

Hegedűs Ernő¹

A VÍZBEFECSKENDEZÉS MOTORIKUS ALKALMAZÁSAINAK ÁTTEKINTÉSE ÉS A KOMPOUND- DUGATTYÚS ÖTÜTEMŰ MOTOR

OVERVIEW OF ENGINE APPLICATIONS FOR WATER INJECTION AND THE COMPOUND-PISTON FIVE- STROKE ENGINE

[HTTPS://DOI.ORG/10.30583/2024-TK-Kulonszam-182](https://doi.org/10.30583/2024-TK-Kulonszam-182)

Absztrakt

A brit Ilmor Engineering motorfejlesztő cég 1,5 literes lökettérfogatú, háromhengeres kompond-dugattyús vízbefecskendezéses ötütemű Otto-motorjának effektív hatásfoka 36,1%, térfogata a hasonló motorok 80%-a. A motor – a vízbefecskendezés kivételével – kizárólag hagyományos kialakítású, szabványos alkatrészekből áll, mindössze a középső kompond-dugattyú átmérője nagyobb.

Kulcsszavak: vízbefecskendezés, kompond-dugattyú, Ilmor Engineering, Mercedes-Benz High Performance Powertrains Ltd., Atkinson-Miller ciklus

Abstract

British engine developer Ilmor Engineering's 1.5-litre, three-cylinder, water-injected, compound-pump, five-stroke Otto engine with water injection has an effective efficiency of 36.1% and a displacement of 80% of comparable engines. The engine is made up entirely of standard components of conventional design, with the exception of the water injection, and only the centre compound piston has a larger diameter.

Keywords: water injection, compound piston, Ilmor Engineering, Mercedes-Benz High Performance Powertrains Ltd., Atkinson-Miller cycle

¹ Dr. Hegedűs Ernő alezredes, PhD, NKE Hadtudományi es Honvédtisztképző Kar, Haditechnikai Tanszék, adjunktus. ORCID: 0000-0001-8457-5044

Bevezetés

Bánki Donát professzor 1894-ben szabadalmaztatta vízbefecskendezéses növelt kompresszióviszonyú Otto-motorját, amely belsőégésű motoroknál alkalmazott gépészeti megoldás ekkortól folyamatosan fejlődött egészen napjainkig. A II. világháborúban vadászrepülőgépeken, majd az 1980-as évek Formula 1 autóiban is alkalmazták a vízbefecskendezést.

A vízbefecskendezés és az olaj-víz emulziós üzemanyagok kutatását 1998-2003 között kezdtem meg Dr. Turcsányi Károly professzor vezetésével, amely hat publikáció megjelentetését eredményezte 2023-ig.² A kutatási eredmények első összefoglalását a Katonai Logisztika folyóiratban végeztem el 2017-ben, elemezve a vízbefecskendezés és az olaj-víz emulziós üzemanyagok alkalmazásának katonai aspektusait.³ Két évtizeddel később a német BMW konszern és a brit Ilmor motorfejlesztő cég eredményei alapján kijelenthető, hogy a vízbefecskendezés alkalmazása a szériagyártás szintjén is megjelenik a gépjárműiparban, illetve, hogy a fejlesztők jelentős eredményeket értek el az Otto-motorok effektív hatásfokának 24%-ról 36%-ra növelésével a vízbefecskendezéses kompond-dugattyús ötütemű turbómotor megalkotásával.⁴ Utóbbi fejlesztés ismét lehetőséget ad az 1998 óta

² Hegedűs Ernő (konz.: Dr. Turcsányi Károly): Az egységes hajtóanyag koncepció alkalmazásának jelentősége haditechnikai eszközök üzemeltetésében, különös tekintettel a szénhidrogén-víz emulziókra. XXVI. OTDK pályamunka, Haditechnika tagozat I. helyezés. 2003. ZMNE VSZTK Budapest.

