

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

ENERGETIKAI GÉPEK ÉS RENDSZEREK TANSZÉK

PAPP DÁNIEL MIKLÓS

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

HIDROGÉN FÖLDGÁZHOZ TÖRTÉNŐ BEKEVERÉSI ARÁNYÁNAK VIZSGÁLATA

PERDÜLETES ÉGŐBEN

KONZULENS:

DR. SZTANKÓ KRISZTIÁN ENDRE

EGYETEMI DOCENS

BUDAPEST, 2023

TARTALOMJEGYZÉK

1	BEVEZETÉS.....	3
1.1	<i>Célkitűzések</i>	3
1.2	<i>Hidrogénstratégiák</i>	3
1.2.1	EURÓPAI UNIÓ HIDROGÉNSTRATÉGIÁJA [2].....	3
1.2.2	MAGYARORSZÁG NEMZETI HIDROGÉNSTRATÉGIÁJA [3].....	6
2	HIDROGÉN FELHASZNÁLÁS.....	8
2.1	<i>Hidrogén térnyerése</i>	8
2.2	<i>Földgáz és hidrogén együtt tüzelése</i>	10
3	GÁZTURBINÁK SZEREPE.....	10
3.1	<i>Inercia szerepe a villamosenergia-rendszerben</i>	10
3.2	<i>Capstone C30 felépítése</i>	12
4	HIDROGÉN EGYÜTT TÜZELÉSE PERDÜLETES ÉGŐBEN.....	13
4.1	<i>Mérés elméleti összefoglaló</i>	13
4.2	<i>Tüzelőberendezés kialakítása [19]</i>	16
4.3	<i>Fúvóka kialakítás</i>	17
4.4	<i>Várakozások</i>	19
4.5	<i>Vizsgálati módszerek</i>	20
4.5.1	SCHLIEREN VIZSGÁLAT.....	20
4.5.2	EMISSZIÓ VIZSGÁLAT.....	24
5	KIÉRTÉKELÉS.....	25
5.1	<i>Eredmények értékelése</i>	25
5.2	<i>Konklúzió</i>	33
5.3	<i>Tovább mérések, fejlesztési irányok</i>	34
6	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	35
7	FELHASZNÁLT FORRÁSOK.....	36

1 BEVEZETÉS

A világ energia- és klímapolitikájának következményeként az országok folyamatosan formálják az energiamixüket és előtérbe helyeződnek azok az energiahordozók, amelyek alacsony karbon kibocsátással rendelkeznek. A jelenlegi tervek és kutatási eredmények alapján a hidrogén az egyik, ha nem a legígéretesebb energiahordozó, mely felhasználható energiatárolásra, valamint kedvező tulajdonságai miatt villamosenergia-termelésre. Jelenleg a villamosenergia-termelés jelentős részéhez gázturbinákat alkalmaznak, amelyek legelterjedtebb tüzelőanyaga a földgáz, aminek a szén-dioxid emissziója visszaszorítandó a karbonsemlegesség eléréséhez.

A kutatási munkám során bemutatom a hidrogén tüzelőanyag érték láncát, amely megalapozza a későbbi felhasználhatóságát, valamint a vizsgálati módszerek és a mérési eredmények alapján kiértékelem a hidrogén földgázzal való együtt tüzelésének hatásait és lehetséges fejlesztési irányzatát.

1.1 *Célkitűzések*

Jelen dolgozat elsősorban a hidrogén és a földgáz együtt tüzelésének vizsgálatára irányul, különböző bekeverési arányok mellett. A számítások kidolgozása és a mérések kiértékelése során azonos hőteljesítményszintek mentén kerülnek analízálásra a hidrogén eltérő bekeverési arányainak hatásai a tüzelési tulajdonságokra. Kiemelten megfigyelésre és kiértékelésre kerülnek az emissziós értékek, az égőtér hőmérsékletek és a gáz keverékek lángképei. A kutatás célja a hidrogén és földgáz keverékek tüzelési tulajdonságának a lehető legpontosabb meghatározása, amelyből kellően precízen becsülhető meg a különböző tüzelőanyag bekeverési arányok viselkedése a gázturbinában.

1.2 *Hidrogénstratégiák*

1.2.1 EURÓPAI UNIÓ HIDROGÉNSTRATÉGIÁJA [2]

Napjainkban a hidrogén szerény részét képezi csak a globális és európai energiamixnek és nagyrészt még mindig fosszilis tüzelőanyagokból állítják elő, főként földgázból és szénből, ami évenkénti 70-100 millió tonna szén-dioxid kibocsátást eredményez az EU-ban. Annak érdekében, hogy a hidrogén hozzá tudjon járulni a klímasemlegességhez egy sokkal nagyobb léptéket kell elérnie és a termelésének teljes mértékig dekarbonizálnak kell lennie.

Az Európa Unió hidrogén stratégiája és a REPowerEU terv együttesen egy átfogó keretrendszer alkotott meg, annak érdekében, hogy elősegítse a megújuló és a karbonszegény

hidrogén elterjedését és költséghatékony módon segítse az Európai Unió szén-dioxid kibocsátásának csökkentését. Ezen felül fontos szempontként szerepel az importált fosszilis tüzelőanyagoktól való függőség csökkentése. [1] Az Európai Unió hidrogén stratégiája 5 fontos lépést és fejlesztési területet határoz meg, amelyek közé tartozik a befektetési terv, a kereslet és a termelés növelése, a hidrogén infrastruktúra és a piaci szabályok keretének a kialakítása, a hidrogén technológiák kutatásának és innovációjának fejlesztése és a nemzetközi együttműködések.

A befektetési terv bemutatja, hogy a telepítési célok eléréséhez 2024 és 2030 között jelentős befektetések szükségesek, melyben kihasználásra kerül az EU különböző anyagforrásainak és az EIB (European Investment Bank) finanszírozásának szinergiája, biztosítva a támogatás koherenciáját és elkerülve a túlzott támogatást. Ezen időszak alatt a tervezett beruházási összeg elektrolizátorokba 24 és 42 milliárd euró között fog alakulni. Továbbá az időszakban az elektrolizálók villamosenergia igényének fedezésére további 220-340 milliárd euróra lenne szükség, a napelem és szélerőmű kapacitás 80-120 GW-ra történő bővítéséhez. A jelenleg üzemben lévő erőművek felébe szén-dioxid megkötő és tárolórendszer beépítése várhatóan 11 milliárd euróba fog kerülni. Ezen felül a hidrogén szállításhoz, elosztáshoz, tároláshoz és 34 töltőállomás telepítéséhez 65 milliárd eurós beruházás várható. Továbbá a végfelhasználási szektor is jelentős beruházásokat igényel, ez akár 850-1000 millió euró között is alakulhat.

A kereslet és a termelés növekedéséhez elengedhetetlen, hogy a hidrogén gazdaság felépítését egy teljes értékű lánc megalkotásával kezdjük. Új vezető piacok létrehozása szorosan együtt jár a hidrogén termelés növekedésével. Az ipari felhasználások és a mobilitás fokozatosan fejleszthetők úgy, hogy hatékonyan kihasználják a hidrogén potenciálját egy klímasemleges gazdaság szempontjából költséghatékony módon. Azonnali alkalmazási lehetőség az iparban a szürke hidrogén helyettesítése a finomítóknál vagy az ammónia előállításában, továbbá részben helyettesítheti az acélgyártáshoz szükséges fosszilis tüzelőanyagot. A másik jelentős ágazat a mobilitás, kiemelten azokon a területeken, amelyekben az elektrifikáció nehezen megvalósítható. Potenciálisan fejlesztési területekbe sorolhatóak a városi buszok, a nehéz tehergépjárművek, esetlegesen a hidrogén üzemanyagcellás vonatok. Ezen túlmenően a hidrogén hosszútávon lehetőséget nyújthat az üzemanyagok dekarbonizálására a repülésben és a tengeri közlekedésben. A repülés számára a későbbiekben megoldást jelenthetnek a hidrogén hajtású üzemanyagcellák vagy a hidrogén alapú sugárhajtóművek is. A korlátozó tényezője a hidrogén felhasználásának az iparban és a

mobilitásban a nagyobb költségek, beleértve a még nem kiforrott infrastruktúra fejlesztést, gondolva itt elsősorban a tárolók és töltőállomások telepítésére.

A hidrogén infrastruktúrának és a piaci szabályok keretének a kialakítása kritikus pont, mivel jelenlegi rendszerünk nem képes kezelni hidrogént nagy mennyiségben, amire a jövőben szükség lenne. A hidrogén infrastruktúra szükségletei elsődlegesen a hidrogén termelésének, keresletének igényétől, valamint a szállítási költségektől függenek. Továbbá figyelembe kell venni a jelentős növekedést, ami várhatóan az intézkedéseknek köszönhetőek fognak megjelenni. A hidrogén keverése a földgáz hálózatba korlátozottan lehetővé teheti a decentralizált megújuló hidrogén ellátást a helyi hálózatokban. Azonban a keverés megváltoztatja az Európában felhasznált gáz minőségét és befolyásolhatja a gáz infrastruktúra tervezését, a felhasználói alkalmazásokat és a határokon átnyúló együttműködési képességet. Így a bekeverés kockáztatja a belső piac széttöredezését, amennyiben a szomszédos tagállamok különböző keverési szintet fogadnak el. A meglévő szabályok, melyek hatékony kereskedelmet tesznek lehetővé a villamosenergia és a gázpiacokon, mint például a kereskedelmi pontokhoz való hozzáférés és a standardizált termék definíció. Ezek a szempontok figyelembe vehetőek a jövőben a hidrogénpiac kialakítása esetében is.

Az Európai Unió évek óta támogatja a kutatásokat és az innovációkat a hidrogénnel kapcsolatban. Ezek az irányzatok és az ígéretes alkalmazásokkal foglalkozó projektek lehetővé tették számos technológia fejlődését és kiforrását. Emellett hozzásegítették az Európai Uniót a globális vezető szerepének elérésében, különösen az elektrolizálók, hidrogén töltőállomások és megawatt nagyságrendű üzemanyagcellák területén. A továbbiakban az infrastruktúrák tovább fejlesztésére van szükség, amelyre az igény a nagy mennyiségű hidrogén felhasználás miatt jelentkezik, illetve a hosszútávon történő elosztás és tárolás ellátása miatt. A meglévő gáz infrastruktúra átalakítása a hidrogén vagy hidrogén alapú üzemanyagok szállítására további kutatást, fejlesztést és innovációs tevékenységet igényel. Ezenfelül a magasszintű végfelhasználási alkalmazásokat kell tovább fejleszteni, különösképpen az ipari felhasználásban, valamint a másik jelentős ágazatban a közlekedésben. Utolsó és egyben az egyik legjelentősebb pont pedig egy támogató politika megalkotását és bevezetése a hidrogénre, illetve a határterületeire vonatkozóan.

A nemzetközi együttműködések az EU célkitűzéseinek szerves részét képezik. A tiszta hidrogén új lehetőségeket kínál az EU-nak az energiapolitikai kapcsolatainak újragondolásához, tervezéséhez, mind a szomszédos országokkal, mind pedig a nemzetközi partnerekkel. Ennek köszönhetően elősegítésre kerül az ellátás diverzifikációja, valamint segíti

a biztonságos és stabil ellátási láncok kialakítását. Az érdeklődés és a lehetőségek a tiszta hidrogén jövőjével kapcsolatban globálisan egyre csak növekszik és számos ország ambiciózus kutatási programokat fejleszt ki a nemzeti hidrogénstratégiák alapján, melyek valószínűsíthetően, egy nemzetközi hidrogén kereskedelmi piacot fognak eredményezni. Ipari becslések szerint 2030-ig akár 40 GW elektrolizáló is telepíthető lennel a keleti és déli szomszédos országokba, amely biztosítaná az EU számára a határkeresztezőkön átívelő folyamatos kereskedelmet.

Összefoglalásként az alacsony szén-dioxid kibocsátással és a megújuló forrásból előállított szén-dioxid kibocsátás nélküli hidrogén jelentős szerepet tölt be az Európai Unió terveiben, a karbonsemlegesség elérésében. Látható, hogy 2030-ig számos beruházás fog megvalósulni, amelyek mind elősegítik a különböző emissziós értékek csökkentését és megalapozzák a további fejlesztési irányokat a 2050-re kitűzött célok eléréséhez.

1.2.2 MAGYARORSZÁG NEMZETI HIDROGÉNSTRATÉGIÁJA [3]

Magyarország a hidrogénstratégiájában 2030-ig összesen hét célt fogalmazott meg, melyekből elsődleges céloknak tekintendő a nagyvolumenű karbonszegény és decentralizált karbonmentes hidrogén előállítása, az ipari felhasználás dekarbonizációja részben hidrogénnel, a közlekedés zöldítése, illetve a támogató villamosenergia- és (föld)gáz-infrastruktúra. A négy elsődleges célon túlmenően további három másodlagos cél került megfogalmazásra, amelyek fő feladata az elsődleges célok elősegítése, támogatása. A másodlagos célok közé sorolandó az ipar- és gazdaságfejlesztési lehetőségek kihasználása, a horizontális feltételrendszer: ösztönző működési környezet kialakítása, valamint a KFI és oktatás, ami támogatja a hidrogén sikerét az átmenetben.

A nagy volumenű karbonszegény, illetve decentralizált karbonmentes hidrogén előállítás pontban a célkitűzésként szerepel, hogy 2030-ra a hidrogén termelés elérje az évi 36 ezer tonna, ami karbonszegény, illetve karbonsemleges forrásból származtatható. Az összegből 16 ezer tonna zöld hidrogénből származna, vagyis a vízbontás energiaigényét kizárólag megújuló energiaforrások állíthatják elő. A fennmaradó 20 ezer tonna kék hidrogénből származna, amelynek az előállításához szükséges energiaigényt földgáz felhasználásával kerül fedezésre, oly módon, hogy a kibocsátott szén-dioxidot arra alkalmas technológia segítségével semlegesítik, megkötik. Ezen túlmenően a célban meghatározásra került az elektrolizálók kapacitásának növelése, aminek a beépített teljesítményét 2030-ra 240 MW-ra bővítenék.

A második kiemelt célban, az ipari dekarbonizációban, ahogy a cél neve mutatja az iparágak szén-dioxid kibocsátása a fő célkitűzése. Jelenlegi hidrogén felhasználás túlnyomó többsége szürke hidrogénből származik, így ennek a kiváltása jelentős szereppel bír a változás. A kitűzött cél, hogy 2030-ban az ipar hidrogén felhasználása karbonmentes és karbonszegény hidrogénből elérje az évi 24 ezer tonnát. A tervben szereplő meghatározás szerint évi 20 ezer tonna karbonszegény hidrogénből származna és a hátramaradó évi 4 ezer tonna fedezésére karbonmentes zöld hidrogénből lenne lehetőség. Az intézkedések elérése esetén a cél az évi legalább 95 ezer tonna szén-dioxid kibocsátás elkerülése.

