

AZ ELŐGYÚJTÁSI SZÖG OPTIMALIZÁLÁSA OTTÓ- CIKLUSÚ BELSŐÉGÉSŰ MOTORBAN 20 % HIDROGÉN ÉS 80 % BENZIN KETTŐSÜZEM ESETÉN

OPTIMIZATION OF IGNITION TIMING IN AN OTTO- CYCLE INTERNAL COMBUSTION ENGINE OPERATING ON A DUAL-FUEL MIXTURE OF 20 % HYDROGEN AND 80 % GASOLINE

Kiss Attila ^{1*}, Kovács László ², Hanula Barna ³, Weltsch Zoltán ⁴

¹ Innovációs Iroda, Neumann János Egyetem, Magyarország, <https://orcid.org/0009-0009-8952-6175>

² Járőműtechnológia Tanszék, GAMF Mőszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország, <https://orcid.org/0000-0001-5110-5919>

³ Járőműhajtás Technológia Tanszék, Audi Hungária Járőműmőrnőki Kar, Széchenyi István Egyetem, Magyarország, <https://orcid.org/0000-0003-2612-5496>

⁴Közőti és Vasőti Járőművek Tanszék, Zalaegerszegi Innovációs Park, Széchenyi István Egyetem, Magyarország, <https://orcid.org/0000-0002-6366-8281>
<https://doi.org/10.47833/2025.2.ENG.003>

Kulcsszavak:

Hidrogén
Benzin
Vegyes űzem

Keywords:

Hydrogen
Gasoline
Dual-fuel

Cikktörténet:

Beérkezett 2025. augusztus 1.
Átdolgozva 2025. augusztus 15.
Elfogadva 2025. augusztus 18.

Összefoglalás

Jelen tanulmány a szikragyűjtáső belsőégéső Otto-cikluső motor szükségsszerű előgyűjtási szögének optimalizálását mutatja be, olyan mőködési körőlmények között, amikor egy eredendően benzin űzemő belsőégéső motorban az eredetileg bevezetett energiamennyiséget megosztva, kettős őzuelőanyag befecskendezéssel valósítjuk meg. Ebben az esetben a bevezetett energiamennyiség 20%-a hidrogén, míg a maradék 80% energia benzin felhasználásával kerül a rendszerbe. A jelen vizsgálat célja az optimális gyűjtási időpont meghatározása volt, amely maximalizálja a teljesítményt és csökkenti a kopogásveszélyt. Az eredmények szerint, benzinűzem esetén, az optimális ponttól számítva átlagosan 4–6° őtengelyfokkal későbbre kell időzíteni az előgyűjtási szöget. A megfigyelt MFB50, égéshossz és égési csőcsnyomás értékek igazolják, hogy az előgyűjtás korrekciója elengedhetetlen a hidrogén-benzin kettősűzem optimális mőködtetéséhez.

Abstract

This study presents the optimization of the necessary ignition advance angle in an Otto-cycle internal combustion engine under operating conditions in which the originally gasoline-fuelled engine is modified to operate with dual-fuel injection, distributing the total energy input between the two fuels. In this configuration, 20% of the introduced energy is supplied by hydrogen, while the remaining 80% is provided by gasoline. The aim of the present investigation was to determine the optimal ignition timing that maximizes performance while minimizing the risk of knock.

* Kiss Attila kiss.attila@nje.hu

According to the results, the ignition advance must be retarded by approximately 4–6° crank angle degrees compared to the optimal ignition point for pure gasoline operation. The observed MFB50, combustion duration, and peak cylinder pressure values confirm that correcting the ignition timing is essential for the optimal operation of hydrogen–gasoline dual-fuel operation.