³ Hegedűs Ernő: Vízbefecskendezés, mint a katonai alkalmazású belsőégésű motorok hatásfoknövelésének és hőkibocsátás-csökkentésének új eszköze. Katonai Logisztika, 2017/1-2.

https://epa.oszk.hu/02700/02735/00084/pdf/EPA02735_katonai_logisztika_2017_1-2_036-084.pdf

⁴ Kompond, kompaund: a gépészetben rendszerint összetett gép, összetett gépcsoport, mely legalább két, eltérő elven működő – esetleg azonos elvű, de jelentősen eltérő méretű - gépelemből áll. Erőgépek esetében alkalmazzák ezt a kifejezést dugattyús motor és turbina összeépítésekor (pl. Napier Nomad repülőgépmotor). Turbocompound dízelmotor: a turbódízelmotoroknál – melyeknél a turbófeltöltő után a kipufogógáz még további jelentős energiamennyiséget tartalmaz - a turbófeltöltést úgy egészítik ki egy második, turbina gépcsoporttal, hogy a turbina tengelyét áttételen keresztül a főteneggellyel összekötik, így a turbocompound rendszer alkalmazásával mechanikai munkavégzésre lehet átalakítani a veszteséghő egy részét (pl. Scania DT12 turbocompound dízelmotor). Gőzgépek esetében a kompaund gőzmozdony olyan kétszeres expanziójú gőzgéppel működő mozdony, amelynél a gőz a munkavégzést (expanziót) két fokozatban, két különböző méretű, de egymással sorba kapcsolt gőzhengerrel végzi.

folytatott kutatásom összefoglalására, azonban ezúttal nem a katonai, hanem az általános gépészeti vonatkozások előtérbe helyezésével.

A vízbefecskendezéses kompond-dugattyús – vagy „ötütemű” – motor egy olyan koncepció, amelynek célja a belsőégésű motorok gazdaságossági hatékonyságának, termikus hatásfokának javítása. Az ötütemű motorkonstrukció soros, háromhengeres kialakítású, azonban csak a két szélső hengerben zajlik égés. Középen egy kompond-henger helyezkedik el. A kipufogógázzal távozó energiát tovább hasznosítják a középső, kompond hengerben: itt vízbefecskendezést követően egy újabb munkavégzési ütemet végeznek a forró kipufogógázok, hasznosítva a veszteségheők egy részét. A feltalálója által ötüteműnek nevezett motort a belga Gerhard Schmitz a Hamburg University of Technology Gépészeti Intézet, Hőtan Tanszék egyetemi tanára szabadalmaztatta 2000-ben.⁵ Schmitz motor-koncepciójával elsősorban a brit Ilmor Engineering motorfejlesztő cég foglalkozik, amely napjainkban a Mercedes-Benz High Performance Powertrains Ltd.(MB HPP) része.⁶ Az 1,5 literes lökettérfogatú - 2 darab, egy 350 köbcentiméteres szikragyújtású hengerű és egy 778 köbcentis kompond-dugattyús expanziós vízbefecskendezéses hengerű - Ilmor erőforrás 130 lóerős teljesítménnyel és 166 Nm-es nyomatékkal rendelkezik. A motor üzemanyag-fogyasztását – egy hagyományos Otto-motorhoz képest – mintegy 30%-kal csökkentették, **az elért gazdaságossági (effektív) hatásfok 36,1%.**⁷ *A vízbefecskendezéses kompond-dugattyús („ötütemű”) motor hatásfoka a dízelmotorok hatásfokával lényegében azonos értéket mutat. (A fogalomtisztázás érdekében célszerű kitérni arra, hogy az Ilmor cég mérnökei által „ötüteműnek” nevezett koncepcióhoz hasonló – azonban sok esetben kompond-henger nélküli – vízbefecskendezéses motorokat „hatütemű” motorként is említi a szakirodalom, amint az jelen tanulmány 3. ábráján is látható.)*