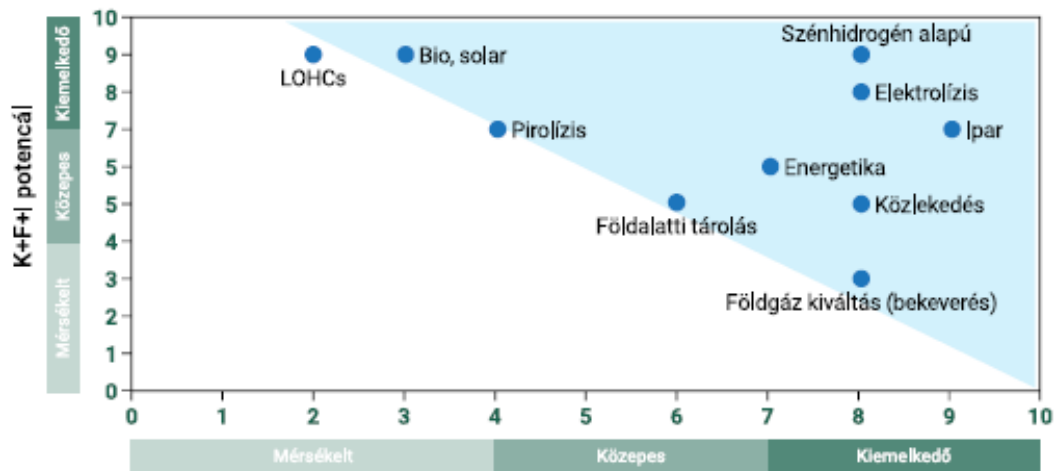
Közlekedés zöldítése pontban meghatározott tervek szerint 2030-ra évi 10 ezer tonna hidrogén felhasználása a kitűzött cél, melynek teljes része kizárólag zöld, karbonmentes hidrogén forrásból származhat. A fogyasztás kielégítésére legalább 20 hidrogén töltőállomás létesítését írták elő, amelyeken állomásonként két töltőpont található. Ezzel párhozamosan pedig összesen 4,8 ezer hidrogén üzemű jármű használata a cél. Ezek teljesülése esetén a szén-dioxid kibocsátás mértéke évi 130 ezer tonnával fog csökkenni.

A negyedik kiemelt cél a támogató villamosenergia- és földgáz-infrastruktúra, amelyben a szektorintegrációs képesség, szezonális energiatárolás kiépítése az elérendő. Ennek egyik eszközeként legalább 60 MW leszabályozási képességet alakítanak ki, továbbá rövid távon a földgázrendszerbe 2%-os térfogatarányú bekeverés lehetővé tétele lenne a cél, amelyet a középtávon elvégzett vizsgálatok függvényében emelni kell.

Az támogató vagy elősegítő célokra átfordulva az ipar és gazdaságfejlesztési lehetőségek kihasználása pontban két fő kategóriába sorolandóak a törekvések. Az első a hazai hidrogéngazdaság fő kihívásaira adandó megfelelő válaszok támogatása, melynek keretében a kék hidrogén előállításához kapcsolódó eljárások elterjedésének elősegítése a cél. Továbbá ide tartozik a megújuló energiatermelésbe történő integrációjának támogatása, valamint az elektrolizáló gyártó kapacitás kiépítése nemzetközi kapcsolatokkal együttműködve. A másik csoport a hazai tudás exportcikké tétele, így elsősorban a tudás kialakítására helyeződik a hangsúly, valamint a komponensfejlesztésre és beszállítóvá válás megerősítésére.

A horizontális feltételrendszer két szempontot helyez előtérbe a támogatói szabályozási környezet kialakítását, ezen belül a tiszta vagy karbonszegény hidrogén piacok átjárhatóságának biztosítása, illetve az értéklánc elemeit érintő ösztönző szabályozási keret kialakítása. Továbbá a másik szempont a nemzeti együttműködés erősítése, aminek egyik aktuális eszköze az IPCEI projekteken való részvétel.

A kutatás és fejlesztés területét érintő támogatásba számos alkalmazási lehetőség szerepel, melyek az 1. ábrán láthatóak. Megfigyelhető az ábrán azon tématerületek, amelyekben Magyarország potenciált lát és érdemesnek és szükségesnek tartja a további fejlesztésüket.



1. ábra: Kiemelt szakterületek a hazai KFI relevancia és potenciál alapján [3]

Az ábrát elemezve a látható, hogy az energetikai célú felhasználás és a földgáz kiváltása, melybe beletartozik a hidrogén bekeverése mind a kiemelt régióban helyezkednek el. Ezáltal a két terület által jól behatárolható, körvonalazható, hogy milyen relevanciával rendelkezik egy gázturbina, amelynek a tüzelőanyagát a hidrogén szolgáltatná. A gázturbinában történő hidrogén tüzelés potenciálját tovább erősíti azok a tényezők, hogy jelentős előrelépést jelenthet mind a károsanyag emisszióban, mind a villamosenergia-termelésben, ahogy a szén-dioxid mentesség felé haladunk.

A 2030-as időszakon túlra tekintve 2040 után várható a földgáz elosztóhálózat, valamint felhasználói rendszerek felkészítése tiszta hidrogén befogadására és felhasználására. Továbbá kutatásokat igényel a karbonmentes hidrogén fűtési és hűtési igények kiszolgálására történő alkalmazások lehetőségeinek vizsgálata. Azonban előre láthatólag jelenlegi fejlesztési tevékenységek következtében rendkívül hamar változhat a technológiák állapota, ezért 2025-ben indokolt a stratégia felülvizsgálata.

2 HIDROGÉN FELHASZNÁLÁS

2.1 Hidrogén térnyerése

Napjainkban számtalan kutatás, fejlesztés és technológiai megoldás jelenik meg nap, mint nap, amelyek hozzájárulnak a mind a hétköznapi, mind az ipari fejlődéshez. A korábbiaktól eltérve az elmúlt évtizedekben hangsúlyossá vált egy tényező, ami más irányba tereli a

fejlesztési irányzatokat, ez nem más, mint a fenntarthatóság. A fenntarthatóság mára szerves részét képezi a mindennapjainknak, azonban még továbbra is csak az erre való törekvések elején járunk. Ehhez kapcsolódóan egyre inkább potenciális problémává válik a globális felmelegedés, ami megannyi új előremutató technológiát és fejlesztési irányzatot indukált. Az egyik legjelentősebb probléma, amelyre a fejlesztések egy része irányul az üvegház hatású gázok kibocsátásának csökkentése. Számos iparág, köztük az energetikában is jelentős szén-dioxid kibocsátásnak tesszük ki a környezetet. A villamosenergia-termelésben jelentős szerepet töltenek be a fosszilis tüzelőanyagok, ezen belül az egyik leggyakrabban használt energiahordozó a földgáz, amely a fő üzemanyaga a gázturbinás erőműveknek. A másik emissziós értékek tekintetében jelentős fosszilis tüzelőanyag a szén, amit mára egyre kevesebb helyen használnak, azonban még mindig számottevő a részaránya néhány ország energiamixében. A fosszilis tüzelőanyagok kiváltásában nagy szerepet kapnak a megújuló energiaforrások, amelyeknek rendkívül alacsonyabb a szén-dioxid és egyéb más emissziós értéke, ebből kifolyólag jó megoldásnak bizonyulnak az emissziós értékek csökkentésében. Ezen indok mellett továbbá a nevükből is fakadóan emberi léptéken belül újra felhasználható energiaforrásokon alapszanak így a fenntarthatóság irányába is jelentősen kiemelt szerepet foglalnak el. A számos jó tulajdonságuk mellett azonban jelentősen kitéttek az időjárásnak, gondolva itt például a napelemekre és a szélturbinákra. Az időjárás függőségéből adódóan felmerül a villamosenergia tárolásnak a kérdésköre, amelyben számos projekt és kutatás irányul a hatékonyabb tárolás megoldására. Az egyik jelenleg kiemelten kutatott terület a hidrogén formájában történő energiatárolás.

A hidrogén kedvező tulajdonságainak köszönhetően, relatív jó megoldásnak ígérkezik a jelenlegi tudásunk szerint. Vízbontás segítségével könnyen hozzáférhető, karbonsemleges anyag, továbbá rövidebb időre a tárolása is megoldható. Számos iparág hasznosítja a hidrogént, így azok számára különösen előnyös, továbbá meglehetősen sok fejlesztés történik a hidrogén alapú közlekedésben is, ami üzemanyagként használja fel, így kiváltva a fosszilis üzemanyagokat. Tehát beláthatjuk, hogy jelentős hatással és potenciállal rendelkezik, mint energiahordozó és egyre inkább elengedhetetlen lesz a használata, ahogy a karbonsemlegesség és karbonmentesség felé haladunk. A kibocsátási célok elérésének érdekében az energetikában is szükséges a jelentős emisszió csökkentés, amire egy optimális megoldást jelenthet a hidrogén. A hidrogén égési tulajdonságai meglehetősen jól hasznosíthatóak, mindazonáltal az égése során nem keletkezik más csak vízgőz, tehát a károsanyag emissziót rendkívül jól képes redukálni.

2.2 Földgáz és hidrogén együtt tüzelése

Jelenleg mind háztartási, mind ipari, mind villamosenergia-termelésben az egyik leggyakrabban felhasznált tüzelőanyag a földgáz. Az EU-ban a földgáz helyzete meglehetősen megváltozott és a földgáz függőség csökkentése se egy elhanyagolható szempont, amikor alternatív tüzelőanyagokat kutatunk. A szennyezőanyag kibocsájtás korlátjainak tiszteletben tartásának szükségessége és az égési hatékonyság magasfokon tartása rákényszeríti a fejlesztőket, hogy új módszereket kutassanak az üzemanyagellátás terén. [5] A földgáz továbbra is az uralkodó az üzemanyag a gázturbina tüzelésben, azonban különböző üzemanyagok keverékével a célok elérhetőbbek. A rendelkezésre álló gáz alapú üzemanyagok közül a hidrogén a legideálisabb a szennyezés mentes tüzelésben. Az állítás könnyen belátható hiszen a hidrogénnek az elégetése során csak vízgőz jön létre. Továbbá a hidrogén rendkívül reaktív és nagyobb sebességgel ég, ami pozitív stabilizáló hatással bír a földgáz lángokra, csökkenti a korom, szén-dioxid és a szén-monoxid kibocsájtást, azonban figyelembe kell venni a visszaégés kockázatát. [5] Ezen túlmenően nem lehet elmenni a tény mellett, hogy a keverékhez adott hidrogén növeli annak az égési hőmérsékletét ezáltal az nitrogén-oxidok emissziója nő. Továbbá számos megfontolásra van szükség az illesztések, a turbina első lapátsorainak hűtése, valamint a tárolás terén, mivel ezek a szempontok korlátot szabhatnak a hidrogén bekeverési koncentrációjára. [5] Sok tanulmány egyetért abban, hogy a hidrogén kiterjeszti a földgáz és levegő keverékű lángok éghetőségi tartományát. [5] [6] [7] [8] [9] [10]

Az égési hőmérséklet növelésével a nitrogén-oxid kibocsájtás nő, azonban ez az érték kompenzálható a paraméterek változtatásával. Egy kutatás kimutatta, hogy az előkevert levegő képes megnövelni az előkevert gáz sebességét és fokozatosan növelni az axiális és a radiális expanzió képességét a gáznak. Következésképpen azt találták, hogy ezáltal megnövekedik a recirkulációs terület, aminek égés stabilizáló hatása van. Hőmérséklet oldalról megfigyelve a többlet levegő összeségében az égőtér maximális a hőmérsékletét csökkenti, azonban lépésről lépésre növeli a magasabb hőmérsékletű területet. [10]

3 GÁZTURBINÁK SZEREPE

3.1 Inercia szerepe a villamosenergia-rendszerben

A mai világban, ahol a mindennapjaink szerves részét képezik az elektromos eszközök, számos szempontnak kell megfelelnie a villamosenergiának, annak érdekében, hogy a végfelhasználók eszközei üzemszerűen működjenek. Az ellátás villamosenergia szempontból kritikus, ezért ennek a fontos szempontjait kezdetben 3 dimenzióba sorolták. Ezek a minőség,

az ellátásbiztonság és gazdaságosság, azonban mára ezek mellett megjelent egy kiegészítő negyedik cél, a környezeti hatások. A minőségi villamosenergia jellemzői közé olyan meghatározások tartoznak, mint a feszültség effektív értéken tartás, valamint a megfelelő frekvencia érték tartása, ami Magyarországon és az egyesített európai hálózaton 50 Hz. A frekvencia tartás az egyik legfontosabb tényező a hálózatban, ennek tartását és az ugrásszerű változások elkerülését segítik a hálózatban megtalálható forgó tömegek. A különböző erőművi körfolyamatokon keresztül a gőz-, illetve gázturbinák segítségével generátorokat forgatunk meg, amiknek kapcsaikról villamosenergia elvételre van lehetőség. Ezen villamosenergia termelési módszerben szereplő forgó tömeg inerciáját, tudjuk hasznosítani. A gép szerkezeti konstrukciójából kiindulva nagyméretű fém tömeg áll rendelkezésre, mely üzem közben valamilyen perdülettel rendelkezik és a hálózaton fellépő gyors frekvenciaváltozásokat képes csillapítani a tehetetlenségéből adódóan. Tehát az inercia egy kulcsfontosságú szerepet tölt be a frekvencia egyenletes értéken tartásában, mindezek mellett nagyban függ más a frekvencia szabályozási rendszerektől, valamint módszerektől is.

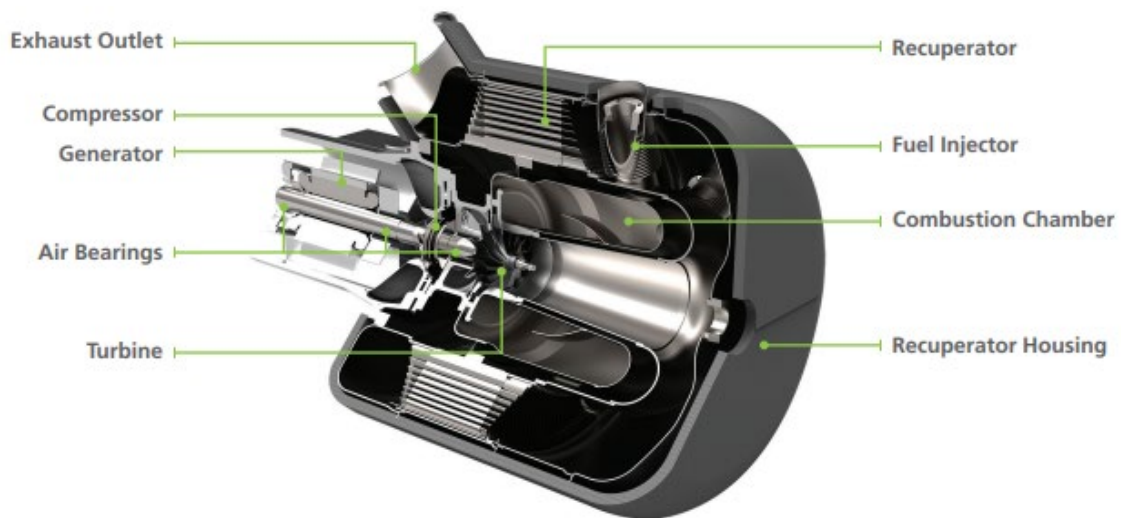
A jelenleg dinamikusán átalakul az energiamix, amelyben egyre nagyobb rész hányadot töltenek ki az olyan technológiák, melyek inverteren keresztül képesek csak termelni a hálózatra, mind például a napelemek és a szélturbinák. Azonban az ilyesfajta teljesítményelektronikák nem rendelkeznek inerciával, ami hozzájárulhatna a rendszerstabilitáshoz. A tényerésüknek köszönhetően a forgó tömeg aránya folyamatosan csökken, amely a későbbiekben akár eredményezheti azt, hogy a rendszer gyorsabbá válik a csillapítás hiánya által, ami oda vezethet, hogy az aktuális frekvencia szabályzó rendszerek túl lassúak lesznek és nem lesznek képesek effektíven követni, ellátni a frekvencia szabályozási feladatukat, ezenfelül meggátolni ennek a következményeit. Mindazonáltal erre megoldást nyújthatnak azok a technológiák, amelyek képesek pótolni és kompenzálni ezt a hiányt valamilyen megújuló, fenntartható és/vagy alacsony emissziós értékekkel rendelkező módon. Többek között ilyen lehetőségeket hordoz magában az atomenergia hasznosítása Rankine gőz körfolyamat segítségével, vagy a vízturbinák alkalmazása. [4] Azonban az utóbbi terén jelenleg is már nagyon nagy a kiépített erőművek hányada a még kihasználható helyekhez viszonyítva. Mindemellett kiemelhető a gázturbinák alkalmazása alternatív karbonsemleges üzemanyaggal, amire egyebek mellett a hidrogéntüzelés szolgáltat egy optimális lehetőséget. Jelen tanulmányban az utolsó felvetésnek a megvalósítási körülményei, illetve az ahhoz vezető kutatási és fejlesztési út kerül a fő irányba.

