



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Kandó Kálmán Gépészeti Tudományok Doktori Iskola

Alternatív motorhajtóanyagok alkalmazása belsőégésű
motorban

Doktori (Ph.D.) disszertáció

Tézisfüzet

Budik György
okleveles gépészmérnök

Témavezető: Dr. Emőd István, egyetemi docens

2011.

1. Előszó

A történelem a világháborúk, és az 1973-as első olajválság idején megmutatta, hogy nem tanácsos egyetlen energiahordozóra alapozni a gazdaságot. Visszanyúlva a motorfejlesztés gyökereihez, újra felmerült a bio üzemanyagok használatának lehetősége, azonban a Föld népességének növekedése, és a jelenleg elterjedt bio üzemanyag előállítási formák miatt emberiességi aggályok merültek fel. A mezőgazdasági hulladékból készített bio üzemanyagok elterjedése még várat magára, elterjedésük hosszú távú megoldást jelenthet a bio üzemanyagok belsőégésű motorokban történő alkalmazásában.

A különböző gáznemű motorhajtóanyagok közül egyedül a hidrogén jelent hosszú távú, nagy mennyiségben előforduló, környezetbarát és megújuló megoldást. Tulajdonságai alkalmassá teszik energiahordozóként történő alkalmazásra. Előállítása villamos energiával vízbontással lehetséges; kémiai úton, tüzelőanyag cellában oxigénnel egyesülve belőle vízgőz jön létre, miközben villamos energia szabadul fel. A folyamat magas hatásfokú, környezetbarát és megújuló, azonban a tüzelőanyag cellák elterjedését magas árak a mai napig akadályozza.

A hidrogént tüzelőanyagként elégethetjük belsőégésű motorban. A megoldás igen előnyös a belsőégésű motorok fejlesztésére, gyártására és üzemben tartására szolgáló kapacitások hosszabb távú felhasználása szempontjából. A hidrogén ezen alkalmazása a fosszilis tüzelőanyagokhoz viszonyítva környezetbarát, fedélzeti tárolása azonban a jelenleg elterjedt megoldásokkal még problematikus.

Irodalomkutatási munkám eredményeképp arra a következtetésre jutottam, hogy az alternatív, megújuló energiahordozók közül a bioetanol, és a hidrogén kiemelkednek, mivel hosszú távon ezek az energiahordozók azok, amelyek versenyképessé válhatnak a szénhidrogénnel szemben. A mobilitás fejlődésének érdekében szükséges ezen tüzelőanyagok belsőégésű motorban történő vizsgálata.

2. Célkitűzés és a téma indoklása

Doktori munkám célja az E85 és hidrogén tüzelőanyag alkalmazása benzin üzemű belsőégésű motorban.

Célkitűzésem a következő volt:

- Ugyanannak a benzin üzemű motornak az átalakítása E85 és hidrogén üzemre, az eredeti benzin üzemre való képesség megtartása mellett, az eredeti kompresszióviszony alkalmazásával.
- A motor optimális beállításainak meghatározása E85 tüzelőanyagra.
- A motor optimális beállításainak meghatározása hidrogén tüzelőanyagra.
- Olyan motorparaméterek meghatározása, amelyek mellett a motor minimális változtatásokkal üzemeltethető benzin, E85 és hidrogén tüzelőanyagokkal.
- A motor üzemének vizsgálata benzin, E85 és hidrogén tüzelőanyag alkalmazásával, a motor üzemi jellemzőinek meghatározása.
- A témával kapcsolatos új tudományos eredmények megfogalmazása.

Doktori disszertációm kereteit a Nemzeti Kutatási és Technológiai Hivatal Jedlik Ányos program „Alternatív energiával működő hidrogén termelő és –tároló rendszer kifejlesztése” projektje határozta meg. A BME Gépjárművek Tanszék a projektet egy négy tagból álló

konzorcium tagjaként valósította meg. A konzorcium egyik tagja az Accusealed Kft., amely világszabadalmat jegyeztetett be egy új típusú hidrogéntermelő és -tároló egységre (továbbiakban HTTE). Ezzel a szabadalommal lehetővé válik a hidrogén normál állapotban való biztonságos fedélzeti tárolása. Tanszékünk kapta azt a feladatot, hogy Dr. Emőd István docens úr vezetésével demonstrációs járművet hozzon létre, mely a HTTE-ben termelt és tárolt hidrogént belsőégésű motorban égeti el.

A demonstrációs járművet soros hibrid hajtáslánccal készítettük. Egy Otto motor-generátor egység tölt akkumulátorokat és ultrakapacitású kondenzátorokat, és villamos kerékagy motorok biztosítják a hajtóerőt.

A demonstrációs járműben alkalmazott, kísérleteimhez használt Otto motor eredeti állapotában benzin üzemű. Feladatom volt megvizsgálni különböző kémiai és fizikai tulajdonságokkal rendelkező tüzelőanyagok (E85 és hidrogén) viselkedését ugyanabban a motorban. Követelmény volt, hogy ugyanazt a kísérleti motort jelentősen különböző tüzelőanyagokra alkalmazzam szerkezeti átalakítások nélkül, és meghatározzam a motor paramétereit. Olyan motorparaméterek meghatározása volt a feladat, melyekkel lehetséges a motor leállítás nélküli átkapcsolása a vizsgált folyékony tüzelőanyagok és a gáznemű tüzelőanyag között.

Változó fordulatszámmal, három jelentősen eltérő tulajdonságú tüzelőanyaggal üzemelő motor létrehozása jelentősen meghaladta volna a projekt kereteit. Így választásom állandó fordulatszámon üzemelő motorra esett, melyhez szinkrongenerátor kapcsolódik. Ezáltal a terhelés változtatható, míg a fordulatszám közel állandó.

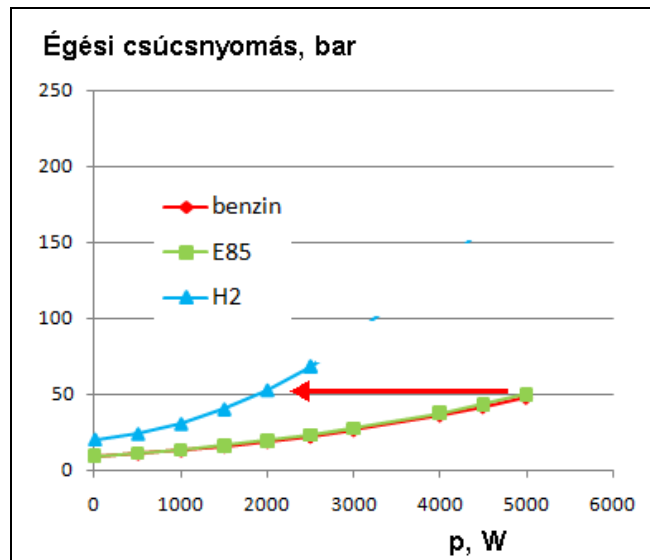
Céлом a kísérleti motor megbízható benzin üzemének megtartása mellett a megbízható E85 és hidrogén üzem létrehozása, vizsgálata, optimalizálása és összehasonlítása volt. Igen fontos volt az átalakítások során, hogy a költségek alacsonyan tartása mellett egy egyszerű és megbízható konstrukció megtervezésével reális alternatívát hozzak létre az alternatív motorhajtóanyagok felhasználására.

3. Eredmények

A vizsgálati teljesítménytartomány meghatározása nyomásindikálással

A motor eredeti benzin üzemének megtartása érdekében a motor kompresszióviszonyát nem módosíthattam. Ez az E85 és a hidrogén üzemanyagban rejlő lehetőségek kihasználását korlátozta, nem állt módomban kihasználni az E85 nagy (105), és a hidrogén igen nagy (130) oktánszámát.

