

"Oxy-fuel ( $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-O}_2$ ) tüzelőanyag vizsgálata  
kísérleti gázmotorban" zárójelentése

2022. december 21.

## Tartalomjegyzék

1	Előzmények .....	3
2	Mérés célja, elméleti háttér .....	4
3	A mérőberendezés .....	6
4	Mérés menete .....	8
5	Vizsgálati eredmények .....	9
	Összefoglalás .....	18
	Irodalomjegyzék .....	21
	Melléletek.....	22

## 1 Előzmények

A BME, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéket 2022 januárjában kereste meg Hujber Ottó úr a Coopinter Kft.-től projekttervezetükkel, amely segítségével a megújuló villamosenergia tárolását és a villamosenergia rendszer szabályozását egyidejűleg lehetővé tevő gépészeti rendszert és eljárást dolgoztak ki. A technológia alapja a széndioxid és a hidrogén metánná történő alakítása, amely történhet a hagyományos Sabatier eljárással, vagy biológiai reaktorban, metánt termelve. A hidrogént víz elektromos bontásával állítják elő, a széndioxidot biogázból vagy más CO<sub>2</sub> keletkezéssel járó fermentációs technológiákból nyerik, vagy például erőművek füstgázából vonják ki. Azonban a CO<sub>2</sub> kivonása drága eljárás, tökeigényes és jelentős üzemeltetési költséggel jár. A vízbontás célja hidrogén előállítás, de annak során oxigén is keletkezik. Ha hasznosítani szeretnénk az oxigént is, akkor ez jelentősen szűkíti a telephelyválasztás lehetőségét.

Az általuk kidolgozott megoldás és gépészeti rendszer egyik fontos eleme, hogy a megújuló villamosenergia tárolás telephelyéül a villamosenergia rendszernek már részét képező gázmotoros erőműveket használnak, egyfelől mint az energiatárolási eljáráshoz szükséges széndioxidot előállító eszközt, másfelől, mint tárolási infrastruktúrát: a villamos-, és a földgáz-csatlakozás helyszínét.

A javasolt eljárás másik lényeges eleme az, hogy a vízbontó által előállított mellékterméket, az oxigént, a gázmotor tüzelőanyagát jelentő földgáz, biogáz stb. eltüzeléséhez használjuk fel, kiváltva ezzel a hagyományos levegőt (amelynek 78%-a nitrogén). Ily módon a füstgázt nem kell drága berendezéssel, költséges módon megtisztítani, hiszen az égéstermék tiszta CO<sub>2</sub> lesz, ami közvetlenül, elméletileg tisztítás nélkül felhasználható a metán előállítási folyamatban.

A megoldás fontos elemei a villamos vezérlés, valamint a megfelelően méretezett CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> puffertároló kapacitások, amelyek lehetővé teszik, hogy a rendszerirányító által rendelkezésre bocsájtható időkeret (mintegy 1.200 – 2.900 óra/év) alatt a tárgyi eljárással a CHP tulajdonos cégek a maximális mennyiségű megújuló villamosenergiát tudják eltárolni metán formájában.

Az újszerű berendezés-együttes és eljárás, mint automatikus energetikai rendszer, egyben a rendszerirányító által vezérelhető villamosenergia-fogyasztó is lehet, amely kiszolgálhatja a rendszerirányító hálózat-szabályozási igényeit. Ebben az esetben a vízbontó kihasználtsága javulhat.

A javasolt gépészeti rendszer villamos vezérlése, a puffertároló tartályok segítségével, a rendszerirányító által a vízbontó számára rendelkezésre bocsájtott idő-, és teljesítménykeret lehetőségein belül optimalizálja a metán előállítás folyamatát és maximalizálja az előállított metán mennyiségét. A találmány egyik elemét képező oxigéntüzelés mint fogalom és

megoldás ismert és annak alkalmazása nagy teljesítményű (több száz MW-os) kazánok és gázturbinák esetében, többnyire kísérleti jelleggel, már alkalmazásra került. Ezekben az esetekben azonban a létező találmányok célja a széndioxid kibocsátás csökkentése és nem a megújuló energia tárolása, vagy a villamos energiarendszer szabályozása. A gázturbinák, valamint a széntüzelésű kazánok nagy teljesítménye fontos a széndioxid kibocsátás nagymértékű csökkentése miatt történő széndioxid elszállítás gazdaságossága érdekében. Az ismert oxy-fuel megoldások nem az elektromos vízbontó berendezések által melléktermékként termelt oxigént hasznosítják, hanem ahhoz külön üzemben állítják elő a szükséges oxigént.

Jelen vizsgálat célja a technológia egyik részét képező egység, az oxigén/széndioxid keverékkel üzemeltetett gázmotor kísérleti tesztelésére. A méréseket oxigén és széndioxid palackok alkalmazásával végezzük, vízbontó és metanizátor nélkül.

Az előzetes vizsgálatok alapján világossá vált, hogy a megkeresésben szereplő gázmotoros ( $V_{\text{lök}} = 2,68$  liter,  $n = 1500$  1/perc fordulatszám) egység átalakítása a célra, noha nem igényelne jelentős átalakítást, de elsősorban a  $\text{CO}_2$ -dal történő ellátása igen jelentős költségeket igényelne (kb. 107 kg/óra). Ezért a Tanszék azt javasolta, hogy a már régen tervbe vett gázüzemre átalakítását végezzük el az oktánszámmérő motornak ( $V_{\text{lök}} = 0,332$  liter,  $n = 600$  1/perc fordulatszám) és ezen a motoron végezzük el a vizsgálatokat.

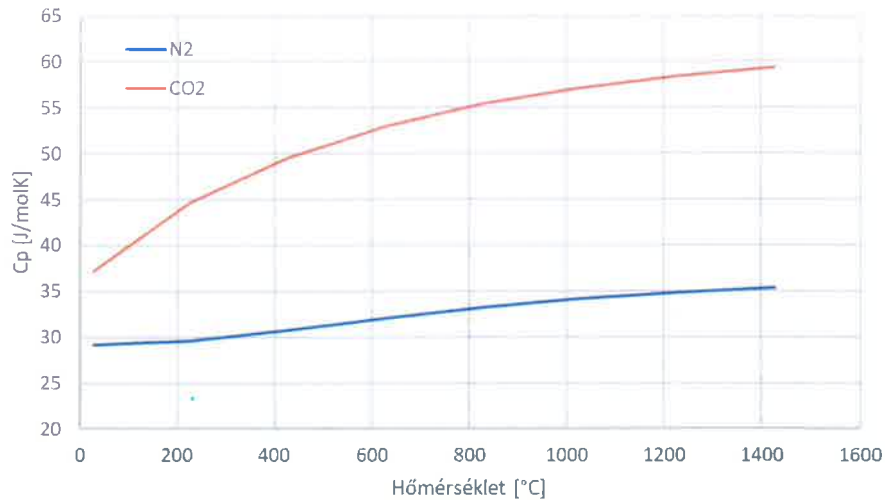
Az ütemtervnek megfelelően 2022. május 14.-én egyeztetések után átadtuk az 1. részfeladat jelentését –Mérőrendszer és a mérési program megtervezése és egyeztetése–, melyet a Megrendelő elfogadott és megkezdődött a kísérleti rendszer kialakítása alvállalkozó bevonásával.

A rendszerrel az első bemutató mérésre 2022. augusztus 29-én került sor még levegő-földgáz keverékekkel, majd 2022. szeptember 20-án már földgáz/ $\text{O}_2$ / $\text{CO}_2$  keverékkel. Az előzetese vizsgálatok során szerzett tapasztalatok alapján, a rendszeren több módosítás kellett végezni: A  $\text{CO}_2$  ellátásához végül a gázpalackos megoldást választottuk, így a rendszerből kimaradt a gázlefejtő elpárologtató hőcserélője, így a reduktort és a csővezetékot fűteni kellett, valamint a hőhasznosító rendszerbe integrálásra került a motor hűtőrendszere.