1. Bevezetés

A hidrogén, mint alternatív tüzelőanyag, kiemelt szerepet játszhat a jövő belsőégésű motorjainak környezetbarát átalakításában. Ezt a megállapítást támasztja alá Chintala és Subramanian [1] átfogó irodalmi összefoglalója is, amely részletezi a hidrogén alkalmazásának előnyeit, különösen a kompressziógyújtású motorok kettősüzemű működésében. E tanulmány alapján a hidrogén hozzáadása jelentős hatásfokjavulást eredményezhet, miközben a szennyezőanyagkibocsátás számottevően csökkenthető. Ezen gondolatmenetet követi Tsujimura és Suzuki [2] munkája is, akik kísérleti úton igazolták, hogy a dízel–hidrogén kettősüzemű rendszerek gyorsabb égést és hatékonyabb energiaszolgáltatást biztosítanak, különösen szegénykeverékes üzemmód esetén. A fenti eredményeket tovább árnyalja Qin és munkatársainak [3] megfigyelése, akik a hidrogén energiarészesedésének növelésével párhuzamosan egyre rövidebb égéshosszokat és magasabb égési csúcsnyomás értékeket dokumentáltak. Ez az égés dinamikájának változására és a hidrogén gyors reakciósebességére utal.

A kutatások ipari alkalmazásokra történő kiterjesztése során Szamrej és Karczewski [4] az úgynevezett HCNG (hidrogén–CNG) keverékek vizsgálatával mutatták ki, hogy már kis mennyiségű hidrogén hozzáadásával is jelentősen javítható az égés hatása.

A keverékképzési és befecskendezési stratégia fontosságát hangsúlyozza Serrano et al. [5], akik a vízbefecskendezés kiegészítő szerepét vizsgálták. Eredményeik alapján a helyesen beállított tüzelőanyagarány és befecskendezési mód jelentős hatást gyakorol a motor teljesítményére és az emissziós jellemzőkre. Az Otto-ciklusú motorok vonatkozásában Gopal et al. [6] és Vavra et al. [7] munkái érdemelnek említést, akik rámutatnak arra, hogy az egyszerű szívócsőbefecskendezés is életképes megoldás lehet a hidrogénmotor technológia szempontjából, különösen, ha a gyári vezérlőegységekhez való illesztés a cél.

A hidrogéndúsítás hatásmechanizmusát tovább részletezi Gültekin és Ciniviz [8], akik szerint az égéstér geometriájának és a keverékképzés módjának módosításával tovább fokozhatók a hidrogén kedvező égési tulajdonságai. A szikragyújtású motorokra vonatkozóan Purayil és munkatársai [9] részletesen bemutatják, hogy az előgyújtási szög kulcsszerepet játszik a kívánt teljesítmény elérésében, míg további vizsgálatuk [10] a kopogáshatár kitolását célzó előgyújtás optimalizálási lehetőségeket elemzi.

Saját méréseink alatt mi is hasonló jelenségeket figyeltünk meg, miszerint 20% hidrogén energiaarány mellett, a gyári benzinüzemre kalibrált gyújtásbeállításokkal is tudott üzemelni a tesztmotorunk, de ezekkel a beállításokkal közel sem optimálisan. Az égéssebesség felgyorsulásának hatására az eltolódott égésfázis a csúcsponti nyomás korai bekövetkezéséhez, fokozott hőterheléshez, kopogásveszélyhez és alacsony teljesítményhez vezetett [11]. Ezen tapasztalatok alapján jelen tanulmány célja az volt, hogy megvizsgáljuk, milyen mértékű gyújtásidőzítés módosítás szükséges ahhoz, hogy a hidrogén–benzin kettősüzem hatékony és üzembiztos legyen.

2. Kísérlettervezés

A kísérleti vizsgálatok célja egy Otto-ciklusú, szikragyújtású belsőégésű motor működésének vizsgálata volt 20% hidrogénenergia arányú, kettősüzemű konfigurációban. A vizsgálatok során kiemelt figyelmet fordítottunk a gyújtásidőztetés hatásaira, valamint az égésfolyamat fázisaira. A vizsgálatok megbízhatósága és reprodukálhatósága érdekében a teljes tesztrendszer szabványos körülmények között, szigorú ellenőrzés mellett került kialakításra. A megvalósítás lépéseit a következő alfejezetek részletezik.

