

Belsőégésű motorok hidrogén üzeme

Budik György*

*Gépjárművek Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Budapest, Magyarország (e-mail: budik.gyorgy@auto.bme.hu)

Összefoglalás: A hidrogén, mint alternatív hajtóanyag tulajdonságai és fedélzeti tárolása. A hidrogén égési tulajdonságai, alkalmazásának lehetőségei belsőégésű motorokban. Égésproblémák, emisszió. Üzemanyag ellátó rendszerek. Kísérleti motor átalakítása hidrogén üzemre.

1. BEVEZETÉS

Az első hidrogén motor kifejlesztésére irányuló próbálkozás W. Cecil barát nevéhez köthető az 1820-as években. Az általa papírra vetett motor vákuummal működött volna, elképzelése szerint a dugattyút atmoszférikus nyomás vákuum ellenében mozgatja, ezáltal fejte ki erőt. A vákuumot hidrogén-levegő keverék elégetésével, expanziójával, majd lehűtésével hozta létre. Bár az általa vázolt motor működött volna, a vákuum motorok sosem váltak be a gyakorlatban. Ötven évvel később, az 1860-as 70-es években N. A. Otto, a később róla elnevezett körfolyamat és motor feltalálója olyan szintetikus gázzal működő motort mutatott be, amely több mint 50%-ban tartalmazott hidrogént. Otto benzinnel is kísérletezett, de használatát túl veszélyesnek találta, így visszatért a gáz halmazállapotú tüzelőanyagokhoz. A forradalmat a karburátor feltalálása hozta meg, mellyel a folyékony tüzelőanyagok alkalmazása is biztonságossá vált belsőégésű motorokban, jó időre háttérbe szorítva más tüzelőanyagokat.

2. A HIDROGÉN, MINT HAJTÓANYAG [1]

2.1 A hidrogén tulajdonságai

A hidrogén a periódusos rendszer első eleme, rendszáma 1, vegyjele H. Normálállapotban színtelen, szagtalan, egy vegyértékű, igen gyúlékony kétatomos gáz. Nagyon jó hővezető. A hidrogén a legkönnyebb és egyben a világegyetemben leggyakrabban előforduló elem, megközelítőleg a világegyetem tömegének 75 %-át, atomszám tekintetében pedig 90 %-át alkotja. Földi körülmények között kétatomos formában van jelen, mint H₂ gáz a légkörben igen ritka, mert a levegőhöz képest alacsony sűrűségének köszönhetően könnyen megszökik az űrbe. Ennek ellenére a földfelszín harmadik leggyakoribb eleme, leginkább vegyületeivel találkozhatunk: jelen van a vízben, minden szerves vegyületben és minden élőlényben. A természetben néhány baktérium és alga állít elő hidrogéngázt.

A hidrogéngáz sűrűsége 20 Celsius fokon és légköri nyomáson 0,08376 kg/m³, folyékony állapotban forráspontján és légköri nyomáson 70,8 kg/m³. A folyékony és a gáz állapot közötti tágulási arány 1/848-hoz, azaz egységnyi tömegű hidrogén térfogata elpárolgás után 848-szorosára növekszik. A kis sűrűségéből következik, hogy

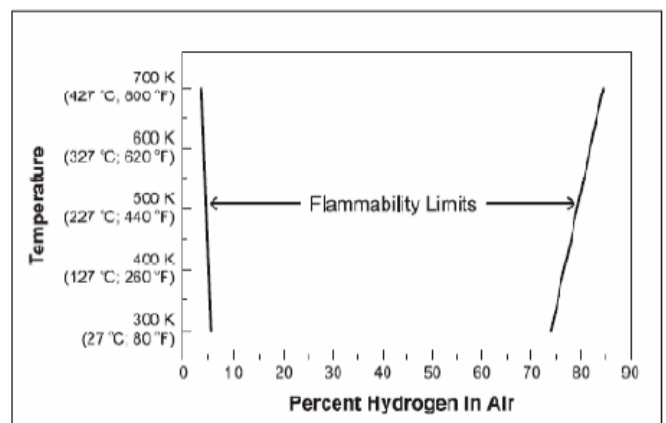
azonos hatótávolsághoz, a később tárgyalt alacsony energiasűrűség miatt nagyobb térfogatú hidrogén szállítására van szükség, mint hagyományos üzemanyagok használatakor.

Anyag	Gőz/Gáz sűrűség (20 Celsius fok, 1 atm.)	Folyadék Sűrűség (Normál forráspont, 1 atm)
	kg/m ³	kg/m ³
Hidrogén	0,08376	70,8
Metán	0,65	422,8
Benzin	4,4	700

1. táblázat: Hidrogén, metán és benzin sűrűségének összehasonlítása folyékony- és gázhalmazállapotban [2]

A hidrogén fémekben könnyen elnyelhető, valamint felületen megkötődhet. Ezen tulajdonsága rendkívül fontos a fémkohászat számára, valamint ez a legbiztonságosabb módja jelenleg a hidrogén fedélzeti tárolásának is.

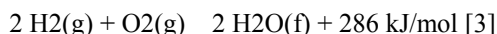
A hidrogéngáz rendkívül gyúlékony, jelenléte levegőben már 4 V/V %-ban is elégethető és meggyullad egészen 75 V/V %-ig. Ez a határ a hőmérséklet növekedésével jelentősen kitágul, ahogy az 1. ábra is mutatja.



1. ábra: A gyúladóképes hidrogén-levegő keverék koncentráció határának (Flammability Limits) változása a hőmérséklet (Temperature) függvényében [2]

Ennek megfelelően zárt térben már nagyon kis szivárgás is rendkívül veszélyes lehet. Reakciója oxigénnel már nagyon

kis aktivációs energia hatására beindul, az égés során víz képződik az alábbi kémiai egyenlet szerint:



A keveréket már nagyon kis energiájú gyújtóforrás is meggyújthatja, minimális gyújtási energiája 0,019 mJ, ami egy tizede a propánénak. Egy csővezetékben akár egy áramló rozsdarészecske elektrosztatikus energiája is gyújtóképes szikrát tud eredményezni. [4]

Égése rendkívül gyors, romboló hatású lehet, sztöchiometrikus keverék esetén 2,65-3,25 m/s, ami egy nagyságrenddel nagyobb a benzinhoz viszonyítva, lángha ennek megfelelően gyorsan kialszik.[1] 585 Celsius fokon öngyulladás lép fel. Öngyulladási hőmérséklete a többi tüzelőanyaghoz képest a legmagasabb, ezért kompresszió gyújtású motorokban nehezen, vagy adalék tüzelőanyagként alkalmazható. A kompressziótűrésre jellemző mérőszám, az oktánszám a hidrogén esetében igen magas, kísérleti úton meghatározva 130 feletti szegény keveréket alkalmazva. [2]

Az égés során kinyerhető energiára jellemző érték az alsó és felső fűtőérték, a kettő különbsége a párolgáshőt adja. Mivel a gázhalmazállapotú hidrogént nem kell elpárologtatni, valamint a végtermék is gőz formájában van jelen, ezért a kinyerhető munkát az alsó fűtőérték reprezentálja. Mivel a hidrogén a legkönnyebb elem, ezért tömegre vetített energiataralma a legnagyobb. Ez magyarázza ürrépülőgépekben történő felhasználását is.