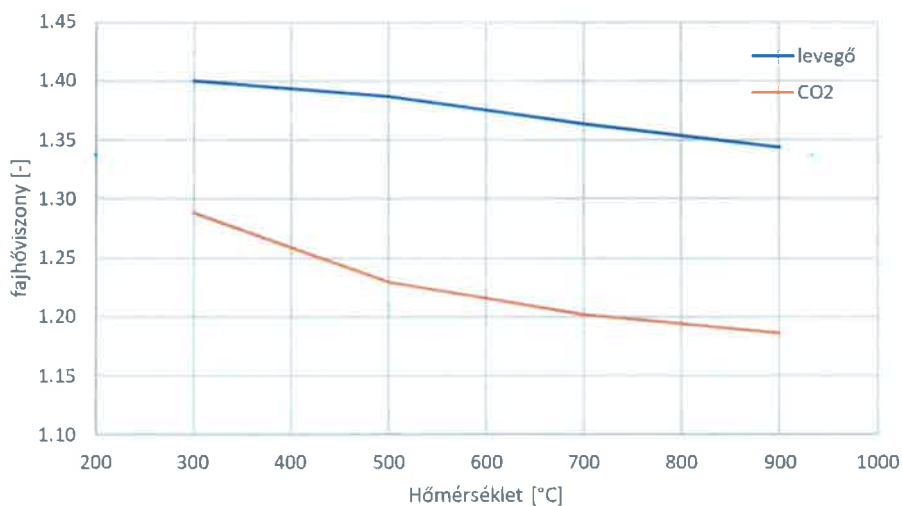
## **2 Mérés célja, elméleti háttér**

A mérések célja egyhengeres, szikragyújtású kísérleti gázmotor jellemzőinek vizsgálata levegő helyett  $\text{O}_2$ / $\text{CO}_2$  keverékkel működtetve. Különböző  $\text{O}_2$ / $\text{CO}_2$ /földgáz keverékek esetén mérésre kerül a motor hasznos teljesítménye, hasznos hőteljesítménye, károsanyag kibocsátása, indikált jellemzői, valamint a földgázfogyasztás.

A levegőben 79 V/V%-ban található  $N_2$  és a  $CO_2$  számos fizikai paramétere között van eltérés, amelyek a motor működésére hatással vannak. Ezek közül a legjelentősebb hatással az eltérő fajhő (1. ábra) és fajhőviszony (2. ábra) bír. A  $CO_2$  nagyobb fajhője kedvezőtlen hatással van az égésre: csökkenti a lángsebességet és rontja a gyújthatóságot.



1. ábra: Nitrogén és széndioxid állandó nyomáson vett fajhője a hőmérséklet függvényében



2. ábra: Levegő és széndioxid fajhőviszonya a hőmérséklet függvényében.

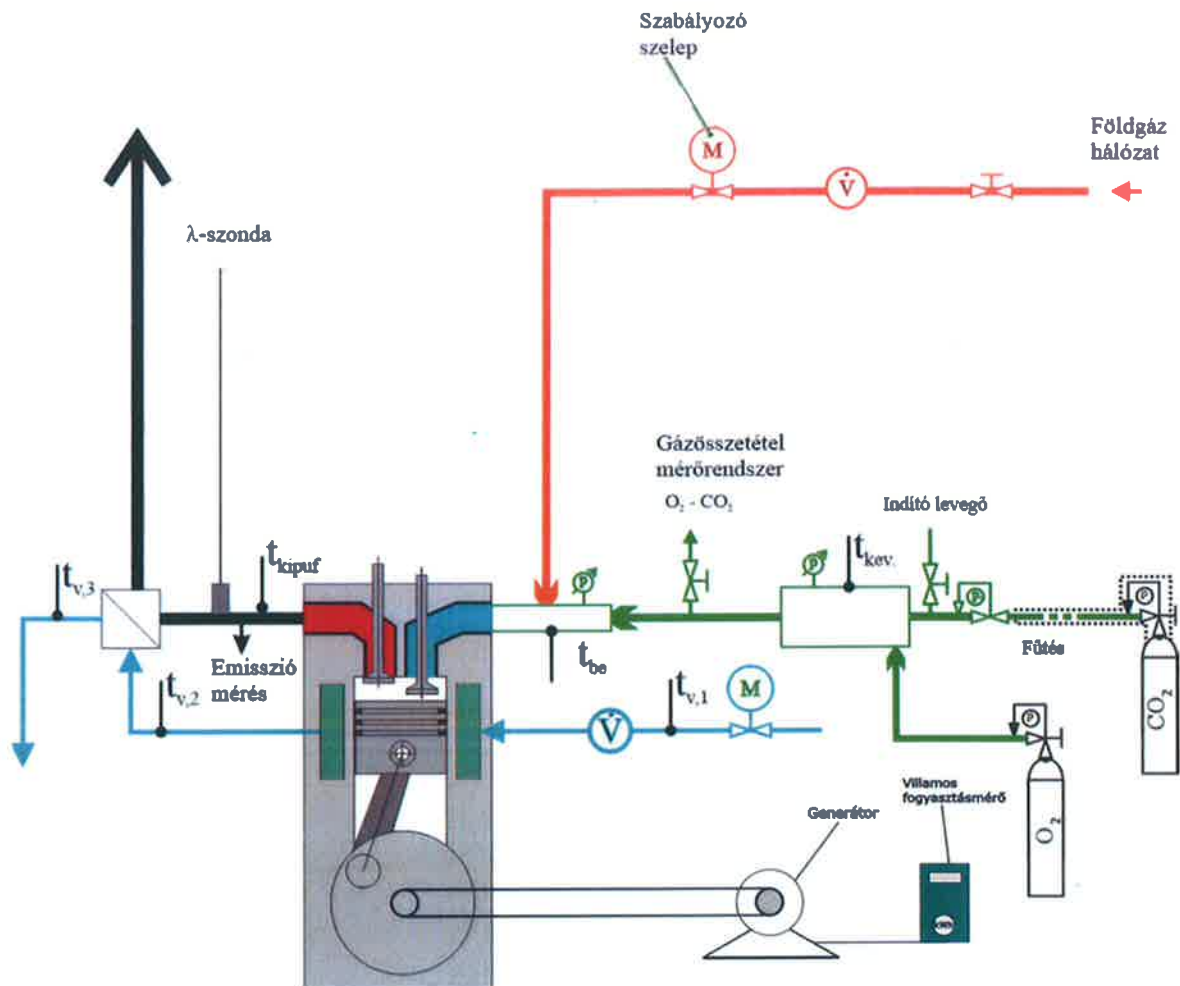
A  $CO_2$  fajhőviszonya jelentősen kisebb a levegőjéhez képest, ami (1) szerint csökkenti a körfolyamat elérhető hatásfokát.

$$\eta_{Otto} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}} \quad (1)$$

ahol:  $\epsilon$  : kompresszió viszony

$\kappa$ : fajhő viszony

### 3 A mérőberendezés



3. ábra: A mérésekre használt rendszer felépítése.

A méréseket a 3. ábrán látható mérőrendszeren végeztük. A méréseknél használt motor egy földgázüzemre átalakított BASF típusú egyhengeres szikragyújtású kísérleti motor. A motor fő paraméterei az 1. táblázatban láthatóak.