A vizsgálati teljesítménytartomány meghatározásához azt a feltételt szabtam, hogy az égéstér csúcshőmérséklete a motor károsodását megelőzendő ne haladja meg a benzin, illetve E85 üzemi mért csúcshőmérsékletet. Az égéstér csúcshőmérsékletét nyomásindikálással határoztam meg. A gyújtógyertya furatába Kistler 6118B piezokvarc-kristály betétes gyertyát helyeztem jeladóként. A csúcshőmérséklet a különböző motorhajtóanyagokkal a következő ábra szerint alakult.

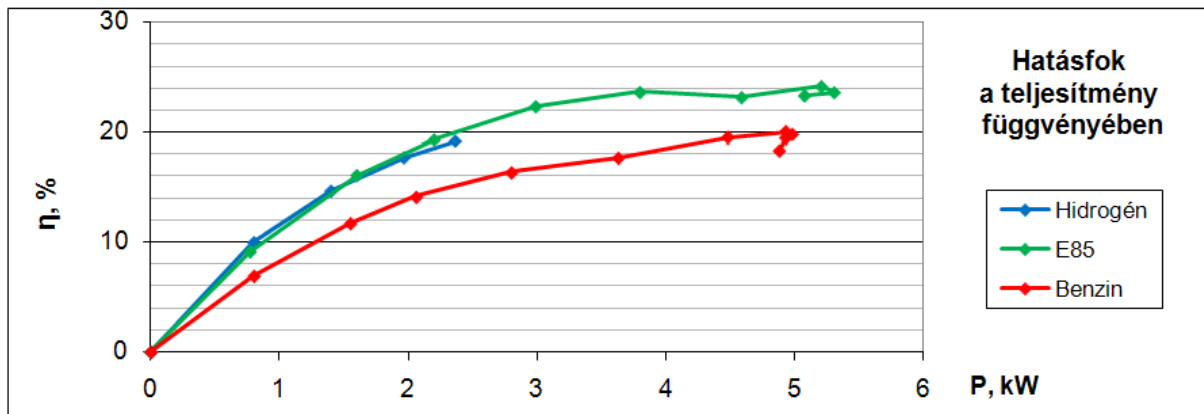


1. ábra: Az égési csúcsnyomás alakulása, hidrogén-, E85 és benzinüzemben, optimális beállításokkal

Benzin és E85 tüzelőanyaggal (a két görbe gyakorlatilag egybe esik) a 3000 fordulathoz tartozó névleges terhelésnél kb. 50 bar csúcsnyomás adódott. A motor károsodását megelőzendő ekkora csúcsnyomást engedtem meg hidrogénüzemre is, ami a motor teljesítményét 2 - 2,5kW-ra korlátozta. Ennek alapján a továbbiakban a hidrogén üzemű méréseket 2,5kW teljesítményhatárig végeztem.

Az optimalizált hidrogén, és E85 üzem

A kutatások során kapott optimum eredmények igazi fokmérője ezek egymással történő összevetése. A disszertációban található diagramok lehetővé teszik a különböző tüzelőanyagokkal üzemelő motor optimum üzeleinek összehasonlítását.



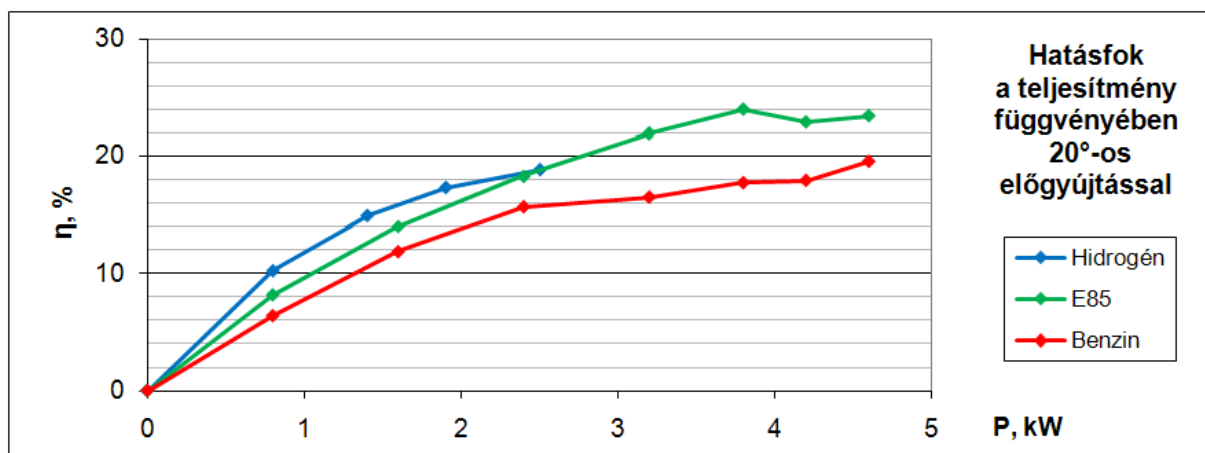
2. ábra: A motor hatásfoka a korrigált teljesítmény függvényében, hidrogén, E85 és benzin üzemben, optimális beállításokkal

Mind E85, mind hidrogén üzemben az összevethető teljesítménytartományban a kísérletek során meghatározott optimum beállításokkal sikerült a gyári benzin üzem hatásfokát jelentősen meghaladni. Figyelemre méltó eredmény az E85 és a hidrogén üzem hatásfok görbéinek közel azonos felfutása. A hatásfokgörbe mind hidrogén, mind E85 üzemben a teljesítmény növekedésével egyre nagyobb értéket mutat a benzin üzem görbéjéhez képest. A diagram vizsgálatakor megállapítható, hogy az átalakítások sikeresek, mert mind hidrogén,

mind E85 üzemben sikerült szinte megegyező hatásfokgörbét kapni a felhasznált tüzelőanyagok jelentősen eltérő tulajdonságai ellenére.

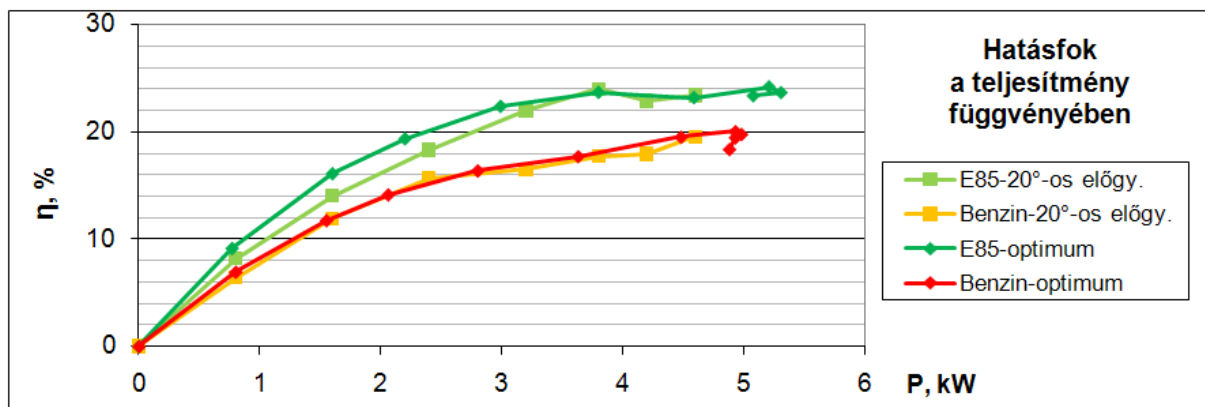
A hidrogén optimális előgyújtásán történt vizsgálatok összehasonlítása