Fuel	Higher Heating Value (at 25 °C and 1 atm)	Lower Heating Value (at 25 °C and 1 atm)
Hydrogen	61,000 Btu/lb (141.86 kJ/g)	51,500 Btu/lb (119.93 kJ/g)
Methane	24,000 Btu/lb (55.53 kJ/g)	21,500 Btu/lb (50.02 kJ/g)
Propane	21,650 Btu/lb (50.36 kJ/g)	19,600 Btu/lb (45.6 kJ/g)
Gasoline	20,360 Btu/lb (47.5 kJ/g)	19,000 Btu/lb (44.5 kJ/g)
Diesel	19,240 Btu/lb (44.8 kJ/g)	18,250 Btu/lb (42.5 kJ/g)
Methanol	8,580 Btu/lb (19.96 kJ/g)	7,760 Btu/lb (18.05 kJ/g)

2. táblázat: Hidrogén, metán, propán, benzin, gázolaj és metanol alsó (lower) és felső (higher) fűtőértékének (heating value) összehasonlítása [2]

Hátránya, hogy térfogatra vetített energiasűrűsége azonban nagyon alacsony, köszönhetően alacsony sűrűségének. Ez szintén fontos, hiszen megmutatja, hogy egy adott térfogatú tartályban mennyi energiát tudunk magunkkal vinni. Például egy 500 literes tartály körülbelül 400 kilogrammnyi diesel olajával egyenértékű hidrogéngáz mennyiség körülbelül egy 8000 literes tartályban férne el 250 bar nyomáson. Folyékony hidrogént használva ehhez körülbelül egy 2100 literes tartály kellene. Fém-hidrid tárolás esetén a fő probléma a tömegnövekedés, a 400 kg diesel olaj energiájának tárolására szolgáló hidrogéntartály tömege körülbelül 1725 kg lenne. [2] Hiába tehát a kis tömegre eső magas energiamentiség, a fedélzeti felhasználásnak korlátokat szabnak a tárolási lehetőségek.

Fuel	Energy Density (LHV)
Hydrogen	270 Btu/ft ³ (10,050 kJ/m ³); gas at 1 atm and 60 °F (15 °C) 48,900 Btu/ft ³ (1,825,000 kJ/m ³); gas at 3,000 psig (200 barg) and 60 °F (15 °C) 121,000 Btu/ft ³ (4,500,000 kJ/m ³); gas at 10,000 psig (690 barg) and 60 °F (15 °C) 227,850 Btu/ft ³ (8,491,000 kJ/m ³); liquid
Methane	875 Btu/ft ³ (32,560 kJ/m ³); gas at 1 atm and 60 °F (15 °C) 184,100 Btu/ft ³ (6,860,300 kJ/m ³); gas at 3,000 psig (200 barg) and 60 °F (15 °C) 561,500 Btu/ft ³ (20,920,400 kJ/m ³); liquid
Propane	2,325 Btu/ft ³ (86,670 kJ/m ³); gas at 1 atm and 60 °F (15 °C) 630,400 Btu/ft ³ (23,488,800 kJ/m ³); liquid
Gasoline	836,000 Btu/ft ³ (31,150,000 kJ/m ³); liquid
Diesel	843,700 Btu/ft ³ (31,435,800 kJ/m ³); minimum; liquid
Methanol	424,100 Btu/ft ³ (15,800,100 kJ/m ³); liquid

3. táblázat: Hidrogén, metán, propán, benzin, gázolaj és metanol energiasűrűségének összehasonlítása [2]

2.2 A hidrogén fedélzeti tárolása

A közúti járműveken alkalmazott hidrogén tartályok főbb szempontjai az elegendően nagy hatótávolság, valamint az ehhez szükséges hidrogén mennyiség kompakt (utas és csomagteret nem leszűkítő) és biztonságos tárolása, a jelenlegiekkel lehetőleg versenyképes áron. Ezen szempontok kielégítése az egyik legfőbb korlátja a hidrogén, mint üzemanyag széles körben való elterjedésének.

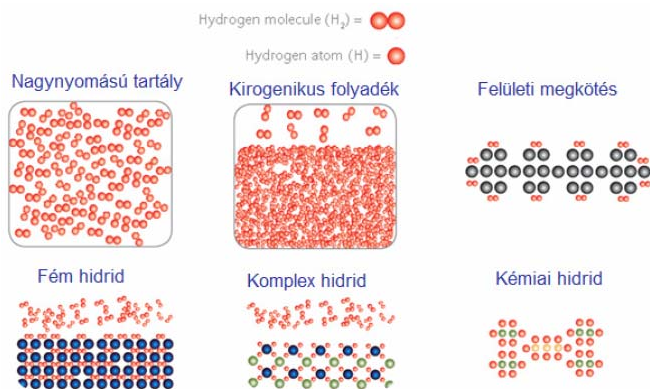
Iparban a hidrogént 200 bar nyomású palackokban tárolják, a jelenlegi demonstrációs járművek azonban ennél jóval több hidrogént igényelnek kisebb súly és térfogat mellett. A tartályok többnyire egy belső, hidrogéntartó rétegből állnak, melyet a nyomástartó réteg követ, amit egy külső hatásoknak ellenálló borítás fed be. Prototípusokon alkalmaznak már 350 és 700 bar-os tartályokat, azonban ezek még mindig nem elégítik ki a fenti követelményeket, hiszen a nyomás növelésével nő a tartály igénybevétele és ennek megfelelően a felhasznált szerkezeti anyagok súlya is.

Másik lehetséges megoldás a hidrogén folyékony állapotban való tárolása. Ehhez a hidrogént -253 Celsius fok alá, kirogenikus hőmérsékletre kell hűteni. Ezen módszer kritikus pontja a tartály megfelelő hőszigetelése, valamint az, hogy a folyamatosan párolgó hidrogént a tartályból szabályozottan ki kell engedni, így a jármű álló helyzetben is fogyaszt. Emellett a hidrogén cseppfolyósítása további energiát igényel mely jelentősen lerontja az összehatásfokot. Lehetséges a két módszer ötvözése is, amely során nagy nyomású kirogenikus tartályt alkalmazunk, hiszen például 350bar nyomású hidrogént lehűtve szobahőmérsékletről -196 Celsius fokra (folyékony nitrogén hőmérséklete), térfogata körülbelül harmadára csökken. Ez azonban ismét olyan szerkezeti anyagot követel, mely jó szigetelő és nyomástartó is egyben, mely árban nem versenyezhet a hagyományos üzemanyag tartályokkal jelenleg.

A hidrogént számos anyag képes elnyelni vagy felületén megkötni, ez lehetővé teszi nagy mennyiségek tárolását és visszanyerését alacsony nyomáson és közel szobahőmérsékleten. Ez lehetséges felületen való megkötéssel (adszorpció), anyagon belüli megkötéssel (abszorpció), kémiai reakció útján vagy ezek ötvözésével.

A fém-hidridek olyan vegyületek, melyek abszorpciós úton kötik meg a hidrogént. Lényege, hogy a hidrogénmolekula atomokra disszociálva beépíthető az adott anyag kristályrácsának hézagaiba. Például a hidrogén beépülve a lantán és nikkell atomok közé (LaNi₅) lantán-nikkell hidridet (LaNi₅H₆) képez. Hő hatására a hidrogénatom kiszabadul a kristályrácsból, ez a folyamat a deszorpció. Tehát a folyamat megfordítható, fém-hidrid képződése közben hő szabadul fel. A felületnövelés érdekében a fém alapanyag por formájában van jelen. Fejlesztésük jelenleg is folyik, ugyanis tárolókapacitásuk jelenleg alacsony, töltése lassú, drága, valamint a töltéskor jelentős hő szabadul fel amit el kell vezetni, vagy újrahasznosítani. A felületi megkötést alkalmazó anyagok javarészt szén bázisúak, melyeknél a hidrogén molekulák vagy atomok az alapanyag felületéhez tapadnak. Ezek formailag szilárd testek vagy labdacskok, ezeket számos szén bázisú alapanyag: nanocsövek, nanoszálak építik fel. Jelenleg is kísérleti stádiumban vannak, a megkötési módjuk még nem tisztázott.