Típus	BASF - Prüfmotor
Furat	65 mm
Löket	100 mm
Lökettérfogat	332 cm <sup>3</sup>
Kompresszió viszony	11,5
Előgyújtás	13 ft° FHPE
Fordulatszám	600 1/min

1. Táblázat: A motor főbb adatai

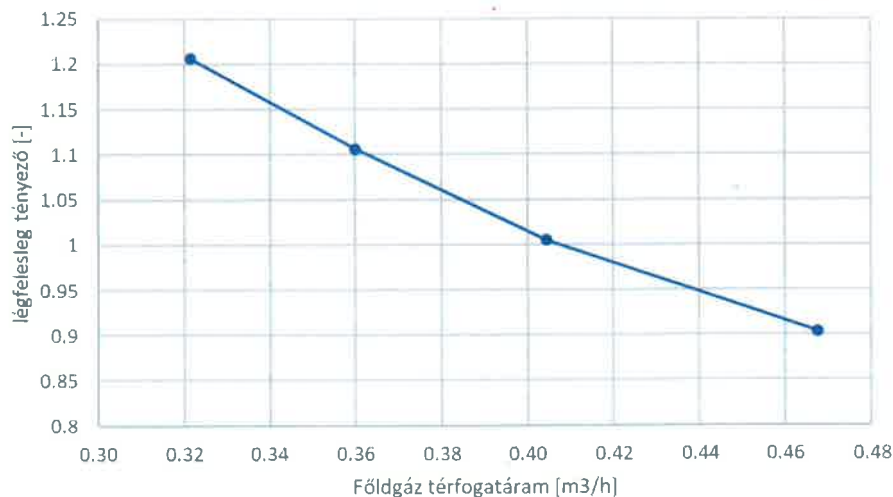
A motorhoz szíjhajtással csatlakozó generátor hasznos villamos teljesítményét villanyóra segítségével mértük. A motor hűtésének és a kipufogógáz hőhasznosító hőcserélő által leadott hasznos hőmennyiséget a szekunder oldali átfolyó víz hőmérsékletkülönbségeinek rögzítésével és vízóra segítségével mértük. A motorba a földgáz bevezetése a szívóvezetékbe erre a célra épített gázkeverővel történik, a földgáz térfogatárama szervomozgatású szabályzószelleppel állítható. A földgáz térfogatáram gázórával került mérésre. A levegőt, illetve az O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> keveréket egy puffertartályból szívja a motor, ami a nyomáslengések kiegyenlítését és a homogén O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> keveréket biztosítja. A keverőtartály nyomása és hőmérséklete mérésre került, továbbá gázelemző berendezés segítségével a tartály O<sub>2</sub> koncentrációját is mértük. A CO<sub>2</sub> és az O<sub>2</sub> állítható nyomáscsökkentőkön keresztül kerül a keverőtartályba, a CO<sub>2</sub> esetében két fokozatban. A CO<sub>2</sub> ágat elektromos fűtéssel láttuk el, a palackból történő expanzió miatti jelentős hűlés miatt. A mérések során a motort indikáltuk, ami a pillanatnyi hengernyomás mérését jelenti a főtengely szöghelyzet függvényében. A mérőrendszerben használt műszerek adatai a 2. táblázatban találhatóak.

Megnevezés	Típus	Tartomány	Pontosság
Vízóra	Idro-tech 110	$0 - 5 \frac{m^3}{h}$	$\pm 1\%$
Gázóra	Itron G4-RF1	$0 - 6 \frac{m^3}{h}$	$\pm 0,2 dm^3$
Hőmérő köpeny be	PT-100 (A-osztály)	-50 – 600 °C	$\pm 0,1 °C$
Hőmérő köpeny ki	PT-100 (A-osztály)	-50 – 600 °C	$\pm 0,1 °C$
Hőmérő füstgáz hőcserélő ki	PT-100 (A-osztály)	-50 – 600 °C	$\pm 0,1 °C$
Hőmérő földgáz	PT-100 (A-osztály)	-50 – 600 °C	$\pm 0,1 °C$
Hőmérő keverő	PT-100 (A-osztály)	-50 – 600 °C	$\pm 0,1 °C$
Hőmérő szívótorok	PT-100 (A-osztály)	-50 – 600 °C	$\pm 0,1 °C$
Hőmérő kipufogó	termoelem K típus	0 – 1200 °C	$\pm 0,5 °C$
Nyomásmérő (keverőtér)	Datcon DT 720L	0 – 1,6 bar	$\pm 0,6\%$
Nyomásmérő (szívócsonk)	Datcon DT 720L	0 – 1,6 bar	$\pm 0,6\%$
THC koncentráció	HORIBA MEXA 8120 F	0 – 5000 ppm	$\pm 0,5\%$
O <sub>2</sub> koncentráció a kipufogógázban	HORIBA PG 520	$0 - 25 \frac{V}{V}\%$	$\pm 0,5\%$
NOx koncentráció	HORIBA MEXA 8120 F	0 – 5000 ppm	$\pm 0,5\%$
CO koncentráció	HORIBA PG 520		$\pm 0,5\%$
CO <sub>2</sub> koncentráció	HORIBA PG 520	$0 - 20 \frac{V}{V}\%$	$\pm 0,5\%$
O <sub>2</sub> koncentráció a keverékben	Servomex 1400B4	$0 - 100 \frac{V}{V}\%$	$\pm 0,5\%$

2. Táblázat: A mérés során használt műszerek

## 4 Mérés menete

A mérések során a motor állandó fordulatszámon, előgyújtással és kompresszió viszonyal üzemelt. A keverőtartály nyomását és hőmérsékletét, ezzel a motor töltési fokát szintén közel állandó értéken tartottuk. A nyomás 0,991 és 1,008 bar között, a hőmérséklet 299 K és 304 K között alakult, ami elhanyagolható hatást gyakorol a motor jellemzőire. Elsőként referenciaméréseket végeztünk a mérőrendszerrel különböző levegő – földgáz keverékkel. A referencia mérési sorozat légfesleg tényező tartománya a 4. ábrán látható. A következő négy mérési sorozatban a levegőt  $O_2/CO_2$  gáz keverékkel helyettesítettük, különböző  $O_2$  koncentrációkat alkalmazva (28 V/V%, 32 V/V%, 36 V/V%, 40 V/V%  $O_2$ ). Minden mérési sorozatban több földgáz térfogatárammal végeztünk vizsgálatokat, úgy, hogy az egyes sorozatokban lévő pontok minél közelebb legyenek egymáshoz. Minden mérési sorozatban a maximális földgáz térfogatárammal a sztöchiometrikus keverési arányt céloztuk, amit a meredeken emelkedő CO és a minimális  $O_2$  koncentráció jelzett a kipufogógázban. A legalacsonyabb vizsgált  $O_2$  koncentráció (28 V/V%) úgy került meghatározásra, hogy a létrejövő keverék még biztonságosan gyújtható legyen, égéskimaradások nélküli működést tudjon biztosítani. A maximális vizsgált  $O_2$  koncentráció (40 V/V%) mellett nagy földgáz térfogatáramoknál már rendellenes égés volt érzékelhető a motorban, illetve a motor hőterhelése is lényegesen nagyobb a névlegesnél ebben az esetben.

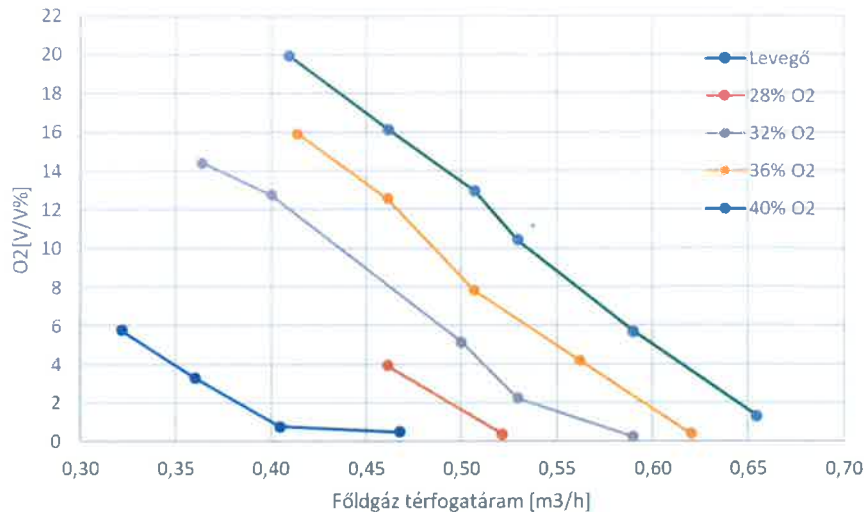


4. ábra: A levegővel történt referenciamérés légfesleg tényező tartománya.