Nicolaus Otto már 1879-ben épített egy 5 ütemű motort az Ilmoréhoz azonos elrendezéssel. Egy amerikai és két spanyol szabadalom a Gerhard Schmitzéval azonos gépészeti felépítésű ötütemű motorokat

⁵ Schmitz G., Five-stroke internal combustion engine, Patent US6553977B2, USA; April 29, 2003., illetve Schmitz G., Five-Stroke Internal Combustion Engine-A new concept for internal combustion engines, St.Vith 2011, Belgium; 5T Beschreibung & Studie

⁶ A céget a korábban a Mercedes számára fejlesztett F1-es motorok tették közismertté. <https://www.ilmor.com/home>

⁷ M. Palanivendhan - Hitesh Modi - Garvit Bansal: Five Stroke Internal Combustion Engine. IJCTA, 9(13) 2016, pp. 5855-5862© International Science Press https://www.researchgate.net/publication/308673879_Five_Stroke_Internal_Combustion_Engine

ír le.⁸ A Gerhard Smitz által feltalált alapelv hasonlít a Toyota hibridek benzinmotorjánál alkalmazott – később részletezett – Atkinson-ciklusra (vagy Miller-ciklusra), amely szintén azzal képes jobb hatásfokot elérni, mint a hagyományos benzinmotorok, hogy a sűrítés és a terjeszkedés aránya eltérő (kiterjesztett expanzió, növelt expanzióarány). Az Ilmor-féle koncepció esetében azonban a terjeszkedés aránya e motorokénál jóval nagyobb. Ezt a jelentős, 14,5:1 expanzióarányt egészíti ki a vízbefecskendezés nyomásnövelő hatása.

A vízbefecskendezés nélküli ötütemű motor már egy ismert konstrukció, a Krakkói Egyetemen is fejlesztenek ilyen szerkezetet⁹. Napjainkban a fejlesztőket egy – a hibrid hajtásláncú járművekhez adoptálható – magas hatásfokú range extender¹⁰ kialakításának lehetősége motiválja. A vízbefecskendezéses kompond-dugattyús motor előnye a vízbefecskendezéssel elérhető magas hatásfok, míg hátránya a kipufogógáz vízbefecskendezés miatt adódó alacsony munkavégző képessége, kiemelten a motor részterhelése során. A vízbefecskendezéses kompond-dugattyús motor így kizárólag teljes terhelésen mutat kedvező hatásfok-eredményeket.

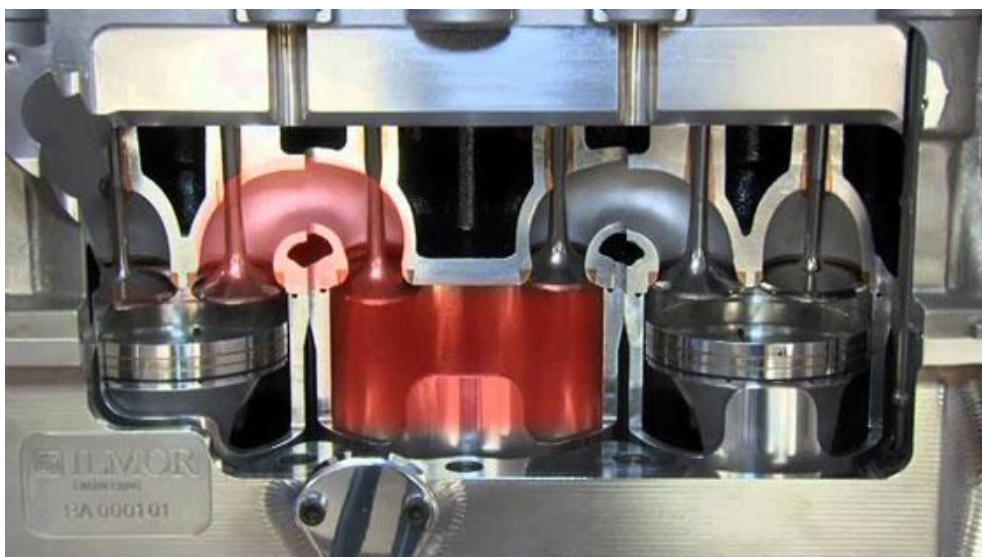
1. A vízbefecskendezéses kompond-dugattyús motor működési elve

