



A hidrogén-benzin-levegő keverék hatása a belső égésű motorok emissziós értékeire – áttekintés és perspektívák

Effect of the Hydrogen-Gasoline-Air Mixture on the Emission Values of Internal Combustion Engines. Overview and Perspectives

Kiss Attila,¹ Weltsch Zoltán²

¹ Neumann János Egyetem GAMF Műszaki és Informatikai kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, Kecskemét, Magyarország, kiss.attila@nje.hu

² Széchenyi István Egyetem Anyagtudományi és Technológiai Tanszék; Járműipari Kutatóközpont. Győr, Magyarország, weltsch.zoltan@sze.hu

Abstract

The urgency to combat climate change and reduce dependence on fossil fuels has spurred intense interest in alternative fuels and advanced propulsion technologies. Among these innovations, hydrogen-gasoline dual fuel mode stands out as a transformative approach with the potential to revolutionize internal combustion engines (ICEs) and paves the way for sustainable mobility. This paper provides a comprehensive analysis of the multifaceted implications of hydrogen-gasoline dual fuel combustion, encompassing engine performance optimization, emissions reduction strategies, combustion dynamics elucidation, technological hurdles to overcome, potential applications across diverse sectors, market perspectives, and future research directions.

Keywords: *hydrogen, dual fuel, internal combustion engine.*

Összefoglalás

Az éghajlatváltozás elleni küzdelem és a fosszilis tüzelőanyagoktól való függőség csökkentésének sürgető igénye élénk érdeklődést vált ki az alternatív tüzelőanyagok iránt. Ezen innovációk közül a hidrogén-benzin keverékes üzemmód kiemelkedik mint olyan átalakító megközelítés, amely forradalmasíthatja a belső égésű motorokat, és utat törhet a fenntartható mobilitás felé. Ez a tanulmány átfogó elemzést nyújt a hidrogén-benzin keverékes üzemmód sokrétű következményeiről, beleértve a motor teljesítményének optimalizálását, a kibocsátáscsökkentési stratégiákat, az égésdinamikát, a leküzdendő technológiai akadályokat és a jövőbeli kutatási irányokat.

Kulcsszavak: *hidrogén, kettős üzemanyag, belső égésű motor.*

1. Bevezetés

Egy olyan korszakban, amelyet az éghajlatváltozás kezelésének és a fenntartható fejlődés előmozdításának kényszere határoz meg, egyre kritikusabbá válik a mobilitás és a környezetvédelem metszéspontja. Ennek fényében a hidrogén sokoldalú és ígéretes alternatív üzemanyagként jelenik meg, amely páratlan lehetőségeket kínál a közlekedés szén-dioxid-mentesítésére és a fenntartható mobilitás új korszakának bevezetésére.

A hidrogén-benzin-levegő keverékes, azaz a kettős vagy hibrid üzemanyagos üzemmód a hagyomány és az innováció találkozását jelenti, kihasználva mind a hidrogén, mind a benzin erősségeit a motorok hatékonyságának maximalizálása és a károsanyag-kibocsátás minimalizálása érdekében.

2. Hidrogén-benzin kettős üzemanyag: a hatékonyság és a teljesítmény maximalizálása

A kettős, másként hibrid üzemanyaggal működő motorok hatékonyságának és teljesítményének optimalizálásában kihasználjuk mind a hidrogén, mind a benzin egyedi tulajdonságait. A kettőstüzelőanyag-égetés lényege a hidrogén és a benzin egyidejű égetése a motor égésterében, olyan tüzelőanyag-keveréket hozva létre, amely javítja az égési jellemzőket [1–4].

2.1. Az égés tökéletesítése

A hidrogén kis gyulladási energiája és széles gyúlékonysági tartománya miatt a benzin-levegő keverékbe keverve égésfokozóként hat. A hidrogén hozzáadása felgyorsítja az égési folyamatot, elősegítve a láng gyorsabb terjedését és az égés rövidebb időtartamát. Ez a katalitikus hatás fokozza az általános égési hatékonyságot, ami jobb termikus hatásfokot és kisebb üzemanyag-fogyasztást eredményez [5, 6].