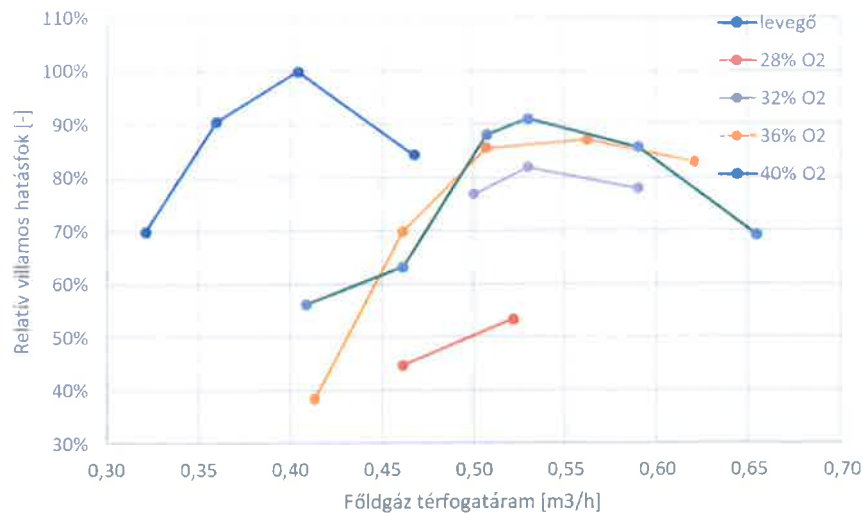
## 5 Vizsgálati eredmények

Az 5. ábrán a kipufogógáz  $O_2$  koncentrációja a földgáztérfogatáram függvényében látható. Megfigyelhető, hogy minden mérési sorozatnál a minimális  $O_2$  koncentráció 0,3-0,4 V/V%, ami a sztöchiometrikus keverési arány közelében volt. A beszívott  $O_2$  koncentráció növelésével arányosan nagyobb földgáztérfogatáramnál jelentkezik a minimum, illetve azonos földgáztérfogatáramnál arányosan nagyobb a maradék  $O_2$  koncentráció a beszívott keverék függvényében.



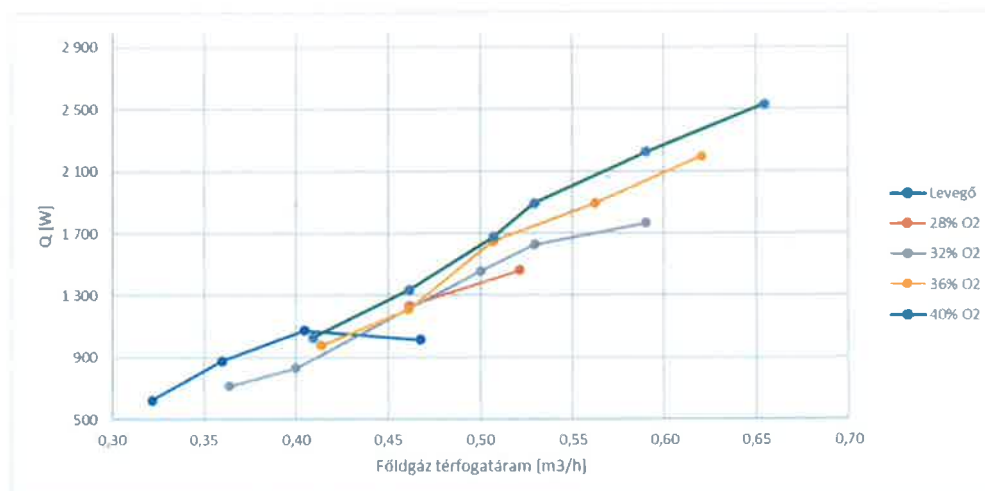
5. ábra: A kipufogógáz  $O_2$  koncentrációja a földgáztérfogatáram függvényében, levegő és különböző  $O_2/CO_2$  keverékek esetében.

A 6. ábrán a levegőtüzelésnél mérhető legjobb hatásfokra normált relatív villamos hatásfok a földgáztérfogatáram függvényébe látható. A  $O_2/CO_2$  keverékek esetén mért legkisebb, 28 V/V%  $O_2$  esetén, ugyan már stabil égés valósult meg, de a lassú égés miatt a villamos hatásfok nagymértékben, közel a felére csökkent. Az  $O_2$  részarány növelésével növekedett a hatásfok, 40 V/V%  $O_2$  esetén 10% -kal kisebb a legnagyobb hatásfok a levegőtüzeléshez képest. Az  $O_2/CO_2$  keverékek esetén lényegesen nagyobb földgáz térfogatáramoknál adódott a legjobb hatásfok. A legnagyobb mért, 40 V/V%  $O_2$  esetén a legnagyobb földgáztérfogatáramnál rendellenes égés alakul ki, ami a hatásfok jelentős csökkenésében is megmutatkozik.

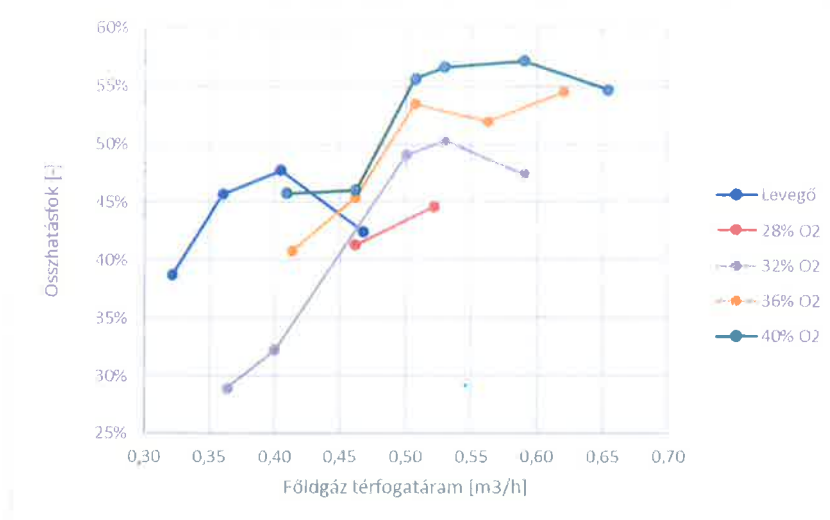


6. ábra: A relatív villamos hatásfok a földgáztérfogatáram függvényében, levegő és különböző O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> keverékek esetében.

A hasznosított hőteljesítmény (7. ábra) a növekvő bevitt tüzelési teljesítménynek megfelelően növekedett a földgáztérfogatáram függvényében. A motor összhatásfoka (8. ábra) O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> keverékek esetében, nagy O<sub>2</sub> koncentrációknál és nagy földgáztérfogatáramoknál meghaladta a levegő tüzelésnél mérhető.