2.1. Vizsgálati motor

A kísérleti és szimulációs vizsgálatok egy BMW M43B18 típusú belsőégésű motort választottunk. Jelen erőforrásunk felépítéséről megfelelő mennyiségű szakirodalom áll rendelkezésre üzemeltetési előlelete jól dokumentált, ellenőrzött, valamint széles körű alkalmazhatósága több járműtípusban bizonyított. Ezért mind a fizikai kísérletek, mind a numerikus modellezés szempontjából ésszerű választásnak bizonyult, hogy ezzel a blokkal dolgozzunk. A pontos és reprodukálható mérési eredmények biztosítása érdekében a motor teljes körű mechanikai felújításon esett át a vizsgálatok megkezdése előtt. A felújítás során a motort teljesen szétszereltük és minden főbb alkatrészt átvizsgáltunk. A hengerfejben kicseréltük a szelepvezetőket és szelepeket, újramartuk a szelepfészkeket, valamint síkba munkáltuk a hengerfej illesztési felületét. A motorblokk hengereit újra honoltuk, a hengerfejjel illeszkedő felületet síkba martuk. A dugattyúgyűrűket, főtengely és hajtórúdcsapágyakat, valamint a tömítéseket új, gyári szabványnak megfelelő alkatrészekre cseréltük. A segédberendezéseket megtisztítottuk, vizuálisan ellenőriztük, majd a gyártói előírások szerint összeszereltük. Az összeszerelést követően a motor a MAHLE által ajánlott bejáratási protokoll szerint fokozatos terhelésű bejáratáson esett át, amely elengedhetetlen volt a mechanikus alkatrészek megfelelő összekapásához [12]. A bejáratás során a motort emelkedő terhelési és fordulatszámlepcsőkben működtettük, így biztosítva a stabil üzemi viselkedést a kísérletek megkezdése előtt. A motor alapvető műszaki paraméterei a vizsgálatok során változatlanok maradtak, így az égési folyamatban tapasztalt eltérések kizárólag az üzemanyagösszetétel változásának voltak tulajdoníthatók.

2.2. Motorvezérlő elektronika és kábelköteg

A kísérleti mérések lebonyolításához egy egyedi motorvezérlőt készítettünk, amely a hagyományos „standalone ECU”-tól eltérően hengerenként két-két befecskendező vezérlésre alkalmas kimenettel rendelkezik. Ez a típusú motorvezérlő valós időben szabadon programozható ennek a lehetőségnek a kihasználásához egy egyedileg készített kábelköteget kellett készítenünk. Ez a kialakítás teljes körű szabályozási lehetőséget biztosított valamennyi motorműködési jellemző beállításában, beleértve az üzemanyag befecskendezés időztetését, a befecskendezés időtartamát és az előgyújtási szöget is. A motorvezérlőbe bekötött és a belsőégésű motorba integrált szenzorok segítségével valós idejű monitorozást és a korábbiakban említett beállítási lehetőségekkel pontosan be tudtuk állítani az általunk definiált működési paramétereket. A motorvezérlő által használt bemeneti és kimeneti csatornákat az 1. táblázatban foglaltuk össze.

1. Táblázat. A motorvezérlő által használt csatornák

Bemeneti csatorna	Kimeneti csatorna
Forgattyústengely jel	Gyújtás 1. henger
Vezérműtengely jel	Gyújtás 2. henger
Víz hőfok	Gyújtás 3. henger
Beszívott levegő hőmérséklet	Gyújtás 4. henger
Szívócső nyomás	Befecskendezés 1. henger benzín
Környezeti nyomás	Befecskendezés 2. henger benzín
Kipufogógáz hőmérséklet 1. henger	Befecskendezés 3. henger benzín
Kipufogógáz hőmérséklet 2. henger	Befecskendezés 4. henger benzín
Kipufogógáz hőmérséklet 3. henger	Befecskendezés 1. henger hidrogén
Kipufogógáz hőmérséklet 4. henger	Befecskendezés 2. henger hidrogén
Fojtószelep állás	Befecskendezés 3. henger hidrogén
	Befecskendezés 4. henger hidrogén

2.3. Égéselemző rendszer

Az égési folyamatok részletes vizsgálatához a BDN Automotive Kft. által fejlesztett CA-6 típusú, hatcsatornás égéselemző rendszert alkalmaztuk. Ezt a nagy felbontású diagnosztikai eszközt kifejezetten a hengerben lejátszódó nyomásváltozások időalapú, főtengeleyszöggel szinkronizált mérésének megfelelően alakították ki, így alkalmas termodinamikai folyamatok elemzésére és szimulációs modellek hitelesítésére.