A kísérleti motor kialakításánál tervezési szempont volt, hogy a motor leállítása nélkül lehetséges legyen a gáznemű és folyékony tüzelőanyagok közötti üzemmód váltás. Mivel a motor előgyújtási szögértéke leállítás nélkül nem változtatható, hidrogén üzemben pedig kizárólag az optimális, 20°-os érték mellett kielégítő a motorüzem, ezzel az előgyújtási értékkel vizsgáltam a motort benzin, illetve E85 üzemben is. Az eredmények alapján ezzel a beállítással is kielégítő hatásfokon és fajlagos fogyasztással üzemel a motor. A hidrogén üzemben optimális 20°-os felső holtpont előtti előgyújtás értékkel vizsgált hidrogén, E85 és benzin üzem mérési eredményeinek összehasonlítása a disszertáció diagramjai alapján lehetséges:



3. ábra: A motor hatásfoka a korrigált teljesítmény függvényében, hidrogén, E85 és benzin üzemben, 20°-os előgyújtás értéken

A következő diagram a benzin és E85 üzemanyagok optimált, illetve 20°-os előgyújtással kapott eredményeit hasonlítja össze. A disszertációból megállapítható, hogy optimum üzemben kedvezőbb hatásfok, illetve fogyasztási értékek adódnak. A kísérletek szempontjából lényegesebb, hogy a 20°-os előgyújtási értéken kapott eredmények is kielégítő motorüzemet eredményeznek, az eltérés a különböző előgyújtási értéken kapott eredmények között nem olyan mértékű, ami elfogadhatatlan lenne.



4. ábra: A motor hatásfoka a korrigált teljesítmény függvényében, E85 és benzin üzemben, optimális, illetve 20°-os előgyújtás érték esetén

Az összehasonlító vizsgálat eredményeinek összefoglalása

Az elvégzett tudományos munka eredményeképp kimondhatók a következők:

E85 üzemben, optimális beállításokkal a motor effektív hatásfoka a teljes összevethető teljesítménytartományban meghaladja a benzin üzem hatásfokát. A maximális teljesítmény is nagyobb, mint benzin üzemben. Ez az üzemanyagok kémiai és fizikai tulajdonságainak (párolgáshő, forráspont, fajhő) különbözőségével magyarázható. Az E85 tüzelőanyag benzinhez viszonyítva nagyobb párolgáshője nagyobb töltési fokot eredményez, ezáltal a motor maximális teljesítménye nagyobb.

Hidrogén üzemben, az összevethető teljesítmény tartományban a motor hatásfoka meghaladja a gyári benzin üzem hatásfokát.

Az optimalizált E85 és hidrogén üzem hatásfok görbéi az összevethető teljesítménytartományban közel kongruensek.

Benzin, és E85 üzemben a motor kielégítően üzemel a hidrogén üzemben optimális előgyújtás értéken, a választott tüzelőanyag optimális tüzelőanyag/levegő keverékarányával.

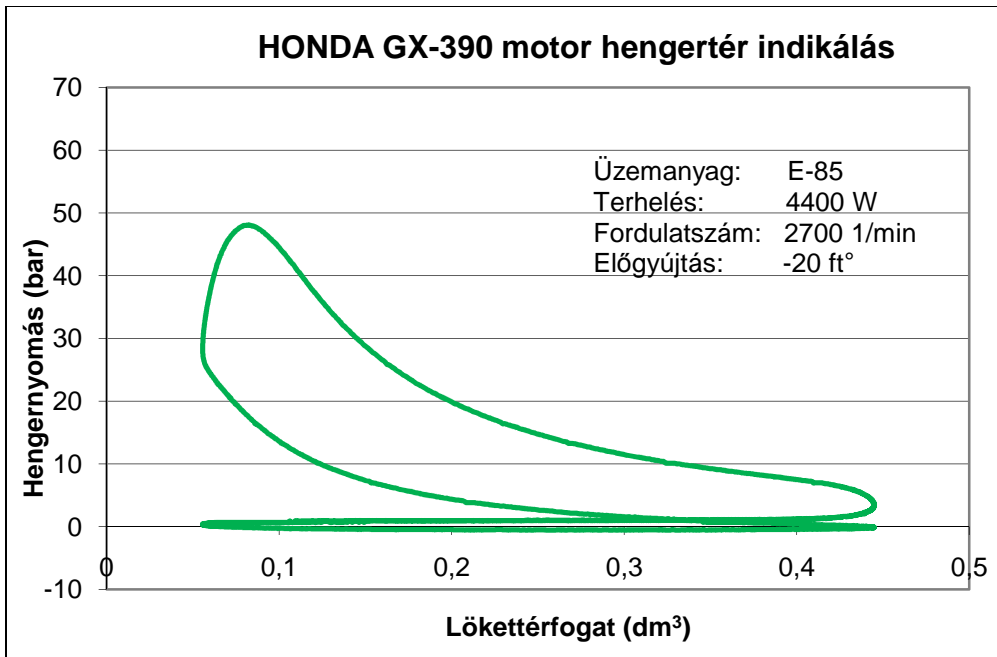
A kapott eredmények megfelelő magyarázatához szükséges a motor légviszonyának, és termodinamikai paramétereinek meghatározása.

A motor termodinamikai számítása

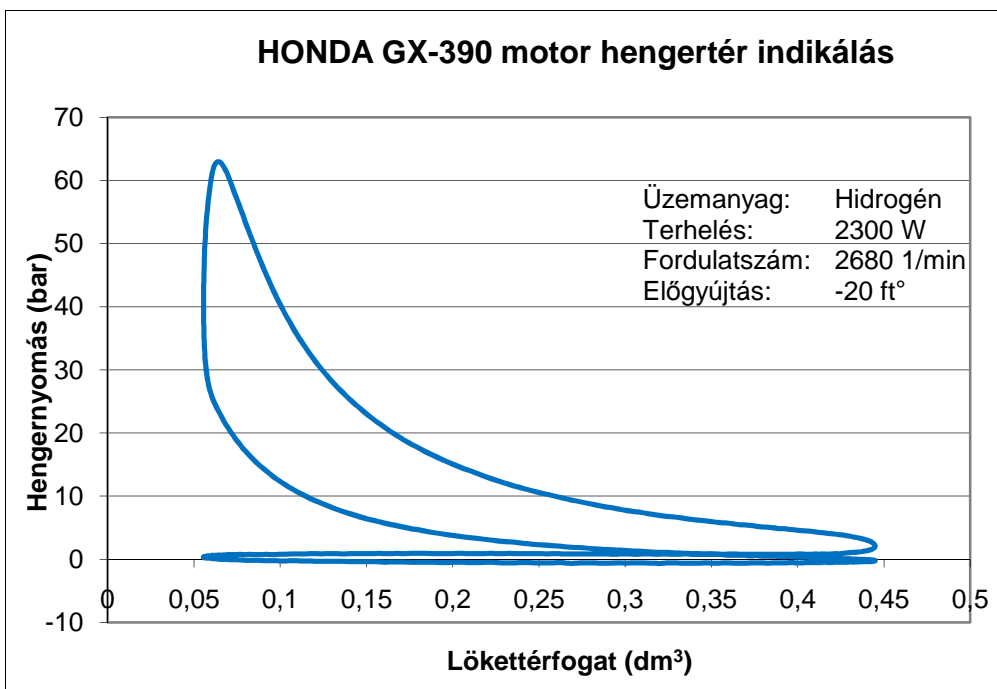
A motor termodinamikai számítása azért szükséges, hogy meghatározzam a motorban zajló folyamatok jellemzőit. A motor üzemének megismerése érdekében célszerű meghatározni a hengerben uralkodó nyomás- és hőmérséklet viszonyokat, valamint a motor légviszonyát. A motor hengertér nyomásindikálásával meghatároztam a motorban uralkodó nyomásviszonyokat, és ezek az értékek szolgáltak bemenő adatokként a termodinamikai számítás elvégzésekor.