2.2. Hőtani hatásfok javítása

A termikus hatásfok maximalizálása a motor optimális teljesítményének és üzemanyag-takarékosságának eléréséhez kiemelkedő fontosságú. A hidrogén és a benzin kettős tüzelőanyaggal történő égetés számos lehetőséget kínál a termikus hatékonyság növelésére, beleértve a szegény égést, a nagyobb sűrítési arányt és a hulladékhő visszanyerését. Ezen kívül a hidrogén a kopogással szembeni ellenállása által lehetővé teszi a nagyobb sűrítési arányokat, ami tökéletesebb égést és nagyobb termikus hatásfokot eredményez [7, 8].

2.3. Szegény keverékes üzemmód

A hibrid üzemanyagos üzemmódú égés egyik legfontosabb előnye, hogy lehetővé teszi az extra-szegény keverékes üzemmódot, amikor a levegő-tüzelőanyag keverék az üzemanyaghoz képest nagyobb arányban tartalmaz levegőt. A hidrogén nagy oktánszáma és gyors égése lehetővé teszi a stabil égést szegény keverékekkel, ami csökkenti az üzemanyag-fogyasztást és a károsanyag-kibocsátást, miközben fenntartja a motor teljesítményét [9, 10].

2.4. A sűrítési arány optimalizálása

A hidrogén hozzáadása az égési folyamathoz nagyobb sűrítési arányt tesz lehetővé a motor kopogásának veszélye nélkül. A hidrogén öngyulladással szembeni ellenállása nagyobb sűrítési arányokat tesz lehetővé, ami jobb termikus hatásfokot

és nagyobb teljesítményt eredményez. A sűrítési arányt a hibrid üzemanyagos keverékképzés mellett szélesebb spektrumon lehet optimalizálni, annak függvényében, hogy a mérnökökkel szemben milyen felhasználói elvárásokat támasztanak [4, 9].

2.5. Égési stabilitás és lángterjedés

A hidrogén nagy lángsebessége és a gyulladáshoz szükséges kis gyulladási energia hozzájárul a fokozott égési stabilitáshoz és a lángterjedési jellemzőkhöz. A hidrogén jelenléte az égésterben felgyorsítja a lángterjedést, biztosítva az egyenletesebb és gyorsabb égést az égési ciklus során. Ez a jobb égési stabilitás egyenletesebb motorüzemeltet, kisebb vibrációt és jobb vezethetőséget eredményez [4, 9].

2.6. Veszteség-hő-hasznosítás

Az égés hatékonyságának optimalizálása mellett a veszteség-hő hasznosítására is figyelmet kell fordítani. A hibrid üzemanyag égetésével járó nagy kipufogógáz-hőmérsékletet különböző hőhasznosítási alkalmazások, például kipufogógáz-visszavezetés (EGR), turbófeltöltés vagy hulladékhő-visszanyerő rendszerek számára lehet hasznos. A hulladékhő hatékony felhasználásával és hasznosításával tovább javítható a motor hatékonysága és a jármű általános teljesítménye [5].

3. Károsanyagkibocsátás-csökkentési stratégiák

A környezeti fenntarthatóságra való törekvés során az ilyenfajta keverékképzési eljárás számos lehetőséget kínál a károsanyag-kibocsátások mérséklésére és a belső égésű motorok ökológiai lábnyomának csökkentésére. Ez a fejezet konkrét stratégiákat és eljárásokat vizsgál, amelyek célja a kulcsfontosságú szennyező anyagok kezelése és a környezeti rugalmasság előmozdítása a kettőstüzelőanyag-égetéssel [11, 12].

3.1. A hőtani hatásfok javítása

A nitrogén-oxidok (NO_x) kibocsátása jelentős kihívást jelent a levegő minőségére és az emberi egészségre gyakorolt káros hatásai miatt. A hibrid üzemanyag égetése számos lehetőséget kínál az NO_x csökkentésére, beleértve az égési hőmérséklet szabályozását, a kipufogógáz-visszavezetést (EGR) és a szelektív katalitikus redukciót (SCR). Az égési paraméterek optimalizálásával a csúcshőmérséklet csökkentése és az EGR alkalmazásával az égési keverék inert gázokkal történő hígítása érdekében minimalizálható az NO_x -képződés az égés során. Az ammóniaalapú katalizátorokat

használó SCR-rendszerek mellett szelektíven nitrogénre és vízre bontják az NO_x -t, tovább csökkentve ezzel a környezeti hatásokat [2, 5].