A kémiai megkötés során a hidrogént vegyi úton reagáltatva kötik meg és szabadítják fel, reagáltatva a hidrideket alkoholokkal vagy vízzel. A kémiai hidridek lehetnek szilárd vagy folyékony halmazállapotúak is, valamint fémes vagy nem fémes vegyületek. A reakciónak minden esetben van mellékterméke, mely használat után regenerálható (laboratóriumban, szervízben) majd újra felhasználható, többnyire hő, hidrogén és más reagensek hozzáadásával. Ezen rendszerek is igénylik a keletkező hő, valamint a melléktermékek kezelését, további kutatások jelenleg is folynak. [5] A fent leírt hidrogén-tárolási módszereket szemlélteti a 3. ábra:



3. ábra: Hidrogén tárolók működési elve [5]

3. A HIDROGÉN ÉGÉSE [1]

3.1 Égési tulajdonságok

A hidrogén azon tulajdonságai, melyek hozzájárulnak belsőégésű motorok tüzelőanyagaként történő felhasználásához: a széles gyulladási határ levegővel keveredve, az alacsony begyújtási energia, alacsony kioltási távolság, magas öngyulladás hőmérséklet, nagy égési

sebesség, magas diffúziósebesség, kiemelkedően alacsony sűrűség.

Belsőégésű motorokban a beszívott levegő és hidrogén keverék 4 V/V %-tól 75 V/V% hidrogén koncentrációban gyulladó képes. A hidrogén ezen tulajdonságának legnagyobb jelentősége, hogy lehetővé teszi a motor igen szegény keverékkel történő üzemelését. Ez csökkenti a tüzelőanyag fogyasztást, tökéletesebb égést eredményez, valamint megkönnyíti a motor indítását, hiszen már nagyon kis arányban jelen lévő hidrogén is meggyújtható. Végeredményben az égési hőmérséklet általában alacsonyabb, ez csökkenti a nitrogén-oxid képződésének valószínűségét. A keverék szegényítésének csak a motor stabil üzeme szab határt. A hidrogén minimális gyújtási energiája 0,019 mJ, ami nagyságrenddel kisebb a benzinénél. A széles koncentráció határok mellett ez is elősegíti a szegény keverékes üzemeltetést. Fenti két tulajdonság egyben hátrány is, hiszen a hengerben maradó forró gázok, vagy a motoralkatrészek forróbb pontjai gyújtóforrásként szolgálhatnak, ami rendellenes égéshez, korai gyulladáshoz, visszaégéshez vezethet. Fenti problémák kiküszöbölése az egyik legnagyobb motorteknikai feladat a hidrogénüzemű belsőégésű motorok fejlesztése során.

Az alacsony kialvási távolság a hidrogénláng nehéz kioltatóságára utal. Ez szintén növeli a visszaégés veszélyét, hiszen a begyújtott keverék lángja könnyedén átjuthat a még nyitott szívószelepen a szívócsonkba. Öngyulladási hőmérséklete magas (585 Celsius fok), aminek nagy jelentősége van a keverék kompressziója során, hiszen meghatározza a kompresszió véghőmérsékletét (T₂), ami függ a kompresszió viszonytól (V₁/V₂), valamint a kezdeti hőmérséklettől (T₁) az alábbi összefüggés szerint:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa-1} \quad (1)$$

Ennek megfelelően a magasabb öngyulladási hőmérséklet magasabb kompresszió viszonyt tesz lehetővé, ami növeli a motor termikus hatásfokát. Ezért is alkalmasabb a hidrogén kényszergyújtású motorok üzemanyagaként, hiszen a kompresszióval való biztos gyújtáshoz az öngyulladási hőmérsékletnél 300-400 Celsius fokkal magasabb hőmérséklet kell. Égési sebessége szintén egy nagyságrenddel nagyobb a benzinénél sztöchiometrikus keverék összetétel mellett. Ez azt jelenti, hogy a hidrogénmotorok sokkal jobban megközelítik az ideális körfolyamatot, az égés közel állandó térfogaton megy végbe. Szegényebb keverék esetén az égési sebesség jelentősen csökken.

A magas diffúziósebesség elősegíti a homogén keverék kialakulását. Egy esetleges szivárgás esetén a hidrogén gyorsan szétterjed, csökkentve ezzel a robbanásveszélyt. Az alacsony sűrűség következménye, hogy nagy hatótávolsághoz jelentős térfogatú hidrogéngázra van szükség. A beszívott hidrogén-levegő keverék energiasűrűsége kisebb, ezáltal a hidrogénüzeműre átalakított motor teljesítménye is csökken.

3.2 Égésproblémák

3.2.1 Korai gyulladás, visszaégés

Belsőégésű motorok esetén a visszaégés a keverék begyulladását, berobbanását jelenti a szívócsőben, karburátorban, levegőszűrőben, vagy a szívórendszer egyéb részeiben. Hagyományos (benzinüzemű) motorok esetén főleg régebbi, karburátoros típusoknál fordult elő, a helytelen beállítás miatt, míg a mai, számítógéppel vezérelt befecskendező rendszereknél nagyon ritka. Általában a visszaégés okozója a rossz gyújtási időpont, vagy a helytelen (általában szegény) keverék összetétel. A gázadásnál szegény keveréket szolgáltató karburátoroknál a lassú égés miatt a begyújtott keverék a szívószelep nyitásánál még mindig éghet, így a lángfront szintén a szívócsőbe juthat. Motorindításnál (alacsony fordulatszámon) a túl nagy előgyújtási szög esetén a szívószelep záródása előtt begyújtott keverék lángja visszajuthat a szívócsőbe és begyújthatja az ott lévő gyulladóképes keveréket, ami robbanást okozhat. A nagynyomású gázok a légszűrőházon keresztül távoznak, de az megakadályozza a láng kijutását a motortérbe. A kisebb, légszűrő nélküli hajómotorokon ezt fémhálók alkalmazásával oldották meg. [6]

Hidrogén használatánál ezek a veszélyek fokozottan jelentkeznek az alacsony gyújtási energia, nagy lánghőmérséklet, magas lángsebesség, és a széles éghető keverék-koncentráció tartomány miatt, továbbá az elpárolgó benzin a hidrogénnel ellentétben belülről hűti a motort, csökkentve ezzel a hengerben lévő alkatrészek hőmérsékletét. A korai gyulladás a keverék begyulladása a hengerben még a gyújtószikra előtt. Ezt a motorban található túlmelegedett részek okozhatják, melyek hőelvezetése nem megfelelő. Ezek lehetnek a hengerfej és a dugattyú felforrósodott, izzó részei, lekerekítetlen élek, kiálló csúcsok, a gyújtógyertya elektródája, a kipufogószelep, vagy izzó koromlerakódások a hengerben. Az eredmény rendellenes égés, rossz hatásfok, kopogás, durva motorjárás, valamint ha a szívószelep közelében történik, ugyanúgy okozhat visszaégést is. Hidrogénmotorok tervezésénél vagy meglévő motorok átalakításánál a hengerfej, a gyújtógyertya és a szelepek kialakításánál ügyelni kell az ilyen lehetséges gyújtóforrások kiküszöbölésére. Az áttanulmányozott motorkísérletek alapján kijelenthető, hogy visszaégés főleg alacsony fordulatszámon, nagy előgyújtási szög mellett és külső keverékképzésű motoroknál fordul elő.

