazási lehetőséget kínál. Kis méretének köszönhetően nem igényel jelentős helyet, továbbá nem okoz vibrációt és nem szükséges hűtőfolyadék vagy kenőanyag. Ugyanakkor maximális elektromos teljesítménye csupán 30 kW-ra korlátozódik, ami hátrányosan befolyásolja az ipari alkalmazhatóságát. Ezen kívül a beruházási költsége magasabb a többi energiatermelőhöz viszonyítva és a hatásfoka elmarad mind az ipari méretű (heavy duty), mind az aeroderivatív gázturbinákétól.

4. HIDROGÉN EGYÜTT TÜZELÉS

4.1. Mérési terv elméleti áttekintése

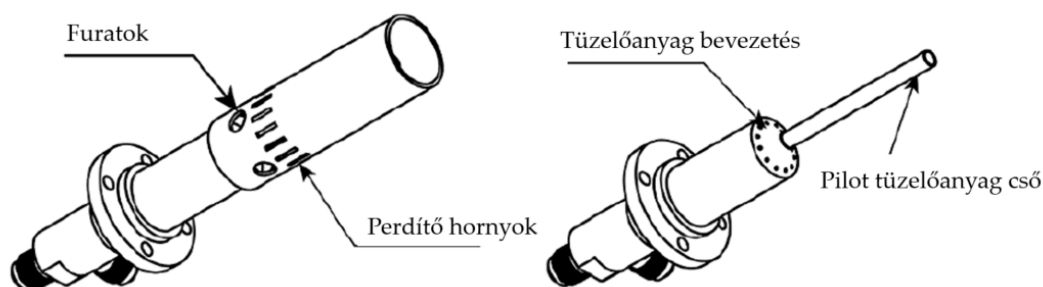
A földgázzal ellentétben a hidrogén és a különböző alternatív gázkeverékek égési tulajdonságai még nem teljesen ismertek. A dolgozatomban későbbi szakaszában bemutatott tüzelőberendezésben végzett mérések elengedhetetlenek a gázkeverékek alaposabb vizsgálatához. Különösen a kialakuló lángkép, a magas hőmérsékletű zóna és emissziós értékek pontos meghatározásához és az égési folyamatok, hatások-ellenhatások részletes megértéséhez. [6]

A mérési felépítés könnyebb megértése érdekében rövid bemutatásra kerül a fúvóka kialakítása, amely alapján a tüzelőberendezésbe tervezett fúvóka kialakítás is készült. A részletes konstrukció ismertetésére a 4.2 fejezetben kerül sor, a tüzelőberendezés leírásánál. A Capstone C30-as mikro gázturbina égőjében két különálló ágot különböztünk meg, amelyeken keresztül a tüzelőanyagok bevezetésre kerülnek. [6]

Az első ágot „pilot” csőként említjük, amely a fúvóka közepén helyezkedik el, és ezen keresztül történik a hidrogén bevezetése. A pilot cső túlnyúlik a földgáz bevezetési pontjához képest, ami a későbbiekben fontos szerepet kap. A második ág, az úgynevezett „premix” cső, amelyen keresztül 12 furaton keresztül történik a földgáz bejuttatása. A premix cső kezdetén tangenciálisan levegő kerül a földgázhoz, amely perdetet ad a gázkeveréknek, javítva ezzel az előkeverést. A premix ágon haladva, a fúvóka végén a pilot csőből érkező hidrogén bekapcsolódik az előzetesen előkevert levegő-földgáz keverékhez, és az így létrejött gázáram lép be a tűztérbe. A Capstone C30-as fúvóka sematikus kialakítását a 2. ábra mutatja be. [6]

A mérési tervet végig állandó 13,35 kW hőteljesítmény tartása mellett határoztam meg, valamint számoltam ki. A mérési pontok definiálását két fő paraméter szerint tettem meg. Az első változtatott tényező a hidrogénaránya a gázkeverékben, amely a teljes hőteljesítményben adott százalékos aránya mentén történt. A hidrogén esetében vizsgált tartomány a tisztán földgáz üzemtől, vagyis 0% P% hidrogéntartalomtól, 30

teljesítmény százalék hidrogén tartalomig terjedt. A mérési pontokat 5%-os P% lépésekkel vettem fel az átfogó kép alkotás miatt. Kiemelendő, hogy a szakirodalmakban jellemzően nem teljesítmény százalékot adnak meg az együtt tüzelések során, hanem térfogat százalékot, azonban a kettő jelentősen eltér. A vizsgált esetben a legnagyobb hidrogéntartalmú pontban a 30 teljesítmény százalék 60,28 térfogat százaléknak felel meg.



2. ábra: Capstone C30 fűvóka vázlata [22]

A vizsgálat második változó paramétere az égőtérbe bevezetett oxigénszint volt. Az égési levegő jelentős mértékben befolyásolja az égési tulajdonságokat, beleértve az égés minőségét, a lángkép kialakulását és a füstgáz emissziós értékeit. E tényezők alaposabb megismerése érdekében négy különböző oxigénszintet határoztam meg a vizsgálathoz, hogy a lehető legátfogóbb képet kapjuk a hatások-ellenhatások viselkedéséről. A vizsgálat során a füstgáz V/V% oxigéntartalma 3%-tól 9%-ig terjedt, 2%-os lépésközzel.

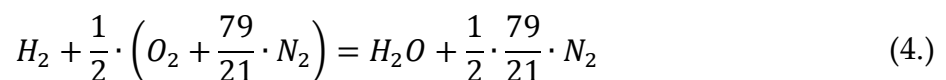
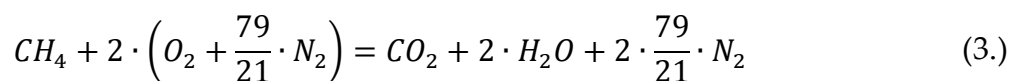
Az adott mérési pontokhoz a hőteljesítmény és a fűtőérték ismeretében meghatároztam a beállítandó tömegáramokat, mind a hidrogén, mind a földgáz esetében, valamint kiszámoltam a hidrogén térfogati arányát a gázkeverékben. A tömegáram értékek számításához az (1.) összefüggést alkalmaztam. A tömegáramok számítását követően megfigyelhető a hidrogén és a földgáz közötti különbség, amely főként a fűtőértékek közötti különbségére vezethető vissza.

$$\dot{m} = \frac{Q}{F} \quad (1.)$$

A számított tömegárammal, a gázok jellemzőinek ismeretében, valamint a fúvóka geometriai méreteinek tudatában megállapíthatóvá vált a komponensek áramlási sebessége. A sebesség ismeretének a fontossága főként a hidrogén esetében volt jelentős, mivel biztosítani kell, hogy ne fordulhasson elő visszaégés. Ezenfelül a fúvókából kilépő sebesség, kiemelten a pilot ág esetében befolyásolja a lángalakot, mivel a pilot cső közel helyezkedik el az égéshez. A számítás elvégzését követően az értékekről megállapítottam, hogy a mérések során alkalmazott, általam átalakított pilot ági fúvóka esetében nem alakul ki visszaégés, mivel jelentősen eltérő a sebesség tartomány. Ezt a gyakorlati méréseim valóban megerősítették és nem volt tapasztalható jele a visszaégésnek. A sebesség számításához (2.) összefüggést használtam fel.

$$v = \frac{\dot{m}}{A \cdot \rho} \quad (2.)$$

Mivel a földgáz és a hidrogén együttes tüzelése eltérő mennyiségű oxigént igényel az optimális égés eléréséhez, elengedhetetlen volt mindkét gáz esetében a sztöchiometriai számítások elvégzése. Ezeknek a számításoknak az elvégzése lehetővé tette számomra az egyes mérési pontokhoz szükséges elméleti levegőigény meghatározását. Az oxigénszükséglet fedezésére minden esetben a levegő oxigéntartalmával számoltam. A földgáz égési sztöchiometriai egyenletéhez a (3.), míg a hidrogén égési egyenletéhez a (4.) összefüggést használtam.



Az eredmények alapján kiszámítható volt a szükséges levegőmennyiség, amelyet a légfesleg-tényezővel kiegészítettem így meghatározhattam a kívánt levegőtömegáramot is minden mérési pontra, amit egy frekvenciaváltós fúvó állítása biztosít. A

korábban elvégzett számításaim rámutattak, hogy a hidrogén kilogrammonkénti levegőigénye körülbelül kétszerese a földgázénak. Ha azonban normál köbméterre átszámoljuk, a reláció megfordul. Egy köbméter földgáz levegőigénye közel négyszerese a hidrogén köbméterenkénti levegőigényének. Mindazonáltal azonos hőteljesítményszint fenntartásához megközelítőleg háromszor több köbméter hidrogén szükséges, ezáltal a mérések során a bevezetendő levegő mennyisége jelentősen nem változott az azonos V/V% oxigéntartalmú pontok esetében. [6]

A számításaim elvégzése után meghatározásra kerültek a mérési módszerek. A magas hőmérsékletű zóna alakulásának elemzésére a Schlieren technikát alkalmaztuk, amely optikai eljárás révén lehetővé teszi a szabad szemmel nem látható területek vizualizációját. A vizualizáció annak köszönhető, hogy vizsgálandó tárgymezőn áthaladó párhuzamos fénysugarak eltérő módon törnek meg a közegen. Ezzel az eljárással olyan részletes információkat nyerhettem a magas hőmérsékletű zóna változásairól, mint például milyen hatással van a növekvő P% hidrogén- és V/V% oxigénaránya a zóna magasságára, szélességére, valamint területére, amelyek kiegészítik a szabad szemmel látható lángkép és lángforma elemzését.

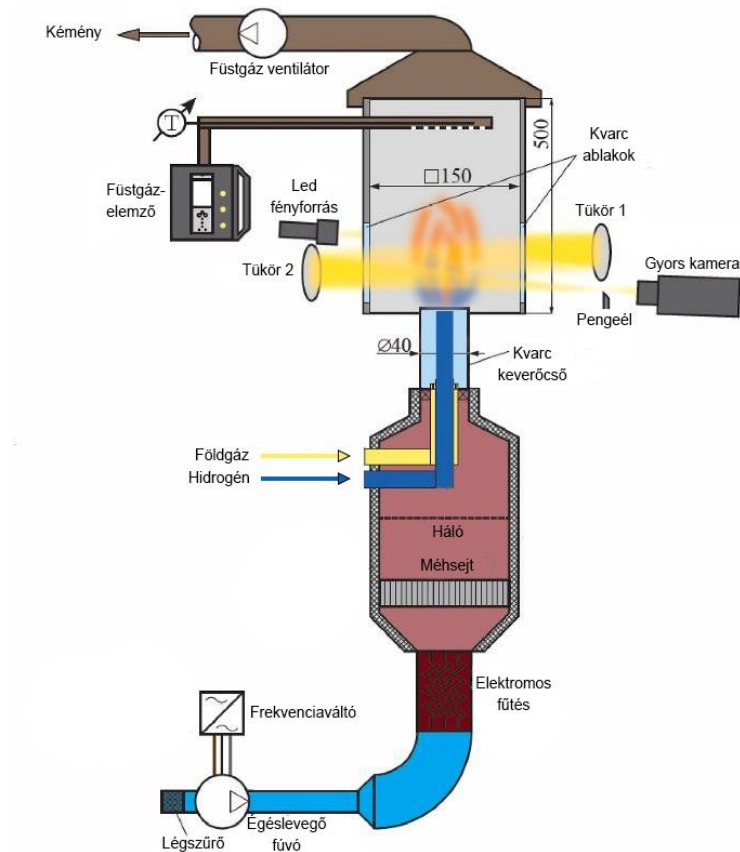
A mérés elvégzésekor az emissziós értékek folyamatosan monitorozásra kerültek. A vizsgálat alatt külön figyelemmel lett kísérve a füstgáz oxigén, szén-monoxid, széndioxid, nitrogén-monoxid és nitrogén-dioxid tartalma. Az összetétel pontos meghatározásához elektrokémiai cellás emisszióelemző berendezést, Testo 350-es műszert alkalmaztunk. A kiértékelés során felmerülő hibaszámításban ezen műszer hiba értékei számításba vettem.

A mérés lezárását követően a pontos folyamatok megértése érdekében elengedhetlenné vált a jelentős mennyiségű képi adat feldolgozása. Ebből a célból megírtam egy képelemző algoritmust, amely automatikusan elemzi az elkészült felvételeket, és a kapott értékek alapján meghatározza az intenzív zóna paramétereit. Ezzel párhuzamosan a Schlieren optikával rögzített képeket további elemzéseknek vettem alá. Az elemzés ezen szakaszához a MATLAB PIV modulját használtam, amely lehetővé tette

a sebességmező kiszámítását az elemzett képeken keresztül, így átfogóbb képet nyújtva a vizsgált áramlási viszonyokról.

4.2. Tüzelőberendezés kialakítása

Az elméleti számítások és a sejtések igazolásához szükséges mérések elvégzésére egy tüzelőberendezést alkalmaztam, amelynek a sematikus ábrája a mérőrendszerekkel együtt a 3. ábrán látható. A mérés szempontjából két fő csoport bemutatása szükséges, az első a gázbevezetések kialakítása, illetve a gázok útja az tűztérig. A másik ismerttetendő csoport a felhasznált mérő és adat rögzítő rendszerek.

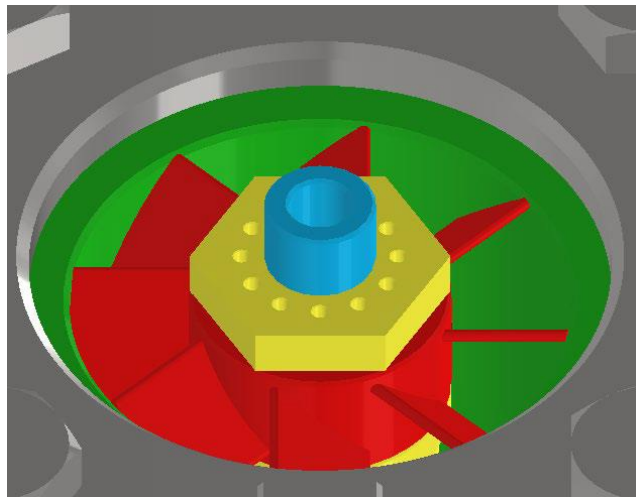


3. ábra: Tüzelőberendezés sematikus felépítése [23]

A mérőrendszerbe az égéshez szükséges levegő egy frekvenciaváltós fúvón keresztül került bevezetésre. A későbbiekben a frekvenciaváltó segítségével történt meg az oxigén V/V% tartalmának változtatása. A levegő ezt követően tovább áramlik a keverőcső irányába, ahol egy perdítő elemen keresztül belép a csőbe. A perdítő elem után

közvetlenül megtörténik a földgáz bevezetése 12 darab szimmetrikusan elosztott 1,5 mm átmérőjű furaton keresztül. Az így kialakuló földgáz-levegő gázkeverék a perdület hatására intenzív keveredésbe kezd, ezáltal az égőtérbe egy előkevert tüzelőanyag lép be. A földgáz és a levegő útját „*premix*” ágnak nevezzük.