A motor termodinamikai számítását először benzin üzemre végeztem el [7] alapján, úgy módosítva a számítás menetét, hogy bemenő adat a motor hengertér indikátor diagramja. Ezután alkalmassá tettem a metódust E85 és hidrogén tüzelőanyaggal üzemelő motor termodinamikai számításainak elvégzésére, majd elvégeztem a motor termodinamikai számítását E85 és hidrogén tüzelőanyagokra. Tézisfüzetemben – a hely rövidege miatt – csak az E85 és hidrogén üzemben kapott számítási eredményeket mutatom be.

A termodinamikai számítást benzin és E85 üzemre a motor által a hidrogén üzemben optimális előgyújtást alkalmazva, a leadott maximális teljesítmény és az ehhez tartozó fordulatszám esetére végeztem. Az indikátordiagramok vizsgálatakor látható, hogy nem az optimális üzem vizsgálata történik. Ennek oka az a tervezési kritérium, hogy a motor leállítás nélkül átkapcsolható legyen a folyékony üzemanyagok és hidrogén között. A gyújtási rendszer azonban nem teszi lehetővé a leállítás nélküli előgyújtás változtatást. A vizsgálat célja a motorban uralkodó nevezetes hőmérsékletek és a légviszony megállapítása.



5. ábra: A motor hengertér indikálás p-V diagramja E85 üzemben



6. ábra: A motor hengertér indikálás p-V diagramja hidrogén üzemben

Olyan számítási módszert dolgoztam ki, amellyel az indikátor diagram ismeretében a kísérleti motor termodinamikai folyamatainak lényeges paraméterei meghatározhatók. A kapott eredmények az alábbi Excel táblázatokban találhatóak.

A munkapont adatai			
fordulatszám	n	2700	1/min
leadott teljesítmény	P	4400	W
Számított értékek			
dugattyú középsebesség	c_k	5,76	m/s
hőmérsékletváltozás	Δt	25	K
	T'_0	318	K
A szívás folyamata			
szívási végnyomás	p_1	88325	Pa
levegő sűrűsége a szívóvezetékben	ρ	0,603	kg/m ³
	Δp_r	8000	Pa
visszamaradó gázok nyomása	p_r	109325	Pa
visszamaradó gázok hőmérséklete	T_r	950	K
szívási véghőmérséklet	T_1	354	K
levegő sűrűsége a szívás végén	ρ_{sz}	0,868	kg/m ³
A sűrítés folyamata			
sűrítés politrópikus kitevője	n_1	1,64	
sűrítési végnyomás	p_2	2673937	Pa
sűrítési véghőmérséklet	T_2	741	K
Az égés folyamata			
tüzelőanyag tömeg szerinti összetétele			
szén	g_c	0,571	kg/kg
hidrogén	g_{H_2}	0,132	kg/kg
oxigén	g_{O_2}	0,297	kg/kg
légvizony	α	1,1	
elméletileg szükséges légmennyiség	L_0	0,339	Mol
tényleges légmennyiség	L	0,373	Mol
visszamaradó gázok tényezője	ψ	0,061	
visszamaradó gázok tömege molban	M_r	0,023	Mol/kg
égési előtti keverék a hengerben	M_2	0,396	Mol/kg
égéstermék mennyisége	M_f	0,408	Mol
égéstermék az égés végén	M_3	0,431	Mol
2. és 3. közötti molváltozási tényező	μ	1,088	
hőkihasználási tényező	ξ	0,744	
molhő	c_{v2}	92,4	kJ/MolK
molhő	c_{v3}	98,7	kJ/MolK
égési véghőmérséklet	T_3	2040	K
égési végnyomás	p_3	4812569	Pa
a gyertya és a henger legtávolabbi pontjának távolsága	h	0,085	mm
égési idő	τ_e	0,0021	s
égés átlagos sebessége	c_e	40,5	m/s
égési időre eső főtengelyelfordulás	θ	35,60	° ft
gyújtás helye a FHP előtt	θ_{gy}	20	° ft
maximális nyomás helye a FHP után	θ_{pmax}	27,2	° ft
	b	0,1	
FHP nyomás	p'_3	2887800	Pa
expanzió politrópikus kitevője	n_2	1,015	
nyomás a 4. pontban	p_4	582675	Pa
hőmérséklet a 4. pontban	T_4	1186	K
A kipufogás folyamata			
kipufogószelep nyitás az AHP előtt	θ_k	14	° ft

expanzióviszony	δ	4,978	
	p'_4	943131	Pa
	T'_4	1294	K
kitolás látszólagos politr. kitevője	n_3	1,343	
visszamaradó gázok hőmérséklete	T'_r	745	K
nyomás az AHP-ban	p'_k	346000	Pa

1.táblázat: Az E85 üzemű számítás Excel-táblázata

A munkapont adatai			
fordulatszám	n	2680	1/min
leadott teljesítmény	P	2300	W
Számított értékek			
dugattyú középsebesség	c_k	5,717	m/s
hőmérsékletváltozás	Δt	25	K
	T'_0	318	K
A szívás folyamata			
szívási végnyomás	p_1	77325	Pa
levegő sűrűsége a szívóvezetékben	ρ	0,603	kg/m ³
	Δp_r	8000	Pa
visszamaradó gázok nyomása	p_r	109325	Pa
visszamaradó gázok hőmérséklete	T_r	949	K
szívási véghőmérséklet	T_1	360	K
levegő sűrűsége a szívás végén	ρ_{sz}	0,748	kg/m ³
A sűrítés folyamata			
sűrítés politrópikus kitevője	n_1	1,664	
sűrítési végnyomás	p_2	2460716	Pa
sűrítési véghőmérséklet	T_2	833	K
Az égés folyamata			
tüzelőanyag tömeg szerinti összetétele			
szén	g_c	0	kg/kg
hidrogén	g_{H_2}	1	kg/kg
oxigén	g_{O_2}	0	kg/kg
légvizony	α	2,466	
elméletileg szükséges légmennyiség	L_0	1,190	Mol
tényleges légmennyiség	L	2,935	Mol
visszamaradó gázok tényezője	ψ	0,072	
visszamaradó gázok tömege molban	M_r	0,211	Mol/kg
égési előtti keverék a hengerben	M_2	3,146	Mol/kg
égéstermék mennyisége	M_f	3,185	Mol
égéstermék az égés végén	M_3	3,396	Mol
2. és 3. közötti molváltozási tényező	μ	1,079	
hőkihasználási tényező	ξ	0,746	
molhő	c_{v2}	21,38	kJ/MolK
molhő	c_{v3}	24,71	kJ/MolK
égési véghőmérséklet	T_3	1734	K
égési végnyomás	p_3	6280441	Pa
a gyertya és a henger legtávolabbi pontjának távolsága	h	0,085	mm
égési idő	τ_e	0,0012	s
égés átlagos sebessége	c_e	70,83	m/s
égési időre eső főtengelyelfordulás	θ	20,21	° ft
gyújtás helye a FHP előtt	θ_{gy}	20	° ft

maximális nyomás helye a FHP után	θ_{pmax}	14,55	° ft
	b	0,419	
FHP nyomás	p'_3	4061181	Pa
expanzió politrópikus kitevője	n_2	1,452	
nyomás a 4. pontban	p_4	306875	Pa
hőmérséklet a 4. pontban	T_4	1017	K
A kipufogás folyamata			
kipufogószelep nyitás az AHP előtt	θ_k	14	° ft
expanzióviszony	δ	4,978	
	p'_4	610930	Pa
	T'_4	1176	K
kitolás látszólagos politr. kitevője	n_3	1,344	
visszamaradó gázok hőmérséklete	T'_r	757	K
nyomás az AHP-ban	p'_k	208100	Pa