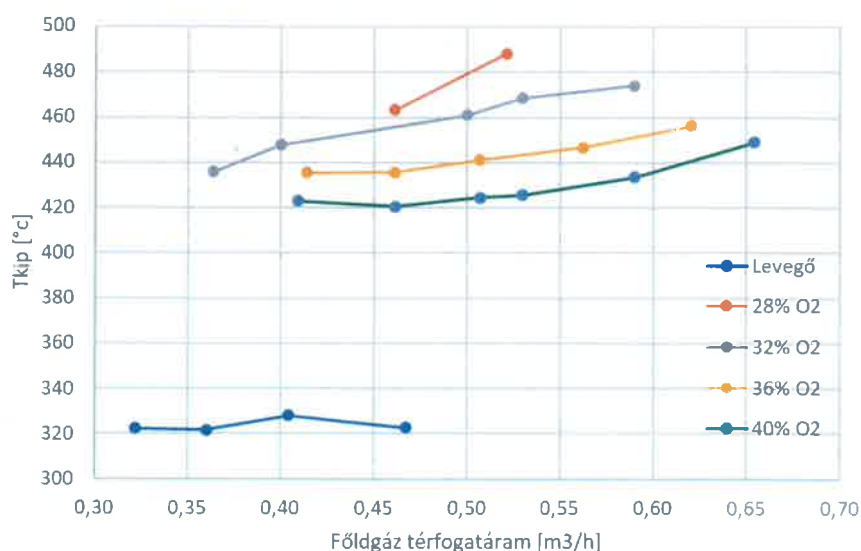


7. ábra: A hasznos hőteljesítmény a földgáztérfogatáram függvényében, levegő és különböző O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> keverékek esetében.



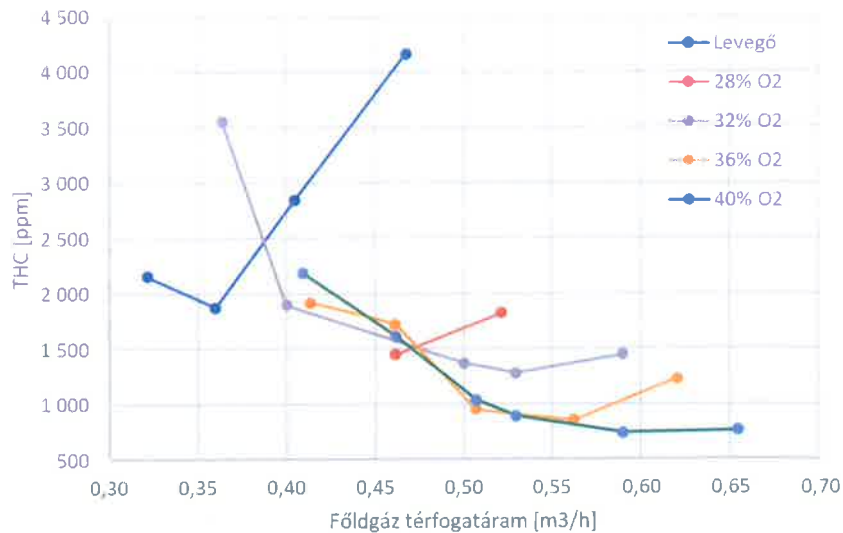
8. ábra: Az összhatásfok a földgáztérfogatáram függvényében, levegő és különböző O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> keverékek esetében.

A 9. ábrán a kipufogógáz hőmérséklet a földgáz térfogatáram függvényében látható. A kipufogógáz hőmérséklet O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> keverékek mellett minden esetben lényegesen nagyobb volt a levegőtüzeléshez képest, ez szintén a lényegesen alacsonyabb fajhóviszony következménye. Az O<sub>2</sub> koncentráció növelésével csökkent a kipufogógáz hőmérséklet, de 40 V/V% O<sub>2</sub> esetén is közel 100°C-kal magasabb a levegőtüzeléshez képest.



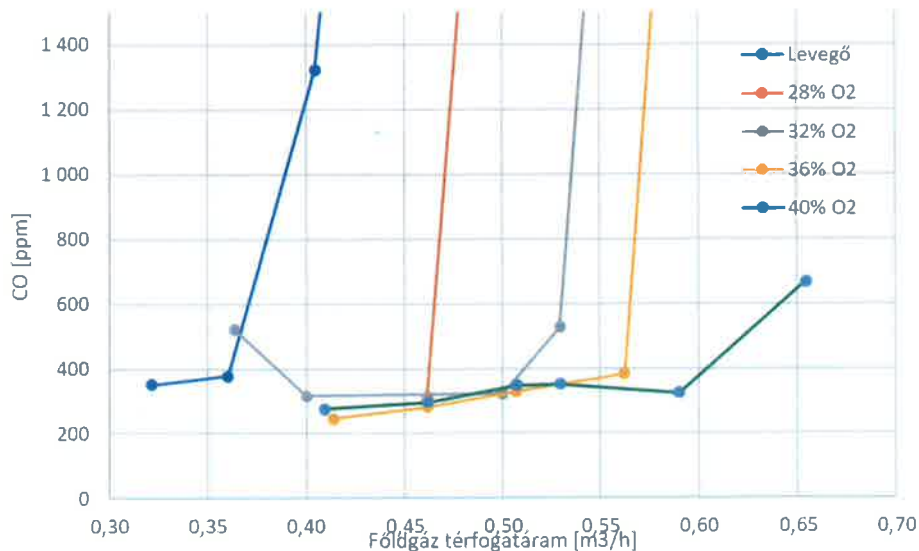
9. ábra: A kipufogógáz hőmérséklet a földgáz térfogatáram függvényében, levegő és különböző O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> keverékek esetében.

A motor elégtelen szénhidrogén kibocsátására (10. ábra) kedvező hatással van az O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> tüzelés. Minden mért O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> keverék esetében jelentősen csökkent az elégtelen szénhidrogén kibocsátás nagy földgáz térfogatáramoknál, 36 V/V% és 40 V/V% O<sub>2</sub> esetében, közel a negyedére csökken a levegő tüzeléshez képest.



10. ábra: A kipufogógáz elégetlen szénhidrogén koncentrációja a földgáztérfogatáram függvényében, levegő és különböző O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> keverékek esetében.

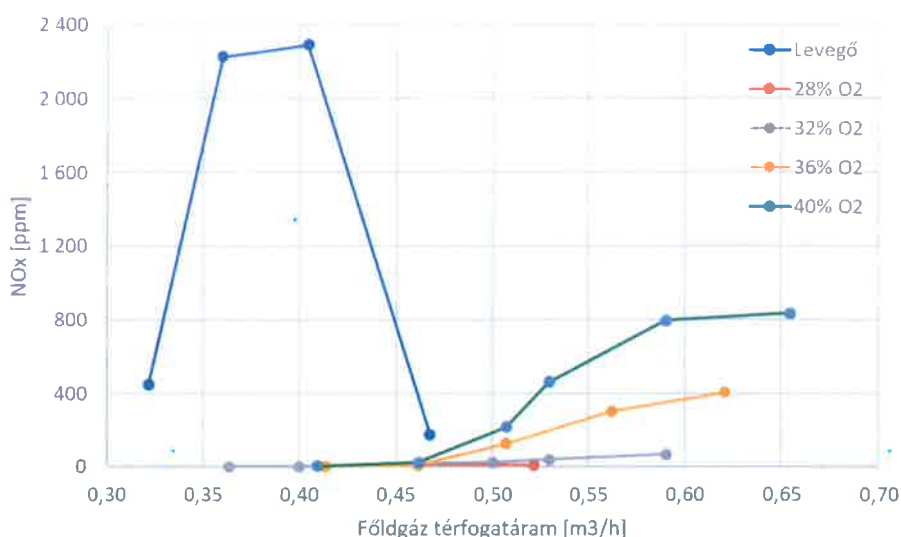
A CO kibocsátásra (11. ábra) nincs jelentős hatással az O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> tüzelés. Tüzelőanyagban szegény tartományban a levegő tüzeléshez hasonlóan, 300ppm körül volt a CO kibocsátás. Az elméletnek megfelelően a sztöchiometrikus keverék közelében, illetve annál kismértékben dúsabb üzemben a CO kibocsátás minden esetben drasztikusan megnőtt.