3.2 *Capstone C30 felépítése*

A dolgozat célja, hogy feltárja a hidrogén és a földgáz tüzelésének a főbb tulajdonságait, továbbá a lehető legpontosabb közelítést adja arról, hogy a Capstone C30-as mikro gázturbinában milyen viselkedést mutatna a gázkeverék. A későbbiekben bemutatott tüzelőberendezés fűvókája az összehasonlíthatóság végett, minimális eltéréssel jól közelíti és visszaadja a Capstoneban alkalmazott fűvóka geometriáját.

A Capstone C30 egy mikro gázturbina, ami a tervezési állapotában 30 kW elektromos teljesítmény leadására képes. Számos tüzelőanyaggal képes üzemelni többek között földgázzal, biogázzal, propánnal, illetve diesellel. A turbina méreteiből adódóan nincs lehetőség külön lapát hűtésre így ezt a problémát a nagyobb levegő mennyiség beszívásával kompenzálja a turbina, ami földgáz esetében körülbelül 7-es légfeszültség tényezőt jelent, vagyis a turbinába 7-szer több levegő jut be, mint ami az égéshez szükséges lenne. A levegő más szempontból is jelentős szerepet vállal ugyanis a turbina forgórésze nem hagyományos gördülő vagy sikló csapágyakkal van felszerelve, hanem légcsapágygal. A megoldás lehetőségét főként a forgórész tömege teszi lehetővé, emellett a magas fordulatszám, ami üzem közben körülbelül 96000 1/perc. Ennek a megoldásnak köszönhetően nincs szükség kenőanyagra, mert a turbina ezt a levegővel helyettesíti, továbbá mivel egyetlen forgórész van a szerkezetben a karbantartási igénye minimális. A forgórészen megtalálható az egy fokozatú centrifugál kompresszor, aminek a kompresszió viszonya 3,1 – 3,7 közötti. A berendezésünkben gyűrűs hőcserélő található, ami rendkívül javítja a hatásfokot, valamint ezt úgy valósítja meg, hogy közben kompakt marad az egész szerkezet, mert az égőtér körül van elhelyezve, a kompresszorból kilépő levegőt itt előmelegítjük a kilépő füstgáz hőjével. [11] A kompaktság végett a tüztér is gyűrűs elrendezésű. A tüztérbe tangenciálisan helyezkednek el a fűvókák, melyből 3 darab található, külön-külön ezek 35 kW tüzelési teljesítményre képesek. A tangenciális elhelyezkedés elősegíti az égést, mert a tüzelőanyag belépéskor egy extra perdületet kap, aminek égési stabilitás növelő hatása van, illetve ezzel a módszerrel az égőtérben való tartózkodási ideje is megnő az üzemanyagunknak, ami kedvező hatással van az üzemanyag felhasználásra és hozzájárul a tökéletes égés meglétéhez. Az égőtérből kilépve a turbinára jut a füstgáz, amin végbe megy az expanzió és ezáltal átalakítja kinetikus energiát forgásivá. Ezt követően a füstgáz belép a hőcserélő házba, hol a már említett hőcserélőn keresztül leadja a hőjének egy részét a komprimált levegőnek. Végezetül az utolsó a villamosenergia-termelést végző alegység az alternátor, melyben az állandó mágneses rész, a forgórészhez csatlakozik, a tekercselés pedig az állórészen helyezkedik el. Tehát a forgás következtében a tekercsekben feszültség

indukálódik. A fentieket összefoglalva a 2. ábrán látható a Capstone C30-as mikro gázturbina felépítése.



2. ábra: Capstone C30 mikro gázturbina felépítése [12]

A Capstone C30-as számos jó tulajdonsággal rendelkezik, mint az alacsony kibocsátás, beleértve az nitrogén-oxidokat, szén-monoxidot, illetve a különböző részecskéket. Továbbá a zajszintje relatív alacsony a többi gázturbinához viszonyítva, ami megannyi lehetőséget nyit számára, emellett a mérete kicsi ebből adódóan nincs nagy helyigénye, nincs vibráció, nem szükséges hűtőfolyadék és kenőanyag. Azonban a maximális elektromos teljesítménye csak 30 kW, ami korlátot szab az ipari alkalmazhatóságának, a beruházási költsége pedig nagy a többi energiatermelőhöz viszonyítva, valamint a hatásfoka elmarad mind a heavy duty, mind az aeroderivatív gázturbinákéhoz képest.

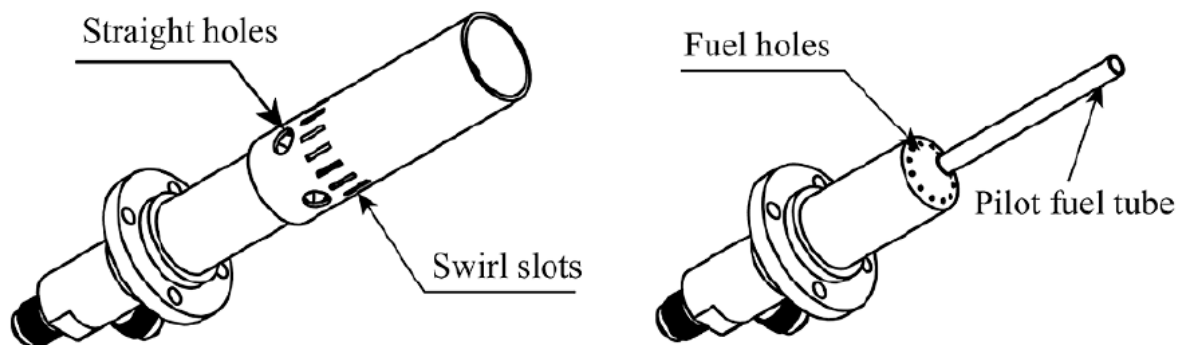
4 HIDROGÉN EGYÜTT TÜZELÉSE PERDÜLETES ÉGŐBEN

4.1 Mérés elméleti összefoglaló

A földgázzal ellentétben a hidrogén és a különböző alternatív gáz keverékek égési tulajdonságai még nincsenek pontosan feltérképezve. A dolgozat későbbi részében tárgyalásra kerülő tüzelőberendezésen történő mérések szükségesek a gáz keverék alaposabb tanulmányozásához, többek között a lángfront pontos alakulásának meghatározáshoz és az égés folyamatának pontos megértéséhez.

A mérés felépítésének könnyebb megértése végett röviden bemutatásra kerül a fűvóka kialakítás, amely alapján a tüzelőberendezésbe került fűvóka is megtervezésre került, a részletes kialakítást a későbbiekben a tüzelőberendezésnél kerül bemutatásra. A Capstone C30-as mikro gázturbina égőében két ágot különböztethetünk meg, amelyeken bejuttatjuk a tüzelőanyagokat.

Az első ág az úgynevezett pilot cső, ami a fűvóka közepén helyezkedik el és ezen a csövön keresztül kerül bevezetésre a hidrogén. A pilot cső hosszan kinyúlik a másik gáz bevezetési pontjához képest, ennek a későbbiekben lesz szerepe. A másik ág az úgynevezett premix cső, amely 12 furaton keresztül vezetjük be a földgázt. A földgázhoz a premix ág elején tagenciálisan levegő bekeverés történik, ami egy alap perdületet ad a gáz keveréknek. A premix ágon tovább haladva a fűvóka végén csatlakozik be a pilot csőből érkező hidrogén, amely már egy jól előkevert levegő-földgáz keverékkel kezd el keveredni és így lép be a már minden komponenszt tartalmazó keverék a tűztérbe.



3. ábra: Capstone C30 fűvóka vázlata [13]

A mérési pontok állandó tüzelési teljesítmény alapján kerültek meghatározásra, figyelembe véve, hogy az égő maximális tüzelési teljesítménye 35 kW, ez alapján három teljesítmény szint a került meghatározásra egy 30 kW-os, egy 20 kW-os, valamint egy 13,35 kW-os szint. Ezen szinteken a földgáz és a hidrogén tömegáramai úgy lettek meghatározva, hogy mindig az adott teljesítmény szintet kapjuk a mérés során, ezzel vizsgálva az azonos teljesítményhez szükséges hidrogén mennyiséget, illetve ennek a károsanyag kibocsátását. A tömegáram számítás (1) képlet alapján történt.

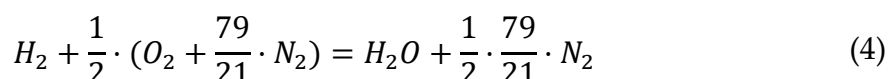
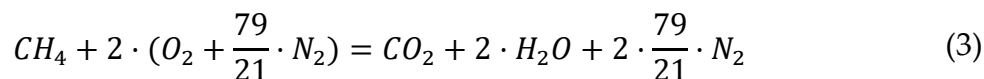
$$\dot{m} = \frac{Q}{F} \quad (1)$$

Mind három teljesítmény szint 21 osztást kapott, ahol 0%-os hidrogén keverési aránytól 5%-os lépésenként kerül változtatásra a hozzákeverési arány. Ezt követően a gázok áramlási sebessége is meghatározásra került, hogy információt kapjunk arról, hogy mennyire állnak messze a hangsebességüktől, amely adat számunkra a fűvókából kiáramló maximális gáz mennyiség meghatározásához szükséges. A sebességek becslésére (2) egyenletet használtam.

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

Az eredmények alapján az értékek nagyságrendekre eltérnek a gázok hangsebességétől, szóval további vizsgálatot nem igényelt. A számítások során számottevő adat a fogyasztása a gázoknak a keverési arány függvényében, mely rá mutat arra, hogy a térfogatra fajlagosított

fűtőértékek között közel 3 szoros eltérés van a hidrogén és a földgáz között az utóbbinak a javára. A következő lépés a kellő oxigén biztosítása volt, melynek meghatározása sztöchiometria számítás útján történt. A földgáz égési sztöchiometriai egyenlete a (3), míg a hidrogén égési egyenlete (4) módszertana alapján került meghatározásra. Mindkét esetben az oxigén igényt a levegő oxigén tartalmával kerül fedezésre.



Q [kW]	H ₂ / NG [%]	V _h [%]	v _h [m/s]	v _{ng} [m/s]	ṁ _h [m ³ /h]	ṁ _{ng} [m ³ /h]	ṁ _l [m ³ /h]
13,35	0	0	0	19,70	0	1,41	15,70
13,35	10	25,91	5,61	17,73	0,45	1,27	15,43
13,35	20	44,04	11,22	15,76	0,89	1,13	15,17
13,35	30	57,43	16,83	13,79	1,34	0,99	14,91
13,35	40	67,73	22,44	11,82	1,78	0,85	14,64
13,35	50	75,89	28,05	9,85	2,23	0,71	14,38
13,35	60	82,52	33,66	7,88	2,67	0,57	14,12
13,35	70	88,02	39,27	5,91	3,12	0,42	13,85
13,35	80	92,64	44,88	3,94	3,56	0,28	13,59
13,35	90	96,59	50,49	1,97	4,01	0,14	13,33
13,35	100	100	56,10	0	4,45	0	13,06

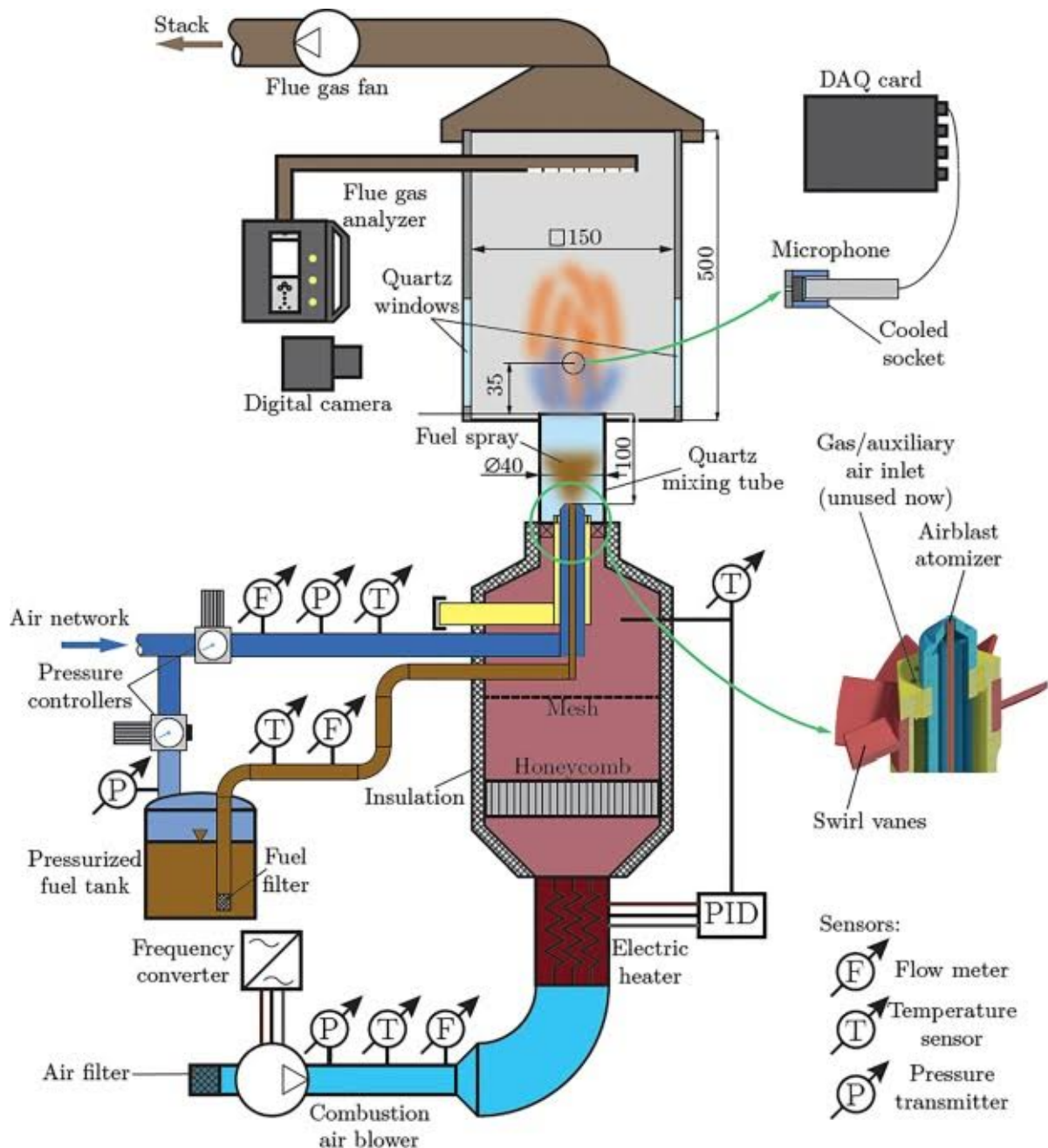
1. táblázat: számítási adatok állandó hőteljesítményre

A kapott eredményekből számítható volt a levegő szükséglet, ami kiegészítésre került a légfelesleg tényezővel, ezáltal a szükséges levegő tömegáram is rendelkezésre áll, ami egy ventilátor által kerül biztosításra. A hidrogén kilogrammonkénti levegő igénye körülbelül kétszerese a földgázénak, amit, ha átszámolunk normálköbméterre azt kapjuk, hogy a reláció megfordul és egy köbméter földgáz levegő igénye az közel négyszerese a hidrogén köbméterben vett levegő igényéhez képest. Mindazonáltal az azonos teljesítmény tartásához nagyságrendileg háromszor több köbméter hidrogén szükséges, ebből kifolyólag a mérések során bevezetendő levegő mennyisége jelentősen nem fog megváltozni. A 1. táblázatban a számítások közül néhány fontosabb érték megtalálható, amelyek adatokkal szemléltetik a fent leírtakat. Fontos kiemelni, hogy az második oszlop a teljesítmény függvényében számítja a bekeverés arányát, amíg a harmadik a hidrogén térfogati százalékát mutatja meg.