3.2.2 Kopogás

Hagyományos benzinüzemű motorok részterhelési hatásfok növelésének egyik módja a nagyobb sűrítési arány alkalmazása, de ennek a teljes terhelésnél fellépő kopogásos égés áll útjában. Kopogásos égés akkor jön létre, ha a lángsebesség meghaladja a helyileg mértékadó hangsebességet. Ez többnyire az égés befejező szakaszában következik be, amikor a maradék gáz nagy nyomásnak és nagy hőmérsékletnek van kitéve. A kopogásos égés kiugróan nagy nyomáscsúcsot eredményez, mely káros hatással van a

terhelésnek kitett alkatrészekre, valamint növeli az égési csúcshőmérsékletet, valamint a károsanyag-kibocsátást. A motorok kopogástűrése magasabb oktánszámú tüzelőanyag, dúsabb keverék alkalmazásával (belső hűtés javítása), a gyújtási időpont későbbre állításával növelhető. [7] A kopogás detektálására a korszerű motorokon a blokkra szerelt gyorsulásmérőket alkalmaznak. A vezérlőelektronika a gyújtási időpont későbbre állításával avatkozik be.

A Michigani Műszaki Egyetem által végzett benzin- hidrogén kopogás összehasonlító kísérletek alapján [8] megállapítható, hogy a két tüzelőanyag kopogása között kis különbségek vannak. A hidrogén-kopogás nyomáslökéseinek frekvenciája magasabb, a nyomáslökések és a gyorsulás intenzitása között lineáris kapcsolat van, tehát a benzines motoroknál használt gyorsulás alapú kopogásmérők használhatók hidrogén üzem esetén is. Kijelenthető, hogy a hidrogén motorok kopogása a gyakorlatban a benzines motorokéhoz hasonlóan kezelhető. A hagyományos kopogásérzékelő és motorvezérlő technikák kiterjeszhetők hidrogén üzemre is kisebb változtatásokkal. A változtatásokat nem a kopogási tulajdonságok, hanem elsősorban a hidrogén aktuális motorüzemi paraméterekre (kompresszió-viszony, légviszony, gyújtásidőzítés, hőmérséklet) való érzékenysége indokolja.

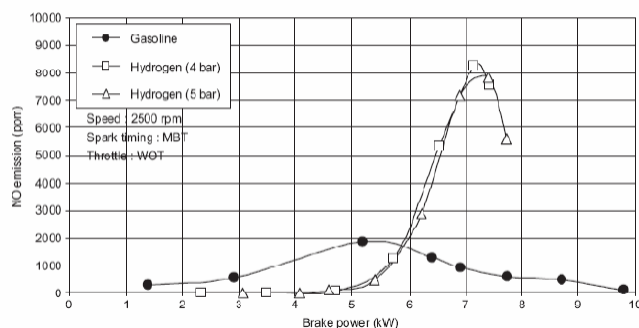
A kanadai Calgary Egyetem tudósai kísérleteket végeztek a hidrogénüzemű motor kopogásának vizsgálatára. Megállapították, hogy a kompresszió viszony növelésével a kopogásmentes üzemi tartomány csak kis mértékben csökken, tehát a kompresszió növelésével nem szükséges a keverék túlzott szegényítése, így a teljesítmény növelhető. A beszívott levegő hőmérsékletének növelésével a kopogás tartománya jelentősen kiszélesedett, ellenben az előgyújtási szög változtatása kevésbé volt hatékony a kopogás megszüntetésére. A kielégítő motorüzem mellett a maximális teljesítményhez a kopogási határon való üzemeltetés szükséges. [9]

3.3 Emisszió

A hidrogén, mint alternatív tüzelőanyag egyik legfontosabb tulajdonsága, hogy vízzé elégve nem szennyezi a környezetet, így elméletben nulla károsanyag-kibocsátás érhető el használatával. Gyors és magas hőmérsékleten történő égésének azonban magas nitrogén-oxid emisszió a következménye, a benzinmotorokhoz viszonyítva akár négyszeres is lehet nagy terhelésen. Normális körülmények között a levegő nitrogéntartalma semleges gázként halad át az égési folyamaton. Nitrogén-oxidok létrejöttéhez magas hőmérsékletre (legalább 1300 Celsius fok) és nagy sűrítésre van szükség. A nitrogén-oxidok képződése a motorban függ a légviszonytól, kompresszió-viszonytól, fordulatszámtól, előgyújtási szögtől és a terheléstől. Benzinmotorok kipufogógázában főleg magas fordulatszámon, nyitott pillangószelepnél, sztöchiometrikus keverési arány mellett jelenik meg. A nitrogén-monoxid szintelen, szagtalan és ízetlen gáz, de oxigén jelenlétében rövid idő alatt nitrogén-dioxiddá és nitrogén-trioxiddá alakul át. A nitrogén-dioxid vöröses-barna színű gáz (szmog), mérgező, a légzőszerveket ingerli és károsítja. Keletkezését vagy meg kell előzni, vagy a kipufogó gáz utólagos kezelésével semlegesíteni kell azt. A

három hatású katalizátorok utóbbi feladatát csak részben képesek elvégezni, a nitrogén-oxid keletkezését tehát még lehetőleg a motoron belül kell megakadályozni. Ez részben megoldható a kipufogógázok részleges visszavezetésével. Ekkor a motorba vezetett keverék szegényebb, ezáltal kisebb fűtőértékű lesz, a keverék nagyobb fajhője, továbbá a vízgőz disszociációja miatt csökken az égési hőmérséklet. A visszavezetésnek határt szab a teljesítmény csökkenése. [7] Hidrogén motoroknál lehetőség van száraz (csak nitrogén) vagy nedves (nitrogén és vízgőz) kipufogógáz visszavezetésre is, de a keverék hígítható argonnal vagy víz befecskendezésével is.

Az Indiai Műszaki Intézet Gépészeti Részlege által hidrogén-benzin üzem összehasonlítására végzett motorkísérletek nitrogén-oxid emisszióra vonatkozó eredményeit láthatjuk a 4. ábrán. A kísérletet egy négyütemű, egyhengeres, 13 lóerős (9.6 kW) motoron végezték 9:1-es kompresszió-viszony és rögzített, 2500-as percnkénti fordulatszám mellett.