2. táblázat: A hidrogénüzemű számítás Excel-táblázata

Értékelés

Az indikátor diagram alapján számított motorparaméterek ellenőrzése érdekében a kísérleti motor fent bemutatott munkapontjaiban kipufogógáz elemző műszerrel analízist végeztem Saxon Infralyt CL típusú kipufogógáz elemző műszerrel, mely szerviz szintű pontosságot tesz lehetővé. Ezt elegendőnek tartom a számítási módszer helyességének ellenőrzésére. A következő összetevőket vizsgáltam: O₂, CO, CO₂. A vizsgálat során a következő értékeket mértem:

Tüzelőanyag	O ₂ (V/V%)	CO (V/V%)	CO ₂ (V/V%)
Benzin	1,08	0,865	18,19
E85	1,84	0,372	11,07
Hidrogén	12,7	0,008	0,09

3. táblázat: A kipufogógáz összetétele

Benzin üzemben a műszer képes a légviszony mérésére. A műszer a Brettschneider formulát használja a mért adatokból a légviszony számítására, így a műszer E85 és hidrogén üzemben a formula benzinre alkalmazott állandói miatt hamis légviszony értékeket számít. E85, és hidrogén üzemben a következő, egyszerűsített, becslő képlettel kiszámolva a légviszonyt:

$$\alpha = 21 / (21 - O_2) \quad [8]$$

A következő légviszony értékeket kaptam:

Tüzelőanyag	α (számított)	α (mért)
Benzin	1	0,986
E85	1,1	1,096
Hidrogén	2,466	2,53

4. táblázat: A mért és számított légfelesleg tényezők

A számítások helyességét igazolja, hogy benzin, E85 és hidrogén üzem esetén is a számított eredmények, valamint a mért eredmények közötti különbség igen csekély. Így benzin üzemben sztöchiometrikus keverékkel ($\alpha=1$), E85 üzemben kissé szegény keverékkel ($\alpha=1,1$), és hidrogén üzemben erősen szegény keverékkel ($\alpha=2,466$) üzemel a motor. A termodinamikai számítás során kapott hőmérséklet értékek ugyancsak indokolják, hogy miért volt lehetséges az E85 és hidrogén üzemre történő átalakítás a motor szerkezeti egységeinek átalakítása nélkül.

4. Összefoglalás, következtetések, kitekintés

Összefoglalás, következtetések

A kitűzött feladatokat sikerült teljesítenem.

A motor szerkezeti átalakítása nélkül, az eredeti 8:1 kompresszióviszony megtartásával üzemképessé tettem a kísérleti motort E85 és hidrogén üzemre.

Az adott, benzin üzemre optimális kompresszióviszony megtartása mellett hidrogén üzemben az optimális légviszonyt ($\alpha=2,466$) és előgyújtási szöget (20° FHP előtt) meghatároztam. Kihasználtam a hidrogén/levegő keverék széles gyulladási határát, ezzel a sztöchiometrikusnál lényegesen szegényebb keverék vált alkalmazhatóvá, normális égés mellett, jó hatásfokon.

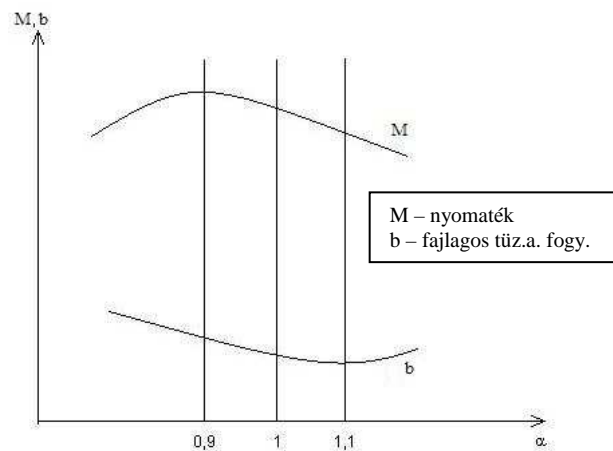
Hidrogén üzemben $\alpha > 2,466$ esetén a motor égési ciklusai nem egyenlők, gyújtáskimaradás és teljesítménycsökkenés lép fel. $\alpha < 2,466$ során detonációs égést tapasztaltam. Ennek oka, hogy hiába széles a hidrogén/levegő keverék gyulladási határa, annak motorban történő alkalmazhatósága szűk beállítási tartományban lehetséges csupán. Az erős hígítás csökkenti az égési sebességet, ezzel magyarázom, hogy hidrogén üzemben a keverék égési sebessége csak 40%-al haladja meg a benzin üzemű keverék égési sebességét. Ezáltal alkalmazható a hidrogén tüzelőanyag benzin üzemű motorban.[4]

A motorban zajló égés turbulens. „A lamináris égés sebességét gyakorlatilag egyértelműen meghatározza a láng tovaterjedési sebessége. A motorban a lángfront szélessége és az égés ideje olyan kicsi, hogy befolyásuk az égés sebességére elhanyagolható. Turbulens lángfrontban a turbulens pulzáció a lángfront felszínét erősen deformálja, s egyúttal a lángfront sebességét megnöveli.”[4] Ez a turbulencia a motorban alkalmazott benzin, E85 és hidrogén tüzelőanyagok lamináris égési sebességei közötti különbséget csökkenti, ezáltal alkalmazható ugyanaz a motor mindhárom tüzelőanyagra.[4]

E85 üzemben az optimális beállítások a következők: $\alpha=1,1$; előgyújtási szög 40° FHP előtt. A benzin üzem gyári beállításaihoz ($\alpha=1$, előgyújtási szög 25° FHP előtt) képest a különbségek a tüzelőanyagok kémiai (anyag-összetételbeli) és fizikai tulajdonságainak különbözőségével magyarázhatók. A benzin és a bioetanol párolgási tulajdonságai lényegesen különböznek. A bioetanol forráspontja $78,3^\circ\text{C}$, a vizsgált motorbenzin közepes forrási hőmérséklete (az Ostwald féle Z jellemző, Siede-Kennziffer) $Z \sim 110^\circ\text{C}$ [4]. Azonban az E85 tüzelőanyag párolgáshője 825kJ/kg , míg a benziné 335kJ/kg . Habár a bioetanol forráspontja alacsonyabb a benzin közepes forrási hőmérsékleténél, az E85 párolgáshője lényegesen nagyobb, mint a benzin párolgáshője, ami magyarázatot ad az optimális előgyújtások különbözőségére. Az E85 nagyobb párolgáshője magyarázza a benzin üzemhez képest elérhető nagyobb teljesítményt, mivel a nagyobb párolgáshő jobban hűti a hengerben lévő keveréket, ezáltal a töltési fok nagyobb.

A szegény keverék optimális voltát indokolja, hogy kísérleteim bebizonyították, hogy a motor sztöchiometrikus E85/levegő keverék használatával sem képes a mérési pontatlanságnál nagyobb teljesítménytöbblet leadására a szegény keverékhez viszonyítva, dúsabb ($\alpha=0,9$) keverék használatával pedig indítási problémák léptek fel. A szegény E85/levegő keverék használata fogyasztáscsökkentést eredményezett a sztöchiometrikus keverék használata során mért fogyasztás értékekhez hasonlítva.

A motor hatásfoka E85 üzemben a teljes teljesítmény tartományban nagyobb, mint benzin üzemben. Ennek egyik oka a tüzelőanyagok fizikai és kémiai tulajdonságai közötti különbségek, másik oka a légviszonyok különbözősége. Míg gyári benzin üzemben a keverék sztöchiometrikus ($\alpha=1$), addig E85 üzemben a keverék kissé szegény ($\alpha=1,1$).