3.2. Káros részecskék (PM) csökkentése

A mikrorészecskékből és aeroszollokból álló részecskék (PM) kibocsátása jelentős egészségügyi kockázatot jelent, és hozzájárul a légszennyezéshez. A kombinált tüzelőanyagok elégetése az égés hatékonyságának javításával és a részecskeszűrő eljárások révén csökkentheti a PM-kibocsátást. Az égési stabilitás fokozásával és a tüzelőanyag teljesebb oxidációjának elősegítésével a hibrid tüzelőanyaggal működő motorok kevesebb koromrészecskét termelnek, és kisebb PM-kibocsátást eredményeznek. Emellett a fejlett részecskeszűrők és részecskecsapdák képesek a PM-kibocsátást felfogni és eltávolítani a kipufogógázból, biztosítva a szigorú kibocsátási előírások betartását és a levegőminőség védelmét [1].

3.3. A szénhidrogének (HC) és szén-monoxid (CO) csökkentése

A szénhidrogén- (HC-) és szén-monoxid- (CO-) kibocsátás, amely a tökéletlen égési folyamatokból származik, a hibrid tüzelőanyag motorok kibocsátáscsökkentésének fő célpontjai. A levegő-tüzelőanyag arányok, az égési fázisok és a gyújtás időzítésének optimalizálása javítja az égés tökéletességét, és minimalizálja a HC- és CO-kibocsátást. Ezen kívül a katalizátorok és oxidációs katalizátorok a HC és CO szennyező anyagokat kevésbé káros vegyületekké oxidálják, tovább csökkentve ezzel a környezeti hatásukat [6, 8].

3.4. Az üvegházhatású gázok kibocsátásának mérséklése

A hidrogén használatával csökkenteni tudjuk az üvegházhatású gázokat, hiszen az égése során nem keletkezik olyan üvegházhatású gáz, amit ma már működő útkezelési eljárásokkal ne lehetne semlegesíteni. A hibrid tüzelőanyaggal hajtott motorok általános környezeti hatása az elsődleges tüzelőanyag-forrás szén-dioxid-intenzitásától függ. Az elektrolízisből vagy biomasszából származó, zöldhidrogén felhasználásával a hibrid motorok szén-dioxid-semleges vagy akár szén-dioxid-negatív kibocsátási üzemiállapotot is elérhetnek, mérsékelve ezzel az éghajlatváltozáshoz való hozzájárulásukat. Emellett a szén-dioxid-leválasztási és -hasznosítási (CCU) eljárások képesek a kipufogógázból származó CO_2 -t újrafelhasználás céljából megkötni, ami tovább csökkenti az üvegházhatású gázok nettó kibocsátását [13, 14].

3.5. Szabályozási és tanúsítási megfelelés

A kettős üzemanyaggal működő motorok kibocsátáscsökkentési stratégiáinak kritikus szempontjai a jogszabályi megfelelés biztosítása és a kibocsátási tanúsítvány megszerzése. A kettős üzemanyaggal működő rendszereket úgy kell megtervezni, hogy azok megfeleljenek a szabályozó hatóságok, például a Környezetvédelmi Ügynökség (EPA) és az Európai Unió (EU) által meghatározott szigorú kibocsátási előírásoknak, vagy meghaladják azokat. E szigorú kibocsátási vizsgálatok validálást és tanúsítási folyamatokat foglalnak magukba. Valós vezetési körülmények között kell bizonyítani a kibocsátási határértékeknek való megfelelést. A szabályozási követelmények betartásával és a kibocsátásszabályozás legjobb gyakorlatainak elfogadásával a gyártók biztosíthatják a kettős üzemanyaggal működő motorok környezeti fenntarthatóságát és piaci elfogadottságát [15, 16].

4. Jövőbeni kutatási irányok

A következőkben a jövőbeli kutatások konkrét területeit vázolom fel, melyek: az égésoptimalizálás, az infrastruktúra-fejlesztés és az úgynevezett zöldhidrogén előállítás.

4.1. Korszerű égésmodellezés és szimuláció

Az égésmodellezés és szimuláció korszerűségének fejlesztése kulcsfontosságú a kettős tüzelőanyaggal működő égési folyamatok optimalizálásához és az összetett égési jelenségek megértéséhez. A jövőbeni kutatási erőfeszítéseknek olyan nagy pontosságú számítási modellek kidolgozására kell összpontosítaniuk, amelyek pontosan számítják a hidrogén és a benzin égése közötti kölcsönhatásokat, valamint az égéster geometriájának, az üzemanyag-befecskendezési stratégiáknak és a turbulenciának az égés hatékonyságára és a kibocsátások kialakulására gyakorolt hatását. A számítási modellek és módszerek finomításával a kutatók mélyebb betekintést nyerhetnek a kettős tüzelőanyag égésdinamikájába, és felgyorsíthatják a következő generációs motorok fejlesztését [17, 18].