A négyütemű ciklushoz - szívóütem, sűrítés (kompresszió), expanzió, kipufogás – egy kompond-dugattyút és további két ütemet adnak hozzá az ötütemű motorkonstrukciónál. A nagy átmérőjű kisnyomású kompond-henger vízbefecskendezéssel kiegészített expanziós üteme az „ötödik ütem”. A motor – a kompond-henger kipufogását is figyelembe véve – elméletileg hat üteműnek is nevezhető lehetne. A lényeges különbség, újdonság azonban – akár a korábbi hatütemű motorokhoz képest is – elsősorban a középben elhelyezett nagy átmérőjű kompond-dugattyú kialakításában van.

⁸ US640890 JW Eisenhuth, 1900; ES0156621, F Jimeno-Cataneo, 1942; és ES0433850, C Ubierna-Laciana, 1975.

⁹ Marcin Noga: Selected Issues of the Indicating Measurements in a Spark Ignition Engine with an Additional Expansion Process. Appl. Sci. 2017, 7(3), 295; <https://doi.org/10.3390/app7030295>

¹⁰ Hatótávolságnövelő (a szerkesztő megjegyzése)



1. számú ábra. A nagyméretű kompond-dugattyú közepén, a két munkadugattyú kétoldalt helyezkedik el a háromhengeres vízbefecskendezéses Schmitz-motorban¹¹

A nagyméretű kompond-dugattyú által működtetett középső henger a két aktív henger lökettérfogatának közel a kétszerese. Az aktív hengerekből felváltva enged be a kompaund-hengerbe a kipufogógázt, ahol az tovább expandál. A kompond-dugattyú hengerében végzett vízbefecskendezés a gőz tágulása révén további teljesítményt biztosít.

Az Ilmor által kifejlesztett „ötütemű” motorkonstrukció lényege, hogy a hatásfok növelése érdekében egy kompond-hengerrel bővítenek egy kéthengeres négyütemű motort, amely – az aktív hengereinek összlökettérfogatát tekintve – 700 köbcéntiméteres. A háromhengeres motor összegzett lökettérfogata a kompond-hengerrel együtt 1480 cm³.

Az ötütemű motor két nagynyomású aktív égésfolyamattal működő hengert használ a négyütemű Otto-motor ciklusával. *A két aktív munkahenger kipufogógáza egy nagyobb – központi – alacsony nyomású kompond-hengerbe kerül.* A háromhengeres erőforrás középső henger nagyobb a szélső kettőnél. A két Otto-ciklus szerint működő henger között beépített, nagyobb átmérőjű, de a közös főtengelyre dolgozó henger így kompond-fokozatként tud működni.

¹¹ <https://autopult.hu/hirek/2-utan-4-aztan-5-otutemu-motort-mutattak-be-a-bri-tek.html>