7. ábra: Motorjellemezők a légfelesleg tényező függvényében Otto-motor esetén [8]

Otto-motor hatásfoka a disszertációban bemutatott számításaim alapján fordítottan arányos a fajlagos fogyasztással. Így a fenti ábra alapján a motor hatásfoka $\alpha=1,1$ környékén a legnagyobb, míg teljesítménye $\alpha=0,9$ körül.[8]

A célszerűség érdekében a motornak – a tüzelőanyagok közötti leállítás nélküli átkapcsoláshoz – fix előgyújtási szögértéken kellett üzemelnie. Ez az előgyújtási szög a hidrogén számára optimális 20° FHP előtti szöget jelentette, mert hidrogén üzemben kizárólag ezen a szögértéken üzemelt a motor égésproblémáktól mentesen. Ezen előgyújtási szögérték használata mellett a különböző tüzelőanyagoknál alkalmaztam a korábban meghatározott optimális keverék arányokat, melyekkel sikerült a motort három igen különböző tüzelőanyaggal üzemeltetnem. Megvizsgáltam a benzin és az E85 üzem jellemzőit a hidrogén számára optimális előgyújtáson, és úgy ítéltm, hogy nem eredményez olyan hatásfok csökkenést, ami elfogadhatatlan lenne. A jelenlegi motoron az állandó 20° FHP előtti előgyújtási szög kompromisszum, ez további fejlesztési lehetőség a jövőben.

A motor termodinamikai számítását elvégeztem benzin, E85 és hidrogén üzemre. A korábban említett okok folytán a hidrogén számára optimális 20° FHP előtti előgyújtáson, az ehhez az előgyújtáshoz tartozó maximális teljesítményen, optimális keverékarányokkal, hengertér indikálással mértem a motor hengertér nyomását. Az így kapott nyomás értékek szolgáltak bemenő adatokként a számítások elvégzéséhez. E85 és hidrogén üzemre átalakítottam és alkalmaztam a számítás metódusát. Mindhárom üzemanyaggal meghatároztam a motor körfolyamatának nevezetes hőmérsékleteit és a légviszonyt. A módszer helyességét igazolta, hogy a kipufogógáz összetétel elemzésével kapott légviszony értékek megfeleltek a számított értékeknek.

Kitekintés, további fejlesztési lehetőségek

A demonstrációs jármű motorja munkám eredményeképp megfelel a tervezési kritériumokban megfogalmazottaknak. Az eredeti benzin üzem lehetőségének megtartása mellett, a motor szerkezeti elemeinek módosítása nélkül, az eredeti 8:1 kompresszióviszony megtartásával

megbízható E85 és hidrogén üzemet hoztam létre. Mindkét alternatív tüzelőanyag alkalmazásával hatásfok növekedést értem el az eredeti benzin üzemhez viszonyítva.

További fejlesztési lehetőség a motor átalakítása az eredeti mágnes tranzisztoros gyújtásról elektronikus gyújtásra. Az elektronikus gyújtás előnye a motor leállítása nélküli előgyújtás változtatás lehetősége. Használatával lehetőség lenne arra, hogy a motor folyékony tüzelőanyaggal is optimális előgyújtással üzemeljen, továbbra is kielégítve azt a kiinduló tervezési kritériumot, hogy a motor leállítás nélkül átkapcsolható legyen folyékony és hidrogén tüzelőanyag között.

A motor keverékképző rendszere szintén további fejlesztési lehetőségre adna módot. A jelenlegi karburátoros keverékképzés használatával ugyan a motor kielégítően üzemel, azonban elektronikusan vezérelt közvetlen befecskendezés használatával a folyékony tüzelőanyagok esetén a töltési fok növekedne. Ennek oka, hogy a tüzelőanyagot közvetlenül a hengertérbe fecskendezve annak párolgása a hengertérben történik, és ez hőt von el a rendszerből. Ezen kívül a rendkívül precíz, nagy nyomású (~200bar) befecskendezés lehetőséget adna a tüzelőanyag/levegő keverékarány terheléstől függő változtatására, amellyel a motor hangolása akár leállítás nélkül lehetséges lenne.

További fejlesztési lehetőség változtatható fordulatszámú motor alkalmazása. A gyújtásrendszer, és a keverékképző rendszer fent bemutatott fejlesztései lehetővé tennék változtatható fordulatszámú motor alkalmazását. Ezzel a soros hibrid hajtásláncnál egyszerűbb, konvencionális hajtásláncban is alkalmazható lenne ugyanaz a motor benzin, E85 és hidrogén tüzelőanyagra.

Doktori disszertációmban bemutattam, hogy E85 és hidrogén tüzelőanyag alkalmazása miként valósítható meg benzinmotorban, létrehozva egy mindhárom tüzelőanyagra alkalmazható belsőégésű motort. A bemutatott módszerek alkalmasak további alternatív, megújuló tüzelőanyagok vizsgálatára, alkalmazására. További fejlesztési lehetőség a motort alkalmassá tenni pl. biogáz tüzelőanyag felhasználására. Sajnálatosan a fenti fejlesztési lehetőségek jelentősen meghaladták volna a projekt kereteit.

5. Tézisek

1. Bebizonyítottam, hogy egy karburátoros, állandó fordulatszámon üzemelő négyütemű belsőégésű benzinmotor szerkezeti átalakítások nélkül, a benzin üzem 8:1 kompresszióviszonyát, és a benzin üzemre való alkalmasságát megtartva átalakítható égésproblémáktól mentes E85 üzemre. Meghatároztam a motor optimális beállításait: a motor előgyújtását E85 üzemben 25°-os felső holtpont előtti előgyújtás értékről 40°-os felső holtpont előtti előgyújtás értékre módosítottam, a karburátor fúvókáját 0,92mm hidraulikai átmérőről 1,08mm hidraulikai átmérőjűre változtattam meg.. A motor az optimalizált E85 üzemben a benzin üzemben elérhetőnél nagyobb maximális teljesítmény leadására képes, és hatásfoka a teljes teljesítmény spektrumon meghaladja a benzin üzem hatásfokát. Kiindulva a benzin üzemre ismert módszerből kidolgoztam a motor termodinamikai számításának metódusát E85 üzemre. Számítással meghatároztam az E85 üzemre optimalizált motor légviszonyát ($\alpha=1,1$) és termodinamikai jellemzőit. [5.4, 5.5, 6.2, 7.1, 8.2 fejezet]