A számítások elvégzését követően a mérési módszerek kerültek meghatározásra. A láng és a füstgáz áramlásának megértésében a Schlieren eljárást kerül alkalmazásra. A füstgáz összetételének meghatározásához pedig az elektrokémiai cellás emisszió vizsgálat adta lehetőségek lettek kihasználva. Az optikai elemzés során külön elemként megfigyelésre kerül a keverék nyílás kúp szöge, ami a fűvókából kilépő szabadsugárnak a nyílását adja meg. Ennek a tulajdonságnak a megfigyelése és esetleges leíró összefüggés, függvény készítése a stacioner égésnek a helyének a meghatározásában lényegesen hozzájárulna.

4.2 Tüzelőberendezés kialakítása [19]

A tüzelőberendezés közelítő összeállítása a 4. ábrán látható.



4. ábra: Tüzelőberendezés közelítő összeállítása

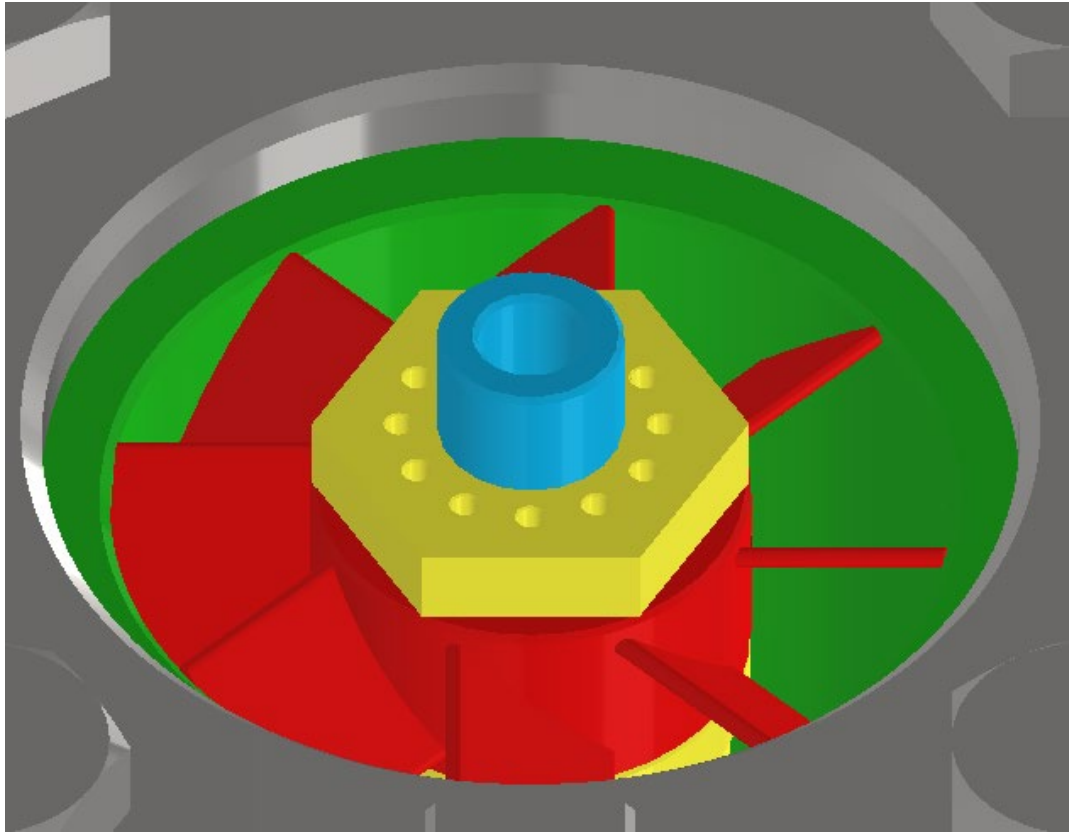
Az ábrán látható összeállítás a minimális különbségekkel megegyezik a mérések során használt tüzelőberendezés összeállításával. A főbb eltérések az ábrán bemutatott kapcsoláshoz képest, a tüzelőanyag, valamint annak a tüztérbe történő bevezetése és az akusztikai eszközök. Annak tekintetében, hogy a mérés során földgáz és hidrogén felhasználás történik az tüzelőanyag bevezetés eltér, a fűvókába történő tüzelőanyag bevezetés a következő fejezetben kerül részletes kifejtésre. A különbségektől eltekintve az ábra rendkívül pontosan szemlélteti a berendezés működését, főbb méreteit és a különböző adat gyűjtési, illetve szabályzási pontokat.

A mérés során az égéslevegő mennyiségét egy frekvenciaváltós ventilátorral szabályoztuk, mennyiségét, hőmérsékletét és nyomását mértük. A tüzelőanyag ágot két részre osztottuk, az előkeveréses ágon a földgáz mennyiségét mérve juttatjuk be az égő előkeverő terébe. A hidrogén tüzelőanyag egy külső tartályból nyomáscsökkentőn keresztül érkezik a tüzelőberendezéshez. Térfogatáramát, nyomását és hőmérsékletét mérjük, majd a pilot csövön keresztül vezetjük be az égőtér reakciózónájába.

4.3 *Fűvóka kialakítás*

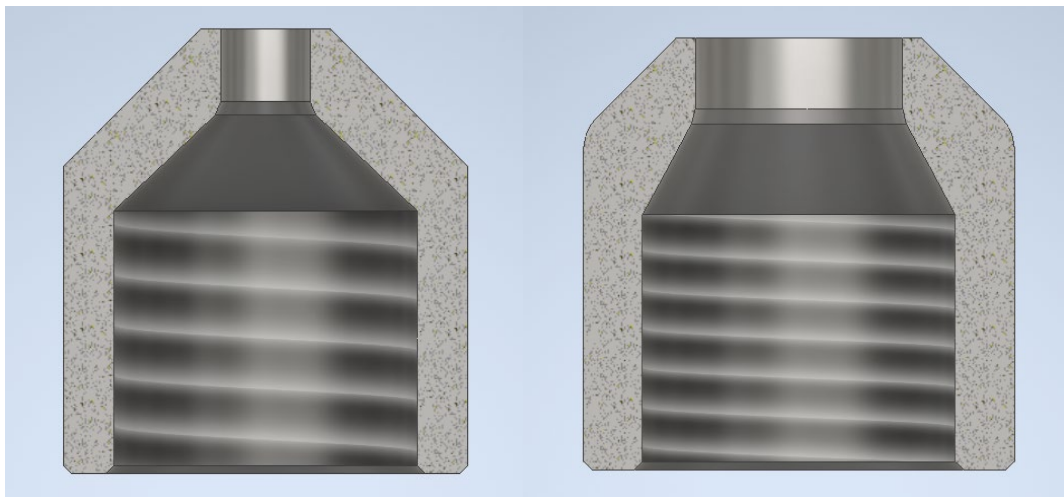
A fűvóka kialakítása az egyik legfontosabb tényező a mérés során. Többek között ez határozza meg, hogy hol fog kialakulni a lángfront, mekkora lesz a különböző ágon érkező gázok sebessége, mennyire lesz előkeverve a földgáz a levegővel és ezeken túl még számos tényezőt. Korábban röviden ismertetve lett a fűvóka és a különböző áramlási utak, azonban néhány tényező nem lett ismertetve, ezért ezekre ebben a részben kerül sor. A premix ágra a földgáz 12 darab 1,5 milliméter átmérőjű furaton keresztül jut be, ezzel egyenletes betáplálást biztosítva. A betáplálásnál megkezdődik a levegő bekeverés, közvetlenül a belépésnél még merőlegesen, majd a tangenciálisan elhelyezkedő hornyokon keresztül megkapja az előkevert földgáz-levegő keverék a perdületét. Az egyik különbség a tüzelőberendezésben használt fűvóka és a Capstone fűvóka között ennél a pontnál jelentkezik, ugyanis az előző mondatban leírtak az eredeti fűvókára vonatkoznak, azonban a mérés során a földgáz már egy perdülettel rendelkező levegő áramba kerül bevezetésre. Az összeállítás az 5. ábrán látható.

A pilot cső helyettesítésére szolgáló csőszakasz belső átmérője kismértékben nagyobb, mint az eredeti átmérő, azonban ez jelentős eltéréseket nem fog okozni, mivel a csőszakasz végére egy cserélhető fűvóka kerül beépítésre. A mérés során a fűvóka átmérője meghatározó abban, hogy hol lassul kellően le a hidrogén ahhoz, hogy a stabil lángfront kitudjon alakulni. Ebből következően több cserélhető fűvókát terveztem, amelyekből a legnagyobb átmérővel rendelkező megegyezik a Capstone pilot csövének átmérőjével, tehát pontosabban közelíthető.



5. ábra: Földgáz és perdületes levegő bevezetés, pilot cső nélküli állapotban [16]

A 6. ábrán metszetben látható a cserélhető fűvókák közül két méret, a bal oldali a kisebbik kilépő átmérővel rendelkező fűvóka furata 2,2 milliméter, amíg a jobb oldali pedig a pilot cső átmérőjével megegyező 5,3 milliméteres kilépő furat átmérőjű.



6. ábra: Cserélhető fűvóka 2,2 mm. illetve 5,3 mm kilépő furat átmérővel

A premix ágon haladva kisebb eltérés tapasztalható az eredeti fűvóka koncepció és a tüzelőberendezésben összeállított fűvóka esetében. Ez maga a premix ág keresztmetszet különbsége, ugyanis a tüzelőberendezésben a premix ágnak az áramlási keresztmetszete

nagyobb, ezáltal a földgáz-levegő keveréknek az áramlása lassabb lesz, mint az eredeti fűvókában lenne. Az eltérésekből fakadó sebesség és egyéb különbségek hatásai a téma tovább fejlesztésében figyelembe lesznek véve, azonban kellően jó közelítés kapható ezen paraméterek eltérése ellenére is, ugyanis a földgáz és a levegő tulajdonságai és áramlási viselkedése meglehetősen jól ismertek.

4.4 *Várakozások*

A számítások és az irodalomkutatás alapján az eredmények várhatóan jól közelíthetőek a legalábbis, ami az emissziót illeti. A kibocsátások várakozások szerint a következőképpen alakulnak. A szén-monoxid esetében csökkenés várható, a stabilabb égés következtében, illetve a földgáz részarányának csökkenésével redukálódik a szén atomok jelenléte az égésben. A szén-dioxid esetében is a csökkenés a feltételezett, mivel a hidrogén tüzelése során nem keletkezik és a földgáz részaránya pedig csökken. Korom várhatóan szintén csökkenni fog, azonban ennek a jelenléte az eredeti állapotban is elenyészőnek tekinthető. A nitrogén-oxid esetében válasz nem adódik egyértelműen. Ugyanis vannak hatások, amik növelik a nitrogén-oxidok létrejöttét, ugyanakkor van olyan hatás, ami csökkenti a képződést. A hidrogén bekeverés hatására a láng hőmérséklete várhatóan nőni fog, ami elősegíti ezen gázok képződését, továbbá a légfelesleg növelése is pozitív irányba dönti a mérlegünket. Ezenfelül a keverési arány növelésével várhatóan megnő a láng sebessége és a hőmérséklete, aminek eredményeként megnő a nitrogén-oxid kibocsátás. A zárt égőtérnek köszönhetően szerepet játszik a természetesen kialakuló másodlagos recirkuláció, ami a stabilabb égéshez vezet, ezenfelül csökkenti az adiabatikus lánghőmérsékletet, ami a nitrogén-oxidok keletkezését csökkenti. Továbbá a korábbi indokokhoz viszonyítva kisebb fajsúllyal mégis befolyásolja negatív irányba a nitrogén-oxid csökkenést a földgáz nitrogén tartalma. Tehát előreláthatólag a nitrogén-oxid kibocsátás növekedést fog mutatni, ezzel szemben a szén-monoxid és a szén-dioxid esetén csökkenés várható.

Áttérve a láng tulajdonságokra a hidrogén növelésével lesz olyan pont, ahol befog következni a visszaégés, előzetesen ez a 20% és a 40% közt valósulna meg, mégpedig azért, mert a keverési arány itt éri el azt az értéket, amikor a láng sebességét a hidrogén sebessége dominálja. Láng stabilitás szempontjából szintén a korábban említett tartomány tekinthető vízváltónak. Amíg az adott bekeverési százalékot nem éri el a hidrogén növelni fogja a stabilitást a kedvezőbb égési tulajdonságaiból fakadóan, mindazonáltal a tartományba lépve, valamint felette jelentős mértékben megnő a visszaégés kockázata. A láng hőmérséklet a keverési arány növekedésével szinte biztosra vehetőn nőni fog a hidrogén fizikai

tulajdonságainak figyelembevételével. A lángfront nagy valószínűséggel a földgáz részarányának visszaszorulásával arányosan a fűvókához fog közelíteni, amíg el nem éri a visszaégési határt. A lángképe várhatóan nem fog jelentősen eltérni a tiszta földgáz lángétól, azonban abban az esetben, amikor a keverék fő összetevőjét a hidrogén fogja alkotni az áramlási kép változhat, habár jelentős változás ebben az esetben sem várható.