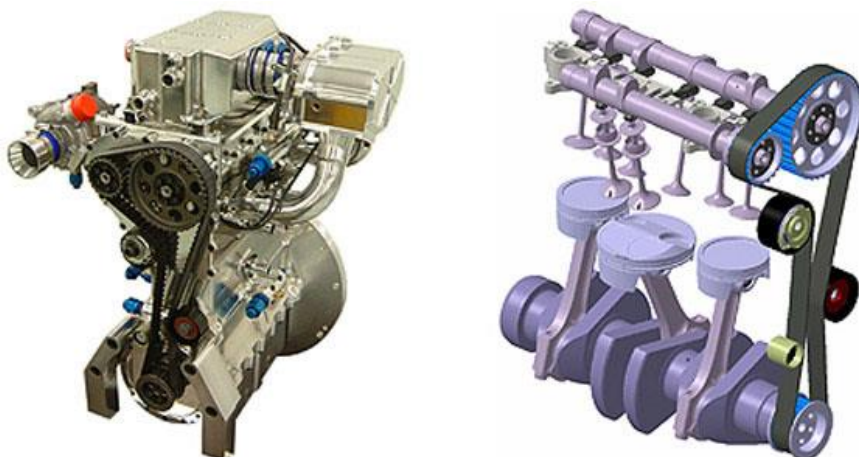
ILMOR KOMPOUND-DUGATTYÚS VÍZBEFECSKENDEZÉSES
ERŐFORRÁSÁNAK FŐBB TECHNIKAI ADATAI¹²

1. számú táblázat

Elrendezés	háromhengeres soros
Aktív (nagynyomású) hengerek	2 db, egyenként 350 cm ³
Kompond (kisnyomású, vízbefecskendezéses) henger	1 db 780 cm ³
Összegzett lökettérfogat	1480 cm ³
Kompresszióviszony	7:1
Expanzióarány	14,5:1
Max. teljesítmény	130 LE 7000 1/min fordulatszámnál
Max. nyomaték	166 Nm 5000 1/min fordulatszámnál
Feltöltés és töltőnyomás	turbó, 3 bar
Fajlagos tüzelőanyagfogyasztás	226 g/kWh
Effektív hatásfok	36,1%
Szelepvezérlés	DOHC
Hűtés	folyadékhűtés
Vízfogyasztás	ca. 1:1,2 – 1:2,5 benzin-víz arány

A négyüteműként dolgozó kisebb átmérőjű aktív hengerekből a kipufogás üteme alatt az égéstermék szeleppel vezérelve a nagyobb átmérőjű kompond-hengerbe áramlik, majd ott munkát végez. Mivel két henger dolgozik rá, ezért a kompond-hengerben a főtengey minden körülfordulására egy munkavégző és egy kipufogó ütem esik. Az alacsony nyomású kompond-hengerbe nem fecskendez a rendszer üzemanyagot, csupán egy átömlő csatornán keresztül a két szélső henger kipufogógázait engedik oda átáramlani a szelepek, amelybe azután vizet fecskendeznek. A veszteség hő hasznosítását ezzel a **közvetlen vízbefecskendezéssel** tudják fokozni a kompond-hengerben.

¹² M. Palanivendhan - Hitesh Modi - Garvit Bansal: Five Stroke Internal Combustion Engine. IJCTA, 9(13) 2016, pp. 5855-5862© International Science Press https://www.researchgate.net/publication/308673879_Five_Stroke_Internal_Combustion_Engine