4. ábra: Szikragyújtású motor nitrogén-oxid emisszió változása a terhelés függvényében benzin és hidrogén üzem esetén [10]

A diagramból nyomon követhető a nitrogén-oxid képződésének tendenciája a leadott teljesítmény függvényében. Látható, hogy magas terhelésen a nitrogén-oxid emisszió a benzines üzemnek közel négyszerese. Körülbelül 4,5 kW leadott teljesítményig ($\phi=0,5$) a nitrogén emisszió elhanyagolható, közel zérus értékű. Ennek oka, hogy szegényebb keverék esetén a nagy mennyiségű, motoron átáramló pluszlevegő belülről hűti a hengert, ezáltal csökken az égési csúcshőmérséklet. A keverék dúsításával az égésben részt vevő levegő mennyisége növekszik, kevesebb lesz a motort hűtő levegőhányad, ezáltal az égési hőmérséklet is növekszik. A magas hőmérséklet és a nagy mennyiségű, a tüzelőanyag elégetésében részt nem vevő oxigén miatt megkezdődik a nitrogén-oxid képződése, és a keverék dúsításával (a teljesítmény növelésével) rohamosan növekszik egy pontig. Maximumát 7 kW leadott teljesítménynél éri el, $\phi=0,85$ -ös légviszonynál, ezután a leadott teljesítmény növelésével csökkenni kezd. Ennek oka a kipufogógázban az oxigénszint csökkenése, hiszen a keverék közel sztöchiometrikus arányra való dúsításával a levegőben lévő oxigén nagy része elég a hidrogénnel. Látható tehát, hogy a benzinnel ellentétben nem az elméleti keverékarány közelében nő meg jelentősen a kibocsátás, hanem már a szegény keveréktartományban közepesen magas terhelések

esetén. Megállapítható továbbá, hogy a benzines üzemhez képest a nitrogén-oxid kibocsátás lényegesen nagyobb, így kezelése a motoron belül hűtéssel és keverékhigítással, a motoron kívül pedig a kipufogórendszerben elengedhetetlen a ténylegesen tiszta motorüzem eléréséhez. [10]

A nitrogén-oxidok és a vízgőz mellett nyomokban megjelenhet szén-dioxid és szénmonoxid is a kenőolaj égése miatt, valamint szénhidrogének is a kenőolaj párolgása miatt, azonban ez a szénhidrogén-üzemű motorokhoz képest elenyésző (a benzinmotorokénak 5-10 %-a). [10]

3.3 Égésproblémák kiküszöbölése

3.3.1 Előgyújtási szög változtatása

Benzinmotorok kopogás kontrolljának bevált eszköze az előgyújtási szög későbbre állítása. Az előgyújtás változásának hatását hidrogén motorok üzemére az Indiai Műszaki Intézet motorlaboratóriumában vizsgálták egy 13 lóerős egyhengeres négyütemű benzinmotoron. Az előgyújtás késleltetésének hatását vizsgálták a motor teljesítményére, égési és emissziós paramétereire.

Kutatási eredményeikből megállapítható, hogy a hatásfok maximális értékét 9 és 6 főtengely fokos FHP előtti előgyújtás érték esetén éri el. Megállapítható továbbá, hogy az előgyújtási szög növelése magas reciprok légviszony értékeknél (dús keverék) nincs nagy hatással a motor hatásfokára, alacsonyabb reciprok légviszony értékeknél (szegény keverék), jelentősebben csökkenti a hatásfokot a nitrogén-oxid kibocsátás csökkenése mellett. [11]

A nitrogén-oxid képződés maximum értékénél ($\phi=0,81$) közel 30%-os emisszió csökkenést lehet elérni csak a gyújtási időpont nyomtatékra optimalizált előgyújtási szög értékéhez viszonyított késleltetésével (10 ft. fok), és a hatásfokromlás mindössze 5 %. Szegényebb keveréktartományban ($\phi=0,7$) ugyanekkora késleltetéshez 62%-os NOx csökkenés tartozik, a hatásfok 6 %-ot csökken. [11]

Látható tehát, hogy kis termikus hatásfok esés árán jelentős emisszió csökkenés érhető el csak a gyújtásidőzítés késleltetésével.

3.3.2 Keverék hígítása, vízbefecskendezés

A keverék hígítása főleg a nitrogén-oxid kibocsátásra illetve a kopogási hajlamra van hatással. A hígítás során a keverékhez a tüzelőanyagon és a levegőn kívül más összetevőket is keverünk. Ezek lehetnek gázok (nitrogén, argon), vízgőz, vagy nagynyomású víz beporlasztás a szívócsőbe. A hozzáadott nitrogén és argon csökkenti az oxigén koncentrációt, ezáltal a nitrogén-oxid képződését, a vízgőz és vízpára megnöveli a keverék nedvességtartalmát, belülről hűti a motort a víz párolgása miatt. Argon, illetve többlet hidrogén adagolása csökkenti a kopogási hajlamot is, az elégtelen hidrogén a kipufogócsőből visszanyerhető. A keverék hígításának az előgyújtási szög változtatásával

kombinálva jelentős szerepe lesz a jövő hidrogén motorjainak kopogás és emisszió kontrolljában.

Indiai Műszaki Intézet kísérleteit alapul véve kijelenthető, hogy a vízbeporlasztás igazán hatékony megoldásnak bizonyul a nitrogénoxid emisszió és a kopogás csökkentésére. A motor és a hengerfej hőmérsékletének csökkentésével csökkenti a visszaégés veszélyét is, valamint a termikus hatásfokot nem rontja. Hátránya hogy korróziót okoz a motoron belül, valamint a kartergázokkal a forgattyúházba jutva és ott lecsapódva rontja a motorolaj kenési tulajdonságait. [11]

3.3.3 Kipufogógáz visszavezetés

Hidrogénmotorok kipufogógázának visszavezetése is lényegében a keverék hígításának egy módja, hatása a vízbefecskendezéshez hasonló, csak a víz, maga az égéstermék a kipufogógázban gőz formában van jelen. Előnye, hogy nagynyomású befecskendező berendezésre nincs szükség, a kipufogógáz egy részét a motor szívócsővébe vezetjük vissza csővezetéken és EGR szelepen keresztül.

4. ÜZEMANYAG ELLÁTÓ RENDSZEREK [1]

4.1 Folyamatos hidrogén-beszívás közel atmoszférikus nyomásról

A benzinmotorok gázüzemre történő átalakításának ez az egyik legegyszerűbb módja. A tüzelőanyagot a szívócsőbe atmoszférikus nyomáson szűkítőn keresztül vezetjük be. A beszívott levegő sebessége a szűk keresztmetszetben megnő, nyomása lecsökken, így a beszívott tüzelőanyag mennyisége a szívócső depresszió és az áramló levegő sebességének függvénye. A szűkítőt a pillangószelep elé kell beépíteni, hiszen mögötte a nyomás a pillangószelep zárásával csökken, így pont alacsonyabb terhelésnél jutna többlet tüzelőanyag a motorba. LPG üzemű autókban gyakran alkalmazott megoldás, beépítése nem igényel jelentősebb átalakítást, a keverőt többnyire a pillangószelep és a karburátor vagy befecskendező szelep közé építik be. Ilyen gázkeverő látható az 5. ábrán, a tüzelőanyag a piros nyíllal jelzett nyíláson át a legrövidebb keresztmetszetben jut a szívócsőbe.



5. ábra: LPG-benzin kettős üzemű motor gázkeverő egysége.

A hidrogén-levegő keverék azonban jóval szélesebb koncentráció határok (4-75 %) között gyulladóképes, mint a

propán-bután gáz és a levegő keveréke (2,2 - 9,6 %), és diffúziósebessége is utóbbi többszöröse. A folyamatos gázáram és a magas diffúziósebesség miatt a szívócső nagy térfogatában van gyulladóképes keverék, ezért ez az elrendezés súlyos visszaégési problémákat eredményezhet, mivel a hidrogént a motortól távolabb, a pillangószelep előtt kell bevezetni. A kijutó láng begyűjthatja a keveréket egészen a légszűrőig, vagy rosszabb esetben robbanást okozhat. Ez különösen alacsonyabb fordulatszám tartományban jelentkezik, ilyenkor a töltet áramlási sebessége lassabb, a hidrogén a motor szívása ellenére diffúzió útján ellentétesen mozoghat, és a keverék már 4 %-os koncentrációban begyűjtható. Ilyen hidrogénellátó rendszer csak magasabb fordulatszámon járó motorok esetén használható, a visszaégést vízbefecskendezéssel, kipufogógáz visszavezetéssel, meg kell akadályozni.