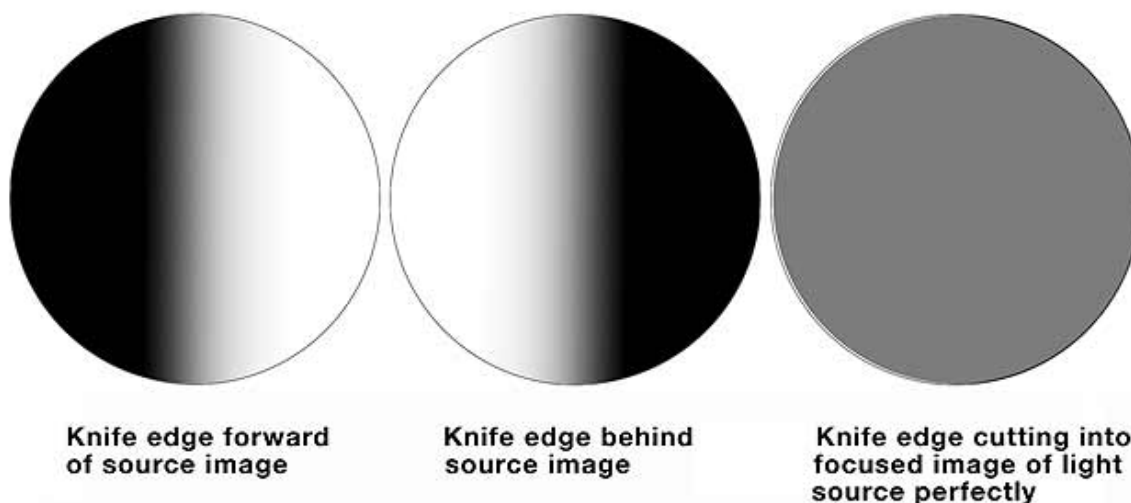
4.5 *Vizsgálati módszerek*

4.5.1 SCHLIEREN VIZSGÁLAT

A mérések során felhasznált egyik legjelentősebb módszer, aminek köszönhetően átfogóbb képet alkothatunk az égési folyamatról és az ezzel járó füstgázról a Schlieren optikai analízis. A Schlieren képalkotás széleskörben használatos a tudományban, mivel megfelelően vizsgálni tudja a transzparens közegekben lejátszódó jelenségeket, valamint megfelelő következtetéseket nyerhetünk a közeg hőmérséklet mezőjéről. Alapvetően a Schlieren optika képes érzékelni egy közeg törésmutatójának változását, amelyen áthalad egy fényforrás által kibocsátott fénysugár. [14] A fénysugarat a közegben fellelhető különböző hőmérsékletű pontok eltérő nagysággal törik meg, ami alapján kialakul számunkra az áramlási kép, amelyből következtethetünk égési tulajdonságokra, illetve meghatározható a hőmérséklet mező.

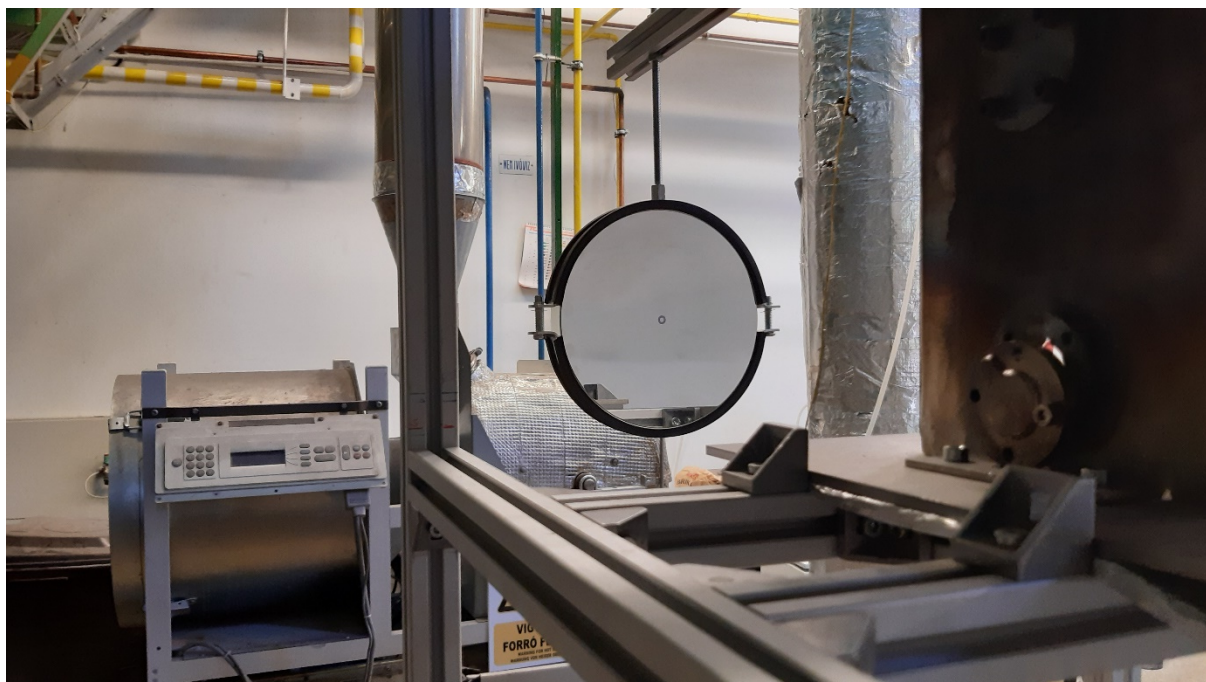
A vizsgálat során a pontszerű fényforrásunkból meghatározott szög alatt érik a fénysugarak az első parabolatüköröt, amely oly módon változtatja meg a fény útját, hogy lehetőleg merőlegesen haladjon át vizsgálandó tárgy mezején. A merőlegesség megközelítése a tüzelőberendezésbe épített üveglapok miatt szükséges, ezáltal minimalizálva az üvegen okozta fénytörést. A vizsgálandó területet elhagyva a fénysugarak a második parabolatükörré érkeznek, amely a képalkotó egység felé irányítja és fókuszálja a fényt. A fókuszpontba érve a fény pontszerűvé válik, ekkor egy penge segítségével a fény fele kitarakásra kerül, ezt követően történik meg a fényképezőgépbe vezetés, ami a fókuszpont mögött helyezkedik el. A penge elhelyezése jelentősen képes meghatározni a kialakult képet, ezért fontos a pontos beállítás. A penge beállításának hatásait a 7. ábra szemlélteti. A jobb oldali képen látható a tökéletesen beállított penge a bal oldalin, valamint a középső képen a fókuszpont elé, illetve mögé helyezett penge mögött kialakult képet láthatjuk. A képalkotó eljárás eredményeként tehát vizuálisan láthatóvá válik az égési folyamat, illetve az áramlási kép, továbbá a kapott kép alapján számos tulajdonságra lehet következtetni.

View of schlieren field vs. knife edge position in each case knife edge cuts into beam from one direction



7. ábra: Schlieren kép a penge pozíciótól függően. [18]

A tüzelőberendezésen végzett mérések elvégzéséhez és kiértékeléséhez egyedileg épített Schlieren optikát készítettünk. A felhasznált parabolatükrök fókusztávolsága 1 méter, az átmérőjük pedig 200 milliméter. A megfogatása a tükröknek csőbilincsek segítségével valósult meg, a megfelelő magasság és irány beállításához menetes szárazakat építettünk be, amíg a távolságokat pedig megfelelő hosszúságú bosch profilok definiálják. Az összeállítás egy részlete a 8. ábrán látható.



8. ábra: Schlieren optika parabolatükör beállítás

A tükör közepén megfigyelhető egy kis átmérőjű szilicon gyűrű. A gyűrűknek a tükrök pontos helyzetének beállításában volt rendkívüli szerepe. A megfelelő magasságok beállítása után az irányok, beesési szögek meghatározása következett, amely lézer segítségével valósult meg. A 9. ábrán látható a lézerpont a gyűrű által meghatározott középpontba van irányítva. A képen nem látható, azonban a másik tükör középpontjába érkezett a lézer, ami onnan a háttérben látható oszlopra verődött tovább, amely a beállítás sikerét mutatja. Ugyanis a magasság láthatóan megegyezik, továbbá a lézer azon a meghatározott egyenesen halad, ahol a későbbiekbe a kamera került beépítésre.



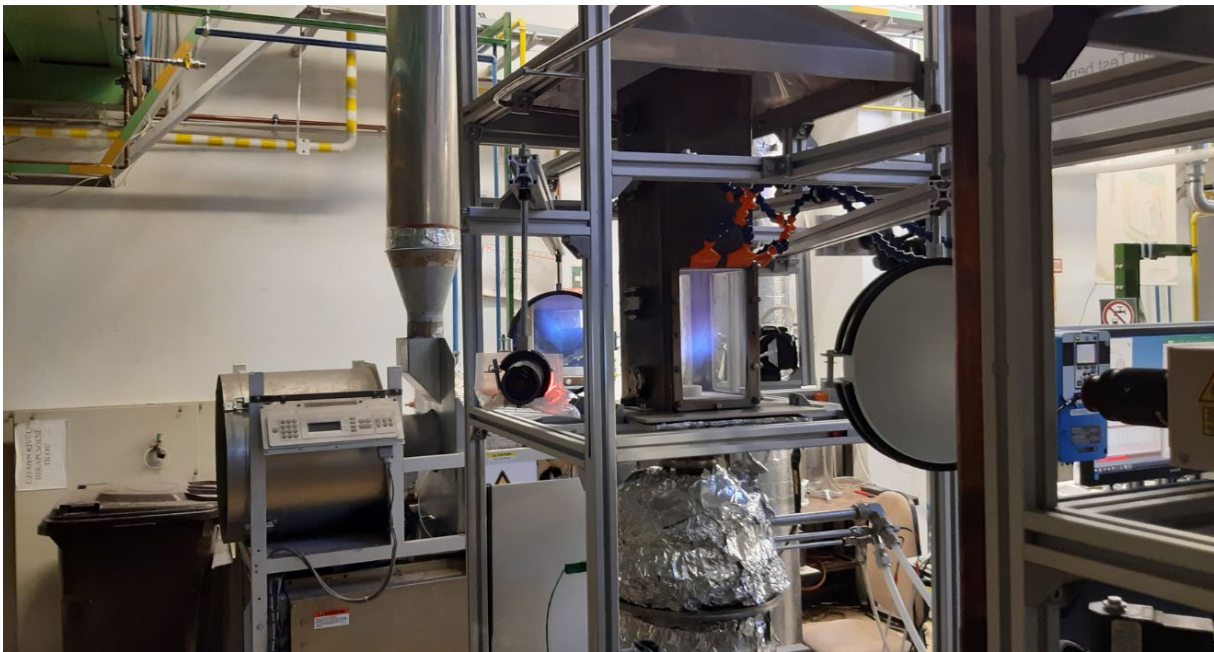
9. ábra: Schlieren parabolatükör irányának beállítása

Ezt követően a fényforrás felszerelés és annak a fókusz távolságba való helyezése következett, amely a fenti módszerekkel és eszközökkel történt, az így kialakult kialakítást a 10. ábra szemlélteti.



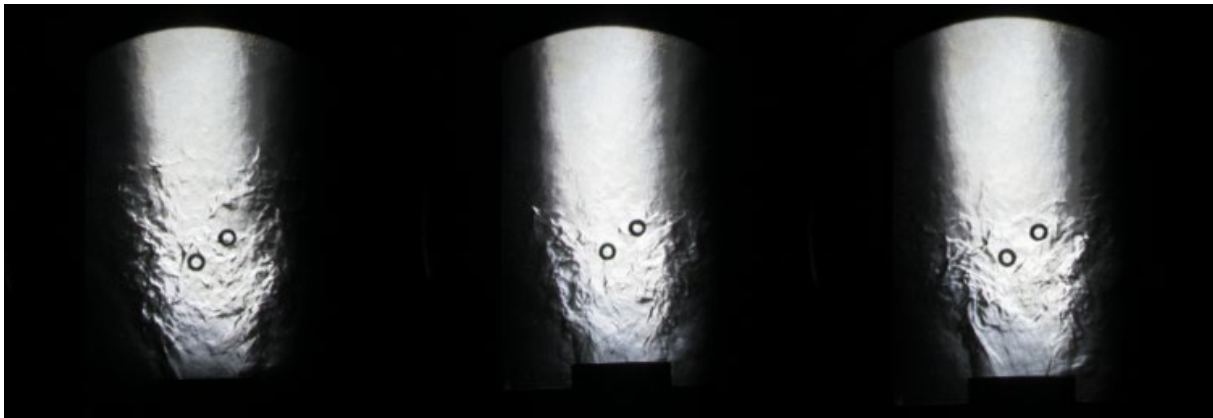
10. ábra: Schlieren optika összeállítása, képfeldolgozó nélkül

Végül a kamera és a penge beillesztése és beállítása következett. Tekintve, hogy a Schlieren vizsgálat rendkívül érzékeny, a kamera távolsága, dőlésszöge meghatározó volt. A penge beállítása a fókusz pontba, szintén precíz munkát igényelt, a fent leírt indokok miatt. A teljes mérési összeállítást a 11. ábra mutatja be.



11. ábra: Schlieren optika végleges összeállítás

Az összeállítás ellenőrzéseként a mérések megkezdése előtt földgáz égést megfigyelve lettek elvégezve a finomhangolások, melyek alapján mondható, hogy a beállítás sikeres. A 12. ábrán látható képek a tesztelés során készültek.



12. ábra: Földgáz égés Schlieren képe

4.5.2 EMISSZIÓ VIZSGÁLAT

A füstgáz összetételének vizsgálatára kiemelt hangsúlyt kell fektetni, mivel az ebből származó adatok alapján lehetséges a meghatározása annak, hogy a hidrogén bekeverés miként gyakorol hatást az emissziós értékekre. Emellett pontos képet kapunk arról, hogy milyen módon tér el a tiszta földgáz tüzeléshez képest a füstgáz összetétele. A vizsgálat szempontjából számunkra a legjelentősebb emissziós termékek, amelyeknek változását szükséges megfigyelni az a szén-monoxid, a szén-dioxid, az elégetetlen hidrokarbonátok és a nitrogén-oxidok.

A nitrogén-oxidok a több forrásból szabadulnak fel. A keletkezés túlnyomó többsége a levegő magas nitrogén tartalmából származik, amelyből jelentős része a magas hőmérsékletű égés során alakul át. A nitrogén-oxidok mind az emberre, mind a környezetre veszélyes. Embereknél légúti megbetegedéseket okozhat, amíg a környezet szempontjából pedig hozzájárul a savas eső kialakulásához. [15]

A szén-monoxid a tökéletes égés következtében jön létre az üzemanyag karbon tartalmából. Az égés hőmérséklete erre a tényezőre fordítottan hat, mint az nitrogén-oxidokra, ami azt eredményezi, hogy valamilyen optimum hőmérséklet szükséges, a két tényező minimális értéken tartása érdekében.