A mérésekhez AVL GH01D típusú nyomásérzékelőt használtunk, amelyet egy belsőégésű motor hengernyomás mérésére fejlesztett AVL gyújtógyertya segítségével helyeztünk el a hengerfejben. Az érzékelőt egy AVL AT6356E típusú négysávos erősítővel kapcsoltuk össze. A rendszer 1 MHz-es mintavételezési frekvenciával gyűjtötte az adatokat, amely lehetővé tette a főtengeleyszögfüggő adatelemzést, különösen az égési csúcsnyomás, a nyomásnövekedési sebesség és az elégett tüzelőanyagfrakció pontos meghatározása érdekében.

Az érzékelőrendszer 5,3 [pC/bar] érzékenységgel rendelkezett, 170 [kHz]-es sajátfrekvenciával, lineáris hibája $\pm 0,3$ [%] volt, mérési tartománya 0–300 [bar] közé esett. A rendszer szinkronizálása 60-2 fogazott főtengeley-ékszíjtárcsa segítségével történt, amely biztosította, hogy valamennyi nyomásadat pontosan a motorciklus megfelelő pontjához legyen hozzárendelve.

2.4. Tüzelőanyagok

A motor tüzelőanyagellátása kereskedelmi forgalomban kapható 95-ös oktánszámú benzinnel és nagy tisztaságú hidrogénnel történt. A benzín megfelelt az Euro 95 szabványnak, kiválasztását elérhetősége és széles körű felhasználása indokolta. A hidrogént minősített, nagynyomású bündelből biztosítottuk, amelynek nyomásszabályozása biztosította a pontos és egyenletes adagolást.

Mindkét tüzelőanyag esetében szigorú kezelési protokollokat alkalmaztunk. A benzint zárt, hőmérsékletszabályozott tartályokban tároltuk, hogy elkerüljük az elpárolgást és a sűrűség ingadozását. A vizsgálatok megkezdése előtt a tüzelőanyag hőmérsékletét 20 °C-ra állítottuk be. A hidrogént szívócsőbefecskendezéssel juttattuk a motorba, az injektorokat a szívószelepek előtt 50 mm-re helyeztük el. Mindkét üzemanyag befecskendezési mennyiségét úgy szinkronizáltuk, hogy biztosított legyen az energiatartalom arány pontos beállítása.

A hidrogénellátó rendszer tartalmazott tömegárammérőt, nyomásszabályzót és nagynyomású tárolópalackot. A biztonságot gázszivárgásérzékelők, mechanikus túlnyomásszelepek, minősített nagynyomású csővezetékek, valamint egy vészleállító protokoll biztosította. Minden biztonsági intézkedés megfelelt a laboratóriumi hidrogénes égésvizsgálatokra vonatkozó aktuális szabványoknak. A belsőégésű motor alapvető paramétereit és a környezeti feltételeket a 2. Táblázatban mutatjuk be.

2. Táblázat. A belsőégésű motor paraméterei és a környezeti feltételek

Megnevezés	Érték
Motorkód	M43B18
Motortípus	Négyütemű sor 4
Furat	84 [mm]
Löket	81 [mm]
Lökettérfogat	1796 [cm ³]
Szelepek száma	8 szelep (2/henger)
Befecskendezés	Szívócső befecskendezés
Kompresszióviszony	9,7:1
Üzemanyagnyomás	3,5 [bar]
Légnyomás	998 [hPa]
Környezeti hőmérséklet	19 [°C]
Üzemanyag hőmérséklet	20 [°C]
Hidrogén nyomás	5 [bar]

2.5. Fékpadi teszt

A kettős tüzelőanyaggal végzett validációs kísérleteket hidrogén-benzin keverékével hajtottuk végre, ahol a hidrogén az összes tüzelőanyag-energia 20%-át tette ki. A motort 1500 és 3500 1/perc közötti fordulatszám-tartományban, 500 1/perces léptékekben, teljes terhelés (WOT) mellett működtettük és mértük. A kísérlet elsődleges célja az volt, hogy felmérjük a hidrogénnel történő dúsítás hatását az égésfolyamat jellemzőire, a teljesítményre és a termodinamikai paraméterekre.

A sztöchiometrikus levegő üzemanyag arányt ($\lambda = 1$) úgy tartottuk fenn, hogy a benzin és hidrogén injektorok nyitvatartási idejét a benzin és hidrogén átfolyásmérők aktuális értékei alapján állítottuk be. Az előgyújtási szöget az adott fordulatszámon, a keverékösszetétel beszabályzása után a kopogási határra állítottuk az összehasonlíthatóság és a legnagyobb teljesítmény elérése érdekében.