2. Bebizonyítottam, hogy egy karburátoros, szinkrongenerátorral összekapcsolt négyütemű belsőégésű benzinmotor szerkezeti átalakítások nélkül, a benzin üzem 8:1 kompresszióviszonyát, és a benzin üzemre való alkalmasságát megtartva átalakítható égésproblémáktól mentes hidrogén üzemre, atmoszferikus nyomású és szobahőmérsékletű hidrogént biztosító ellátó rendszer alkalmazásával. Meghatároztam a motor optimális beállításait: a motor előgyújtását hidrogén üzemben 25°-os felső holtpont előtti előgyújtás értékről 20°-os felső holtpont előtti előgyújtás értékre módosítottam, és a hidrogén adagoló fúvóka megfelelő méretét kiválasztottam ($D=4,8\text{mm}$). Az optimalizált hidrogén üzemben a motor hatásfoka a teljes összevethető teljesítmény spektrumon meghaladja a benzin üzem hatásfokát. Kiindulva a benzin üzemre ismert módszerből kidolgoztam a motor termodinamikai számításának módszerét hidrogén üzemre. Számítással meghatároztam a hidrogén üzemre optimalizált motor légviszonyát ($\alpha=2,466$) és termodinamikai jellemzőit. [5.4, 5.5, 6.3, 7.1, 8.3 fejezet]
3. Kimutattam, hogy állandó fordulatszámon üzemelő négyütemű benzin üzemű belsőégésű motort szerkezeti módosítások nélkül hidrogén üzemre átalakítva és optimalizálva – a benzin üzem eredeti 8:1 kompresszióviszonyát és a benzin üzemre való alkalmasságát bizonyos kompromisszumokkal megtartva – a hidrogén üzemben elérhető maximális teljesítményt a motor eredetileg benzin üzemre való méretezése miatt az égési csúcsnyomás korlátozza. [5.4, 5.5, 6.3, 7.1 fejezet]
4. Bebizonyítottam, hogy ugyanazt az állandó fordulatszámon üzemelő négyütemű benzin üzemű belsőégésű motort szerkezeti módosítások nélkül E85, vagy hidrogén üzemre átalakítva és optimalizálva – a benzin üzem eredeti 8:1 kompresszióviszonyát és a benzin üzemre való alkalmasságát bizonyos kompromisszumokkal megtartva – a motor hatásfok görbéi a hidrogén üzem megengedett teljesítményspektrumán E85 és hidrogén üzem esetén – a tüzelőanyagok megfelelő optimális beállításokkal – közel kongruensek. [6.2, 6.3, 7.1 fejezet]
5. Igazoltam, hogy állandó fordulatszámon üzemelő négyütemű benzin üzemű belsőégésű motort szerkezeti módosítások nélkül hidrogén üzemre átalakítva és optimalizálva – a benzin üzem eredeti 8:1 kompresszióviszonyát és a folyékony tüzelőanyagra (benzin, vagy E85) való alkalmasságát bizonyos kompromisszumokkal megtartva – a motor a hidrogén számára optimális előgyújtás értéken (20° a felső holtpont előtt) kielégítően üzemel benzin, illetve E85 üzemben, a választott folyékony tüzelőanyag optimális tüzelőanyag/levegő keverékarányával. [6.1, 6.2, 6.3, 7.2, 7.3, 8.1, 8.2 fejezet]

6. A témához kapcsolódó publikációim

Budik György

Hydrogen Based Operation of Internal Combustion Engines

Járművek és Mobilgépek, No.3., (2008), pp. 205-221

HU ISSN: 2060-4408

http://www.vehicles.hu/dec/dec/-5-budikgyorgyangol2008december206_221.pdf

Budik György

Conversion of Internal Combustion Engine from Gasoline to E85 Fuel

Periodica Polytechnica Transportation Engineering (2010 – 38/1.)

HU ISSN: 0303-7800 (papír alapú)

HU ISSN: 1587-3811 (elektronikus, kereshető forma)

www.pp.bme.hu

Budik György

Hidrogén felhasználási lehetőségei belsőégésű motorok üzemanyagaként

Járművek és Mobilgépek, II. évf. (2009) No. 1., pp. 222 – 236

HU ISSN: 2060-4408

<http://www.vehicles.hu/jan/jan/budzik.pdf>

Budik György

Belsőégésű motor átalakítása E85 üzemre

Járművek és Mobilgépek, II. évf. (2009) No. IV., pp. 372 - 396

HU ISSN: 2060-4408

http://vehicles.hu/apr/budik_372_396.pdf

Dr. Emőd István, Budik György

Belsőégésű motor átalakítása hidrogén üzemre

A jövő járműve, 2009/3-4

HU ISSN: 1788-2699

http://www.sze.hu/~jret/AJJ/AJJ_200934.pdf

7. Irodalomjegyzék

Könyv:

1. Dezsényi Gy., Emőd I., Finichiu L.: *Belsőégésű motorok tervezése és vizsgálata*
2. kiadás. Nemzeti Tankönyvkiadó Rt., Budapest, 1992.
2. Emőd I., Tölgyesi Z., Zöldy M.: *Alternatív járműhajtások*
Maróti Könyvkereskedés és Könyvkiadó Kft., Budapest, 2006.
3. Kalmár I., Stukovszky Zs.: *Belsőégésű motorok folyamatai*
Műegyetemi kiadó, Budapest, 1998.
4. Sitkei Gy.: *Kevertérféregés és égés karburátoros motorokban*
Akadémiai kiadó, Budapest, 1969.
5. Sitkei Gy.: *Hőátadás és hőterhelés belsőégésű motorokban*
Akadémiai kiadó, Budapest, 1962.
6. Pásztor E., Szoboszlai K.: *Kalorikus gépek üzemre*
Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1967.
7. Vas A.: *Kalorikus gépek*
Szent István Egyetem kiadó, Gödöllő, 2000.

8. Meggyes A.: *Hőerőgépek égéstermékei okozta levegőszennyezés*
Műegyetemi kiadó, Budapest, 1993.
9. Frank T., Kovács M.: *Benzinbefecskendező és motorirányító rendszerek*
Maróti Könyvkereskedés és Könyvkiadó Kft., Budapest, 2004.
10. Kovács M., Nagyszokolyai I., Szalai L.: *Dízel befecskendező rendszerek*
Maróti Könyvkereskedés és Könyvkiadó Kft., Budapest, 2005.
11. Martyr A.J., Plint M.A.: *Engine Testing, Theory and Practice*
SAE International, Elsevier Ltd., Oxford, UK, 2007.
12. Drane, K.B.: *Convert Your Car to Alcohol*
Love Street Books, Louisville, Kentucky 40258, USA, 1980.
13. Lippman R.: *How to Modify Your Car to Run on Alcohol Fuel*
U.S. Dept. of Energy, Appropriate Technology, 1982.

Tanulmány, pályázati beszámoló:

14. Emőd I., Finichiu L., Keszthelyi K., Varga F.: *Alternatív motor-hajtóanyag előállítási és felhasználási lehetőségek. I-IV. kötet.* (Szerkesztette: Tóth L.)
Tanulmány az OMFB részére. Gödöllő, 1992.
15. Emőd I.: *Alkohol hajtóanyag alkalmazása Otto-motorokban*
Mebízó: Győri Olajipari Rt, 1995.
16. *A hidrogén felhasználása belsőégésű motorokban* – BME Gépjárművek Tanszék, Dr. Emőd István és Kádár Lehel irányításával. Budapest, 2008.
17. *Hidrogén-benzinüzemű motor kialakítása, I. rész* – BME Gépjárművek Tanszék, Dr. Emőd István és Kádár Lehel irányításával. Budapest, 2008.
18. *Hidrogén-benzinüzemű demonstrációs jármű célterve* – BME Gépjárművek Tanszék, Dr. Emőd István és Kádár Lehel irányításával. Budapest, 2008.
19. *A demonstrációs jármű tervezése és kivitelezése* – BME Gépjárművek Tanszék, Dr. Emőd István és Kádár Lehel irányításával. Budapest, 2009.
20. *Hidrogén-benzinüzemű motor kialakítása, II. rész* – BME Gépjárművek Tanszék, Dr. Emőd István és Kádár Lehel irányításával. Budapest, 2009.
21. *Nyári gyakorlat beszámoló* – Erdős Péter (Konzulens: Budik György), BME Gépjárművek Tanszék. Budapest, 2009.
22. *Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies* – College of the Desert, Palm Desert, CA, USA, 2001.