11. ábra: A kipufogógáz CO koncentrációja a földgáztérfogatáram függvényében, levegő és különböző O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> keverékek esetében.

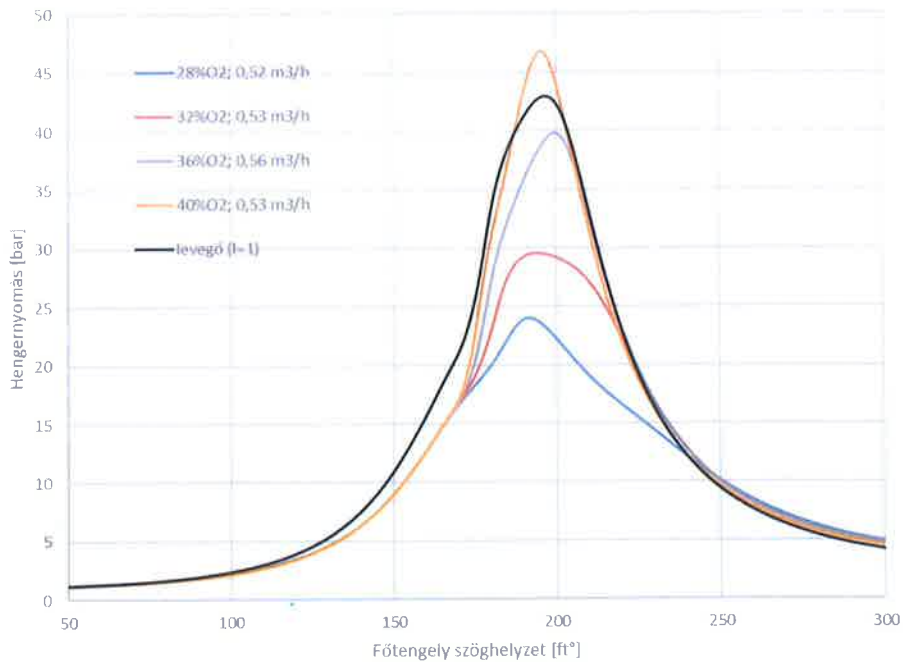
A 12. ábrán a nitrogénoxid kibocsátás látható. Alacsony földgáztérfogatáramoknál O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> tüzelés esetén az NO<sub>x</sub> kibocsátás nulla körül volt. Ebben az esetben a kialakuló alacsony láng hőmérsékleten az NO<sub>x</sub> képződés gátolt. Nagyobb földgáz térfogatáramoknál viszont szignifikáns NO<sub>x</sub> kibocsátás volt mérhető. Ezekben az esetekben annak ellenére számottevő a NO<sub>x</sub> képződés, hogy az égésnél jelenlévő N<sub>2</sub> gáz mennyisége lényegesen kisebb a

levegőhöz képest. Mivel, mind a földgázban, mind az  $O_2/CO_2$  keverékben szennyezőként, kis mennyiségű, összeségében kevesebb, mint 2 V/V%  $N_2$  gáz volt (oxigén legalább 99,5%-os vagy ennél magasabb tisztaságú volt).



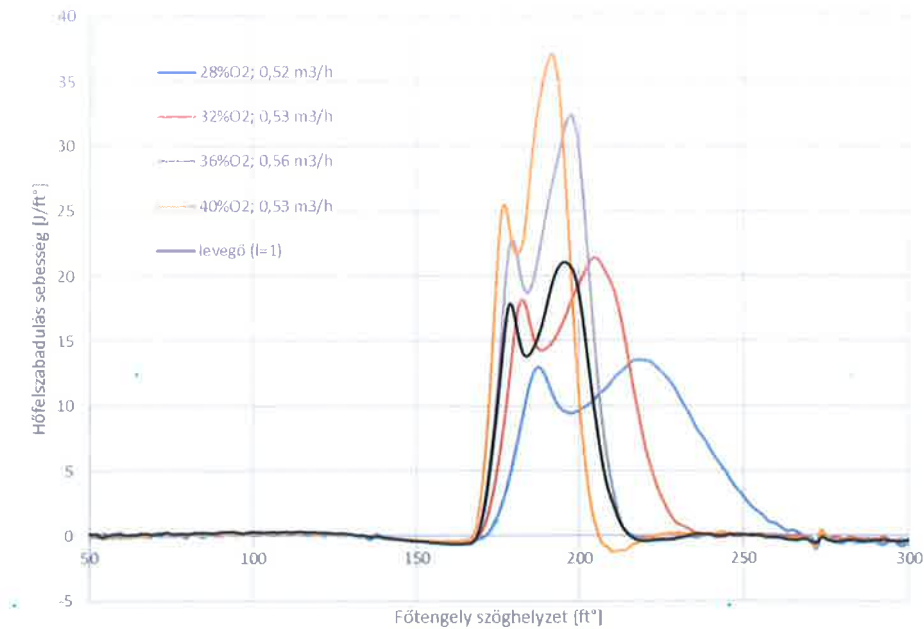
12. ábra: A kipufogógáz nitrogénoxid koncentrációja a földgáztérfogatáram függvényében, levegő és különböző  $O_2/CO_2$  keverékek esetében.

A 13. ábrán az indikátordiagramok láthatóak levegő és különböző  $O_2/CO_2$  keverék tüzelésnél; levegő esetén sztöchiometrikus légfeslegű ( $0,4 \text{ m}^3/\text{h}$  földgáztérfogatáram),  $O_2/CO_2$  keverékek esetén  $0,54 \text{ m}^3/\text{h}$  körüli földgáztérfogatáramú üzemiállapotban. Megjegyzendő, hogy az  $O_2/CO_2$  keverékek esetén ez mindegy 35%-kal nagyobb tüzelési teljesítményt jelent. Az  $O_2/CO_2$  keverékek esetén az égéskezdet előtti kompressziógörbék együtt futnak, levegő esetén számottevően nagyobb a kompresszió során a nyomás. Ezt a jelentősen eltérő fajhőviszony okozza. A kialakuló égési csúcsnyomások 28 V/V%, 32 V/V% és 36 V/V%  $O_2$  koncentráció esetén, alacsonyabbak a levegő tüzeléshez képest a lényegesen nagyobb tüzelési teljesítmény ellenére. Kis mértékben (12%-kal), csak 40 V/V%  $O_2$  esetében haladja meg az égési csúcsnyomás a levegő tüzelésnél mértet.



13. ábra: A hengernyomás a főtengely szöghelyzet függvényében, levegő és különböző O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> keverékek esetében.