A mért paraméterek közé tartoztak a motorfordulatszám, a forgatónyomaték, a fékezett teljesítmény, a levegő tömegárama, a kipufogógáz hőmérséklete (EGT), valamint a benzin és a hidrogén fogyasztása. Az AVL próbapadi platform egységes környezeti és motorvezérlési feltételeket biztosított. A benzináramlást az AVL 735S, AVL 752C és AVL 7531.21 rendszerekkel mértük, amelyek a tüzelőanyag hőmérsékletét, nyomását és így a sűrűségét is szabályozzák. A beszívott levegő mennyiségét és hőmérsékletét, valamint nyomását az AVL Airsonix rendszerrel mértük, míg a termelt nyomatékot és teljesítményt az AVL DynoRoad 200 teljesítménymérő fékpaddal rögzítettük.

2.6. Égésvizsgálat

Az égésfolyamatok részletes kiértékelését a nagy felbontású, hengerben mért nyomásadatok alapján végeztük, amelyek stabil, stacioner üzemi feltételek mellett, különböző fordulatszám tartományokban kerültek rögzítésre. A mérési pontokon 100 egymást követő ciklus adatait gyűjtöttük össze, lehetővé téve a ciklusátlagolt elemzést, így csökkentve az átmeneti anomáliák és a ciklusról ciklusra változó ingadozások hatását.

Az égési folyamat jellemzőit a Rassweiler–Withrow módszer segítségével határoztuk meg, amely széles körben elfogadott a szikragyújtású belsőégésű motorok nyomásgörbéinek elemzésére. Az elemzés során több kulcsfontosságú paramétert vizsgáltunk. Elsőként az úgynevezett Mass Fraction Burned (MFB) profilokat határoztuk meg, ezen belül is az MFB10, MFB50 és MFB90 értékeket, amelyek rendre az égési energia 10%, 50% és 90%-ának felszabadulását jelzik. Ezen paraméterek pontos képet adnak a gyúléskésedelemről, az égés különböző fázisáról, valamint az égés lezáródásáról.

Az égéshossz jellemzésére két különböző metrikát alkalmaztunk. Az első az égés kezdetétől (SOC) a befejeződéséig (EOC) tartó teljes égéstartományt fedte le, míg a második módszer kizárólag az MFB10 és MFB90 közötti szakaszt vizsgálta, amely a fő égési fázist jeleníti meg. Míg az előbbi módszer az egész égésfolyamatot lefedi, beleértve a gyúléskésedelmet és az utóégést is, addig az utóbbi kevésbé érzékeny az esetleges rendellenességekre. Az égés intenzitását és időbeli lefolyását a hőfelszabadulás ütemének (ROHR) meghatározásával jellemeztük, amelyet a termodinamika első törvénye alapján, a nyomás és térfogatadatokból számítottunk. Ez az elemzés nemcsak az égési esemény intenzitásáról és karakteréről nyújtott információt, hanem lehetőséget adott rendellenes égési jelenségekre, például a kopogás vagy a túlzott előgyújtás azonosítására is.

Végül, az égéstérbeli csúcsnyomás és nyomásnövekedési sebesség vizsgálatával felmértük a kopogási hajlamot, illetve az égés dinamikáját. Külön figyelmet szenteltünk annak tanulmányozására, hogy miként befolyásolja a hidrogénes dúsítás az égésfázist. A 20%-os hidrogénenergia részarány alkalmazása esetén az MFB50 érték következetesen közelebb tolódott a felső holtponthoz (TDC), ami a lángfront gyorsabb terjedését jelezte. Az égéshossz, különösen az MFB90 és MFB10 pontok közötti tartomány, minden vizsgált fordulatszámon csökkent, ami jól mutatja a hidrogén nagy reakciókészségét és gyors égési karakterisztikáját.