Hátránya, hogy a motor szabályozásához továbbra is szükség van a pillangószelepre a beszívott levegő fojtásához, így a hidrogén üzem egyik nagy előnye, a motor minőségi szabályzásának lehetősége nem használható ki (a volumetrikus hatásfok nem növelhető).

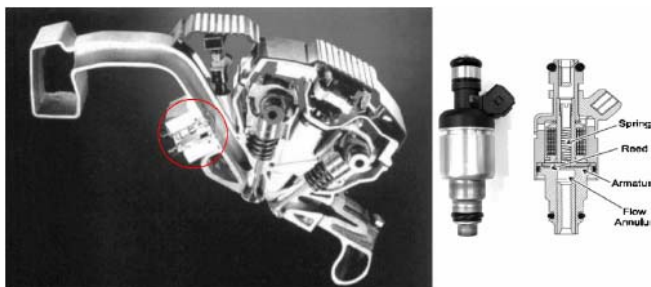
A törökországi Izmiri Műszaki Intézet tudósai egy négyhengeres szikragyújtású motoron végeztek hidrogén-benzin kettős üzemű összehasonlító vizsgálatokat. A hidrogénellátás atmoszférikus nyomásról a fent leírt módon történt, a visszaégés-gátlásról vízbefecskendezés gondoskodott. A kettős üzem közti átváltás a motor leállítása nélkül volt lehetséges. Az első összeállításban a gázkeverőt a karburátor elé beépítve súlyos visszaégés jelentkezett. A gázkeverőt a karburátor és a szívócsőnk közé helyezve is csak 2600-as percnkénti fordulatszám felett volt visszaégésmentes üzem a, vízbefecskendezés ellenére. A motort csak szegény keverékes üzemben használták, így jelentős nitrogén-oxid emisszió nem volt tapasztalható. A teljesítménycsökkenés főleg alacsonyabb fordulatszámon volt jelentős, magas fordulatszám tartományban a motor hatásfoka és teljesítménye megközelítette a benzines üzemet. [12]

A megoldást a járművek hidrogén motorjaiban ritkán alkalmazzák, nagyobb stabil üzemi fordulatszámú motorokon azonban a kettős üzem megvalósítása ilyen rendszerrel kis átalakítással egyszerűen elvégezhető.

4.2 Hengerenkénti szívócsőbe történő szakaszos befecskendezés

Szabályozott befecskendezéssel lehetőség van a motor minőségi szabályzására, így a pillangószelep elhagyható a szívócsőből, kiküszöbölve ezzel a magas áramlási veszteségeket részterheléses üzemi tartományban. A tüzelőanyag megfelelő időpontban történő befecskendezése továbbá csökkenti a visszaégés veszélyét, ugyanis a hidrogén csak a szívóütem közben áramlik a szívócsőben, és a befecskendezés a motor szívószelepéhez közel történhet. A gyulladóképes keverék így a szívócső kisebb térfogatában van jelen. Hátránya, hogy a pontos mennyiség befecskendezéshez nagyobb befecskendezési nyomásra (3-6 bar) [10] és vezérlő elektronikára van szükség, tehát bonyolultabb és drágább rendszer kiépítése szükséges. Az

ilyen hidrogén üzemanyag ellátó rendszerek a hengerenkénti benzinbefecskendező rendszerekhez hasonlóan épülnek fel. A hidrogén ellátás közepes nyomáson történik, a befecskendező szelepeket a vezérlő elektronika működteti meghatározott nyitási időpontban és időtartammal. A befecskendező szelepeket lehetőleg a szívószelephez minél közelebb kell elhelyezni. A motor szabályozása a szelepek nyitvatartási idejének, vagy a tápnyomás nagyságának változtatásával lehetséges. A nyitvatartási idő, vagy a tápnyomás változtatásával változik a motorba jutó hidrogén mennyisége, ezáltal a légviszony az aktuális üzemiállapotnak megfelelően változtatható. Kettős üzemű motor szelep beépítését és a szelep metszetét mutatja a 6. ábra.



6. ábra: Hidrogén befecskendező szelep beépítése kettős üzemanyagú motor szívócsövébe és a szelep metszete

Hidrogén használatával nincs szükség közvetlen befecskendezésre vagy rétegzett keverékképzésre a minőségi szabályzás megvalósításához. A széles gyulladási határ lehetővé teszi a szegény keverékes üzemet szívócső befecskendezés esetén is, ami lényegesen egyszerűbb motorkonstrukciót tesz lehetővé. Az égésproblémák (visszaégés, kopogás) kezelése azonban még itt is nagy gondot okoz. A visszaégés magas terhelésen megelőzhető a befecskendezési időtartam csökkentésével, de ehhez nagyobb tüzelőanyag tápnyomás szükséges. A teljesítmény növelés fő korlátja a kopogásos égés. [10]

4.2 Közvetlen befecskendezés

Közvetlen befecskendezésnél a befecskendező szelepet a hengerfejen a szívószelepek mellett helyezik el. Benzinmotoroknál a pillangószelep elhagyása csak ilyen nagy nyomású rendszerekkel és rétegzett keverékképzéssel valósítható meg a benzin-levegő keverék szűk gyulladási koncentráció tartománya miatt. Rétegzett keverékképzés esetén a gyújtógyertya közelében gyulladóképes, távolabb szegény keverék van. Ez a befecskendezés és a beáramló levegő örvénylésének megfelelő összehangolásával lehetséges, így 2,0 - 2,5-ös légfelesleg is elérhető. Hátránya a bonyolultabb motorkonstrukció és a magas nitrogén-oxid képződése a nagy légfelesleg miatt.

Hidrogénmotoroknál az égési tulajdonságoknak köszönhetően nincs szükség a rétegzett keverékképzésre. Legnagyobb előnye az eddig megismert rendszerekkel szemben, hogy megfelelő befecskendezés időzítéssel megszüntethető a kopogás, és mivel a keverékképzés a hengerben történik, nincs visszaégés a szívócsőben még nagy

terhelések esetén sem. Hátránya, hogy a hengerbe történő befecskendezéshez nagy nyomás (80 bar) szükséges, de használatával megoldható a problémamentes hidrogén motorüzem. Közvetlen befecskendezést alkalmaz hidrogénmotorjaiban a Mazda (RX8 Hydrogen) és a legújabb BMW modell (Hydrogen 7) is. A 7. ábrán a hidrogén-benzin kettős üzemű Wankel (forgódugattyús) motor befecskendező szelepeinek elrendezése látható.