4.2. A hidrogén elérhetőségének biztosítása

A hidrogén elérhetőségének biztosítása alapvető fontosságú a hidrogént energiaforrásként felhasználó eszközök széles körű elterjedésének érdekében. A jövőbeni kutatásoknak a költség-hatékony hidrogéngyártási, -tárolási és -elosztási technológiák fejlesztésére, valamint a hidrogén-utántöltési infrastruktúra optimalizálására

ra kell összpontosítaniuk. Az infrastrukturális akadályok elhárításával és az iparági szereplők közötti együttműködés elősegítésével megkönnyíthető a kettős üzemanyaggal működő motorok bevezetése. Mindemellett felgyorsítja a hidrogén-alapú gazdaságra való áttérést [15].

4.3. A zöldhidrogén előállítása

A hidrogén mint energiaforrás fenntartható elterjedése a zöldhidrogén rendelkezésre állásától függ. Amennyiben a hidrogént fenntartható és környezetbarát energiaforrásként szeretnénk használni, mindenképpen olyan előállítási formát kell választanunk, aminek a környezetre gyakorolt hatása a lehető legalacsonyabb. Ilyen előállítási módok például a megújuló energiaforrásokkal működő elektrolízis, a biomassa elgázosítása és az atomerőművek által termelt elektromos áramának völgyidőszaki hasznosítása. A zöldhidrogén-előállítási technológiák fejlesztésével olyan fenntartható és szén-dioxid-semleges üzemanyag-ellátást biztosíthatunk, ami lehetővé teszi a kis szén-dioxid-kibocsátású, kettős tüzelőanyag-ellátású belső égésű motorok elterjedését [15].

4.4. Fejlett meghajtásmódok

A kettős (hibrid) tüzelőanyag alkalmazásán túl másféle, fejlett meghajtási módok feltárása is alapvető fontosságú a hosszú távú fenntarthatósági célok eléréséhez és a változó közlekedési igények kielégítéséhez. Mivel a személyközlekedés célja, minősége és lokációja is változik, ezért fontos megemlíteni, hogy nem minden esetben a hibridizált belső égésű motorok lesznek a legoptimálisabb energiaforrások. Egyes esetekben az üzemanyagcellák, az elektromos hibridek vagy a tisztán elektromos hajtások lesznek a legkedvezőbbek. Ezekből következik, hogy szükségszerű az összes alternatív hajtáslánc fejlesztése a felhasználói igények sokszínűsége miatt.

5. Alkalmazási lehetőségek az egyes szektorokban

5.1. Autóipar

Az autóiparban a kettős üzemanyag motor-üzem módok forradalmasíthatják a járművek meghajtását, mivel tisztább és hatékonyabb alternatívát kínálnak a hagyományos benzinmotorok helyett. A hibridüzemanyag-ellátású motorok zökkenőmentesen beépíthetők a személygépkocsikba, teherautókba, buszokba és kereskedelmi járművekbe, ami egyenes utat jelent a szén-dioxid-men-

tesítés és a kibocsátáscsökkentés felé. A hidrogén-benzin keverékkel mint kettős tüzelőanyaggal történő égés kihasználásával az autógyártók jobb üzemanyag-fogyasztású, csökkentett kibocsátású és nagyobb teljesítményű járművek széles választékát kínálhatják a fogyasztóknak, felgyorsítva a fenntartható mobilitás felé való átmenetet.

5.2. Hajózás

A tengeri hajók a kettős üzemanyaggal működő motorok másik ígéretes alkalmazási területét jelentik a hajózási ágazatban. Az ilyen típusú motorok számos tengeri hajót, köztük teherhajókat, kompkat is képesek meghajtani, és a hagyományos tengeri dízelmotoroknál tisztább és fenntarthatóbb alternatívát kínálni. A hidrogén-benzin kettős tüzelőanyaggal történő égetéssel a hajóüzemeltetők csökkenthetik a szén-dioxid-kibocsátásukat. A káros szennyezőanyagok, például a kén-oxidok (SO_x) és a nitrogén-oxidok (NO_x) kibocsátását pedig kipufogógáz-utókezeléssel semlegesíthetik. Mindemellett javíthatják az üzemanyag-hatékonyságot és az üzemeltetési rugalmasságot is.