Szén-dioxid tökéletes égés során jön létre az üzemanyag karbon tartalmából. A jelenléte káros ugyanis a számos más gázhoz hasonlóan üvegházhatású gázok közé sorolandó. A kibocsátása jelentősen csökkenthető valamilyen karbon megkötő technológia segítségével vagy további lehetőséget kínálnak az alternatív, alacsonyabb karbon tartalmú vagy karbonsemleges üzemanyag tüzelése.

Elégetetlen hidrokarbonátok a neve alapján is sokat mond az eredetéről, ugyanis a tüzelőanyagunkban, esetünkben a földgázban fel lelhető szénhidrogén vegyületek elégetetlen részét jelenti. Amennyiben a füstgáz tartalmaz ilyen vegyületeket az leginkább arra az okra vezethető vissza, hogy az égéstér hőmérséklete alacsony vagy a tartózkodási ideje volt kevés az üzemanyagunknak. A környezetbe kikerülve a többi emissziós termékhez csatlakozva ezek a gázok is üvegházhatást erősítik.

Az égés végtermékeinek és az összes kibocsátás mérésére használt eszköz egy füstgáz analízátor, amely elektrokémiai cellák segítségével képes mérni az egyes komponenseket a kiáramló közegben. Általánosan az elektrokémiai gáz szenzor a vizsgálni kívánt gáz koncentrációját oxidációs vagy redukációs reakció hatására kialakuló áramjel segítségével képes vizsgálni. [17] A mért értékek közé tartozik az oxigén, a szén-monoxid, a szén-dioxid, a nitrogén-oxid és a nitrogén-dioxid. A műszer által mért értékek segítségével pontosan meghatározható, hogy milyen hatást okoz az emissziós értékekre a hidrogén bekeverése a földgáz önálló tüzeléséhez viszonyítva.

5 KIÉRTÉKELÉS

5.1 *Eredmények értékelése*

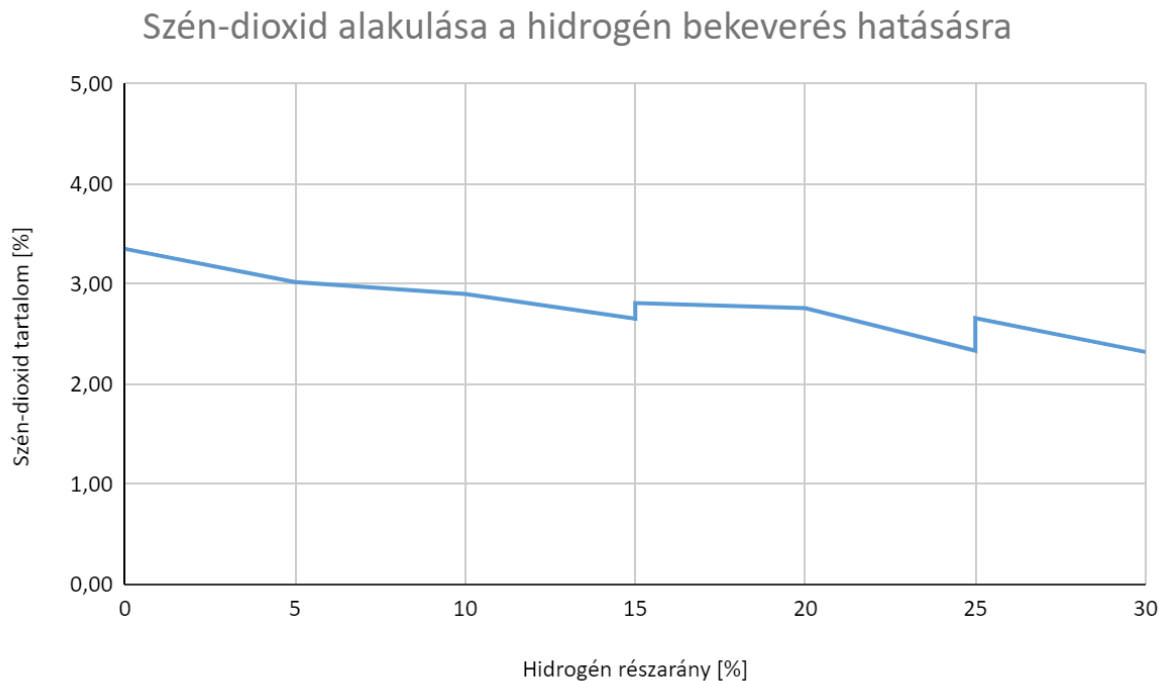
A vizsgálat alatt az állandó tüzelési teljesítménynek a 13,35 kW került meghatározásra és a kijelölt tartományon 7 mérési pontban végeztem el a mérést. A mérési pontok a teljesen földgáz üzemtől kezdődően 5%-os hidrogén bekeverési lépések mentén 30%-ig lettek kijelölve, kiemelendő, hogy a bekeverés nem a térfogat alapján, hanem teljesítmény szint alapján történt.

Az emissziós vizsgálat során rögzítésre kerültek a korábban említett komponensek az összes vizsgált mérési pontban, az értékek a 2. táblázatban találhatóak.

H_2 részarány [%]	V_h [%]	O_2 részarány [%]	CO [ppm]	CO_2 részarány [%]	NO_x [ppm]	NO [ppm]	NO_2 [ppm]
0	0	3,03	0,99	3,35	16,07	15,84	0,23
5	14,57	3,22	0,62	3,02	15,43	15,22	0,22
10	26,48	3,25	0,62	2,90	15,94	15,69	0,25
15	36,38	3,36	0,60	2,65	16,64	16,37	0,27
15	36,38	3,19	0,63	2,81	17,21	16,93	0,28
20	44,76	3,09	2,59	2,76	19,06	18,77	0,29
25	51,93	3,39	2,95	2,34	18,05	17,70	0,35
25	51,93	3,37	2,97	2,36	18,19	17,80	0,39
25	51,93	3,00	10,33	2,66	20,53	20,00	0,53
30	58,14	3,19	82,13	2,32	20,56	19,75	0,82

2. táblázat: Emissziós értékek

Az első oszlopban látható a hidrogén bekeverésének az aránya, amelynek változtatása mentén történt a vizsgálat. Látható, hogy tisztán földgáz üzemben, hogyan alakultak az értékek. Az adatok közt fellelhető, hogy a 15%-os értékhez és a 25%-os értékhez több mérési adat tartozik, ez annak köszönhető, hogy a mérés során azokban a pontokban hiba jelentkezett a hidrogén bevezetés során, ezáltal az eredmény jobb megközelítése érdekében többszöri adat rögzítés történt ezeken a tartományokon.

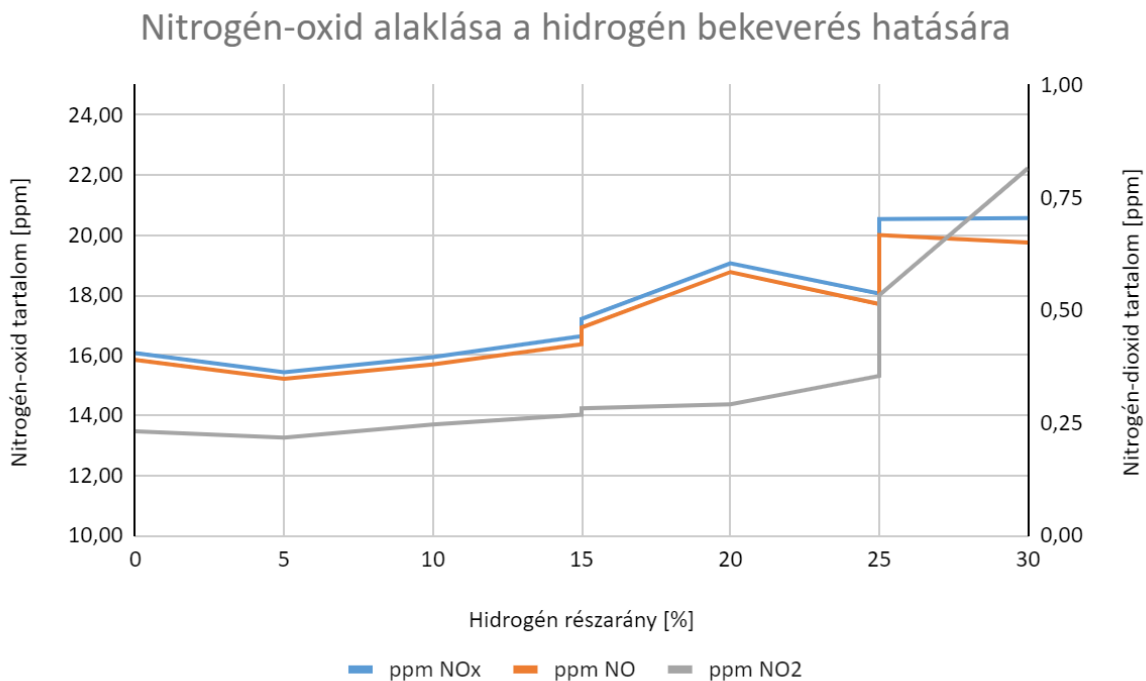


13. ábra: Szén-dioxid alakulása a hidrogén bekeverés hatására

A várakozásnak megfelelően a szén-dioxid érték a teljesen földgáz alapú tüzelés esetében a legnagyobb. A szén-dioxid megfigyelhetően csökkenő tendenciát mutat az eredmények alapján, ami teljesen megfelel az elméletnek és az előzetes elképzelésnek. A 13. ábrán megfigyelhető, hogy a szén-dioxid tartalom lineárisan csökken a bekeverés hatására és a mérés ismétlés hatására nem látszik jelentős eltérés.

A nitrogén-oxidok esetében az adatok igazolják a várakozást, mivel mind a nitrogén-monoxid, mind a nitrogén-dioxid növekedést mutat. A korábban bemutatott nitrogén-oxidokat befolyásoló elemek közül, valószínűsíthetően a legnagyobb faktorral az adiabatikus láng hőmérséklet bír, ami növeli a nitrogén-oxidok kibocsátását. Az adatokból továbbá kiderül, hogy összességében a kibocsátás nő a hidrogén arányának növelésével és a jelentős növekedés leginkább a nitrogén-oxid okozza. A 14. ábrán látható, hogy az összes keletkezett nitrogén-oxid jelentős része a magasabb értékű és meredekebben növekvő nitrogén-monoxidból származik.

A nitrogén-dioxid diagramján a 25%-os tartománytól felfele rendkívül meredek emelkedésnek indul az érték. Ezen kiugrás több dologra utalhat, az első feltételezés, hogy a tartományba lépve a hidrogén kezd domináló hatású lenni a gáz keverékben és ezen a ponttól kezdve jelentkezik igazán a láng hőmérséklet hatása. Egy másik lehetséges magyarázat a mérés pontatlansága, amelyre a későbbiekben a szén-monoxidnál is találunk nyomot. A pontos ok felderítéséhez további mérés szükséges.

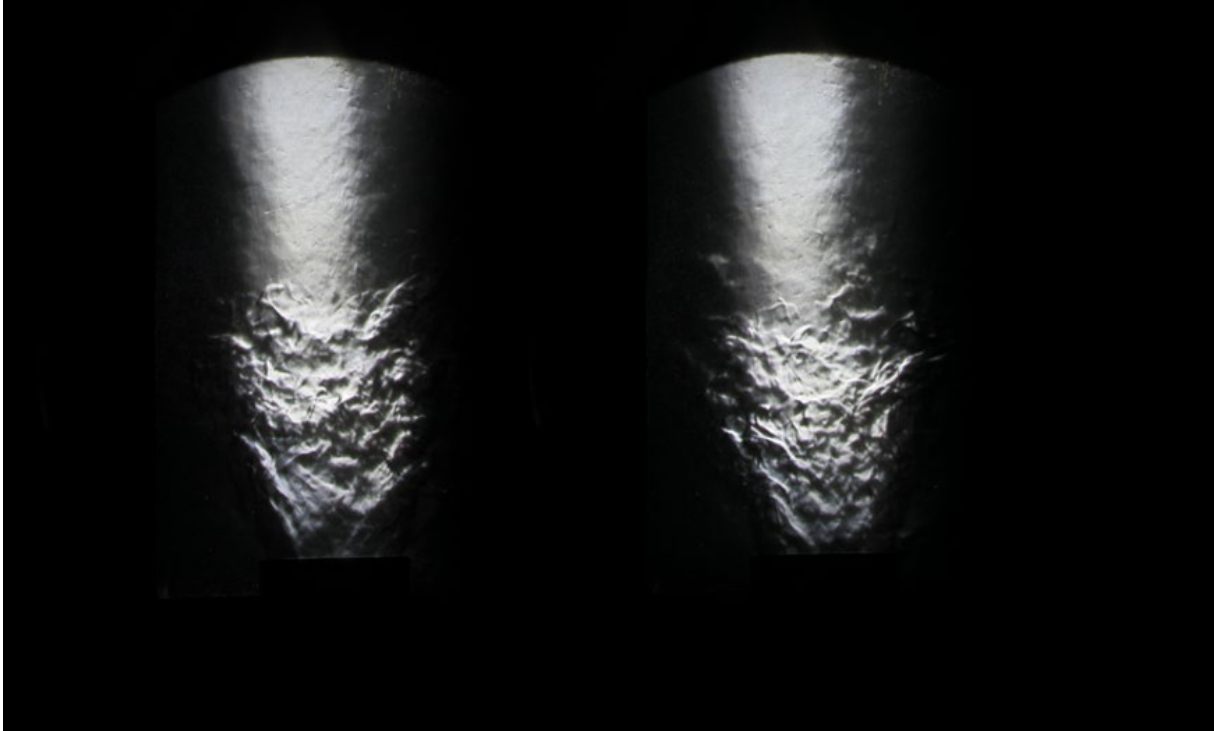


14. ábra: Nitrogén-oxidok alakulása a hidrogén bekeverés hatására

A szén-monoxid esetében a kezdetben a várakozásnak megfelelően csökkent az érték, bár fontos megjegyezni, hogy a kezdeti érték is rendkívül alacsony. A 20%-os bekeveréstől kezdve a szén-monoxid értékek növekvő tendenciát mutatnak, ami jelentősen ellentmond a várt eredménynek. Amíg a 25%-os esetet vizsgáljuk a legvalószínűbbnek tűnő lehetőség az égés tökéletlensége, azonban kiterjesztve a 30%-os vizsgálatra az érték nagyságrendileg megváltozik, ami annak függvényében, hogy az égésben résztvevő földgáz aránya lecsökkent, ezáltal kevesebb a jelenlévő szén atom, teljesen nem várt kiugró érték. Az oka alighanem a mérés során bekövetkezett ismeretlen eredetű hiba, ezen feltevés igazolásához további mérés szükséges.