A hidrogén esetében a bevezetés a „*pilot*” csövön keresztül történik, amely kinyúlik szinte egészen a keverőcső végéig és ott lép csak be a gázáramba. A pilot ág relevanciája elsősorban a visszaégés megakadályozása miatt jelentős, a kialakításnak köszönhetően a hidrogén a szabadsugar később kezd el kialakulni, ezáltal a sebesség is később éri el azt a pontot, amikor ki tud alakulni a lángfront.



4. ábra: Tüzelőberendezés premix ági gáz bevezetés felépítése [24]

Áttérve a mérőrendszerekre, az emisszió mérésnek az elvezetése az égőtér felett helyezkedik el, amely bele van vezetve az elektrokémiai cellás füstgázelemzőbe. A Schlieren optika elhelyezése az égőtér körül „Z-elrendezésben” valósult meg. Oly módon, hogy a fényforrásból kibocsátott fénysugarak az egyes tükörről visszaverődve merőlegesen haladjanak át az vizsgálendő tárgymezőn és a kettes tükör segítségével pedig a pengeélen keresztül a kamerába legyenek fókuszálva.

4.3. Alkalmazott módszerek

4.3.1. EMISSZIÓ

A füstgáz összetételének elemzése kiemelten fontos, mivel az alternatív karbon kibocsátástól mentes tüzelőanyagok kizárólag abban az esetben jelenthetnek megoldást, amennyiben az emissziós értékek terén javítják a kibocsátási értékeket. Tehát az analízisből származó adatok lehetőséget nyújtanak annak meghatározására, hogy a hidrogén bekeverése hogyan befolyásolja az emissziós értékeket. Ezen túlmenően pontos képet nyerhetünk arról, hogy a füstgáz összetétele milyen módon tér el a tiszta földgáz tüzeléshez képest. A vizsgálat során különös figyelmet kell fordítani a legjelentősebb emissziós termékek változására, amelyek a szén-monoxid, szén-dioxid, az elégetetlen szénhidrogének és a nitrogén-oxidok koncentrációja. [6] A mérések során felhasznált mérőműszer hiba értékeit az 1. táblázatban foglaltam össze. A műszer eltérő tartományban eltérő hibával terhelt, ezáltal az a tartomány és a hozzátartozó hiba érték szerepel a táblázatban, amely magába foglalja a mért értékeket.

1. Táblázat: Füstgázelemző hiba értékei

Komponens	O ₂	CO	CO ₂	NO	NO ₂
Tartomány	0-25 V/V%	0-199 ppm	0-25 V/V%	0-99 ppm	0-99 ppm
Hiba érték	± 0.2 V/V%	± 10 ppm	± 0.3 V/V%	± 5 ppm	± 5 ppm

A nitrogén-oxidok jelenlétét elsősorban az égés levegő magas nitrogéntartalma eredményezi, amely a magas hőmérsékletű égési folyamatok során nitrogén-oxidokká alakul át. A nitrogén-oxidok mind az emberi egészségre, mind a környezetre káros hatásúak. Emberi szervezetben légúti megbetegedéseket okozhat, míg a környezetben hozzájárul a savas eső kialakulásához, amely számos ökológiai problémát eredményez. [25]

A szén-monoxid a tökéletlen égés során keletkezik a tüzelőanyag széntartalmából. Tekintve, hogy az égési levegő hőmérséklete eltérő módon befolyásolja a szén-monoxid képződést és a nitrogén-oxid képződést ezáltal egy optimális hőmérséklet szükséges a két komponens minimalizálásának érdekében.

A szén-dioxid a tökéletes égés eredményeként jön létre a tüzelőanyag széntartalmából, mivel üvegházhatású gáz, jelenléte környezeti szempontból káros hatású. A szén-dioxid kibocsátás jelentős mértékben csökkenthető különféle karbonmegkötő technológiák alkalmazásával, valamint további lehetőséget kínálnak az alacsony karbontartalmú vagy karbonsemleges tüzelőanyagok, amelyek égetése kedvezőbb emissziós profilt biztosít.

4.3.2. SCHLIEREN

A képalkotó eljárások szerepe az égési folyamatok kutatásában egyre hangsúlyosabbá válik, különösen mióta a képfeldolgozási folyamatok különféle programkódok segítségével egyszerűsíthetőek és automatizálhatóak. Az égőtérben zajló folyamatok megfigyeléséhez és elemzéséhez elengedhetetlen valamilyen optikai vizsgálati technika alkalmazása. Tekintettel arra, hogy a vizsgálatok célja a hidrogén tüzelésének részletes megfigyelése és a lehető legpontosabb elemzése, olyan módszer alkalmazása szükséges, amely a lehető legtöbb információt biztosítja a mérési körülmények között. A Schlieren optikával készült képek megoldási lehetőséget biztosítanak erre, mivel pontosan és részletgazdagon képesek feltárni a hőmérsékleti változásokat az égőtérben, elősegítve a hidrogén tüzelésének részletes vizsgálatát.

A Schlieren képalkotás széles körben alkalmazott eljárás a tudományos kutatásokban, mivel hatékonyan képes a transzparens közegekben végbemenő jelenségek vizsgálatára és lehetőséget biztosít a közeg hőmérsékleti mezőjének elemzésére. [26] A Schlieren optika érzékeli a Lightspeed HPLS-36 fényforrásunk által kibocsátott fény-

sugár törésmutatójának megváltozását. [26] A fénysugár a közegben található különböző hőmérsékletű pontoknál eltérő mértékben törik meg, amelyből következtethetünk a hőmérsékleti mezőre.

A képképzés alkalmazásának köszönhetően lehetőség nyílik a szabad szemmel nem látható magas hőmérsékletű zóna megfigyelésére, amely plusz információval szolgál, összehasonlítva a hagyományos módszerekkel készült lángképekkel. Ezen módszerrel részletesebben detektálható és érzékelhető az égés intenzív zónája, beleértve annak minden paraméterét, például a kezdőpontját, magasságát és nyílásszögét.

4.3.3. KÉPFELDOLGOZÁS

A Schlieren optikával készült képek két módon kerültek feldolgozásra, annak érdekében, hogy az információ tartalmából minél többet meg lehessen tudni. Ez első módszer az automatizált intenzív zóna nagyságára használt kód, a másik pedig a képek sebesség mezőjének megállapítására fókuszáló módszer.

Az automatizált képfeldolgozás elengedhetetlen amikor nagy mennyiségű adat áll rendelkezésre. A mérések során minden mérési pontban 1000 kép készült a Fastcam SA-Z 2100K-M-16GB gyorskamera által. Ebből kifolyólag a MATLAB szoftver segítségével készítettem egy kódot, amely automatizáltan elvégzi a szükséges képfeldolgozást. A kód első lépésben kiélesíti a kontúrjait a Schlieren képeknek, majd szürke árnyalatot készít. A szürke árnyalatot a zajcsökkentés követi, amit a prewitt algoritmus szerinti éldetektálás követ. A képeket ezek után binarizálom és végül az általam megírt algoritmus megkeresi a képeken az intenzív hőmérsékleti zóna határait.

A második módszerben a MATLAB PIVLAB applikációját alkalmaztam. A PIVLAB egymás követő képsorok velocimetriai adatainak feldolgozására és vizualizálására használható bővítmény. A PIV (Particle Image Velocimetry) módszert főként a folyadékok vagy gázok áramlási mezőinek elemzésére használatos, amely során a részecskék mozgása követhető nyomon, majd ebből számíthatóak ki a sebességvektorok, illetve az áramlási mező.

5. EREDMÉNYEK

5.1. Emisszió

Az mérési eredmények áttekintéséhez fontos emlékezni, hogy a földgáz előkevert módon kerül bevezetésre, amíg a hidrogén egyből a tűztérbe kerül, ahol diffúz módon ég. A károsanyag kibocsátás eredményeinek értékelése során az emissziós szinteket 15%-os füstgáz V/V% oxigéntartalomra számítottam át. A konvertálásra az összehasonlíthatóság végett volt szükség, mivel a gázturbinák füstgázában a 15%-os V/V% oxigénszint van meghatározva vonatkoztatási értéknek, valamint ez a meghatározott európai szabvány. [27] A referencia értékre történő számításhoz az (5.) összefüggést használtam. Az egyenletben E_i az i -edik szennyezőanyag koncentrációját jelenti. Az eredmények összefoglalva a 2. táblázatban találhatóak meg.

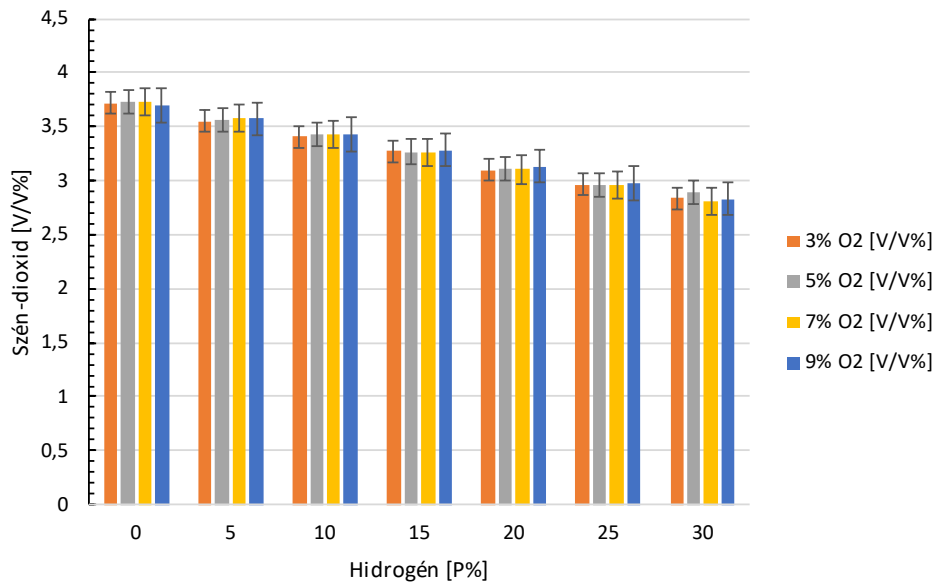
$$E_{i,ref} = E_i \cdot \frac{21 - O_{2,ref}}{21 - O_{2,mért}} \quad (5.)$$

A szén-dioxid értékeinek az alakulása megfelel az előzetes várakozásaimnak. A méréseim során a füstgáz szén-dioxid tartalma monoton csökkenést mutatott a P% hidrogénarányának növelésével, mivel lecsökkent a tüzelőanyagból átalakuló széntartalom. Figyelembe véve, hogy a mérés 60 térfogatszázalék hidrogénig zajlott és ezen érték felett nő meg jelentősen a szén-dioxid mennyiségének csökkenése. A szén-dioxid tartalom változásának mértékét az 5. ábra mutatja be. Az ábrán megfigyelhetőek a hibásávok az egyes mérési pontokhoz, amelyeket a műszer mérésihibájának figyelembevételével számítottam ki.

2. Táblázat: Emissziós adatok

H ₂ [P/P%]	H ₂ [V/V%]	O ₂ [V/V%]	CO [ppm]	CO ₂ [V/V%]	NO _x [ppm]	NO [ppm]	NO ₂ [ppm]
0	0	2,97	0,67	3,72	11,86	11,65	0,22
5	15,71	2,98	0,67	3,55	12,25	11,99	0,26
10	28,24	2,95	0,65	3,41	13,01	12,63	0,38
15	38,46	3,04	0,89	3,27	13,78	13,36	0,41
20	46,96	2,94	1,57	3,10	13,70	13,30	0,40
25	54,14	3,04	29,71	2,97	13,91	13,05	0,87
30	60,28	3,10	5,90	2,84	15,77	13,76	2,01
0	0	4,97	0,56	3,73	10,27	10,07	0,20
5	15,71	5,05	0,38	3,56	10,46	10,16	0,30
10	28,24	4,93	0,37	3,43	10,95	10,58	0,37
15	38,46	5,03	0,43	3,27	12,09	11,65	0,44
20	46,96	4,96	0,75	3,11	12,43	11,97	0,46
25	54,14	5,05	1,47	2,96	12,69	12,11	0,58
30	60,28	4,94	10,30	2,89	17,66	16,79	0,87
0	0	6,94	0,43	3,73	7,51	7,25	0,26
5	15,71	7,06	0,43	3,58	8,14	7,75	0,39
10	28,24	6,93	0,43	3,43	8,53	8,10	0,43
15	38,46	6,94	1,08	3,26	9,35	8,98	0,37
20	46,96	7,04	0,86	3,10	10,36	9,89	0,47
25	54,14	7,08	3,02	2,96	10,61	9,89	0,72
30	60,28	7,01	17,15	2,81	14,22	13,17	1,04
0	0	8,95	2,54	3,70	5,32	4,98	0,34
5	15,71	8,96	2,20	3,57	5,41	4,98	0,43
10	28,24	8,96	2,49	3,43	5,98	5,48	0,50
15	38,46	8,94	5,26	3,28	6,01	5,47	0,54
20	46,96	9,04	13,06	3,13	6,61	5,90	0,71
25	54,14	9,00	65,82	2,98	7,70	6,50	1,20
30	60,28	8,99	157,28	2,83	11,69	9,95	1,75