5.3. Energiatermelés

A kettős tüzelőanyaggal működő berendezések képesek átalakítani az energiatermelő rendszereket, mivel hatékony és környezetbarát megoldásokat kínálnak a villamosenergia-termeléshez. Ilyen berendezések a stabil belső égésű motorokkal működő aggregátorok. A kettős tüzelőanyaggal működő aggregátorokat olyan elosztott energiatermelési alkalmazásokban lehet alkalmazni, mint a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés (CHP), a mikrohálózatok és a tartalék generátorok, amelyek megbízható és rugalmas villamos energia-ellátást biztosítanak. A hibrid tüzelőanyagot felhasználó motorral hajtott generátorok alkalmazásával a villamosenergia-termelő létesítmények csökkenthetik az üvegházhatású gázok és a kritériumok szerinti szennyező anyagok kibocsátását, miközben az üzemanyag rugalmasságának és az energiabiztonságnak a javulásából is profitálhatnak [19].

5.4. A különböző ipari felhasználások

A kettős tüzelőanyag motorok a hagyományos közlekedési és energiatermelési ágazatokon túl az építő, a vasúti, a mezőgazdasági és bányászati gépeket is működtethetik, ezzel a hagyományos dízelmotorok tisztább és hatékonyabb alternatíváit kínálják. A hidrogént tartalmazó kettős tü-

zelőanyaggal történő égetés bevezetésével ezek a szektorok is csökkenthetik a kibocsátást, javíthatják az üzemanyag-hatékonyságot és növelhetik a termelékenységet, miközben megfelelnek a szabályozási követelményeknek és a fenntarthatósági céloknak [19].

5.5. Repülés és űrhajózás

A légi és űrhajózási ágazatban a kettős üzemanyaggal működő motorok ígéretesek a kibocsátások csökkentésére és a légi járművek meghajtási rendszerei üzemanyag-hatékonyságának növelésére. A kettős tüzelőanyaggal történő égés koncepciói alkalmazhatók a repülőgép-hajtóművekben, és így utat kínálnak a szén-dioxid-mentesítés és a fenntarthatóság felé a légi közlekedésben. A hidrogénnek a hagyományos repülőgép-üzemanyagokhoz, például a sugárhajtóművekhez való üzemanyagba keverésével a kettős üzemanyaggal működő motorok csökkenthetik az üvegházhatású gázok és szennyező anyagok kibocsátását. Az ilyen hajtóműrendszerek lehetővé teszik a repülőgépek számára a tisztább és fenntarthatóbb légi üzemanyagokra való áttérést [20].