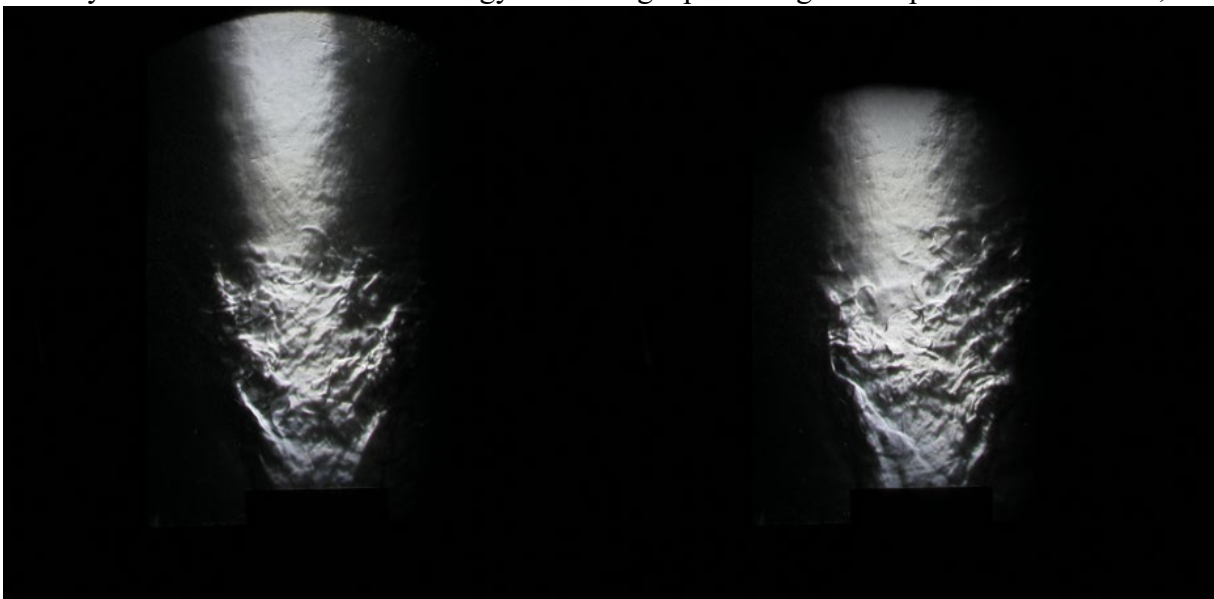
Az emisszió vizsgálat mellett a Schlieren analízis alapján is számos tulajdonságot figyelhettünk meg. A teljesen földgáz alapú mérési pontban a láng „v” alakú és az áramlása meglehetősen turbulens az égési zónában. A tangenciális levegő bevezetés és a perdítő elemekből adódóan a turbulens áramlási kép a várakozásoknak megfelelő.

A 15. ábrán látható két felvétel a hidrogén bekeverés nélküli állapotról. A bal oldali képen könnyen kivehető, a premix ágról kilépő földgáz-levegő előkevert közeg nyílásának a kúpszöge, aminek révén a láng felülete növekszik, viszont a sebessége ezzel arányosan csökken. A lángfront kialakulásának helye, pedig ott van, ahol a közeg kellően lelassul.



15. ábra: Hidrogén bevezetés nélküli égés

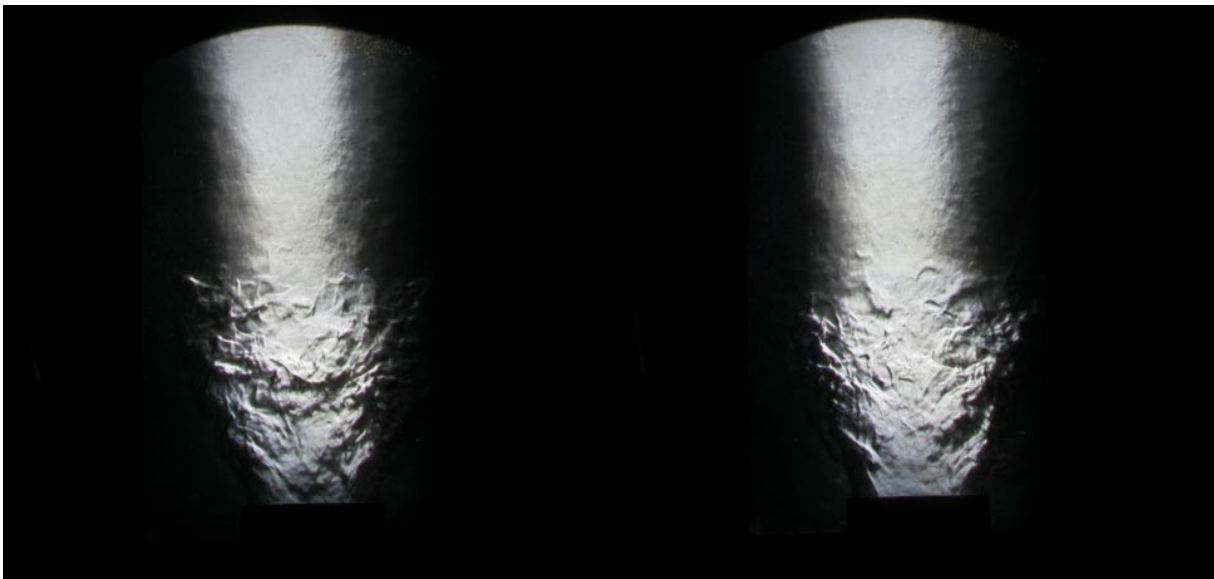
A kis részarányú hidrogén bevezetés hatására megfigyelhetően megváltozott a kapott képünk. Az első szembetűnő tulajdonság a láng „v” alakját érinti, ugyanis az 5%-os hidrogén bevezetése szabályosabb alakot eredményezett a lángképben. Továbbá az előző esethez viszonyítva a minimális növekedés figyelhető meg a premix ágból kilépő átmérőt tekintve,



16. ábra: 5%-os hidrogén bekeverés hatása az égésre

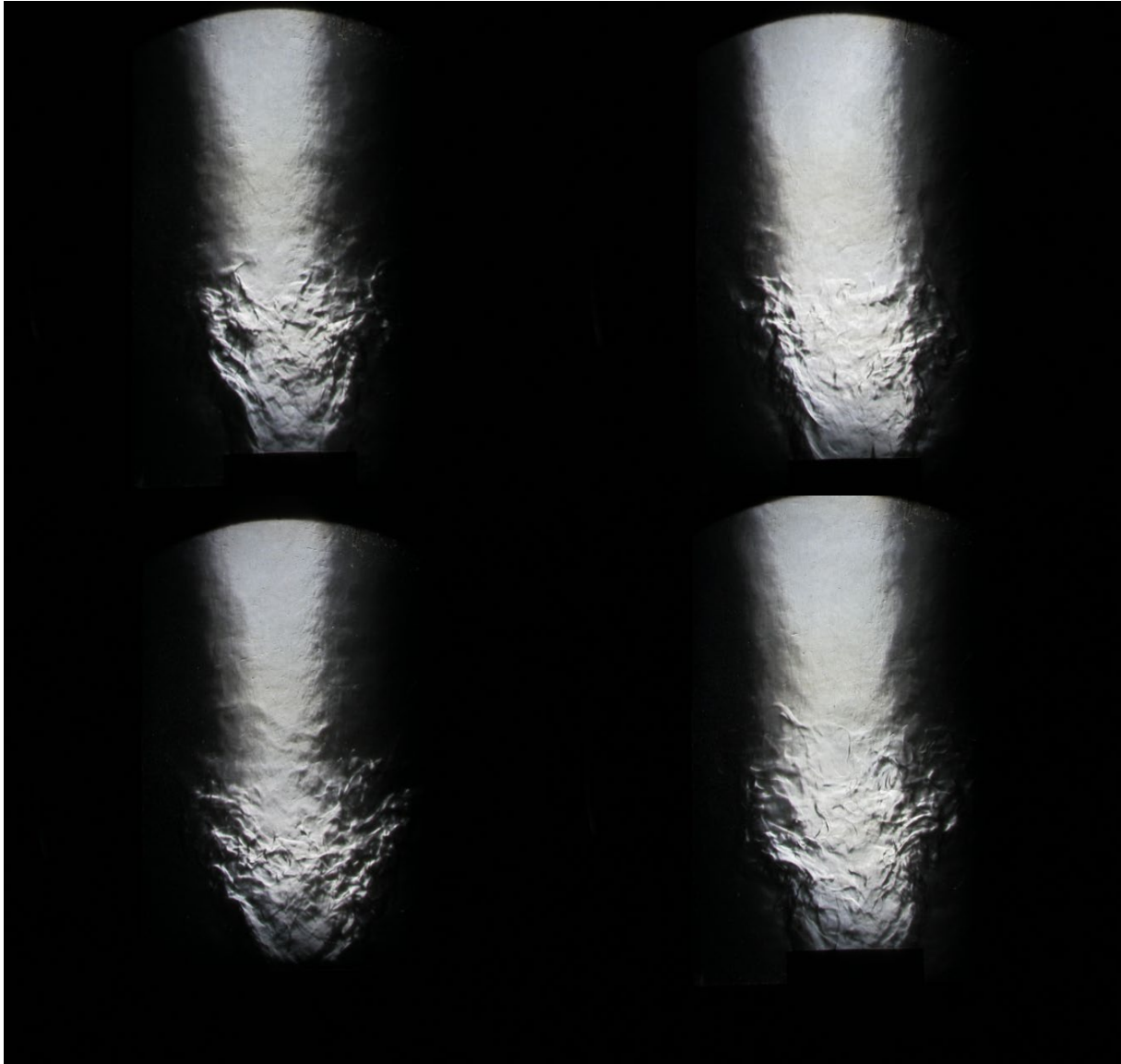
mindemellett a szintén csak kis mértékben, azonban az erősen turbulens égési zóna is redukálódott. A 16. ábra szemlélteti az 5%-os hidrogén bevezetés mérési pontjában tapasztalt jelenségeket.

A további hidrogén bekeverés tovább erősíti azon feltevéseket, amelyek az 5%-os esetben elkezdtek megjelenni. Tehát ebben az esetben tovább nőtt a premix ágból kiáramló gázkeverék felülete, ami a 17. ábrán jól kivehető. Ezenfelül a kúpszög nyílása is látható és a reakció tér tovább csökkenése is megfigyelhető, a tartomány csökkenése a hidrogén nagyságrenddel nagyobb lángterjedési sebességének is köszönhető. Továbbá érzékelhető, hogy a kialakuló lángfront a bekeverés hatására egyre jobban tolódik lefelé a fúvóka felé.



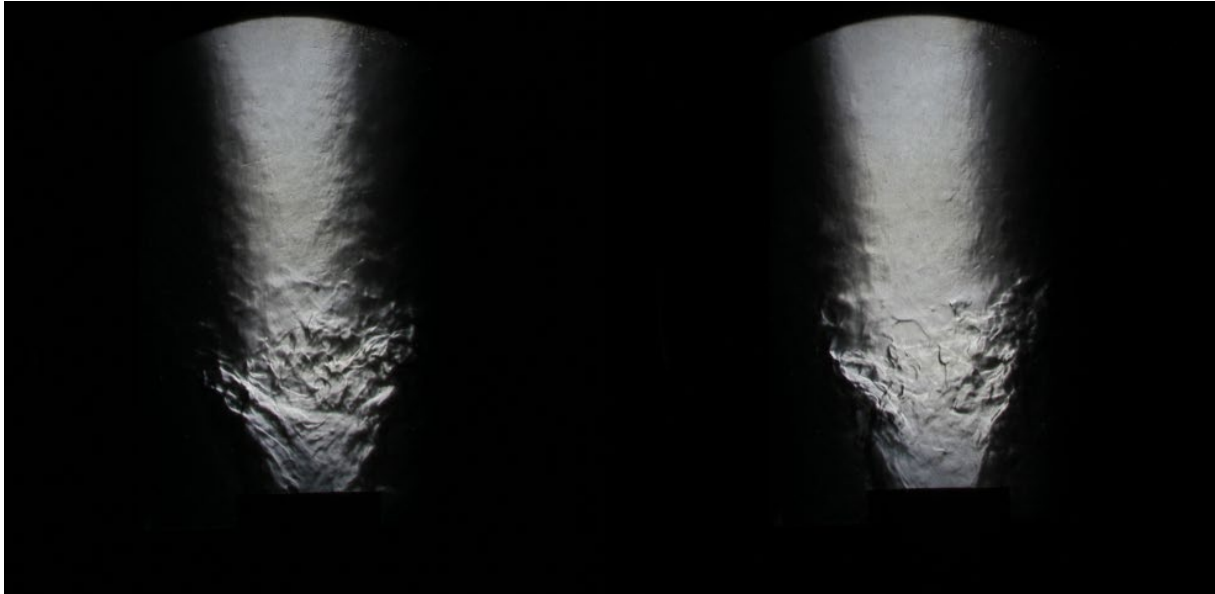
17. ábra: 10%-os hidrogén bekeverés hatása az égesre

Tovább növelve a hidrogén arányát az első pillantásra is kivehető, hogy a képek eltérnek és alaposabb átvizsgálás után fellelhető néhány különbség az előző esethez viszonyítva. A relatív homogén áramlási képtől a mondhatni zavaros inhomogén áramlásig több eset is megfigyelhető. A jelenség kialakulása a hidrogén kellően nagy rész aránya okozhatja, mivel bizonyos állapotokban a keveredés hatására eltérhet pillanat szerűen az egyes lokációk hidrogén tartalma ezáltal az adott pillanatban változó lehet az éppen domináló tüzelőanyagunk. Feltételezhetően ennek köszönhetően változik szemmel jól kivehető módon a zóna terjedelme is. A jelenség vizualizálására a 18. ábra képei szolgálnak, melyeken eltérő állapotok láthatóak, ezáltal a különbségek jól elkülöníthetőek.



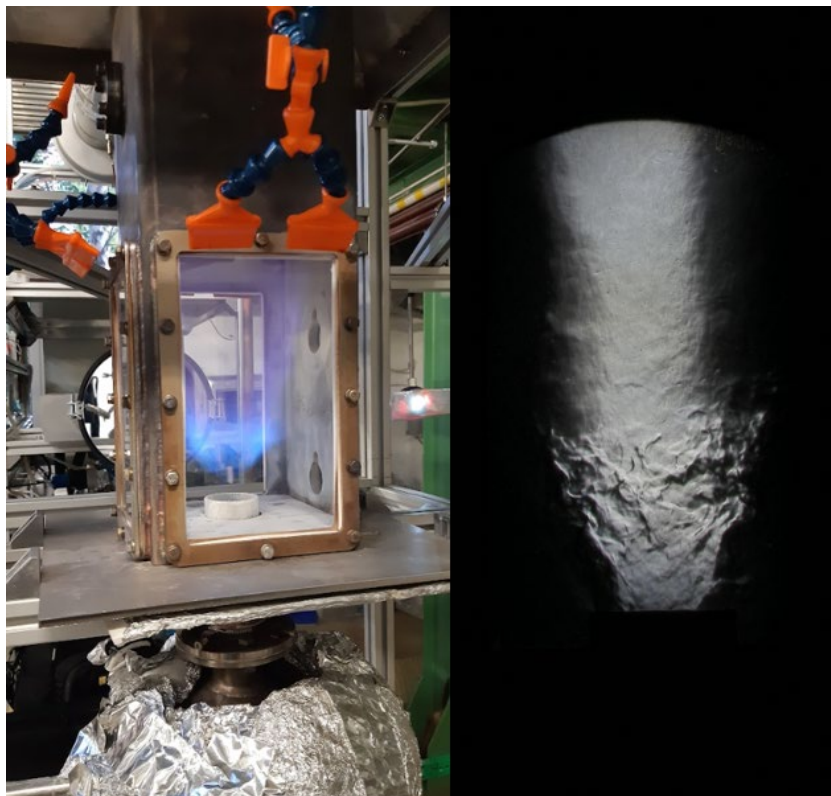
18. ábra: 15%-os hidrogén bekeverés hatása az égesre

A földgáz arány további csökkentése a korábbi megállapításokra erősít rá, vagyis a reakció zóna csökkenése ebben a mérési pontban is fennáll. A zóna csökkenés a korábban tárgyalt nitrogén-oxidok kialakulásában is szerepet játszik, mivel a zóna csökkenése a tartózkodási idő csökkenését is jelenti esetünkben, ami a nitrogén-oxid termelődést a pozitív irányba mozdítja el. A 20%-os bekeverést elérve jelentkezik először megnövekedett szén-monoxid szint, ami a schlieren képek alapján kialakult következtetésekkel összesítve arra enged következtetni, hogy ezen beállítások mellett a reakciós zóna csökkenésével az égés tökéletlensége is növekszik. Vagyis a magas hőmérsékletű terület csökkenése és a pilot ágon egyre nagyobb sebességgel beáramló hidrogén hatására a gáz keverék nem tölt elegendő időt az égéstérben. A 19. ábrán a 20%-os bekeverés hatására kialakuló lángnak és áramlásának a schlieren képe látható.