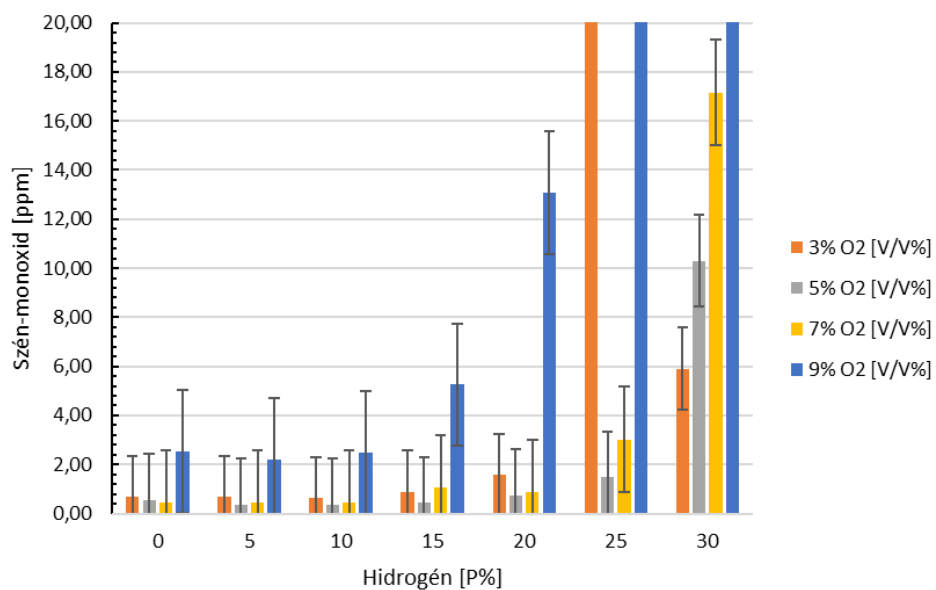
Szén-dioxid tartalom eltérő
hidrogén- és oxigénszintek mellett



5. Ábra: Szén-dioxid tartalom alakulása

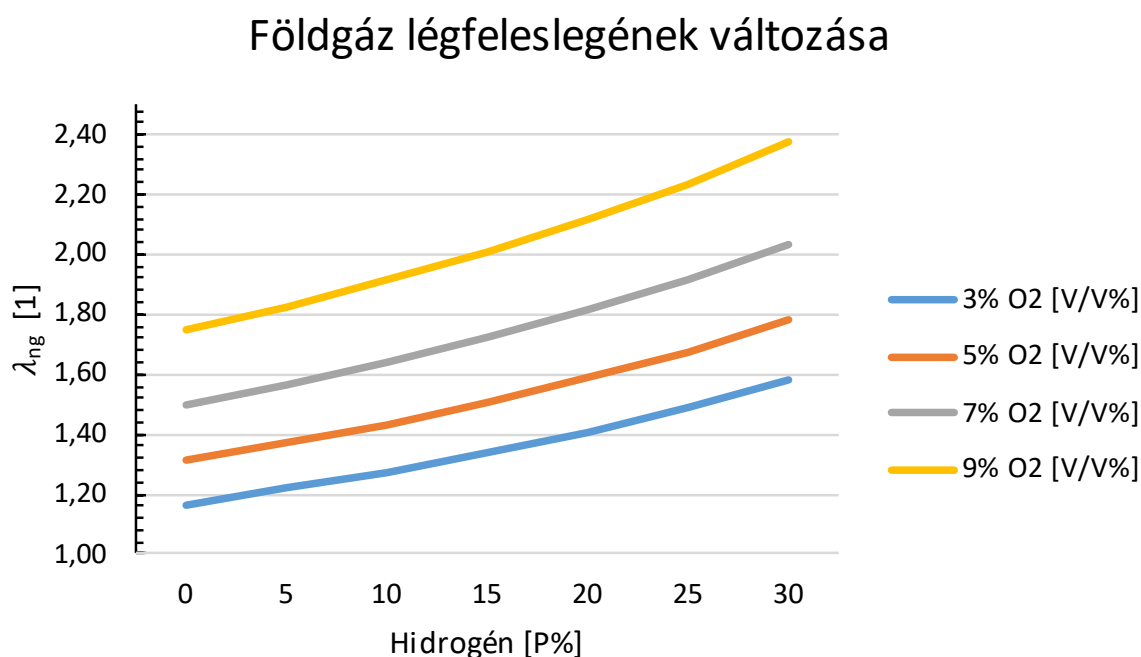
A szén-monoxidtartalom esetében a P% hidrogén növelésével növekmény látszik bizonyos folyamatok következtében. A kezdeti szakaszban 20 teljesítményszázalék hidrogénig a mért értékek relatív tökéletes égést mutattak a 3, 5 és 7%-os tartományban.

Szén-monoxid tartalom eltérő
hidrogén- és oxigénszintek mellett



6. Ábra: Szén-monoxid tartalom alakulása (részlet)

Ezen értékek rendkívül alacsonyak és teljesen a műszer mérési hibatartományán belül helyezkednek el, azonban az látszik, hogy 5 és 7 V/V%-nál rendre alacsonyabb értékeket vett fel. Mindazonáltal a 9 V/V%-os oxigéntartalom esetében mindig nagyobb volt a szén-monoxid képződés. Ez arra vezethető vissza, hogy a tüzeléshez szükséges égési levegő a premixágon a földgázhoz került bevezetésre. Ebből kifolyólag a teljes tüzeléshez szükséges levegő mennyiség a földgáz égése során nagyobb légfelesleget biztosít. A földgáz esetében a szén-monoxid képződés nagyban függ a légfeleslegtől, mivel az optimális tartomány alatt is magas a szén-monoxid keletkezés, illetve az optimális tartományon túl lépve is megnő a keletkező szén-monoxid. Tehát a P% hidrogénarány növelésével a földgáz mennyisége csökken és a lecsökkent mennyiség több-let levegő környezetében fog elégni, ami szén-monoxid növekményt eredményez. A szén-monoxid változását a légfelesleg függvény a következő tanulmány mutatta be. [28] Az eredmények összevetése miatt a (6) - (8) egyenletek számításai lettek elvégezve, amelyekben meghatározásra került a gázkeveréknél felhasznált légfelesleg, a valós égéshez szükséges levegő mennyiség és a földgáz égésénél jelenlévő légfelesleg. A légfelesleg alakulását a 7. ábrán mutatom be.



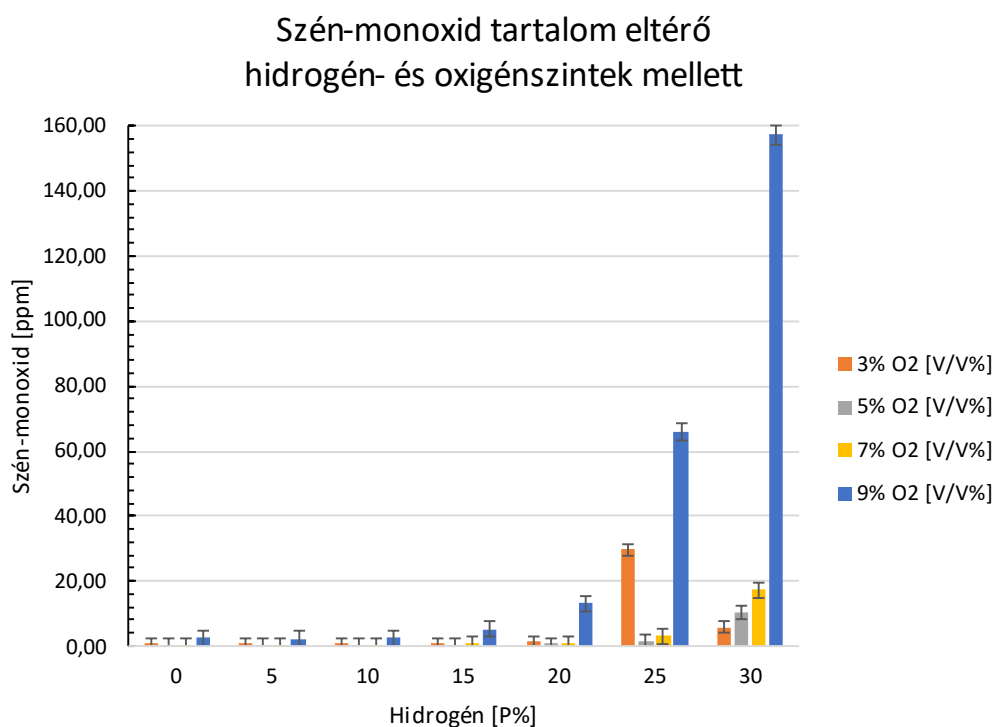
7. Ábra: Földgáz légfeleslegének változása

$$\lambda_{h+ng} = \frac{21}{21 - O_2 \text{ mért}} \quad (6.)$$

$$\dot{V}_{l, \text{valós}} = (\dot{V}_{h, \text{elm}} + \dot{V}_{ng, \text{elm}}) \cdot \lambda_{h+ng} \quad (7.)$$

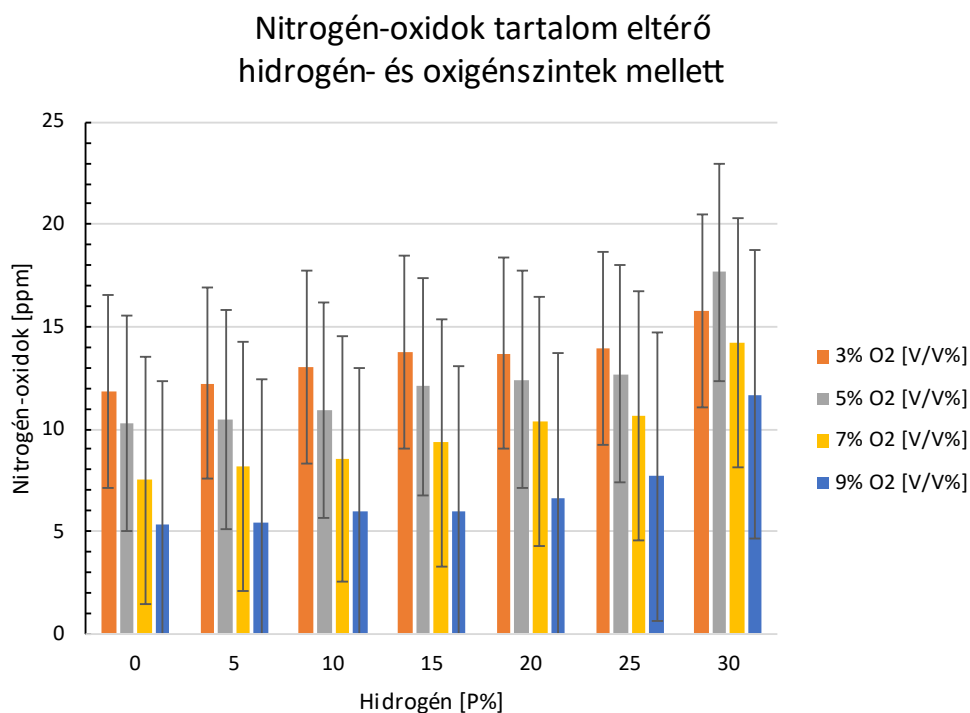
$$\lambda_{ng} = \frac{\dot{V}_{l, \text{valós}}}{\dot{V}_{ng, \text{elm}}} \quad (8.)$$

A kezdeti szakaszban ezen mérési pontok esetében sem volt nagy mértékű a szén-monoxid, de növekmény látható a többihez viszonyítva. A növekmény oka a megnövekedett alacsony hőmérsékletű levegő, ami az oxigéntartalom biztosítása miatt került bevezetésre. Az alacsony hőmérsékletű levegő hatására az égőtér hőmérséklete csökkent és magasabb szén-monoxid kibocsátást eredményezett. Áttérve a magasabb bekeverési pontokra a 25 P%-os hidrogén bekeverésénél a 3 V/V% oxigéntartalmú pontnál megjelenik egy kiugró növekmény. Ennek oka, hogy az égésben a hidrogénnek a kiáramlási sebessége túl magas volt és ennek következményeként a korábbi „v” alakú lángból „s-v” alakú láng formálódott. A „s-v” alak arra utal, hogy egyenes (straight) láng alakult ki, amelynek a gyökében jelen volt a „v” alak is egy kis területen. Ebből kifolyólag az égés jelentősen eltért az optimálistól és közel sem történt tökéletes égés, ami megjelenik a szén-monoxid értékekben is. Ezzel szemben a magasabb V/V% oxigéntartalom már elégnék bizonyult és a levegő kellő perdülettel rendelkezett, hogy a „v” alak kialakuljon. Tovább lépve a 30 P%-os hidrogén tartalmú pontra, ahol minden egyes oxigénszint mellett megfigyelhető volt az „s-v” alakú láng, ebben a mérési pontban az előző mintájára a szén-monoxid értékek növekedtek. Megemlítendő a 9 V/V%-os oxigénszint, mert ebben az esetben a szén-monoxid jelentősen megnőtt, ami a levegő hűtő hatásából adódó hatások eredménye. A szén-monoxid emisszió eredményeit a 6. és 8. ábrák tartalmazzák.



8. Ábra: Szén-monoxid tartalom alakulása (teljes)

A nitrogén-oxidokra fókuszálva két fő hatás befolyásolta jelentős mértékben az alakulásukat. Az első hatás az adiabatikus lánghőmérséklet változása, mivel a hidrogén lánghőmérséklete magasabb, mint a földgázé, ezért a P% hidrogénarány növelésével



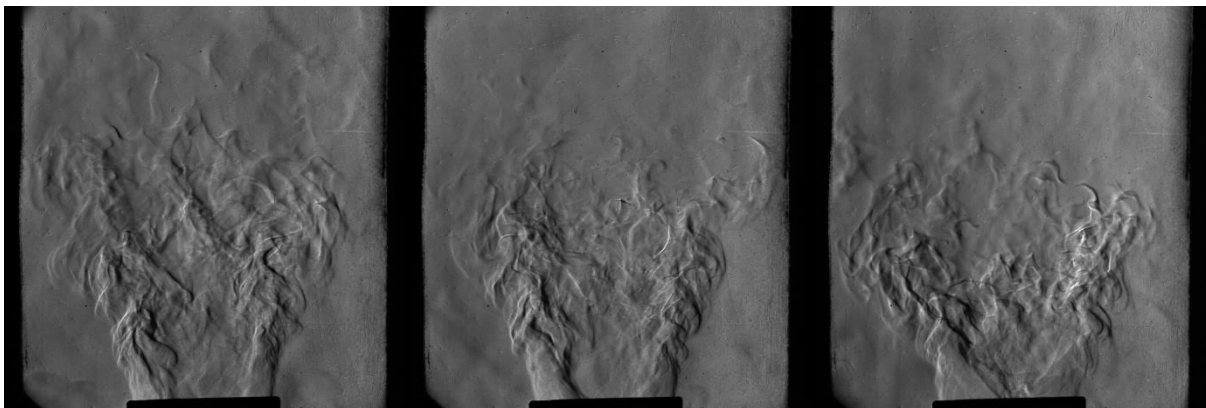
9. Ábra: Nitrogén-oxidok tartalmának alakulása

növekszik az tűztéri hőmérséklet is. A hőmérséklet emelkedése a nitrogén-oxidok keletkezését elősegíti, ezáltal a P% hidrogénarány növelése összességében a nitrogén-oxidok növekményét okozta. Áttérve az oxigéntartalomra az megfigyelhető, hogy a bevezetett levegő mennyiségével a nitrogén-oxidok keletkezése is lecsökkent. Ez ismételtén a tűztéri hőmérséklet megváltozására vezethető vissza, mivel a környezetből beszívott levegő nem volt előmelegítve így sokkal alacsonyabb hőmérsékletű volt a tűztérnél. Ennek eredményeképp pedig csökkenés volt tapasztalható a nitrogén-oxidokban. A mérési értékeken megfigyelhető a bemutatott trend, azonban megemlítendő ebben az esetben is a mérőműszer hibásávja, ami rendkívül nagy a mért értékeinkhez viszonyítva. A nitrogén-oxidok eredményei a 9. ábrán láthatóak.