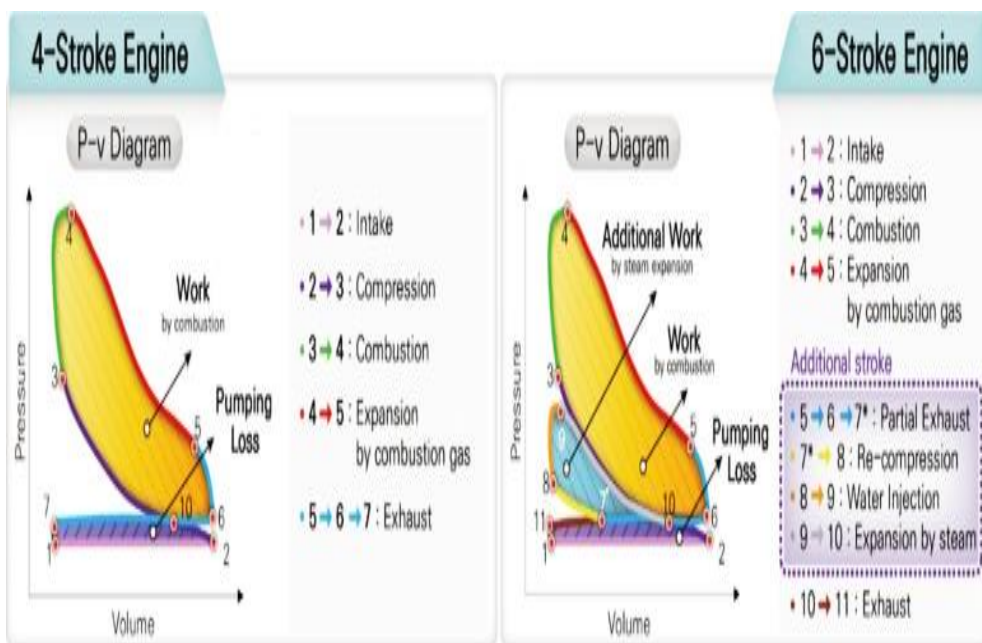
2. számú ábra. A 130 LE teljesítményű háromhengeres motor két szélső hengerében aktív munkafolyamatot, míg a középső hengerében vízbefecskendezéses kompond-expanziót valósít meg¹³

A magas hőmérsékletű kipufogógáz és a keletkezett gőz a kompond-hengerben együtt tovább expandál. A kompond-hengerből történik a végleges kipufogás a környezetbe, a turbófeltöltő turbina lapátjain keresztül.

A szelepvezérlés DOHC (Double Overhead Camshaft - dupla felülfekvő vezérműtengely), azaz dupla vezérműtengelyes kialakítású, azonban ebben a motorban egy felezett és egy – a főtengely fordulatszámával megegyező fordulatszámú – vezérműtengely helyezkedik el. A motor két felülfekvő vezérműtengelyt használ, az egyik a magas, a másik az alacsony nyomású henger(ek)hez tartozik. A nagynyomású hengerek vezérműtengelye a forgattyústengely fordulatszámának a felével, míg az alacsony nyomású henger vezérműtengelye a főtengely sebességgel azonos fordulatszámmal forog. (Azaz a középső kompond-henger vezérműtengelyét egy, a főtengelyhez képest 1:1 arányú áttétel működteti.) A nagynyomású vezérműtengely bütykei a külső két hengernél dolgoznak ugyanúgy, mint egy hagyományos négyütemű motornál, míg az alacsony nyomású vezérműtengely bütykei a középső – nagyobb – hengernél, vezérelve a külső hengerekből érkező kipufogógázokat.

A motoron *turbófeltöltést* is alkalmaznak: a kompond-expanziót követően a vízgőzzel telített kipufogógáz a kompond-henger expanziós terét elhagyva egy turbófeltöltőbe áramlik tovább.

¹³ <https://www.visordown.com/news/general/ilmor-develop-5-stroke-motor-what>



3. számú ábra. A dél-koreai Hanyang Egyetem mérnökei által összeállított P-V nyomás-térfogat diagramm munkaterületén késsel jelölték a kompond-hengerben keletkezett gőz expanziójából származó munkát¹⁴