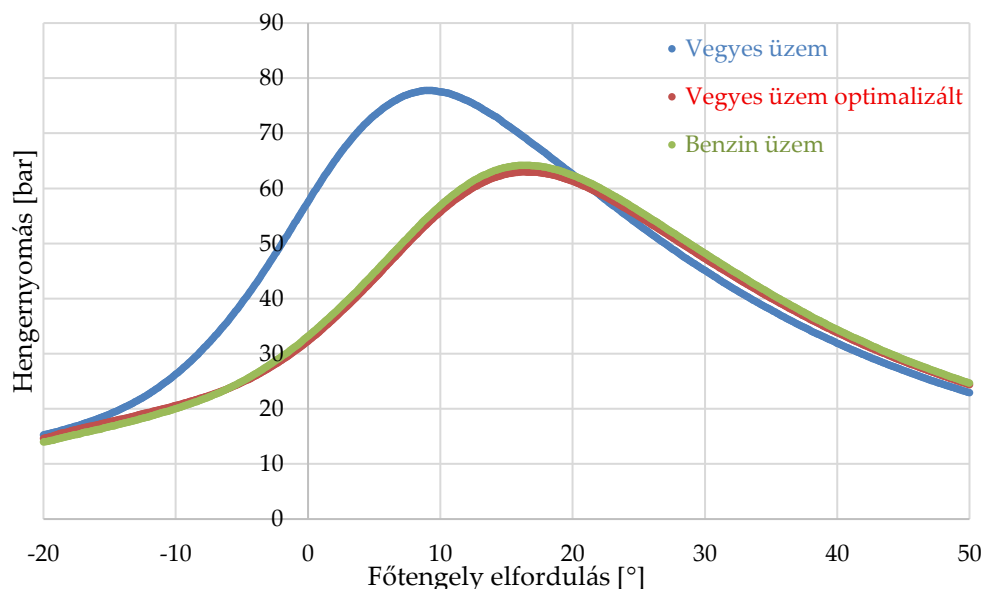
3. Eredmények

A kísérletek során minden vizsgált fordulatszám tartományban szisztematikus különbséget tapasztaltunk a kizárólag benzinüzemhez optimalizált előgyújtási szögekhez képest. A 20%-os hidrogénenergia részarány alkalmazása jelentősen módosította a gyújtás időzítésének optimális pontját, így annak újra kalibrálása elengedhetetlen volt az elvárt teljesítmény és égéskarakterisztika biztosításához. A hidrogén égési sebessége lényegesen nagyobb, mint a benziné, így jelenléte a gyúléadás után gyorsabban terjedő lángfrontot eredményezett. Ennek következményeként az égés hamarabb lezajlott, és az égés középpontját, ezzel együtt az MFB50-et minden mérési pontban a felső holtpont (TDC) felé tolta el. Ha az előgyújtást nem korrigáljuk, az égés folyamata túlságosan korán ment volna végbe, amely fokozott kopogásveszélyt és hatásfokcsökkenést eredményez. Az elvégzett mérések egyértelműen kimutatták, hogy az optimális gyújtási időpont minden esetben 4–6° főtengelyfokkal későbbre tolódott, mint a kizárólag benzinnel történő üzem során meghatározott. Ez az előgyújtás-visszavétel minden fordulatszámon (1500–3500 1/perc) szükséges volt a stabil és hatékony működéshez. Az előgyújtás értékeit a 3. számú táblázat tartalmazza.

3. Táblázat. Előgyújtási szögek

Fordulatszám [1/perc]	Optimális előgyújtási szög benzin [°]	Optimális előgyújtási szög benzin 80%-hidrogén 20%[°]
1500	30,2	24,8
2000	31,5	26,4
2500	31,8	26,8
3000	31,5	28,1
3500	35,5	28,8

Az égés és nyomáslefolysisban bekövetkező változások jobb megértése és szemléltetése érdekében az 1. ábrán összehasonlító módon mutatjuk be a 2500 fordulat/perc fordulatszámra rögzített nyomásgörbéket. Az ábrán három különböző üzemállapotot vizsgálunk, az alapértelmezett benzinüzemet, a 20%-os hidrogénenergia-részesedésű, de előgyújtásmódosítás nélküli vegyes üzemet, valamint a gyújtás optimalizálást követő kettősüzem módot.