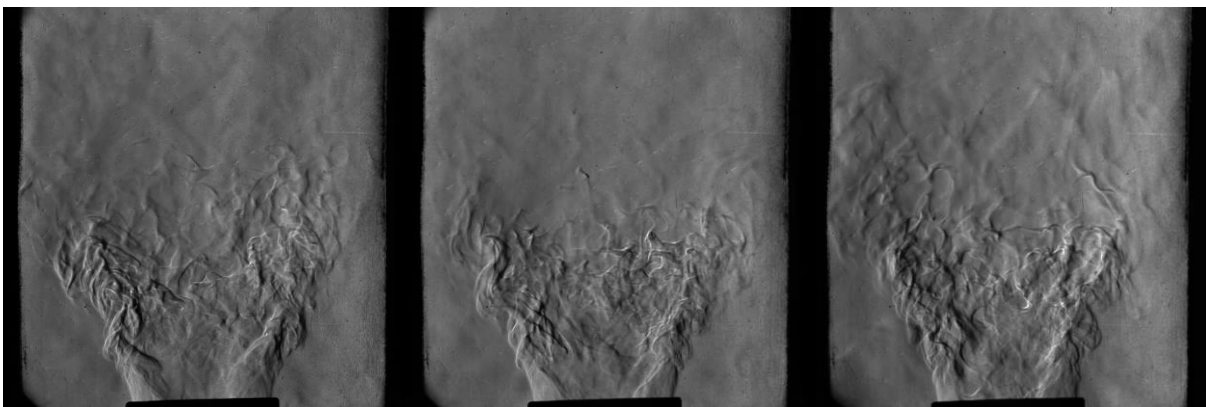
5.2. Intenzív zóna

5.2.1. INTENZÍV ZÓNA GEOMETRIÁJA

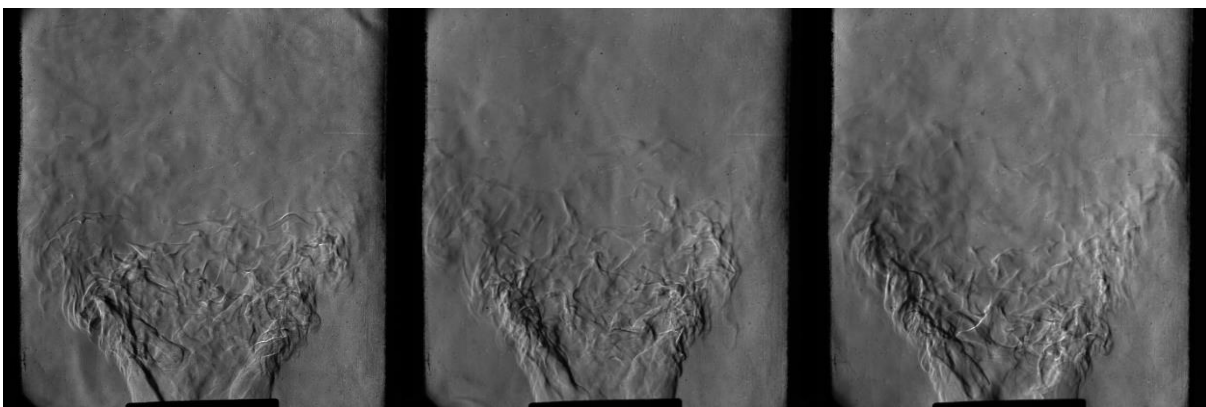
Az intenzív magashőmérsékletű zónának elemzésére a Schlieren képek adtak lehetőséget. Mérési pontonként 1 másodpercet figyeltem meg, amely alatt 1000 kép készült el. Ezek a képek szolgáltak bemeneti adatként mind az általam megírt intenzív zóna magasságát meghatározó kódnak, mind a PIVLAB-ban elemzett adatoknak. A következő ábrákon néhány eredmény képet mutatok be, amelyek megmutatják, hogy az eltérő oxigén és hidrogén miként befolyásolta a nyers képeket. A kép sorozatok azonos V/V% oxigénszint mellett kerültek csoportosításra ebben az esetben. Az eltérések szemléltetéséhez minden pontban 3 eltérő hidrogén bekeverési állapotot mutatok be, amelyek a 0%, a 15%, valamint a 30 P%-os hidrogénarányok. Ezáltal jól láthatóvá válik, hogy a P% hidrogén- és a V/V% oxigéntartalom mellett hogyan változik meg a Schlieren kép és ezzel együtt az intenzív magashőmérsékletű zóna. A Schlieren képek változását a 10 – 13. ábra csoportok mutatják be az V/V% oxigéntartalom és a P% hidrogénarány változásának a függvényében.



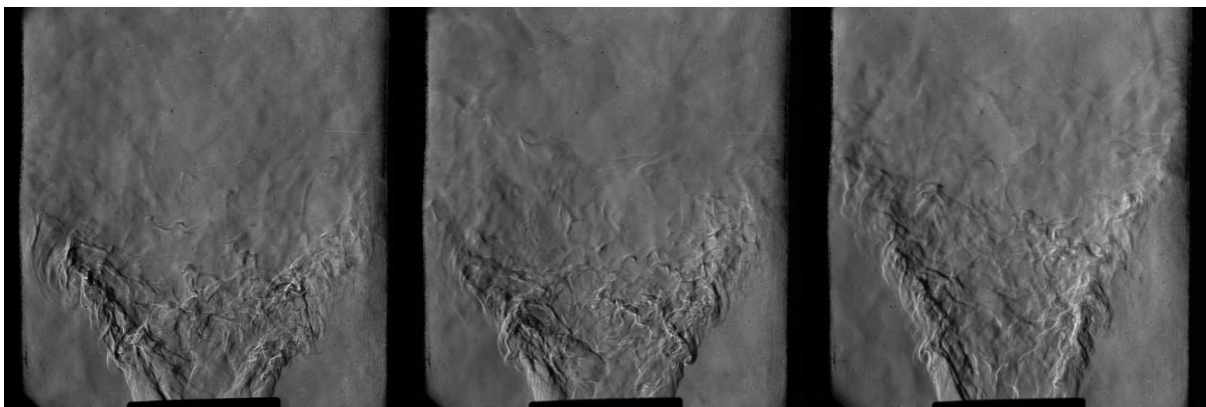
10. Ábra: Schlieren képek 3% O_2 és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H_2 tartalom mellett



11. Ábra: Schlieren képek 5% O_2 és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H_2 tartalom mellett

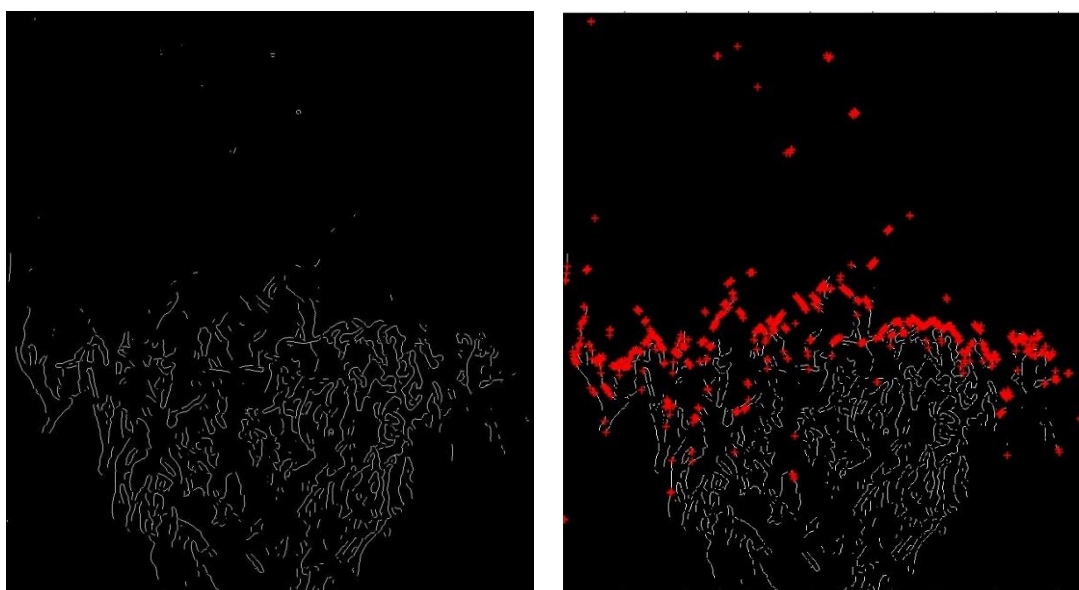


12. Ábra: Schlieren képek 7% O_2 és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H_2 tartalom mellett



13. Ábra: Schlieren képek 9% O_2 és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H_2 tartalom mellett

A 4.3.3-as fejezetben megismert kódot használva minden mérési pontban készült képekre elvégeztem a képelemzést. Ennek eredményeként megkaptam az élfelismert képet, valamint az intenzív zóna felső határát, az ezekről készített képek a 14. ábrán láthatóak. A front keresési megoldásomnál látható némi hiba főleg a kép felső tartományában, azonban ezek a jelölt pontok nem befolyásolják jelentősen a statisztikai kiértékelést.

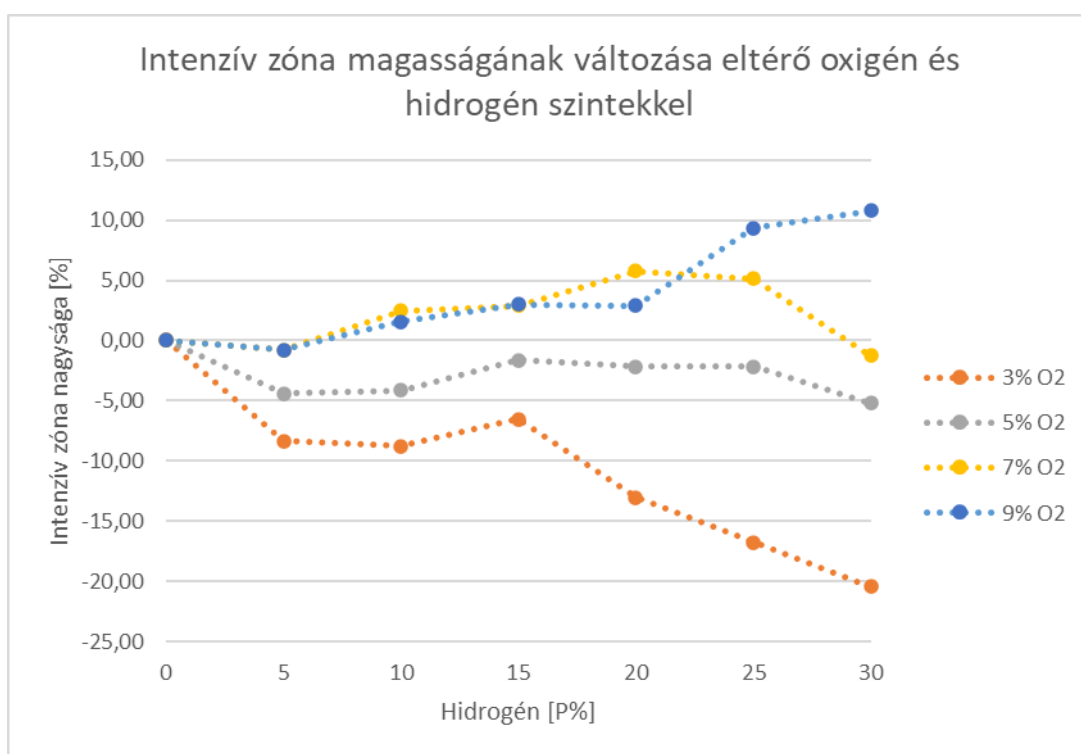


14. Ábra: Detektált élek (jobb) és Detektált magasság (bal) 3% O₂ és 25% H₂ tartalom mellett

A kapott eredmények alapján, hogy mind a V/V% oxigénszint változása, mind a P% hidrogénarányának a megváltozása befolyással bír az intenzív zóna magasságára. A mérési pontok első esetben az adott oxigéntartalomhoz tartozó tisztán földgáz tüzelésű ponthoz lettek viszonyítva.