6. Következtetés

Összefoglalva, a hidrogén-benzin keverékkel való tüzelési eljárás olyan paradigmaváltást jelent a belső égésű motorok területén, amely környezetbarát, fenntartható átmenetet képez a teljesen fosszilis üzemanyagot mellőző rendszerek és a hagyományos belső égésű motorok között. Kutatásaim és számításaim alapján nem feltétlenül a személyközlekedés területén fog teret nyerni ez az eljárás, sokkal inkább a nagy investíciót igényelt munkagépek, mozdonyok és ipari energiatermelő egységek átalakítása lesz kifizetődő.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Purayil S. T. P., Mohammad O. Hamdan, Al-Omari S. A. B., Selim M. Y. E., Elnajjar E.: *Review of hydrogen-gasoline SI dual fuel engines: Engine performance and emission*. Energy Reports, 9. (2023) 4554–4566.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.03.054>
- [2] Vasu Kumar, Dhruv Gupta, Naveen Kumar: *Hydrogen use in internal combustion engine: a review*. International Journal of Advanced Culture Technology, 3/2. (2015) 87–99.
<https://doi.org/10.17703/IJACT.2015.3.2.87>
- [3] Joonsuk Kim, Kwang Min Chun, Soonho Song, Hong-Kil Baek, Seung Woo Lee: *Hydrogen use in internal combustion engine. The effects of hydrogen on the combustion, performance, and emissions of a turbo gasoline direct-injection engine with exhaust gas recirculation*. International Journal of Hydrogen Energy, 42/39. (2017) 25074–25087.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.097>
- [4] Kanga Rui, Zhoua Lei, Huaa Jianxiong, Fenga Dengquan, Weia Haiqiao, Chena Rui: *Experimental investigation on combustion characteristics in dual-fuel dual-injection engine*. Energy Conversion and Management, 181. (2019) 15–25.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.057>
- [5] Velmurugan A., Rajamurugan T. V., Rajaganapathy C., Murugapopathi S., Kassian T. T. Amesho: *Enhancing performance, reducing emissions, and optimizing combustion in compression ignition engines through hydrogen, nitrogen, and EGR addition: An experimental study*. International Journal of Hydrogen Energy, 49/2. (2024) 1363–1366.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.159>
- [6] Das L. M.: *Hydrogen engines: A view of the past and a look into the future*. International Journal of Hydrogen Energy, 15/6. (1990) 425–443.
[https://doi.org/10.1016/0360-3199\(90\)90200-I](https://doi.org/10.1016/0360-3199(90)90200-I)
- [7] White C. M., Steeper R. R., Lutz A. E.: *Hydrogen engines: The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review*. International Journal of Hydrogen Energy, 31/10. (2006) 1292–1305.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.001>
- [8] Sun Zehao, Hong Jichao, Zhang Tiezhu, Sun Binbin, Yang Binbin, Lu Liquan, Li Lin, Wu Kaiwei: *Hydrogen engine operation strategies: Recent progress, industrialization challenges, and perspectives*. International Journal of Hydrogen Energy, 48/1. (2023) 366–392.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.256>
- [9] Ghosh Anupam, Munoz-Munoz Natalia M., Chatelain Karl P., Lacoste Deanna A.: *Laminar burning velocity of hydrogen, methane, ethane, ethylene, and propane flames at near-cryogenic temperatures*. Applications in Energy and Combustion Science, 12. (2022) 110.
<https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2022.100094>
- [10] Sementa Paolo, Vargas Antolini Jácson Beltrão de, Cinzia Tornatore, Catapano Francesco, Vaglieco Bianca Maria, López Sánchez José Javier: *Exploring the potentials of lean-burn hydrogen SI engine compared to methane operation*. International Journal of Hydrogen Energy, 47/59. (2022) 25044–25056.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.250>
- [11] Ugurlu Adem: *An emission analysis study of hydrogen powered vehicles*. International Journal of Hydrogen Energy, 45/50. (2020) 26522–26535.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.156>
- [12] Hosseini Seyed Ehsan, Wahid Mazlan Abdul: *Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 57. (2016) 850–866.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.112>

- [13] Verhelst Sebastian, Wallner Thomas: *Hydrogen-fueled internal combustion engines*. Progress in Energy and Combustion Science, 35/6. (2009) 490–527.
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.08.001>
- [14] Gao Jianbing, Wang Xiaochen, Song Panpan, Tian Guohong, Ma Chaochen: *Review of the back-fire occurrences and control strategies for port hydrogen injection internal combustion engines*. Fuel, 307. (2022) 121553.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121553>
- [15] Halde Pobitra, Babaie Meisam, Salek Farhad, Haque Nawshad, Savage Russell, Stevanovic Svetlana, Bodisco Timothy A., Zare Ali: *Advancements in hydrogen production, storage, distribution and refuelling for a sustainable transport sector: Hydrogen fuel cell vehicles*. International Journal of Hydrogen Energy, 55. (2024) 973–1004.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.204>
- [16] Marcus Newborough, Graham Cooley: *Green hydrogen: water use implications and opportunities*. Fuel Cells Bulletin, 2021/12. (2021) 12–15.
[https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(21\)00658-1](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00658-1)
- [17] Shravan K. Vudumu, Umit O. Koylu: *Computational modeling, validation, and utilization for predicting the performance, combustion and emission characteristics of hydrogen IC engines*. Energy, 36/1. (2011) 647–655.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.051>
- [18] Li Hailin, Karim Ghazi A.: *Knock in spark ignition hydrogen engines*. International Journal of Hydrogen Energy, 29/8. (2004) 859–865.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2003.09.013>
- [19] Hwang Joonsik, Maharjan Krisha, Cho HeeJin: *A review of hydrogen utilization in power generation and transportation sectors: Achievements and future challenges*. International Journal of Hydrogen Energy, 48/74. (2023) 28629–28648.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.024>
- [20] Yusaf Talal, Shadate Faisal Mahamude Abu, Kadirgama Kumaran, Ramasamy Devarajan, Farhana Kaniz, Dhahad Hayder A., Talib ABD Rahim Abu: *Sustainable hydrogen energy in aviation – A narrative review*. International Journal of Hydrogen Energy, 52/C. (2024) 1026–1045.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.02.086>