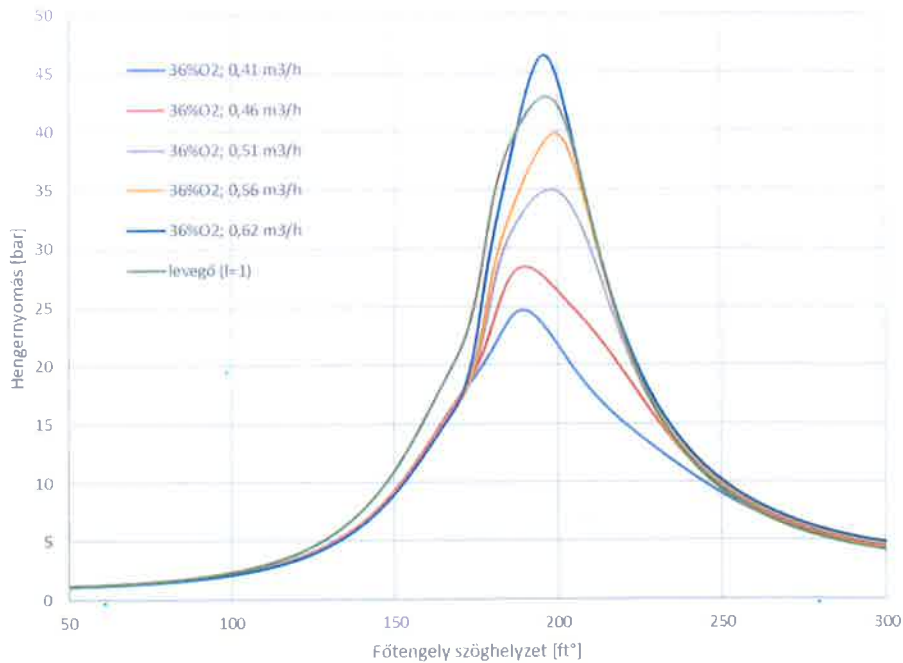
A 14. ábrán számított hőfelszabadulás sebesség görbék láthatóak levegő és különböző O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> keverék tüzelésnél; levegő esetén sztöchiometrikus légfeslegű (0,4 m<sup>3</sup>/h földgáztérfogatáram), O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> keverékek esetén 0,54 m<sup>3</sup>/h körüli földgáz térfogatáramú üzemi állapotban. Itt is megjegyzendő, hogy az O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> keverékek esetén ez mintegy 35%-kal nagyobb tüzelési teljesítményt jelent. Megállapítható, hogy a gyulladási késedelem 36 V/V% O<sub>2</sub> keverék esetén közel megegyezik a levegő tüzeléssel, alacsonyabb O<sub>2</sub> koncentrációknál növekszik, míg 40 V/V% O<sub>2</sub> esetén kisebb a gyulladási késedelem. Az égési hossz tekintetében is hasonló tendencia volt megfigyelhető, 36 V/V% O<sub>2</sub> esetében hasonló az égéshossz a referenciához képest, alacsonyabb O<sub>2</sub> koncentrációknál növekedett, míg 40 V/V% O<sub>2</sub> esetén már rövidebb volt az égéshossz. A 28 V/V% O<sub>2</sub> keveréknél nagymértékben lelassult, elhúzódott az égés, ami már jelentősen csökkenti a hatásfokot.



14. ábra: A számított hőfelszabadulás sebesség a főtengely szöghelyzet függvényében, levegő és különböző O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> keverékek esetében.

A 15. ábrán 36 V/V% O<sub>2</sub> mellett, különböző földgáz térfogatáramok esetén mért indikátor diagramok láthatóak. Referenciaként itt is a levegő - földgáz keverék sztöchiometrikus légfesleslegű (0,4 m<sup>3</sup>/h földgáz térfogatáram) esetben ábrázoltuk. A földgáz térfogatáram növelésével növekedett a csúcsnyomás, a növekvő tüzelési teljesítmény és a csökkenő égéshossz miatt. A referenciához képest kismértékben nagyobb csúcsnyomás csak a legnagyobb 0,62 m<sup>3</sup>/h földgáz térfogatáram esetén alakult ki.

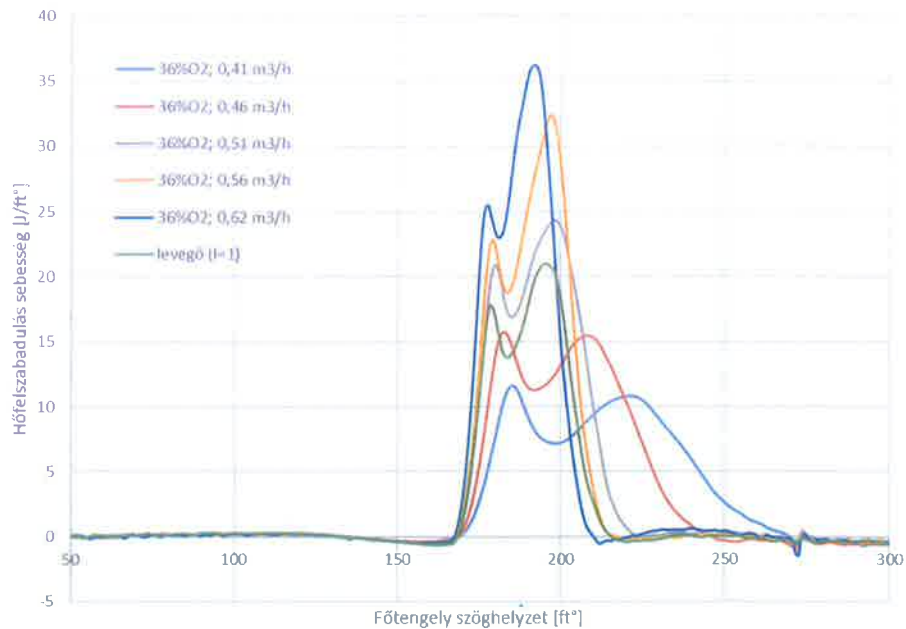




15. ábra: A hengernyomás a főtengely szöghelyzet függvényében, levegő és 36 V/V% O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> keverék esetében, különböző földgáztérfogatáramoknál.

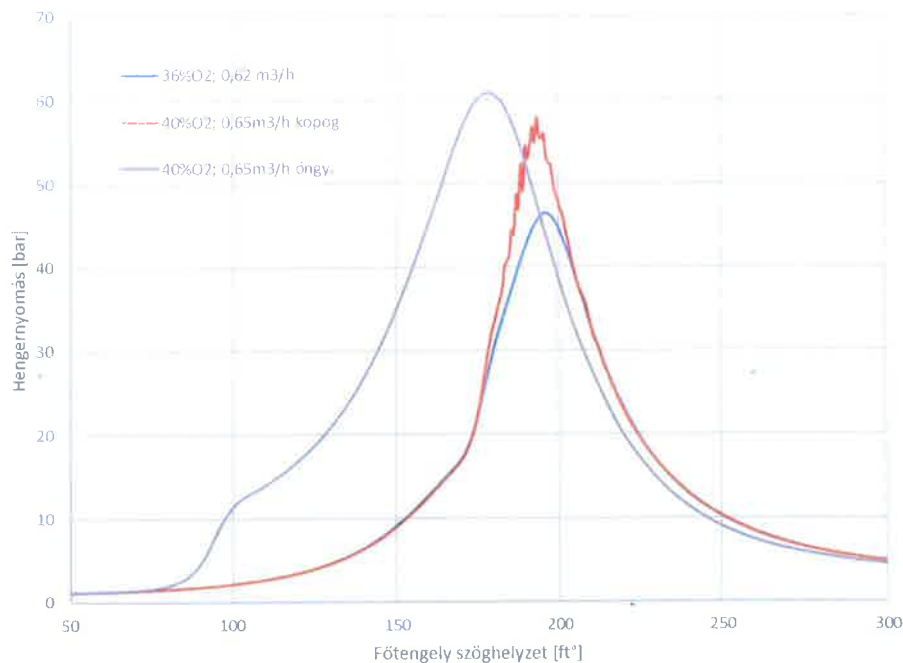
A 16. ábrán 36 V/V% O<sub>2</sub> mellett, különböző földgáztérfogatáramok esetén számított hőfelszabadulás sebesség görbék láthatóak. Referenciaként itt is a levegő - földgáz keverék sztöchiometrikus légfeslegesű (0,4 m<sup>3</sup>/h földgáztérfogatáram) esetben ábrázoltuk. A földgáztérfogatáram növelésével kismértékben csökkent a gyulladási késedelem és jelentős mértékben gyorsult az égés. A referencia levegő tüzeléshez hasonló földgáz térfogatáramok esetén (0,41 m<sup>3</sup>/h és 0,46 m<sup>3</sup>/h) az égés jelentősen lassabb, elhúzódó volt. A referenciához közeli égési sebesség és ezzel égéshossz csak nagyobb (0,56 m<sup>3</sup>/h) földgáztérfogatáramnál alakult ki.