Az eredményeim azt mutatják, hogy alacsony, 3 V/V%-os oxigéntartalom mellett a hidrogénarányának a növelésével csökken az intenzív magashőmérsékletű zónája az égésnek. Ezen eredmény teljesen egybe vág egy korábbi mérési sorozatommal, ahol eltérő optikai rendszert és kiértékelést alkalmaztam. [6] Emelve a füstgázban a V/V% oxigénszintet 5%-ra a csökkenőhatás átalakul és a tiszta földgáz üzemi ponthoz viszonyítva ugyan csökkent a zóna magassága a hidrogén bevezetésével, azonban a többi pont között nagy változás nem tapasztalható. Tovább emelve az oxigéntartalmat 7 V/V%-ra a korábbi trend teljesen megváltozik. Ezen mérési pontok esetén a P% hidro-

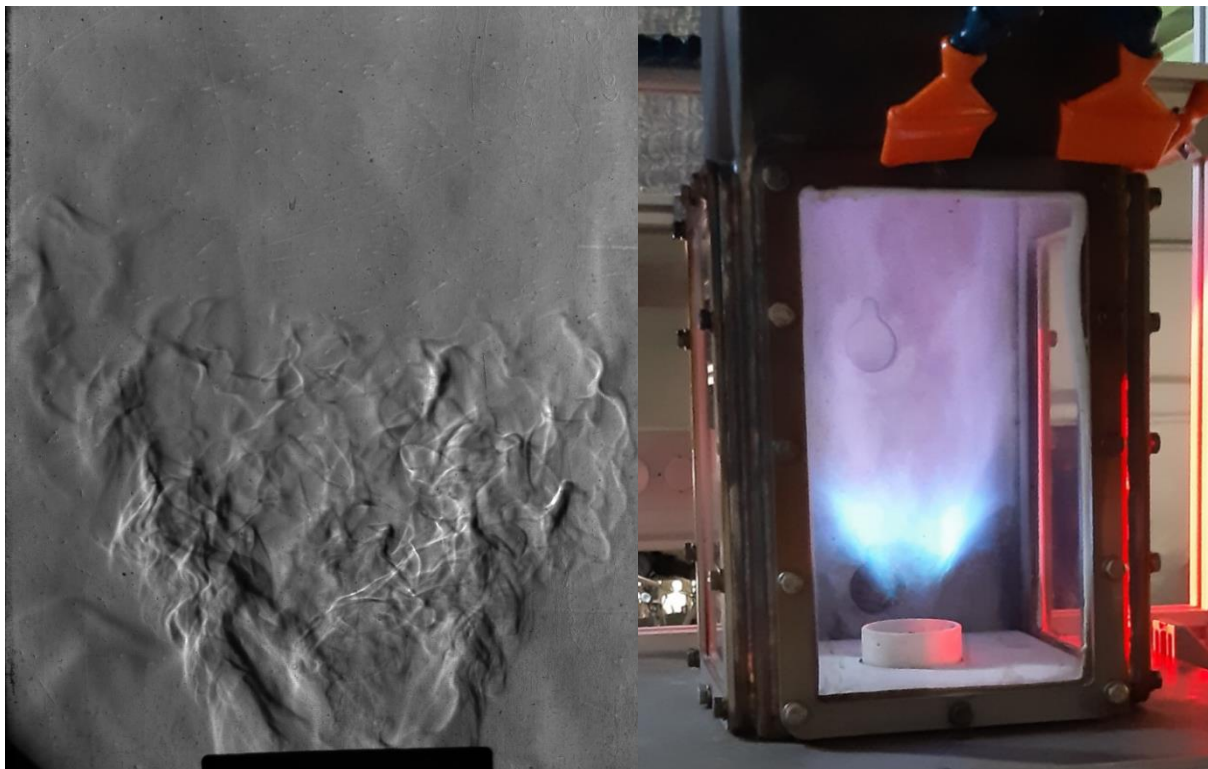
génarányának növelésével a zóna magassága növekedni kezdett, a legnagyobb hidrogén bekeverés elérésekor viszont csökkent. A 9 V/V%-os oxigéntartalom esetén az intenzív zóna magasságának változása a hidrogén bekeverési aránnyal már folyamatosan növekedett és ezáltal egy teljesen ellenkező trendet mutatott az alacsony oxigénszinthez képest. A bemutatott trendek a 15. ábrán láthatóak.



15. Ábra: Intenzív zóna magasságának változása

A jelenség főként arra vezethető vissza, hogy a P% hidrogénarányának növelésével a kiáramlási sebesség a pilot ági fúvókán megnő. A megnövekedett kiáramlási sebességből fakadó impulzus szívja meg a magasabb V/V% oxigéntartalommal rendelkező pontokat, hogy kevésbé legyen diffúz az égés. Ezzel párhuzamosan a magas P% hidrogénarány mellett kialakult a kettős „s-v” égés az áramlási sebesség miatt. Az egyenes láng a gyorsan átáramló hidrogénnek köszönhető, amelyben az égés közel sem egyenletes és az alacsony perdület miatt kisebb lesz az a zóna, ahol az égés megfelelő minőségű. A beszívott égési levegő a tűztérbe vezető útján keresztül át halad egy perdítő elemen, amely megnöveli a premix ágon érkező közeg perdületét. A Schlieren képeken az egyenes lángkép nem látható, ezáltal ahogy nőtt az egyenes tartomány az alacsony oxigéntartalom mellett úgy csökken a magassága az intenzív zónának alacsonyabb

szinten. A szabadszemmel látható lángkép és az azonos üzemállapotban készült Schlieren kép a 16. ábrán látható.

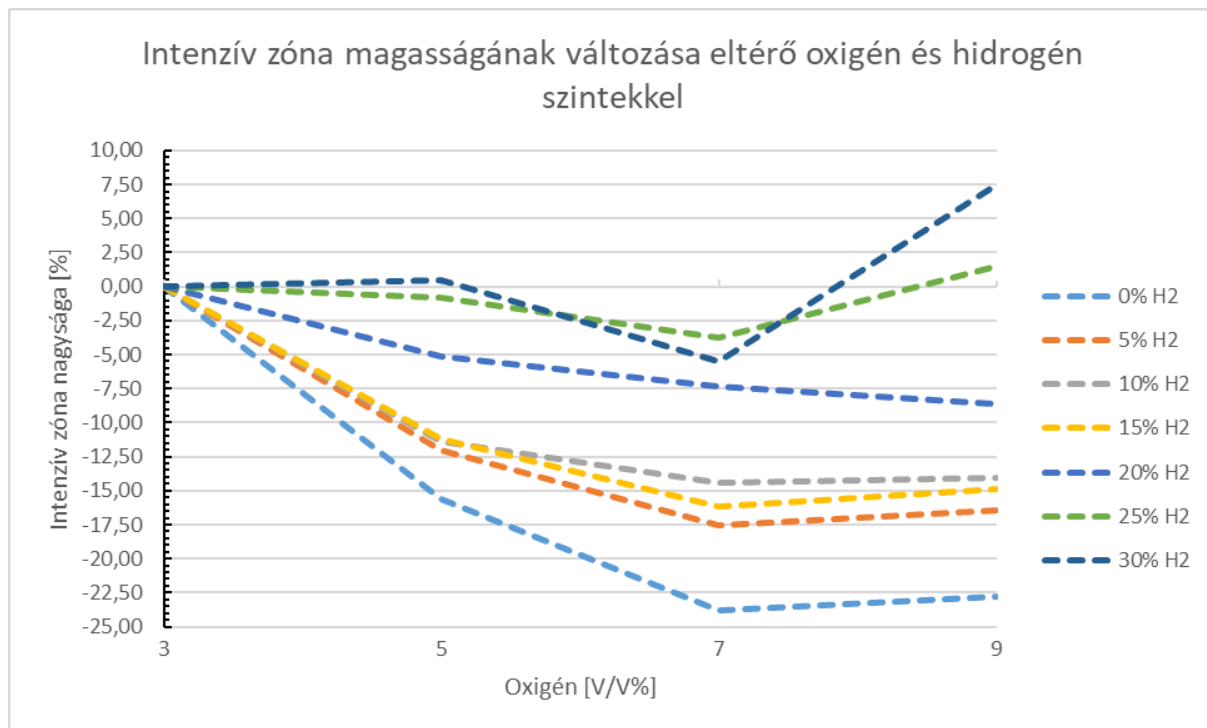


16. Ábra: Schlieren kép (bal) és szabadszemmel látható lángkép (jobb) 3% O_2 és 25% H_2 tartalom

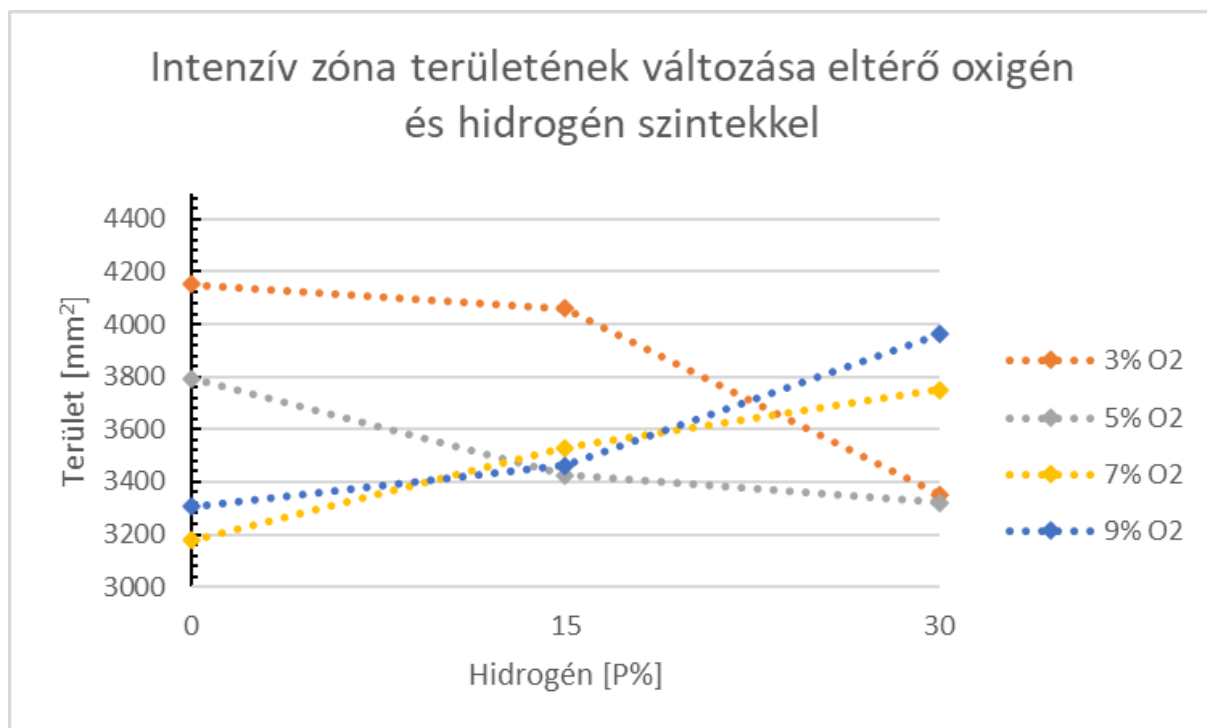
A bemutatott hatás-ellenhatás közel 5%-os szintnél éri el az egyensúlyi állapotot, ebből kifolyólag ebben a pontban a magasság értékek szűk határon belül maradtak az eltérő hidrogén bekeverések során. Ezt követően a 7 és 9 V/V% oxigéntartalom mellett a nagyobb perdülettel rendelkező levegőt a hidrogén impulzusa megszívta ezáltal az intenzív zóna növekedett.

Áttérve az állandó P% hidrogénarány mellett vizsgált zóna magasságokra, azt láthatjuk, hogy a P% hidrogénarányának növelésével az intenzív zóna magasságának csökkenése egyre kisebb mértékben történik meg. A füstgáz oxigéntartalom növekedésével a zóna magasságváltozásnak a gradiense lecsökken. Illetve megfigyelhető, hogy a 7 és 9 V/V%-os oxigéntartalmú pontoknál van egy törés és jellemzően előjelváltás is. A füstgáz oxigéntartalom függvényében ábrázolt intenzív zóna magasságának változása a 17. ábrán látható. A magas, 30 P% hidrogéntartalmú mérések mentén

a 7 V/V%-os oxigéntartalmú pontban több oldalról is eltérés látható a trendekhez képest. A trendeket figyelembe véve a pont mérése során vélhetően zavarás lépett fel, ami a pont visszamérését fogja igényelni a jövőben.



17. Ábra: Intenzív zóna magasságának változása



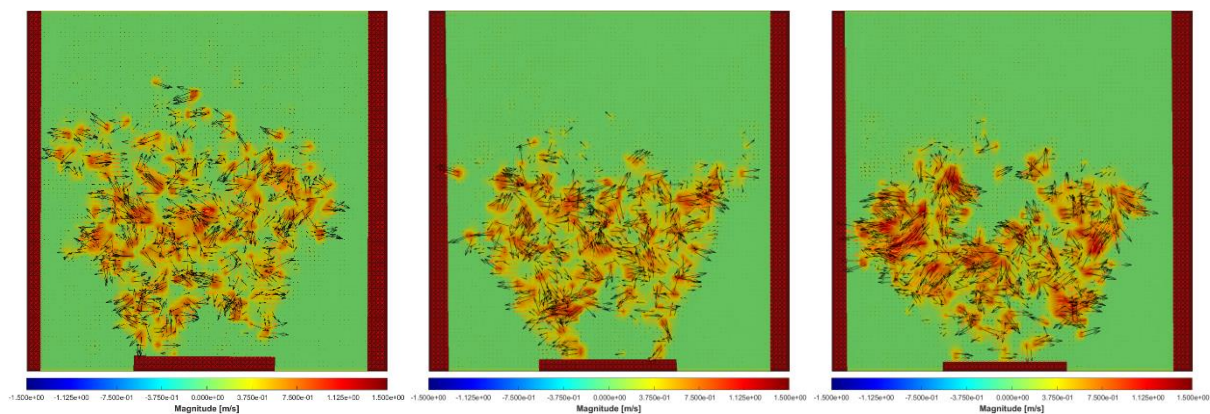
18. Ábra: Intenzív zóna területének változása

A magasság változás mellett vizsgálható az intenzív zóna területe is. A terület vizsgálatakor a térbeli áramlásiképnek csak a síkbeli vetülete került vizsálatra. A zóna területének változását a 18. ábra mutatja. A zóna területének alakulása a magasság ismeretében visszavezethető a kúpszög nyílására is. A területmérés eredményeként az adódik, hogy a 3 V/V% oxigéntartalom mellett a növekvő P% hidrogén részarány mellett a zónának csökken a magassága és ezzel együtt csökken a zóna területe is, mindazonáltal a nyílásszög pedig növekszik. 5 V/V% oxigéntartalom mellett továbbra is megvan a zóna területének csökkenése, amelynél figyelembe véve a magasságnak a szűk határok közötti ingadozását arra lehet következtetni, hogy a bejuttatott többlet levegő hatására a nyílásszög ebben az esetben már csökken. Mindazonáltal áttérve a 7 V/V%-os oxigénszintre a terület változása már nem csökkenő trendet mutat a P% hidrogén növekedésével, hanem növekedést. Amely tovább folytatódik a 9 V/V%-os oxigéntartalom mellett.