Pályázat:

23. *Mezőgazdasági termékekből és hulladékokból előállítható hajtóanyagok belsőégésű motorok tüzelőanyagaként történő alkalmazása* – BME Gépjárművek Tanszék, témavezető: Emőd István. OM KTF pályázat, KMFP-0003/2002. 2003-2004.
24. *Újratermelhető motorhajtóanyagok gépjármű- és mezőgazdasági motorok tüzelőanyagaként történő alkalmazása* – BME Gépjárművek Tanszék, témavezető: Emőd István. Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium KTKF pályázat, K-36-02-00099H. 2002-2003

Folyóirat cikk:

25. Budik Gy.: *Hydrogen Based Operation of Internal Combustion Engines*
Járművek és Mobilgépek, No.3., 2008. pp. 205-221, HU ISSN: 2060-4408
26. Budik Gy.: *Conversion of Internal Combustion Engine from Gasoline to E85 Fuel*
Periodica Polytechnica, HU ISSN: 0303-7800
27. Budik Gy.: *Hidrogén felhasználási lehetőségei belsőégésű motorok üzemanyagaként*
Járművek és Mobilgépek, II. évf. No.1., 2009. pp. 222 – 236, HU ISSN: 2060-4408
28. Budik Gy.: *Belsőégésű motor átalakítása E85 üzemre*
Járművek és Mobilgépek, II. évf. No.4., 2009. pp. 372 – 396, HU ISSN: 2060-4408

29. Emőd I., Budik Gy.: *Belsőégésű motor átalakítása hidrogén üzemre*
A jövő járműve, 2009/3-4, HU ISSN: 1788-2699
30. Emőd I.: *Környezetkímélő motorhajtóanyagok*
Környezet és fejlődés, 5.k. 7.sz. 1995. p.24-26.
31. Hailin Li, Ghazi A. Karim.: *Knock in Spark Ignition Engines*. www.sciencedirect.com
32. Szwaja S., Bhandary K.R., Naber J.D.: *Comparisons of Hydrogen and Gasoline Combustion Knock in a Spark Ignition Engine*. www.sciencedirect.com
33. Ganesh R.H., Subramanian V., Ramesh A., Sharma R.P.: *Hydrogen Fuelled Spark Ignition Engine with Electronically Controlled Manifold Injection: An experimental study*. www.sciencedirect.com
34. Subramanian V., Mallikarjuna J.M., Ramesh A.: *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
35. Heffel W.J.: *NO_x Reduction in a Hydrogen Fuelled Internal Combustion Engine at 3000 rpm Using Exhaust Gas Recirculation*. www.sciencedirect.com
36. Kahraman E., Ozcanli S.C., Ozerdem B.: *An Experimental Study on Performance and Emission Characteristics of a Hydrogen Fuelled Spark Ignition Engine*.
www.sciencedirect.com
37. Mohammadi A., Shioji M., Nakai Y., Ishikura W., Tabo E.: *Performance and Combustion Characteristics of a Direct Injection SI Hydrogen Engine*.
www.sciencedirect.com

Előadás:

38. Budik Gy.: *Belsőégésű motorok hidrogén üzeme*
IFFK-MMA Konferencia, Budapest, 2008.
39. Budik Gy.: *Hydrogen Based Operation of Internal Combustion Engines*
JUMV Konferencia, Belgrád, 2009.
40. Budik Gy.: *Hydrogen Based Operation of Internal Combustion Engines*
Poszter prezentáció, EAEC Konferencia, Pozsony, 2009.
41. Budik Gy.: *Hidrogén felhasználási lehetőségei belsőégésű motor üzemanyagaként*
Gépipari Tudományos Egyesület, Vezetőségi ülés, Budapest, 2010.
42. Emőd I., Kádár L., Budik Gy.: *Demonstrációs jármű kifejlesztése és kivitelezése*
AutoDiga kiállítás, Győr, 2010. november 9.
43. Emőd I.: *Alternatív tüzelőanyagok felhasználásának lehetőségei az autóbusz üzemben*.
XXIII. Autóbusz Szakértői Tanácskozás, Tata, 1992.
44. Emőd I., Abonyi Tóth I.: *Környezetbarát motorhajtóanyagok*
Kutatás és Oktatás a Környezetvédelemért Konferencia, Veszprém, 1993.
45. Emőd I., Finichiu L., Varga F.: *Alternatív tüzelőanyagokkal Magyarországon végzett kísérletek*. IX. Nemzetközi Közúti Fuvarozási és Közlekedésbiztonsági Konferencia,
Budapest, 1992.
46. Emőd I.: *Alternatív gépkocsihajtások környezetszennyezése*
Smog-Stop Környezetvédelmi Konferencia, Budapest, 1992.
47. Gross K.: *The Reversible Hydrides Solution for Hydrogen*
G-CEP Hydrogen workshop, Stanford University, California, USA, 2003.
48. Padro C.: *Hydrogen from Renewable Resources*
G-CEP Hydrogen workshop, Stanford University, California, USA, 2003.
49. Schoonman J.: *Sustainable Hydrogen, a European Perspective*
G-CEP Hydrogen workshop, Stanford University, California, USA, 2003.

Internet:

50. Maierhofer H.: *Ethanol-Initiative Bayern – Markteinführung von E85 am Beispiel von Straubing*, www.carmen-ev.de
51. *Biztonsági útmutató – A hidrogén kezelése*, www.lindegas.hu
52. *Honda GX390 Engine*, www.honda-engines-eu.com
53. *Owners Manual (2007) – GX390* – Honda Motor Co. Ltd., www.honda-engines.com
54. *Hydrogen & Our Energy Future* – U.S. Department of Energy, www.hydrogen.energy.gov
55. *Hydrogen Analysis Resource Center* – U.S. Department of Energy, www.hydrogen.pnl.gov
56. *Hydrogen Fuel Quality Standard Article 8* – California Hydrogen Highway, www.hydrogenhighway.ca.gov
57. *Series EK-R Use and Maintenance Manual* – Sincro, www.sincro.co.za
58. *Biodiesel Handling and Use Guidelines* – U.S. Department of Energy, www.osti.gov
59. *E85 and Flex Fuel Vehicles* – U.S. Environmental Protection Agency, www.epa.gov
60. *Handbook for Handling, Storing and Dispensing E85* – U.S. Department of Energy, www.eere.energy.gov
61. *Ignition System* – Crystal Netbook, www.crystal-netbook.info
62. Aldrich R.: *A Guide to Alternative Fuel Vehicles* – California Energy Commission, www.energy.ca.gov
63. *LPG Around the world* – U.S. Department of Energy, www.eere.energy.gov
64. Sierens R., Verhelst S.: *Hydrogen Fuelled Internal Combustion Engines* <http://www.osd.org.tr/20.pdf>
65. *Mobil mit Wasserstoff* – Clean Energy Partnership (CEP) <http://www.bmvbs.de/artikel-,302.22711/Mobil-mit-Wasserstoff-Clean-En.htm>
66. *Tüzelőanyagok felhasználásához kapcsolódó légköri szennyezőanyag-kibocsátások* http://w3.oszk.hu/repscr/wwwi32.exe/%5Bin=rpsr2.in%5D/?SSZ=TAJTHY_TIHAMER
67. *Emissionen von Wasserstofffahrzeugen. Abschätzung der Emissionen von Wasserstoff- und brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen* <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0012.pdf>
68. *FIZ Forschungs- und Innovationszentrum BMW-München* http://www.ivv.tuwien.ac.at/uploads/media/Exkursionsbericht_Fiz_01.pdf
69. *Der Wasserstoffmotor* <http://www.lifeandscience.de/fileadmin/downloads/referate/physik/Wasserstoffmotor.pdf>.
70. *Wasserstoff – Verbrennungsmotor* http://www.energieportal24.de/download_179.htm
71. *Sind alternative Antriebssysteme auf Basis von Wasserstoff in Kraftfahrzeugen?* <http://www.morphy-tr.de/seminarfacharbeit.pdf>
72. *H2Mobility: Hydrogen Vehicles Worldwide* <http://www.netinform.net/H2/H2Mobility/Default.aspx>