7. ábra: Mazda kettős üzemű Wankel (forgódugattyús) motorja közvetlen hidrogén befecskendezéssel

A motor a szívóütem során az oldalsó nyíláson keresztül szívja be a levegőt, és a motor mindegyik kamrájában („hengerében”) két-két befecskendező juttatja közvetlenül az égéstérbe a hidrogént. Konstruktív adódóan a külön képződő kamrák a szívás és a munkáütem számára ideálisak a hidrogén elégetése szempontjából, a hagyományos dugattyús motorokban előforduló visszaégés nélkül. A külön kialakuló égéstér hőmérsékleti szempontból is biztonságosabb a gumitömítéseket tartalmazó hidrogén injektorok számára, amelyek fokozottan érzékenyek a hagyományos motorokban létrejövő magas hőmérsékletekre. Mivel a hidrogén kifejezetten alacsony sűrűségű anyag, jóval nagyobb térfogat befecskendezése szükséges, mint a folyékony benzin esetében. Ez egynél több befecskendező alkalmazását teszi szükségessé, ami a hagyományos alternáló dugattyús motorokban igen nehezen valósítható meg. A forgódugattyús motor ezzel szemben elegendő helyet kínál égésterenként akár két befecskendező telepítésére is. A hidrogén üzemű Wankel motor maximális teljesítménye és nyomatéka azonban a fenti előnyök ellenére is megközelítőleg fele a benzines üzemhez képest. [13]

A közvetlen befecskendezés előnye az abnormális hidrogén-égés megszüntetése, továbbá kipufogógáz visszavezetéssel

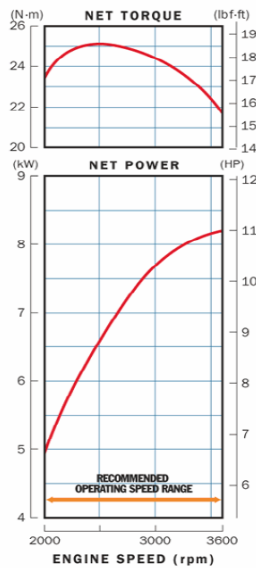
illetve vízbefecskendezéssel az emisszió értékek elfogadható értékre csökkenthetőek.

5. KÍSÉRLETI MOTOR ÁTALAKÍTÁSA HIDROGÉN ÜZEMRE [1]

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépjárművek tanszékének egy jelenleg is futó kutatási témája benzin-hidrogén-bioetanol hármas üzemű demonstrációs jármű fejlesztése. A Gépjárművek tanszék egy több szereplőt felvonultató konzorciumban dolgozva átalakít egy belsőégésű, benzin üzemű motort hidrogén, valamint bioetanol (E85) üzeműre, megőrizve az eredeti, benzin üzeműt. A konzorcium egyik tagja (Accusealed Kft.) speciális hidrogén termelő és tároló egységet (HTTE) fejleszt. A demonstrációs jármű a HTTE által kibocsátott, közel légköri nyomású hidrogént belsőégésű motorban felhasználva lesz mozgóképes. Bioetanol üzeműre való átalakítás is cél, környezetvédelmi szempontok érdekében.

5.1 A motor főbb paramétereit és felépítése

A kísérlet során használt motor a TR7E áramfejlesztő egységbe épített Honda GX390- es jelzésű, 2007-ben gyártott motorja. A motor egyhengerű, négyütemű felül két szeleppel vezérelt, léghűtéses, hengertérfogata 389 cm³. A motor nyomaték és teljesítmény görbéi a 8. ábrán láthatók.

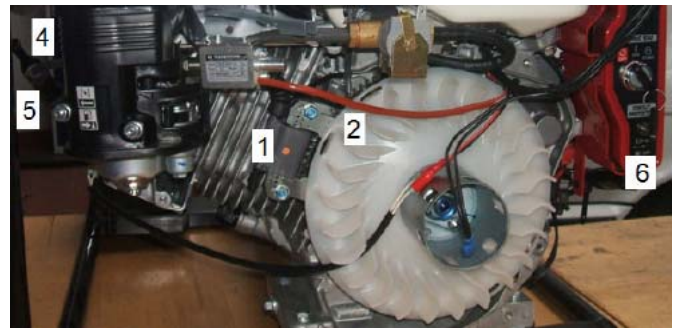


8. ábra: GX390 nyomaték és teljesítmény görbéi [14]

A motorhoz kapcsolt generátor szinkrongenerátor, ezért csak 3000 percnkénti fordulatszámon működik, így 50Hz frekvenciájú váltakozó áramot ad le. A motor által ezen a fordulatszámon leadható maximális teljesítmény a görbe alapján 7,7 kW, nyomatéka 24,5 Nm.

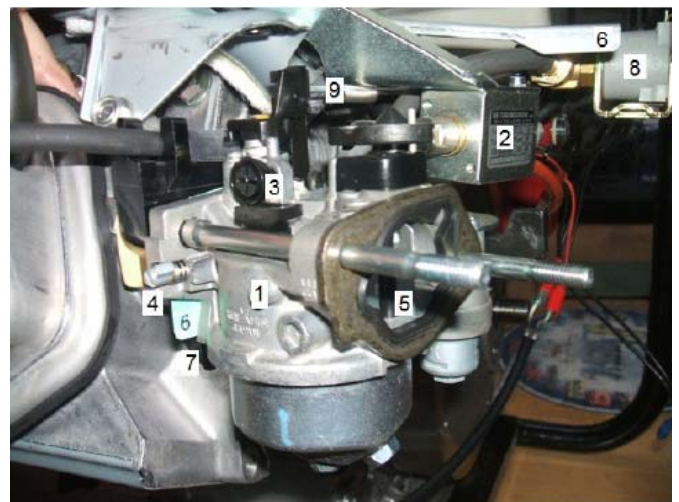
A motor gyújtásrendszere mágnes-tranzisztoros, a kisebb egyhengerű benzinmotoroknál gyakran alkalmazott. A gyújtásrendszer részei a motor elülső részén a hengerfejre rögzített vasmagos tekercs (1), a lendkerékre (2) rögzített

állandó mágnes (3), a gyújtókábel (4), a gyújtógyertya (5) valamint a gyújtáskapcsoló (6).



9. ábra: A gyújtásrendszer részei

A motor keverékképzése egytorkú vízszintes áramú karburátorral (1) történik. Az indítási szakaszban automatikus hidegindító mágnes szelep (2) segíti a keverékképzést. Ez vezérli (zárja) az előfojtó szelepet (5), aminek segítségével a keverőtérben a nyomás lecsökken, így többlet tüzelőanyag kerül a fő és alapjáratú rendszeren át a szívócsőbe. Az alapjáratot a (3) ütköztető csavarral lehet beállítani, esetünkben ez nem szükséges, hiszen a motor által meghajtott szinkrongenerátor fix fordulatszámon működik. Ennek beállításáról röpsúlyos fordulatszám szabályzó gondoskodik a (9) rudazaton keresztül. Alapesetben a pillangószelep nyitását végző kar (6) rögzítve van. A keverék-összetételt a (4) csavarral állíthatjuk, a pillangószelepet és a szűrőt megkerülő alapjáratú levegő a (7) nyíláson jut a motorba. A benzincsap nyitását elektromos szelep végzi (8), a tartályból a benzin a gravitáció segítségével jut el idáig (ejtő tank).