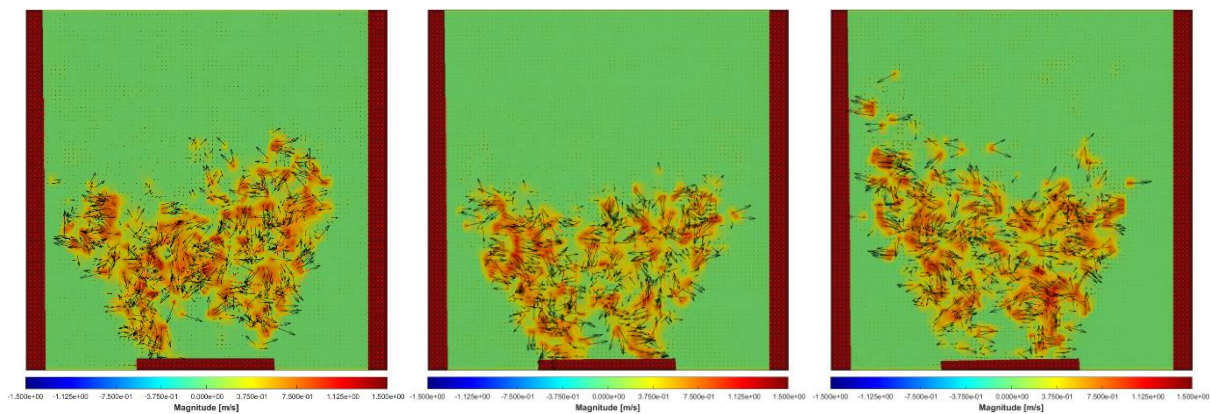
5.2.2. PIVLAB

A Schlieren képek másik felhasználási módszertana a MATLAB PIVLAB bővítménye által nyújtott vektor analízis. A módszer a részecskéknek és az azonos alakzatoknak az egymást követő képek alapján történő elmozdulásának számítását teszi lehetővé. Annak érdekében, hogy a program valós sebesség vektorokat adjon eredményül kalibrációra volt szükség, amelyben egy vizsgált környezetben egy valós geometriának a pixel és mm adatai segítségével számolt tovább. A Schlieren képekből minden mérési pontban készültek vektorábra, valamint külön ábrák, a magnitúdóról (magnitude), az örvényességről (vorticity), az x-irányú komponensekről (u-component) és az y-irányú komponensekről (v-component). Az legenerált képek segítségével alaposabban megismerhetővé váltak az intenzív zónában lejátszódó folyamatok és áramlási viszonyok. Többek között lehetőséget adtak arra, hogy megfigyeljük azokat a területeket, ahol jellemzően örvényesebb az áramlás vagy ahol többször alakul ki visszaáramlás. A képek skáláin látható, hogy milyen sebességek alakultak ki az égés és az áramlás

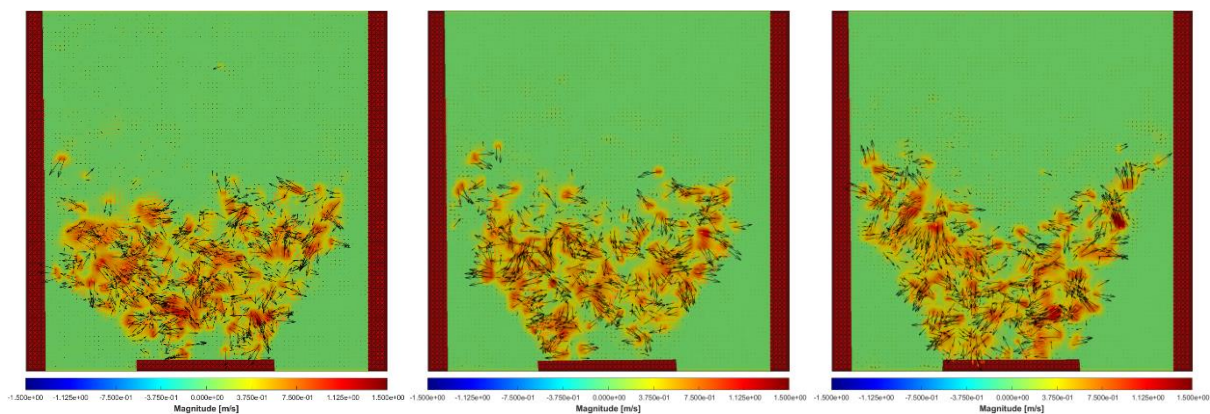
következtében. A képek alapján minden esetben lett generálva egy átlag is, ami magába foglalta az összes képet egy adott mérési pont esetén. Az átlag minden esetben rendkívül kis értékekre adódott, ami annak köszönhető, hogy perdületes az áramlás. Az alkalmazott eszköz által készített képeket összefoglalva és csoportosítva a 19 - 22 ábrák mutatják a magnitúdó esetében, a többi vizsgálatról készült kép eredmény a Mellékletben található. A magnitúdó képeken megfigyelhető, hogy a P% hidrogénarány növelésével a nagy hidrogén áram impulzusának következménye az alacsony nyomású zóna, ami az intenzív zóna kúpszögének csökkenésével jár. Ennek következményeként a diffúz módon bevezetett hidrogén a magasabb V/V% oxigéntartalmaknál a lecsökkent nyomású hidrogén zóna következtében csökken az intenzív terület kúpszöge.



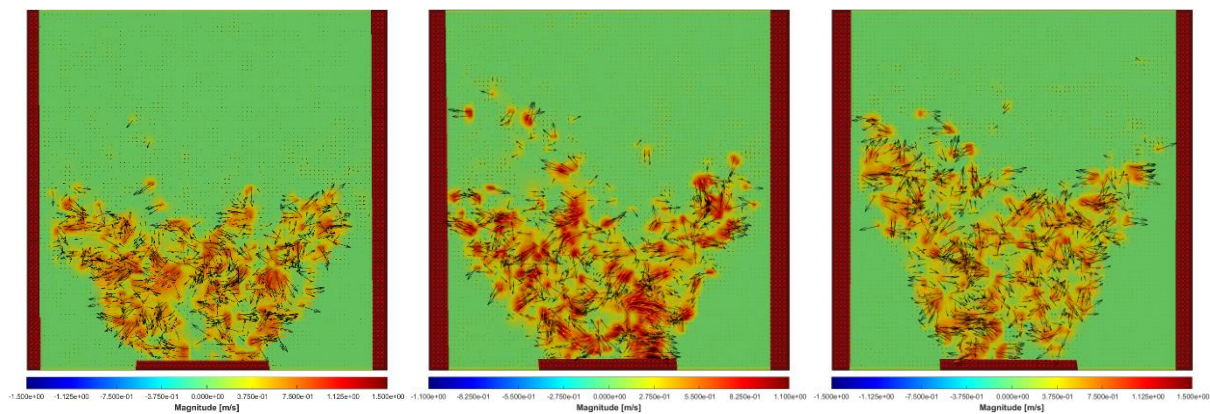
19. Ábra: Magnitúdó képek 3% O_2 és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H_2 tartalom mellett



20. Ábra: Magnitúdó képek 5% O_2 és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H_2 tartalom mellett



21. Ábra: Magnitúdó képek 7% O_2 és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H_2 tartalom mellett



22. Ábra: Magnitúdó képek 9% O_2 és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H_2 tartalom mellett

6. ÖSSZEFOGLALÁS

6.1. Konklúzió

A hidrogén bekeverés a szén-dioxid emisszió tekintetében képes javítani az értékeken a várakozásoknak megfelelően. A szén-monoxid esetében a megfelelő légfelesleg tényezők tartása mellett ez az emissziós érték is el tudja érni az optimálisan alacsony szintet, amennyiben a tüzelőanyag teljesen el tud égni. Ebből kifolyólag az „s-v” alakú lángok kerülendőek, mert nem csak az emissziós értékekben mutattak növekményt, de az égés jelentősen túlnyúlt az égőtéren egészen a füstgázelemző mintavételezési helyéig. Ebből arra lehet következtetni, hogy a diffúz módon bevezetett hidrogén nem képes teljesen kiégni a tűztérben, amennyiben nincs elegendő oxigén többlet. A magnitúdó ábrákon az látszik, hogy ha nő az oxigéntartalom a perdület nő, ezáltal nyílik a kúpszög amennyiben növeljük a hidrogéntartalmat. A nagyobb impulzus következtében lecsökken a középvezetékben a nyomás, ami csökkenti a kúpszöget (pl. 9 V/V% oxigéntartalom növekvő hidrogénarány mellett). A nitrogén-oxidok esetében, habár kibocsátás növekedés tapasztalható a hidrogén növelésével ez a növekmény mérsékelhető a V/V% oxigénszint növelésével. Az intenzív zóna tekintetében látható, hogy a bevezetett oxigén és hidrogén következményként a kialakuló hatások befolyásolják egymást. Ennek eredményeként a 3 és 5 V/V% oxigéntartalom esetében a hidrogén bevezetés hatására csökken az intenzív zóna területe, amíg 7 és 9 V/V% esetében pedig növekszik a hidrogén impulzusából fakadóan. Tehát az szén-monoxid változásának viszonyait figyelembe véve, a mostani mérési sorozathoz felhasznált geometriák esetében az látszik, hogy a földgáz-hidrogén gázkeverékeknek 5 és 7 V/V% oxigéntartalom mellett szélsőértéke található. Azonban megjegyzendő, hogy az értékek a mérési pontoknál hibahatáron belül helyezkednek el.

6.2. További vizsgálatok

A mérések igencsak ígéretes eredményekkel zárultak, így mindenképp szükséges a további átfogó analízis. A méréseim során teszt jelleggel kipróbálásra kerültek nagyobb pilot ági fúvóka átmérők, amelyekkel kiküszöbölhető volt az „s-v” alakú lángok kialakulása és magasabb hidrogén tartalomig is lehetséges volt a biztonságos üzem. Azonban a rövid tesztek során már megállapítható volt, hogy a magasabb hidrogén és oxigéntartalom mellett a láng elkezdett visszaülni az égőszájra, ami nagy hőterhelést okoz és növeli a visszaégés veszélyét bizonyos üzemállapotokban. A legmagasabb teszt jelleggel mért pont 50 teljesítményszázalék hidrogén volt, amely 77,98 térfogatszázaléknak felel meg. Tehát a nagyobb fúvóka átmérővel végzett méréseknek, amely teljes egészében megfelel a Capstone C30-as égőjének fontos szerepe van. Továbbá azon eredmények alapján még tovább fejlődhet a kutatás és már a gázturbinában üzemközből is tesztelhetőek lennének a viszonyok.

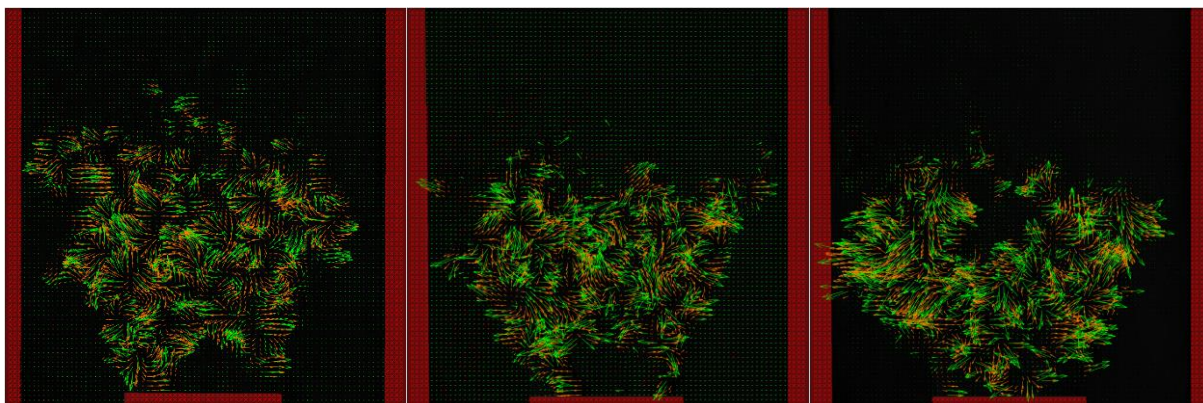
7. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] H. A. John Paulson, X. Yang, C. P. Nielsen, S. Song, and M. B. McElroy, "Breaking the hard-to-abate bottleneck in China's path to carbon neutrality with clean hydrogen", doi: 10.1038/s41560-022-01114-6.
- [2] "Net Zero by 2050 – Analysis - IEA." Accessed: Oct. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- [3] J. Cresko *et al.*, "U.S. Department of Energy's Industrial Decarbonization Roadmap," Sep. 2022, doi: 10.2172/1961393.
- [4] Y. Bak, H. Ryu, G. Choi, D. Lee, and J. M. Lee, "Optimization of operational strategies for industrial applications of solar-based green hydrogen," *Appl Energy*, vol. 377, p. 124693, Jan. 2025, doi: 10.1016/J.APENERGY.2024.124693.
- [5] A. Buttler and H. Spliethoff, "Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2440–2454, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2017.09.003.
- [6] Papp D., "Hidrogén együtt tüzelése perdületes égőben," Szakdolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2023.
- [7] R. De Robbio, "Innovative combustion analysis of a micro-gas turbine burner supplied with hydrogen-natural gas mixtures," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, Sep. 2017, pp. 858–866. doi: 10.1016/j.egypro.2017.08.291.
- [8] M. Sekar, "Gaseous fuel injection assisted with rich hydrogen content in turbo-jet engine for enhanced thrust and combustion efficiency," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 78, pp. 564–571, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2024.06.332.
- [9] M. Sekar, T. A. Alahmadi, and S. Nithya, "Numerical simulation of industrial gas burners fueled with hydrogen-methane mixtures for enhanced combustion efficiency and reduced greenhouse gas emissions," *Fuel*, vol. 370, p. 131807, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.FUEL.2024.131807.
- [10] H. Pan, S. Geng, H. Yang, G. Zhang, H. Bian, and Y. Liu, "Influence of H₂ blending on NO_x production in natural gas combustion: Mechanism comparison and reaction routes," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 2, pp. 784–797, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.09.251.
- [11] W. Du, S. Zhou, H. Qiu, J. Zhao, and Y. Fan, "Experiment and numerical study of the combustion behavior of hydrogen-blended natural gas in swirl burners," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 39, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.csite.2022.102468.
- [12] L. de Santoli, G. Lo Basso, S. Barati, S. D'Ambra, and C. Fasolilli, "Seasonal energy and environmental characterization of a micro gas turbine fueled with H₂NG blends," *Energy*, vol. 193, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2019.116678.