1. Ábra, Hengernyomás szemléltetés

4. Összegzés

A hidrogén, mint tüzelőanyag az Otto-ciklusú belsőégésű motorok esetében is jelentős potenciállal bír. E kutatási irány azért is különösen ígéretes, mert a meglévő motorarchitektúrák kisebb módosításokkal alkalmassá tehetők a kettősüzemű (hidrogén-benzin) működésre. Jelen vizsgálat is azt támasztja alá, hogy már az előgyújtási szög megfelelő módosításával olyan konstrukció alakítható ki, amely nemcsak stabil működést biztosít, hanem csökkentett károsanyag-kibocsátással is üzemeltethető.

A mérések alapján egyértelműen megállapítható, hogy a 20% hidrogénenergia részarány alkalmazása minden vizsgált fordulatszám tartományban (1500–3500 1/perc) szükségessé tette az előgyújtási szög korrekcióját. A benzinüzemhez optimalizált gyári értékhez képest az előgyújtást 4–6 fokkal kellett visszavenni annak érdekében, hogy a hidrogén gyorsabb égési karakterisztikájából fakadó előretolt nyomáscsúcs ne okozzon kopogást, túlzott hőterhelést vagy hatásfokcsökkenést. A korrigált előgyújtási beállítások mellett az égés lefolyása stabilizálódott, így az eredmények azt mutatják, hogy megfelelő optimalizálás mellett a hidrogén-benzin kettősüzem nemcsak megvalósítható, hanem műszakilag is megbízható és emissziócsökkentő alternatívát kínál a jelenlegi belsőégésű hajtásláncok számára.

Irodalomjegyzék

- [1] Chintala, V., & Subramanian, K. (2017). A comprehensive review on utilization of hydrogen in a compression ignition engine under dual fuel mode. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 472–491. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.239>
- [2] Tsujimura, T., & Suzuki, Y. (2017). The utilization of hydrogen in hydrogen/diesel dual fuel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(21), 14019–14029. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.294>
- [3] Qin, Z., Yang, Z., Jia, C., Duan, J., & Wang, L. (2020). Experimental study on combustion characteristics of diesel-hydrogen dual-fuel engine. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 142, 1483–1491. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09760-3>
- [4] Szamrej, G., & Karczewski, M. (2024). Exploring Hydrogen-Enriched Fuels and the Promise of HCNG in Industrial Dual-Fuel Engines. *Energies*, 17(5), 1525. <https://doi.org/10.3390/en17051525>
- [5] Serrano, J., Jiménez-Espadafor, F., & López, A. (2019). Analysis of the effect of different hydrogen/diesel ratios on the performance and emissions of a modified compression ignition engine under dual-fuel mode with water injection. *Energy*, 172, 702–711. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.031>
- [6] Gopal, G., Rao, P. S., Gopalakrishnan, K., & Murthy, B. (1982). Use of hydrogen in dual-fuel engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 7(3), 267–272. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(82\)90003-0](https://doi.org/10.1016/0360-3199(82)90003-0)
- [7] Vavra, J., Bortel, I., & Takats, M. (2019). A Dual Fuel Hydrogen—Diesel Compression Ignition Engine and Its Potential Application in Road Transport. SAE Technical Paper, 2019-01-0564. <https://doi.org/10.4271/2019-01-0564>
- [8] Gültekin, N., & Ciniviz, M. (2023). Examination of the effect of combustion chamber geometry and mixing ratio on engine performance and emissions in a hydrogen-diesel dual-fuel compression-ignition engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(6), 2801–2820. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.091>
- [9] Purayil, S., Elfakhany, M., Rashid, M. M., & Krishnasamy, P. (2023). Review of hydrogen–gasoline SI dual fuel engines: Engine performance and emission. *Energy Reports*, 9, 4547–4573. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.03.239>
- [10] Purayil, S., Elfakhany, M., Rashid, M. M., & Krishnasamy, P. (2024). Experimental investigation of spark timing on extension of hydrogen knock limit and performance of a hydrogen-gasoline dual-fuel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49(2), 910–922. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.265>
- [11] Kiss, A., Szabó, B., Kun, K., & Weltsch, Z. (2024). Prediction of efficiency, performance, and emissions based on a validated simulation model in hydrogen–gasoline dual-fuel internal combustion engines. *Energies*, 17(22), 5680. <https://doi.org/10.3390/en17225680>
- [12] MAHLE Group. Engine Testing and Break-In Procedures: Technical Manual. Stuttgart, Germany: MAHLE GmbH, 2021.