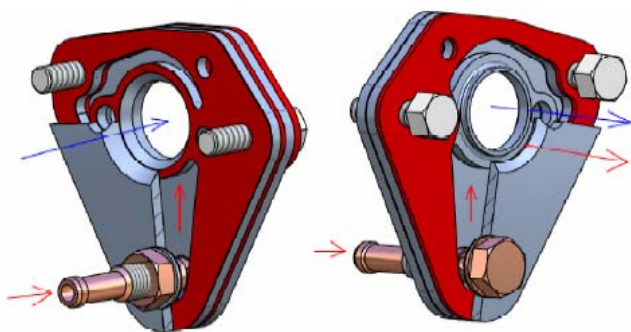
10. ábra: A GX390 vízszintes áramú karburátora és a tüzelőanyag ellátó rendszer részei

5.2 A hidrogén motorba juttatása

A motor hidrogénelátó rendszere folyamatos szívócső beszívású. Alkalmazását az atmoszférikus nyomáson történő hidrogénelátás, valamint az átalakítás egyszerűsége indokolja. A gázkeverő a karburátor és a levegőszűrő közé

kerül beépítésre a pillangószelep elé. Az elhelyezést indokolja, hogy a hidrogént a motorhoz minél közelebb kell bevezetni, de a minőségi szabályzás miatt a gázkeverő szűkületi szakaszának a pillangószelep előtt kell elhelyezkednie. A nyomásviszonyt a szűkületben így az áramló levegő sebessége határozza meg. A pillangószelep nyitásával így a nyomás a szűkületben fokozatosan csökken és nő a beáramló gázmennyiség.

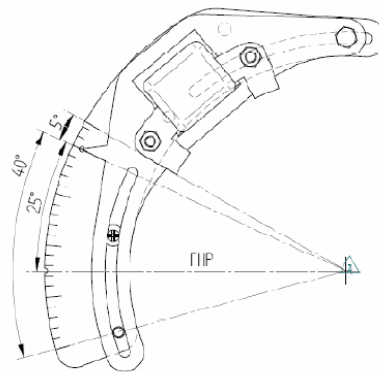
A gázkeverő felépítése a hagyományos LPG üzemanyagú motoroknál megismerthez hasonló. Felépítését tekintve három lemezből áll, melyek szendvicsszerűen épülnek egymásra, a lemezek között tömítő réteg található. A szűkületet az első és a középső lemez alkotja, a gáz a középső lemez járataiban jut a legszűkebb keresztmetszetbe. A gázkivezetés a középső és a hátsó lemez közti hézagon keresztül történik, melynek nagyságát a tömítés vastagságának változtatásával módosíthatjuk.



11. ábra: A gázkeverő

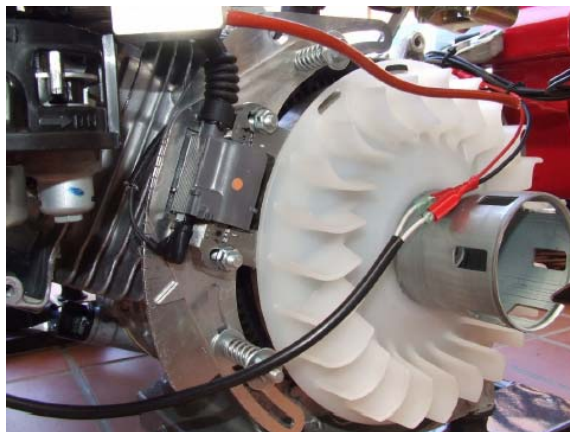
5.3 A gyújtásrendszer módosítása

Az előgyújtási szög állítása a gyújtótekerces kerület mentén való mozgatásával lehetséges. A tekercset bizonyos szögértékkel elmozdítva a motor forgása során a lendkerék állandó mágnessé mindig más helyzetben éri el azt a felső holtponthoz viszonyítva. Ennek megfelelően a tekercsben a feszültség felfutása, így a gyújtószikra keletkezésének időpontja az elmozdulásnak megfelelő szögértékkel változik. Mivel a motor jobbforgású, ezért a gyújtótekerces az óramutató járásával megegyező irányban elmozdítva az előgyújtási szög csökken, és fordítva. Hidrogénüzemben az előgyújtási szög csökkentése szükséges a gyári értékhez képest, felső holtpont közeli időpontra. Az esetleges felső holtpont utáni gyújtási eseteket és bioetanol üzemeltetést is vizsgálандó, a szükséges állítás mértékét FHP után 5 fok értékűtől FHP előtt 40 fok értékig határoztuk meg. A gyújtásállító szerkezet rajza a 12. ábrán látható.



12. ábra: Előgyújtás állító szerkezet

Felerősítése a gyújtótekerces helyére a hengerfejre történik süllyesztett csavarokkal. A tekercset a sínben elmozduló lemezre rögzítjük, állítása a síneket összeszorító csavarok lazításával lehetséges. A motor üzemeltetése előtt az előgyújtási szög értékét az aktuális üzemanyagnak megfelelően kell beállítani. A motorra szerelt szerkezet a 13. ábrán látható.



13. ábra: Az előgyújtás állító szerkezet a motoron

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A hidrogén változatos, és a hagyományos tüzelőanyagoktól nagyban eltérő tulajdonságai sokféle motorhajtóanyagként való felhasználási módot tesznek lehetővé. Ezen tulajdonságok többnyire előnyt és hátrányt is jelentenek a motor üzemeltetése során. A sok ellentmondásos tulajdonság mellett azonban a legnagyobb pozitívum, ami a hidrogént az összes többi motorhajtó anyag elé helyezi, hogy égésterméké víz, így használatával környezetbarát motorüzem valósítható meg. Hidrogénmotorok tervezése során a fő cél olyan konstrukció kialakítása, amely a hidrogén, mint tüzelőanyag tulajdonságainak előnyös oldalát maximális mértékben kihasználja, a káros következményeket minimálisra csökkentve. A hagyományos hajtóanyagokhoz hasonlóan a tökéletesség mértékével arányosan növekszik a konstrukció bonyolultsága és költsége.

IRODALOMJEGYZÉK

1. Váradi István (2008). *Diplomaterv: Belsőégésű motorok hidrogén üzeme*, BME Gépjárművek Tanszék
2. Shang, Hsiung. *Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies*
3. *Hydrogen* - Wikipedia www.wikipedia.org
4. Biztonsági Útmutató - *A hidrogén kezelése* www.lindegas.hu
5. U.S.Department of Energy. *Hydrogen & our Energy Future* www.hydrogen.energy.gov
6. *Backfire* – Wikipedia www.wikipedia.org
7. Dr. Frank Tibor, Dr. Kováts Miklós (2004). *Benzinbefecskendező és motorirányító rendszerek*, Maróti Könyvkereskedés és Könyvkiadó Kft. Budapest
8. Szwaja, S., K.R. Bhandary, J.D. Naber. *Comparisons of hydrogen and gasoline combustion knock in a spark ignition engine* www.sciencedirect.com
9. Li Hailin, Ghazi A. Karim. *Knock in spark ignition engines* www.sciencedirect.com
10. Ganesh, R.H., V. Subramanian, A. Ramesh, R.P. Sharma. *Hydrogen fueled spark ignition engine with electronically controlled manifold injection: An experimental study* www.sciencedirect.com
11. Subramanian, V., J.M. Mallikarjuna, A. Ramesh. *Effect of water injection and spark timing on the nitric oxide emission and combustion parameters of a hydrogen fuelled spark ignition engine* www.sciencedirect.com
12. Kahraman Erol, S. Cihangir Ozcanli, Baris Ozerdem. *An experimental study on performance and emission characteristics of a hydrogen fuelled spark ignition engine* www.sciencedirect.com
13. Mazda Magyarország. *A Mazda RENESIS hidrogénüzemű Wankel motorja*, www.mazda.hu
14. Honda Motor Co., Ltd. *Owners manual(2007) - GX390* www.honda-engines.com