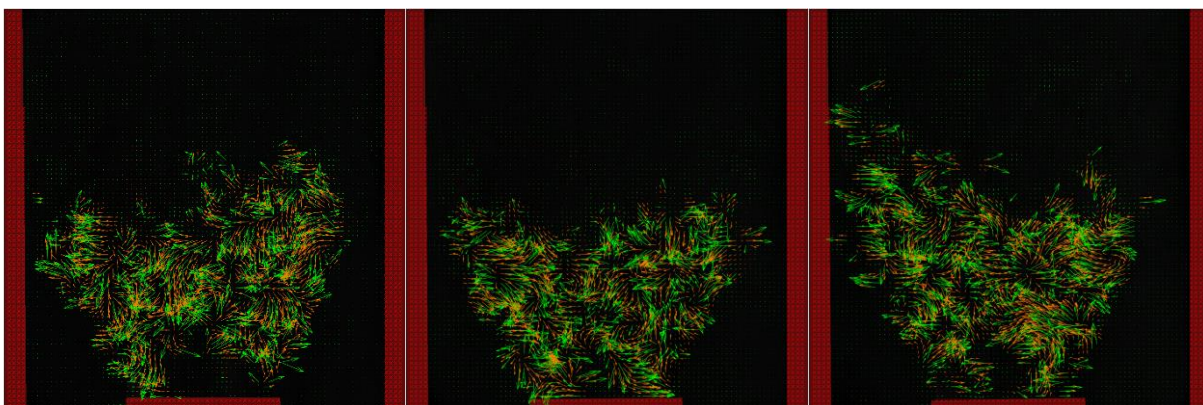
- [13] Y. Wang *et al.*, "Numerical investigation on combustion regulation for a stoichiometric heavy-duty natural gas engine with hydrogen addition considering knock limitation," *Int J Hydrogen Energy*, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.01.299.
- [14] J. Lu, Z. Fu, J. Liu, and W. Pan, "Influence of air distribution on combustion characteristics of a micro gas turbine fuelled by hydrogen-doped methane," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 207–216, May 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2021.11.027.
- [15] W. Bao, L. Ding, Y. C. Kang, and L. Sun, "Closed-Loop Synthetic Inertia Control for Wind Turbine Generators in Association With Slightly Over-Speeded Deloading Operation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 38, no. 6, pp. 5022–5032, Nov. 2023, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3224431.
- [16] W. Zhang, Y. Wen, and C. Y. Chung, "Impedance-Based Online Estimation of Nodal Inertia and Primary Frequency Regulation Capability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 38, no. 3, pp. 2748–2760, May 2023, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3186525.
- [17] S. Behera *et al.*, "A comprehensive study on energy management, sensitivity analysis, and inertia compliance of feed-in tariff in IEEE bus systems with grid-connected renewable energy sources," *Heliyon*, vol. 10, no. 17, p. e36927, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.HELIYON.2024.E36927.
- [18] H. Gao, F. Zhang, L. Ding, G. Zhang, L. Yang, and A. Salimu, "Towards non-virtual inertia control of renewable energy for frequency regulation: Modeling, analysis and new control scheme," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 162, p. 110314, Nov. 2024, doi: 10.1016/J.IJEPES.2024.110314.
- [19] A. Ulbig, T. S. Borsche, and G. Andersson, "Analyzing Rotational Inertia, Grid Topology and their Role for Power System Stability," in *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier B.V., 2015, pp. 541–547. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.12.436.
- [20] J. Cai, X. Huai, and W. Xi, "An optimal design approach for the annular involute-profile cross wavy primary surface recuperator in microturbine and an application case study," *Energy*, vol. 153, pp. 80–89, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.ENERGY.2018.04.016.
- [21] "Reliable power when and where you need it. Clean and simple." [Online]. Available: www.capstoneturbine.com
- [22] P. S. P. Corrêa, J. Zhang, E. E. S. Lora, R. V. Andrade, L. R. de Mello e Pinto, and A. Ratner, "Experimental study on applying biomass-derived syngas in a microturbine," *Appl Therm Eng*, vol. 146, pp. 328–337, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.09.123.
- [23] V. Józsa, M. Malý, D. Füzesi, E. Rácz, R. A. Kardos, and J. Jedelský, "Schlieren analysis of non-MILD distributed combustion in a mixture temperature-controlled burner," *Energy*, vol. 273, p. 127230, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.ENERGY.2023.127230.

- [24] G. Hidegh, D. Csemány, J. Vámos, L. Kavas, and V. Józsa, "Mixture Temperature-Controlled combustion of different biodiesels and conventional fuels," *Energy*, vol. 234, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121219.
- [25] "Basic Information about NO2 | US EPA." Accessed: Nov. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2>
- [26] E. Traldi *et al.*, "Schlieren imaging: a powerful tool for atmospheric plasma diagnostic," *EPJ Tech Instrum*, vol. 5, no. 1, Dec. 2018, doi: 10.1140/epjti/s40485-018-0045-1.
- [27] "Directive - 2015/2193 - EN - EUR-Lex." Accessed: Sep. 03, 2024. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2015/2193/oj>
- [28] "(PDF) Cost effective biomass combustion process control." Accessed: Nov. 09, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/290762568_Cost_effective_biomass_combustion_process_control

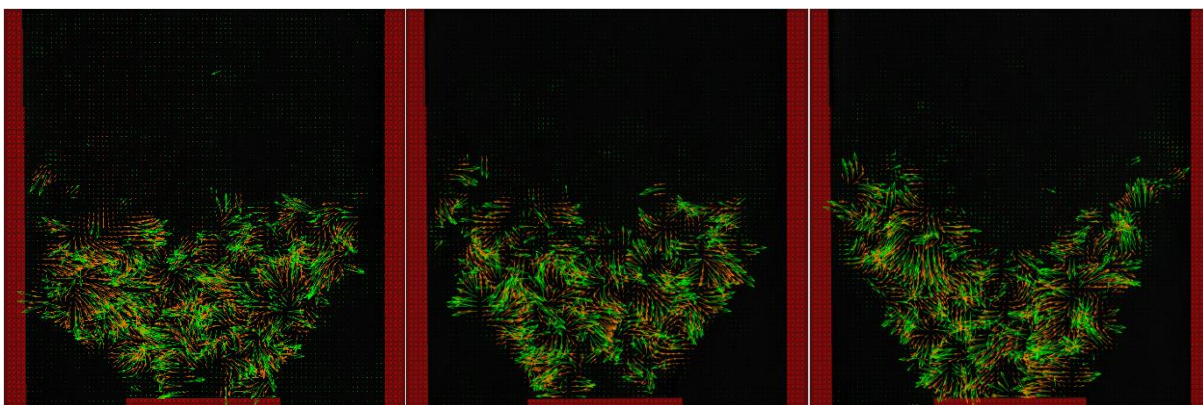
8. MELLÉKLET



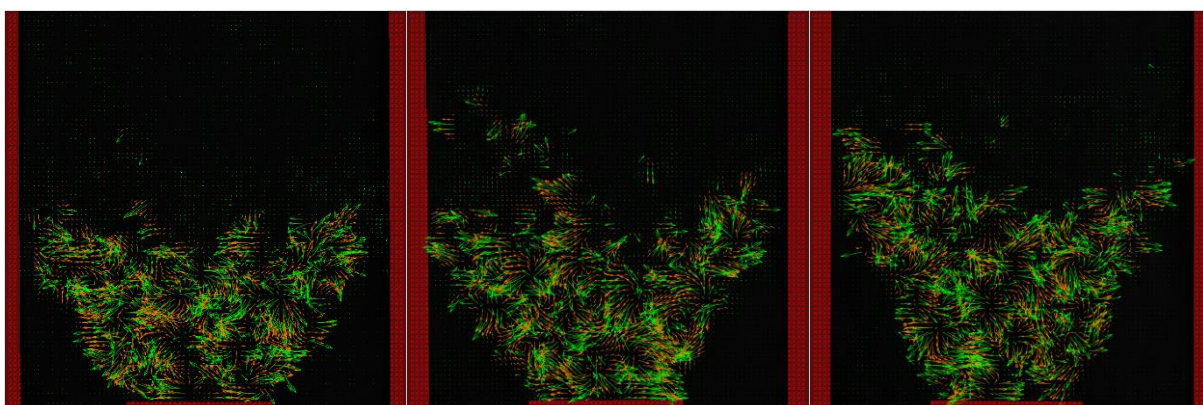
23. Ábra: Vektor képek 3% O_2 és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H_2 tartalom mellett



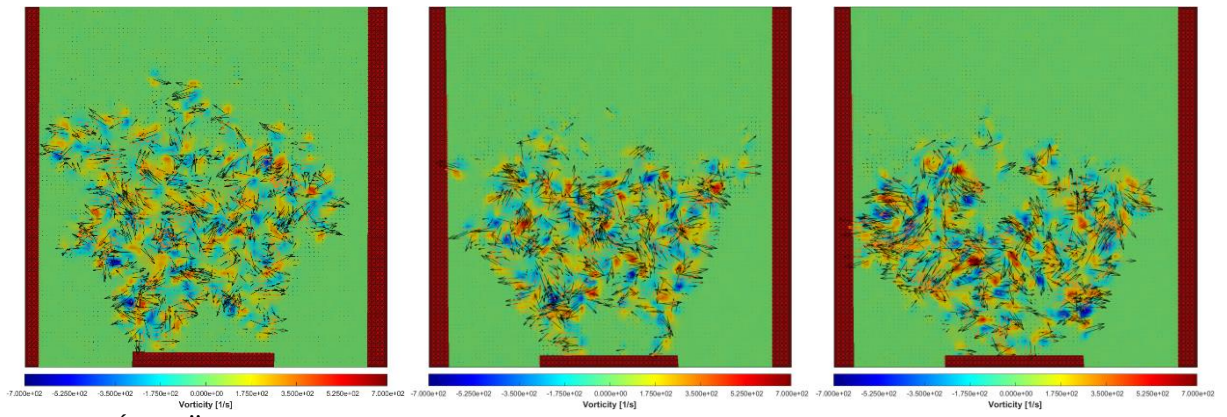
24. Ábra: Vektor képek 5% O_2 és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H_2 tartalom mellett



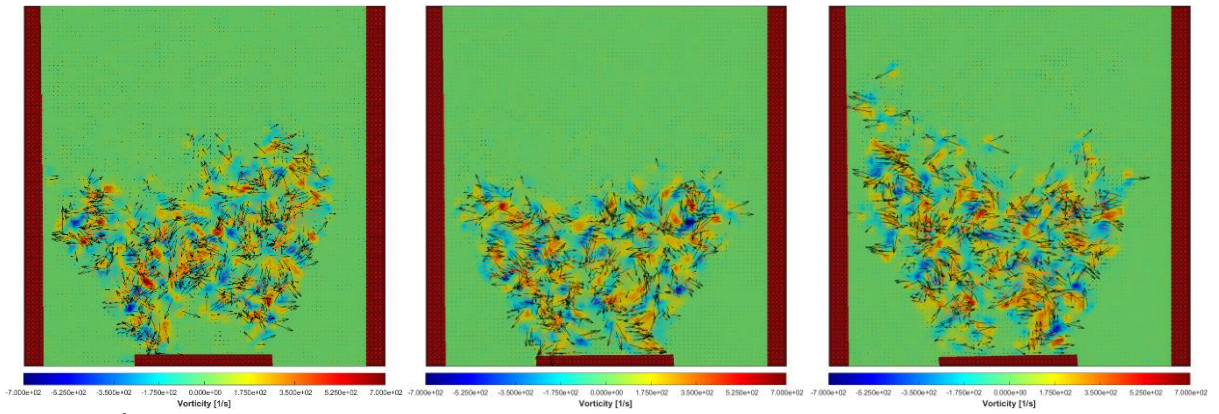
25. Ábra: Vektor képek 7% O_2 és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H_2 tartalom mellett



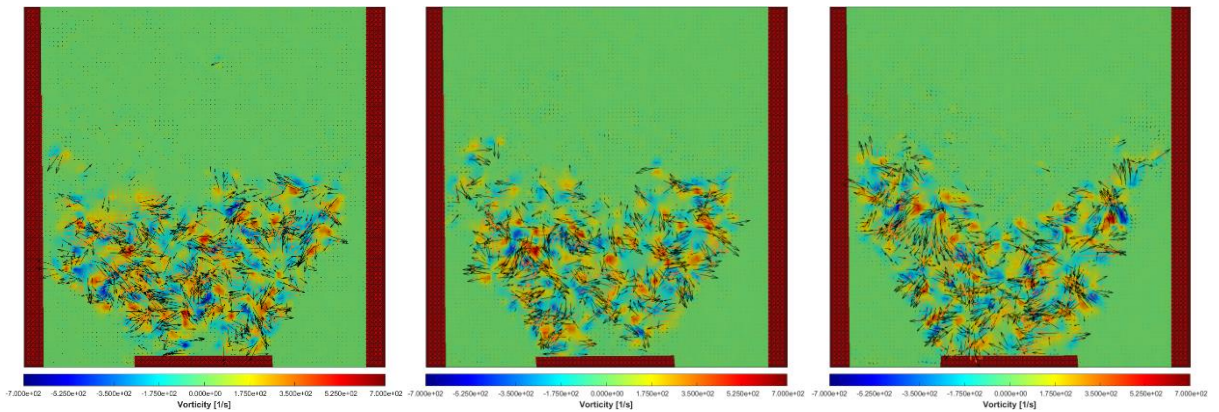
26. Ábra: Vektor képek 9% O_2 és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H_2 tartalom mellett



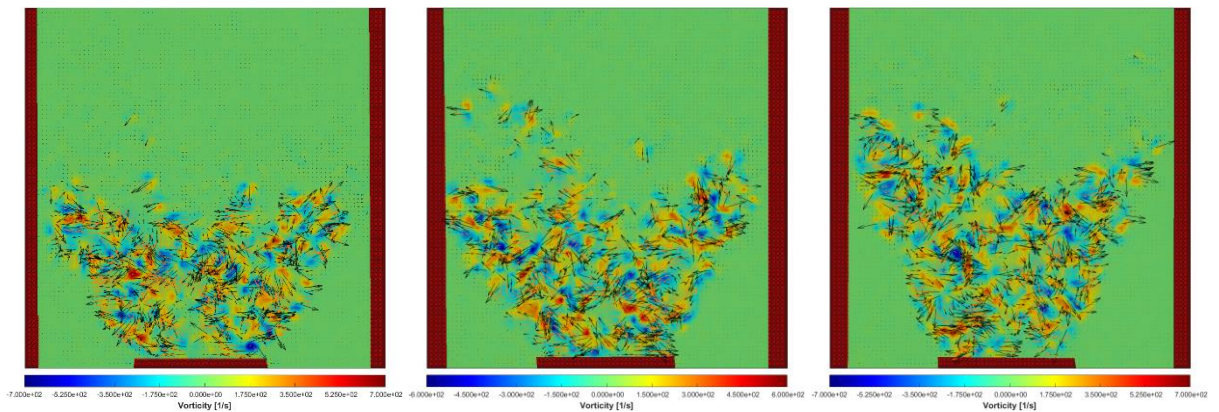
27. Ábra: Örvényesség képek 3% O₂ és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H₂ tartalom mellett