16. ábra: A számított hőfelszabadulás sebesség a főtengely szöghelyzet függvényében, levegő és 36 V/V% O<sub>2</sub> keverék esetében, különböző földgáz térfogatáramoknál.

Magas O<sub>2</sub> koncentráció mellett magas földgáz térfogatáram rendellenes égés kialakulásához vezetett. Rendellenes égésű ciklusok 40 V/V% O<sub>2</sub> és 0,65 m<sup>3</sup>/h földgáz térfogatáram esetén már jelentős számban előfordultak. Ebben az esetben kopogásos égés és szikrától független korai gyulladás -belobbanás- tapasztalható volt. A 17. ábrán két rendellenes égésű ciklus (40 V/V% O<sub>2</sub> mellett) és egy normálégésű ciklus (36 V/V% O<sub>2</sub> mellett) látható.



17. ábra: A hengernyomás a főtengely szöghelyzet függvényében, 36 V/V% O<sub>2</sub> esetében normál égés, 40 V/V% O<sub>2</sub> esetében két rendellenes égésű ciklus.

## Összefoglalás

A mérések célja egy egyhengeres, szikragyújtású kísérleti gázmotor jellemzőinek vizsgálata levegő (O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>) helyett O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>-földgáz keverékkel működtetve. Különböző O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>-földgáz keverékek esetén mérésre került a motor hasznos teljesítménye, hasznos hőteljesítménye, károsanyag kibocsátása, indikált jellemzői, valamint a földgázfogyasztás.

A mérések során a motor állandó fordulatszám, előgyújtással és kompresszió viszonyal üzemelt. A szívótér nyomását és hőmérsékletét, ezzel a motor töltési fokát szintén közel állandó értéken tartottuk. Elsőként referenciaméréseket végeztünk a mérőrendszerrel különböző levegő – földgáz keverékekkel. A következő négy mérési sorozatban a levegőt O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> gáz keverékkel helyettesítettük, különböző O<sub>2</sub> tartalommal (28, 32, 36 és 40 V/V% O<sub>2</sub>). Minden mérési sorozatban több földgáz térfogatárammal végeztünk méréseket, úgy, hogy az egyes sorozatokban lévő pontok minél közelebb legyenek egymáshoz.

A mért legkisebb, 28 V/V% O<sub>2</sub> esetén, ugyan már stabil égés valósult meg, de a lassú égés miatt a villamos hatásfok nagymértékben, közel a felére csökkent. **Az O<sub>2</sub> részarány növelésével növekedett a hatásfok, de 40 V/V% O<sub>2</sub> esetén is 10%-kal kisebb volt a legjobb hatásfok a levegőtüzeléshez képest. A motor összhatófoka O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> keverékek esetében, nagy O<sub>2</sub> koncentrációnál és nagy földgáztérfogatáramoknál meghaladta a levegő tüzelésnél mérhető.**

**A kipufogógáz hőmérséklet O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> keverékek mellett minden esetben lényegesen nagyobb volt a levegőtüzeléshez képest. Az O<sub>2</sub> koncentráció növelésével csökkent a**

kipufogógáz hőmérséklet, de 40 V/V% O<sub>2</sub> esetén is közel 100°C -kal volt magasabb a levegőtüzeléshez képest.

**Minden mért O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> keverék esetében jelentősen csökkent az elégtelen szénhidrogén kibocsátás** nagy földgáz térfogatáramoknál, 36 V/V% és 40 V/V% O<sub>2</sub> esetében, közel a negyedére csökken a levegő tüzeléshez képest. A CO kibocsátásra nincs jelentős hatással az O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> tüzelés. Tüzelőanyagban szegény tartományban a levegő tüzeléshez hasonlóan, 300ppm körül volt a CO kibocsátás. Alacsony földgáz térfogatáramoknál O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> tüzelés esetén az NO<sub>x</sub> kibocsátás nulla körül volt. Nagyobb földgáz térfogatáramoknál viszont szignifikáns NO<sub>x</sub> kibocsátás volt megfigyelhető, mivel mind a földgázban, mind az O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> keverékben szennyezőként, kis mennyiségű kb. 2 V/V% N<sub>2</sub> gáz volt.

A gyulladási késedelem 36 V/V% O<sub>2</sub> keverék és 0,56 m<sup>3</sup>/h földgáztérfogatáram esetén közel megegyezett a levegő tüzeléssel, alacsonyabb O<sub>2</sub> koncentrációknál növekedett, míg 40 V/V% O<sub>2</sub> és 0,53 m<sup>3</sup>/h földgáztérfogatáram esetén kisebb volt a gyulladási késedelem. Az égési hossz tekintetében is hasonló tendencia figyelhető meg, 36 V/V% O<sub>2</sub> és 0,56 m<sup>3</sup>/h földgáztérfogatáram esetében hasonló volt az égéshossz a referenciához képest, alacsonyabb O<sub>2</sub> koncentrációknál növekedett, míg 40 V/V% O<sub>2</sub> és 0,53 m<sup>3</sup>/h földgáztérfogatáram esetén már rövidebb volt az égéshossz. A földgáztérfogatáram növelésével kismértékben rövidült a gyulladási késedelem és jelentős mértékben gyorsult az égés. A referencia levegő tüzeléshez hasonló földgáz térfogatáramok esetén (0,41 m<sup>3</sup>/h és 0,46 m<sup>3</sup>/h) az égés jelentősen lassabb, elhúzódó volt.

Magas O<sub>2</sub> koncentráció és magas földgáz térfogatáram rendellenes égés (kopogás és belobbanás) kialakulásához vezetett. Rendellenes égésű ciklusok 40 V/V% O<sub>2</sub> és 0,65 m<sup>3</sup>/h földgáz térfogatáram esetén már jelentős számban előfordultak.

**Összegezve:** a kísérletek bizonyították a hagyományos égéslevegő O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> gázkeverékkel való helyettesítésének megvalósíthatóságát és működőképességét, a földgáz-üzemű motorok esetében. Az égéslevegő O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> gázkeverékkel való helyettesítése esetén a gázmotor kipufogógázából kellően tiszta széndioxidot kaphatunk, amely a légfelcsesztényező függvényében 0,5-2,0 V/V% CO is tartalmaz. Az a későbbi felhasználástól függ, hogy ezt szükséges-e kivonni vagy átalakítani, illetve maradhat-e a gázban.

A széleskörű ipari bevezetés érdekében azonban célszerű a fentebb ismertetett kísérleteket ipari és nem kísérleti gázmotoron is elvégezni és az üzemi tapasztalatokat kiértékelni, hogy bizonyos motoroknál az esetlegesen szükségessé váló kisebb konstrukciós kiegészítéseket, a gyártók bevonásával, el lehessen végezni. Egyben, a felhasználásra kerülő gázmotor típus számára meg kell határozni az optimális O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> gázkeverék oxigén arányát, az adott gázmotorok üzemi paramétereinek optimalizálása érdekében.

Ennek szükségességét, időszerűségét az elektromos vízbontók és P2G várható elterjedése indokolja, célszerűvé téve a vízbontó berendezések melléktermékeként keletkező oxigén gázmotorokban történő hasznosítását annak érdekében, hogy minimális CAPEX mellett és

külön OPEX ráfordítás nélkül legyen előállítható a P2G technológiák számára szükségessé váló nagy mennyiségű tiszta széndioxid.

Köszönjük a Coopinter Kft. azon belül Hujber Ottó úr és munkatársa bizalmát, türelmét és részvételét a mérésekben, ahol megismerhette a vizsgálatok bonyolultságát, amely számunkra is jelentős kihívásokat jelentett!

Budapest, 2022. december 21.



Dr. Bereczky Ákos  
egyetemi docens  
témavezető



Lukács Kristóf  
egyetemi tanársegéd  
mérésvezető



Dr. Imre Attila  
egyetemi tanár  
Tanszékvezető