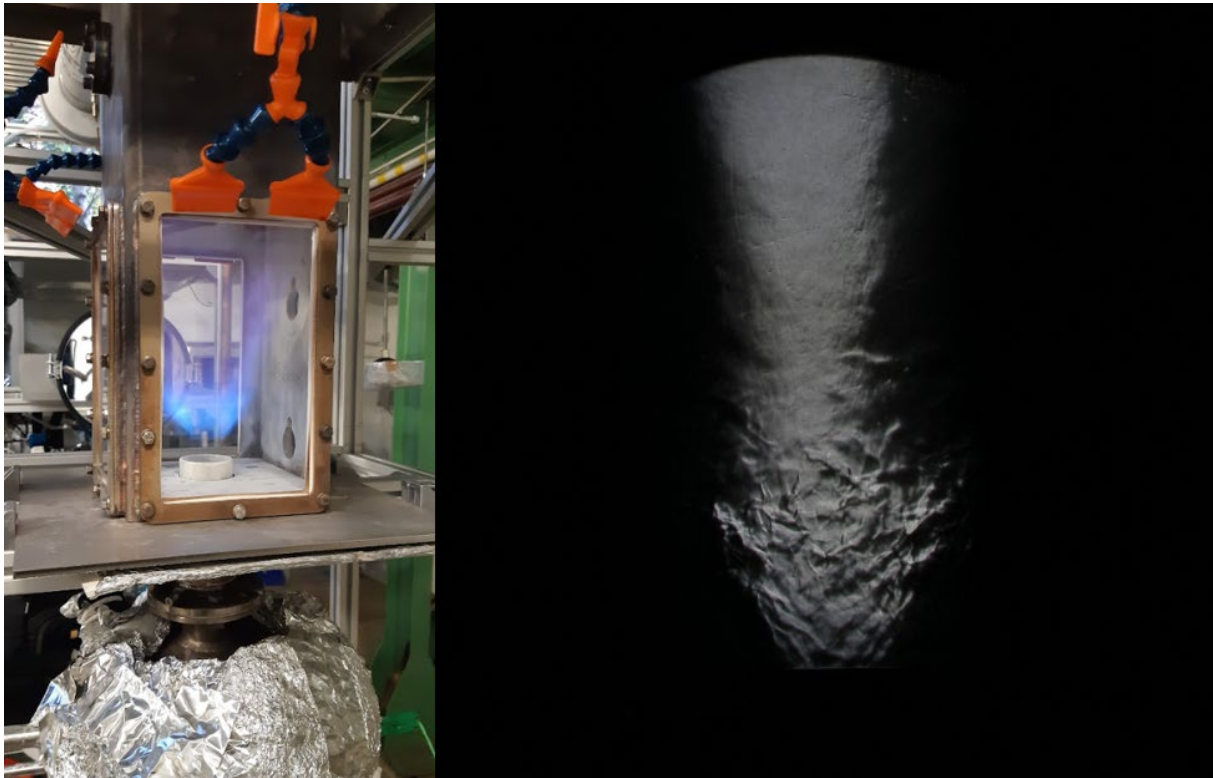
19. ábra: 20%-os hidrogén bekeverés hatása az égésre

A 20. ábrán a 20%-os mérési pontban található schlieren kép és egy szabad szemmel látható láng kép látható. A két kép különbségéből rendkívül jól látszik, hogy mennyivel másabb információk nyerhetők ki és mennyi számunkra hasznos adatot és információt tartalmaz az égésnek az alapvetően emberi szemmel nem látható tartománya. Mind a két képen észrevehető a „v” alakú lángkép és a stabil lángfront.



20. ábra: 20%-os hidrogén bekeverés szabad szemmel látható képe és schlieren képe

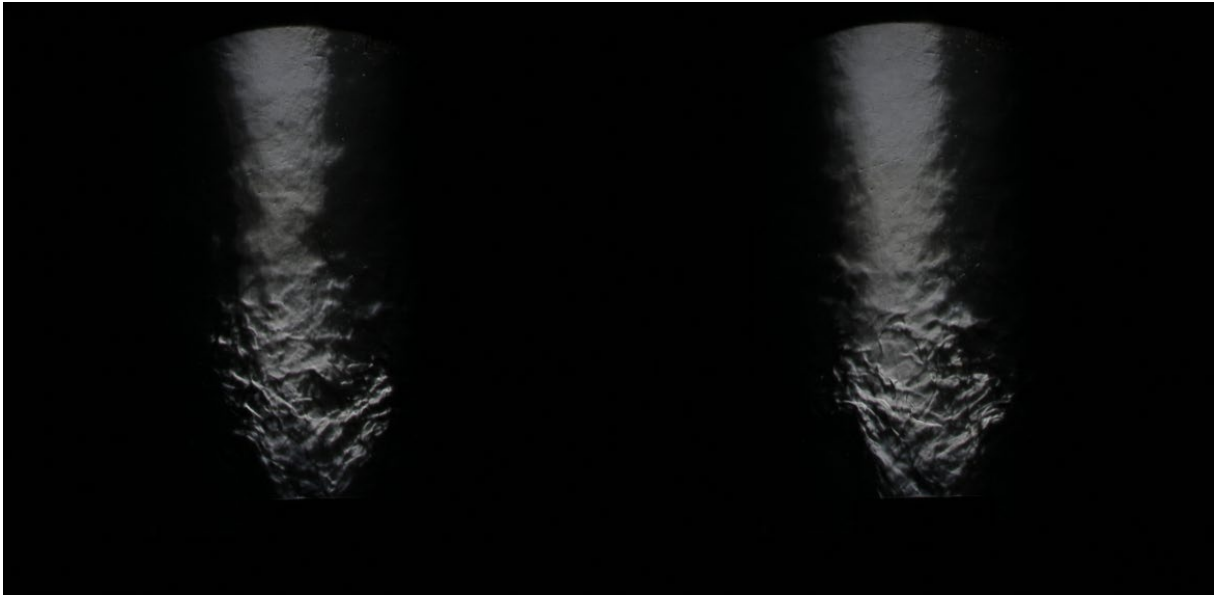
25%-os hidrogén szintet elérve a lángkép jelentősen nem változott meg a korábbi esethez képest. A 20%-os bekeverésnél leírtakhoz hasonlóan ebben a pontban is megfigyelhető a kisebb reakciós zóna okozta következmények azzal a kiegészítéssel, hogy láthatóan a hatás dominánsabbá válik, ha hozzávetőlegesen összevetjük az emissziós értékekkel. A 21. ábrán látható a 25%-os bekeverés hatása, ebben az esetben látványosabb eltérést mutat a szabadon látható kép, ugyanis a látható láng kezdete közelebb helyezkedik a kiáramló csomakhoz, mint a 20%-os esetben, valamint a lángban enyhe árnyalat különbség is észlelhető.



21. ábra: 25%-os hidrogén bekeverés hatása az égésre

Az utolsó, 30%-os bekeverés munkapont a várakozásoktól jelentősen eltérő eredményeket mutatott az emisszió elemzés alatt. A képeken azonban jelentős különbség a többi esethez képest nem észlelhető. Az megfigyelhető eltérés a képeken a leginkább az inhomogenitás, ami a mérési pontban készített képek túlnyomó részén megjelenik. Az emissziós értékekkel közösen értékelve egészen különösnek mondható a pontban vett viselkedése a gázkeveréknek, mivel nagy eltérés nem tapasztalható az áramlásban, ezzel ellentétben az emissziós értékek rendkívül más tartományban helyezkednek el. A nitrogén-dioxid esetében érzékelhető a változás mértéke növekedett a korábbihoz viszonyítva, azonban itt a magasabb hőmérsékletű mező csökkenése is kiemelendő, ami képes esetlegesen nagyobb változást is okozni az értékekben. Azonban a szén-monoxid esetében a sokszoros változás szignifikánsan eltér a vártaktól, amely azt a tartalmat hordozza magával, hogy az égés minősége drasztikusan romlott, amennyiben a mérési eredmények helyesek és a további mérések során azonos értékek adódnak.

A 22. ábrán az utolsó, 30% hidrogén bekeverés hatására kialakuló schlieren kép látható.



22. ábra: 30%-os hidrogén bekeverés hatása az égésre

5.2 *Konklúzió*

Összegezve a hidrogén bekeverésnek a hatása az szén-dioxid emisszióra nézve kedvező, azonban a többi emissziós komponensre csak a megfelelő konstrukció mellett lehet kedvező hatást elérni. Az eredményekből levonható, hogy a kisebb bekeverési arányig a kívánt változást tudtuk elérni, vagyis a tüzelési tulajdonságok jelentős megváltoztatása nélkül a szén-dioxid emisszió csökkenthető, a szén-monoxid tartalom alacsony mértéken tartható, a nitrogén-oxidok pedig csekély mértékű növekményt mutatnak. A schlieren képek alapján átfogóbb képet kaptunk a hidrogén bekeverés hatásáról, azonban a mérési eredmények alapján látszik, hogy a terület igencsak összetett és számos tényező képes befolyásolni a végső eredményeket, viszont ebből adódóan megannyi megvizsgálandó fejlesztési lehetőség rejlik benne. Tekintve, hogy a jelenlegi mérés során felhasznált 2,4 mm átmérőjű fúvóka esetében a 30% hidrogén bekeverési állapotban sem látszódott a visszaégés lehetősége, ezért lehetőség van esetlegesen a nagyobb bekeverési százalékok vizsgálatára, akár a nagyobb fúvóka átmérővel való teszteléshez.

5.3 *Tovább mérések, fejlesztési irányok*

A téma rengeteg lehetőséget, kihívást és potenciált rejt magában, amelyek a témába belemerülve egyre jobban foglalkoztatnak, ebből fakadóan a téma alaposabb kidolgozását és a lejátszódó folyamatok tanulmányozását a dolgozat megírását követően is folytatnám. Mindenképp fontosnak tartom a gyakorlati megvalósítást és a különböző paraméterekkel történő teszteléseket, mivel számos tényező alakulását ezen tesztek mentén érthetjük csak meg igazán. Az adatok értékelése során felderített tények alapján a különböző fűvóka átmérő mellett végzett mérések előre láthatólag nagyban fogják befolyásolni az égési folyamat lejátszódását, ezért az ezekkel végzett többszöri mérések elvégzése, értékelése a jövőben mindenképpen célként fogom kezelni. Emellett a paraméterek fokozatos változtatásával egyre pontosabban szeretném modellezni a gázturbinában uralkodó viszonyokat, ennek érdekében magasabb teljesítmény szinten történő mérések is szükségesek, valamint a magasabb légfelesleg tényező befolyásolásának feltérképezése is további feladat. Tehát az elsődlegesen szem előtt tartott mikro gázturbinában történő tüzelés megvalósulásáig még számos kihívással teli mérés és bővebb irodalomkutatás szükséges.

6 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A dolgozat zárásaként szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik előre mozdítottak és valamilyen módon hozzásegítettek ahhoz, hogy jelen tanulmány elkészülhessen. Elsősorban köszönöm szépen a témavezetőmnek Dr. Sztankó Krisztiánnak a számos segítséget, az útmutatást és a megannyi konzultációt, amelyek mind előre mozdítottak, motiváltak a munka elkészítésében és az egyéni szakmai fejlődésben. Köszönöm szépen Dr. Józsa Viktornak a segítség nyújtását az alkatrészek tervezésben, valamint a mérés lebonyolításában. Továbbá rendkívül hálás vagyok a személyemhez közelálló embereknek, akikre bármikor számíthatok és akik támogatnak a mindennapokban.

7 FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Hydrogen
https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en
Hozzáférés dátuma: 2023. 05. 22.
- [2] A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe
https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en#documents
Hozzáférés dátuma: 2023. 05. 22.
- [3] Magyarország Nemzeti Hidrogénstratégiája
<https://kormany.hu/dokumentumtar/magyarorszag-nemzeti-hidrogenstrategiaja>
Hozzáférés dátuma: 2023. 05. 15.
- [4] Ulbig, A., Borsche, T. S., & Andersson, G. (2015). Analyzing Rotational Inertia, Grid Topology and their Role for Power System Stability. *IFAC-PapersOnLine*, 48(30), 541–547.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.12.436>
Hozzáférés dátuma: 2023. 05. 31.
- [5] 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.
Hozzáférés dátuma: 2023. 02. 23.
- [6] 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.
Hozzáférés dátuma: 2023. 05. 15.
- [7] 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.
Hozzáférés dátuma: 2023. 03. 15.
- [8] 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.
Hozzáférés dátuma: 2023. 05. 15.
- [9] 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.
Hozzáférés dátuma: 2023. 05. 15.
- [10] 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.egypr.2021.11.027.
Hozzáférés dátuma: 2023. 05. 15.
- [11] 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.
Hozzáférés dátuma: 2023.03.08.
- [12] “Reliable power when and where you need it. Clean and simple.” [Online]. Available: https://www.pureworldenergy.com/media/filer_public/d8/d9/d8d9f29a-b680-4ccc-bf62-a8cf59f3a435/c30_hpng_331140a.pdf
Hozzáférés dátuma: 2023. 06. 04.
- [13] 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,
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.123>
Hozzáférés dátuma: 2023. 06. 04.
- [14] 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.
Hozzáférés dátuma: 2023. 05. 15.
- [15] Nitrogen Dioxide (NO₂) Pollution
<https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2>
Hozzáférés dátuma: 2023. 06. 04.

- [16] 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.
Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 03.
- [17] The challenges with electrochemical NO₂ sensors in outdoor air monitoring
<https://www.aeroqual.com/blog/challenges-electrochemical-no2-sensors-outdoor-air-monitoring>
Hozzáférés dátuma: 2023. 06. 05.
- [18] Reflection schlieren photography of liquid surfaces
Andrew Davidhazy
Imaging and Photographic Technology
School of Photo Arts and Sciences / RIT

<http://www.davidhazy.org/andpph/text-reflection-schlieren-two.html>
Hozzáférés dátuma: 2023. 10. 28.
- [19] V. Józsa, "Mixture temperature-controlled combustion: A revolutionary concept for ultra-low NO_x emission," *Fuel*, vol. 291, May 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.120200.
Hozzáférés dátuma: 2023.11.05.