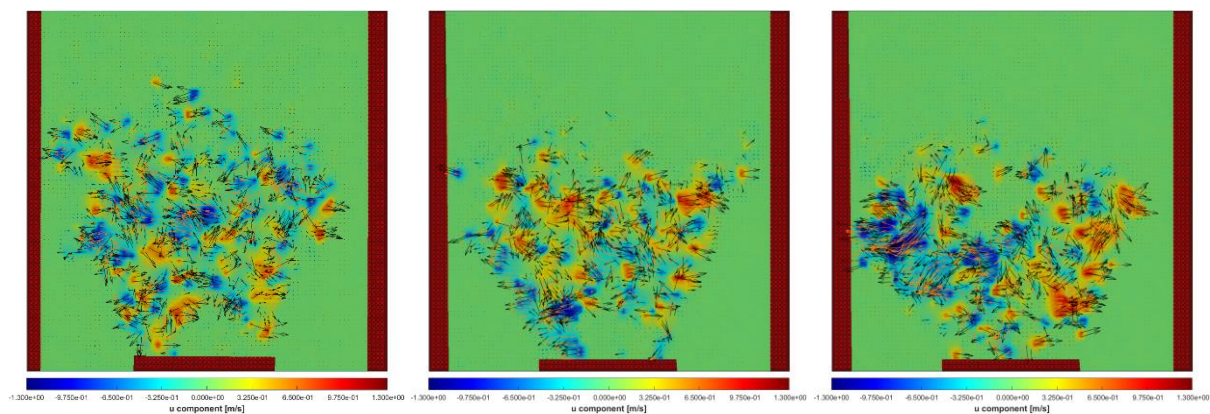
28. Ábra: Örvényesség képek 5% O₂ és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H₂ tartalom mellett



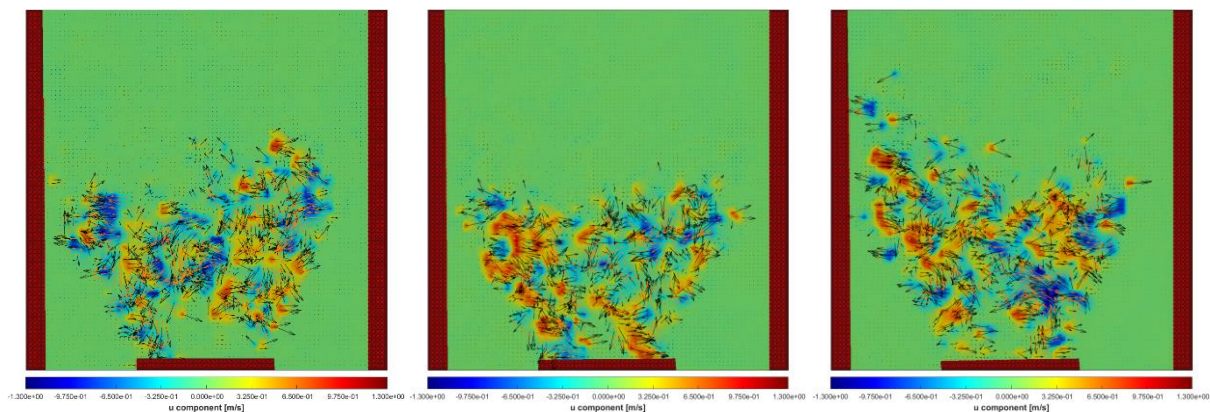
29. Ábra: Örvényesség képek 7% O₂ és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H₂ tartalom mellett



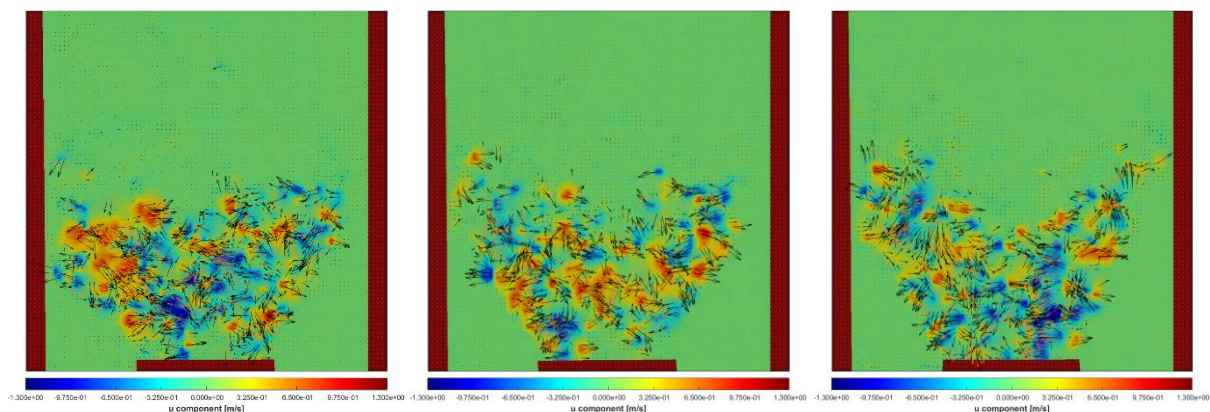
30. Ábra: Örvényesség képek 9% O₂ és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H₂ tartalom mellett



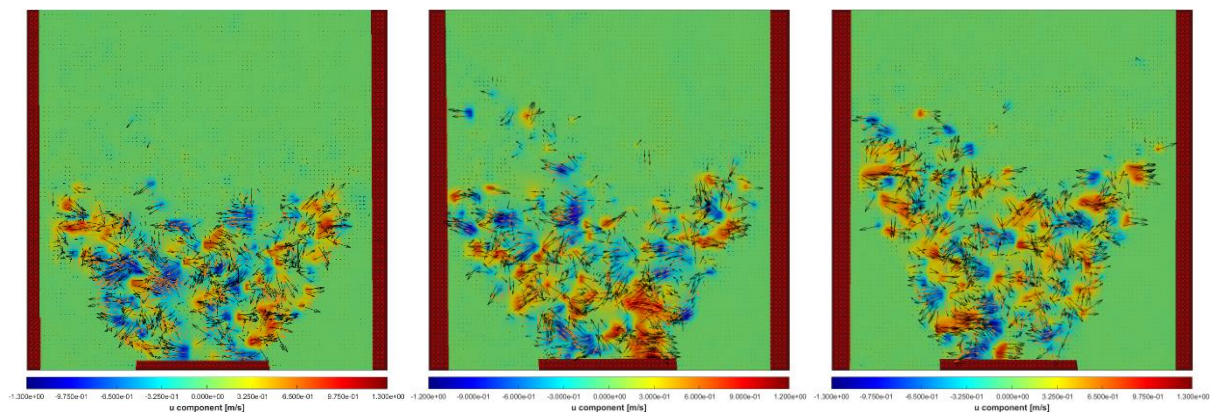
31. Ábra: X komponens képek 3% O₂ és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H₂ tartalom mellett



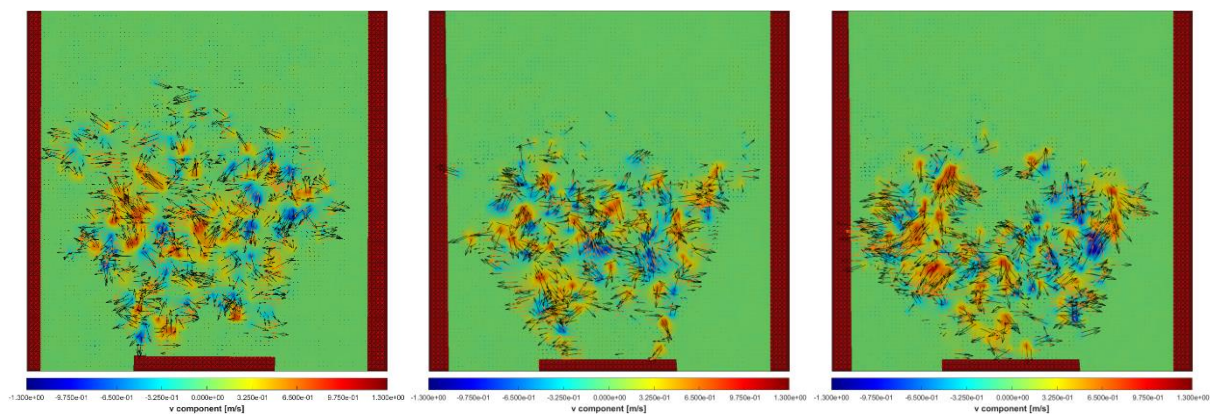
32. Ábra: X komponens képek 5% O₂ és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H₂ tartalom mellett



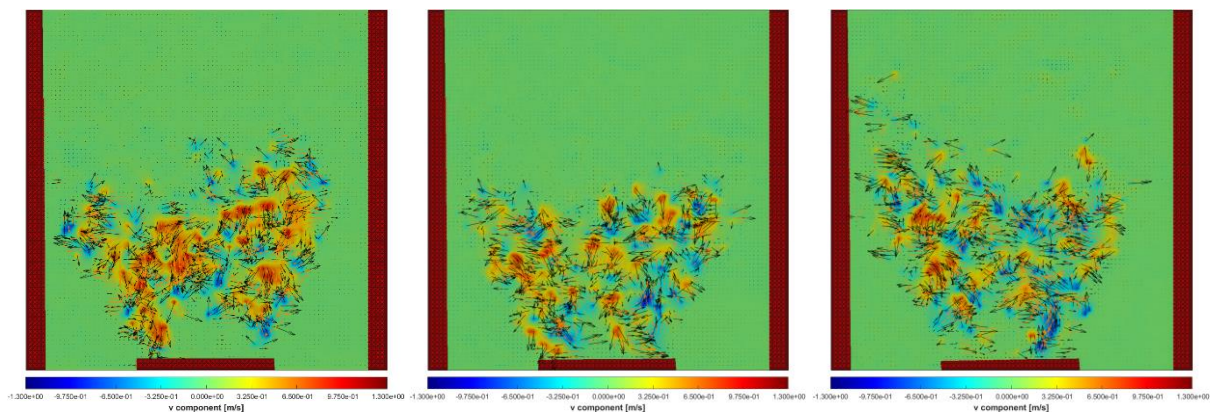
33. Ábra: X komponens képek 7% O₂ és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H₂ tartalom mellett



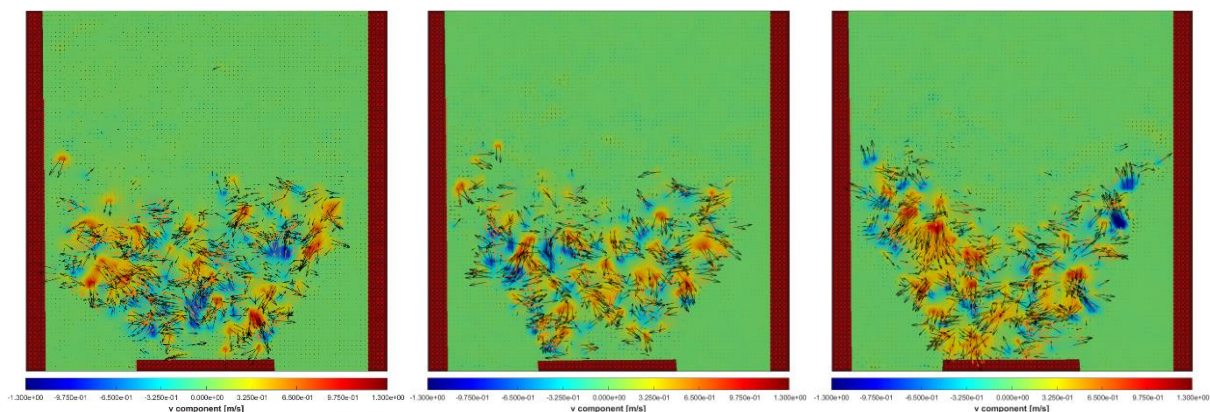
34. Ábra: X komponens képek 9% O₂ és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H₂ tartalom mellett



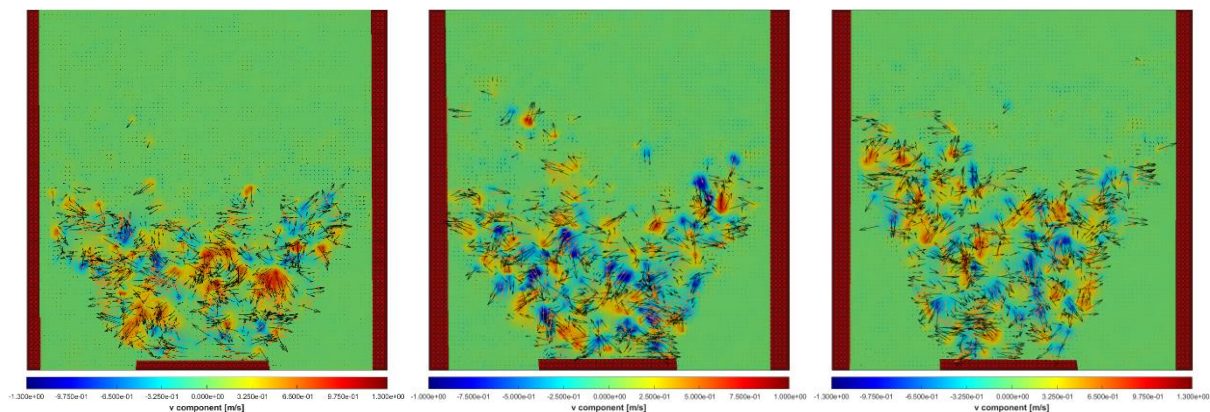
34. Ábra: Y komponens képek 3% O₂ és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H₂ tartalom mellett



35. Ábra: Y komponens képek 5% O₂ és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H₂ tartalom mellett



36. Ábra: Y komponens képek 7% O₂ és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H₂ tartalom mellett



37. Ábra: Y komponens képek 9% O₂ és 0% (bal), 15% (középső), 30% (jobb) H₂ tartalom mellett