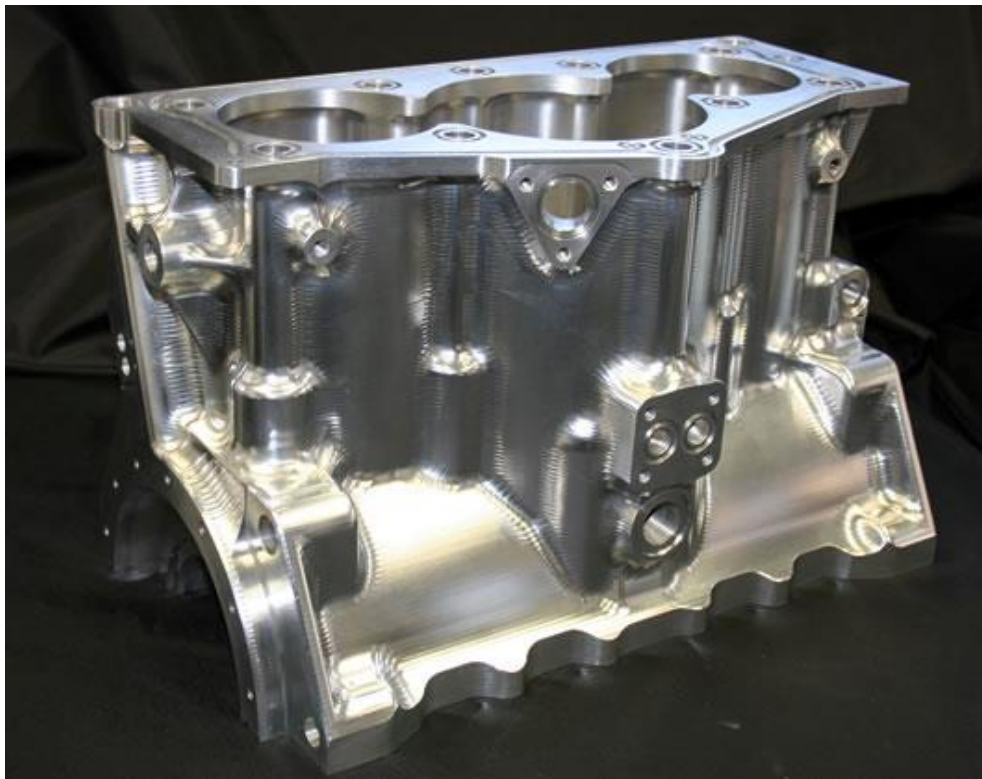
Az Ilmor öttemű motornál alkalmazott turbófeltöltés hatékonysága csupán teljes terhelésnél jelentkezik, mivel a részterhelésen üzemelő motor esetében - az alacsony nyomású kipufogógáznak köszönhetően - már idejekorán jelentkezik a turbólyuk jelensége.¹⁵ A vízbefecskendezéses kompond-dugattyús motor előnye az elért magas hatásfok, míg **hátránya a vízbefecskendezés miatt alacsony hőmérsékletű, a kompond-henger miatt pedig alacsony nyomású kipufogógáz alacsony munkavégző képessége, amely jellemzően a motor részterhelése során jelentkezik.**

A turbófeltöltő ennél a háromhengeres motornál egyetlen kompond-hengerből kapja a kipufogógázt, amely indokolhatja egy turbófeltöltés

¹⁴ Yubeen Yang - Hoseung Yi - Seungho Yang - Sungwook Park: Challenges and feasibility of a six-stroke engine using water direct injection. Applied Thermal Engineering, Volume 230, Part A, 25 July 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431123007822>

¹⁵ Turbólyuk: a turbófeltöltő hátránya, hogy a motor főtegye és a turbótengely között nincs mechanikus kapcsolat, így a gázadásra bizonyos késleltetéssel reagál, ez az ún. "turbólyuk"-jelenség. E hátrány megoldására napjainkra számos szabályozási és konstrukciós megoldás született.

szempontjából kedvezőbb V-6 henger-elrendezésű variáns kifejlesztését, akár „Hot-V” elrendezéssel is.¹⁶



4. számú ábra. Az Ilmor motor – a vízbefecskendezés kivételével – kizárólag hagyományos kialakítású, szabványos alkatrészekből áll, mindössze a középső kompond-dugattyú átmérője nagyobb, amely miatt azonban speciális hengeröntvény készítése vált szükségessé¹⁷

A vízbefecskendezéses kompond-dugattyús motor így kizárólag teljes terhelésen mutat kedvező hatásfokeredményeket. Ezért „csupán” hibridjármű hatótáv-növelőként (range extender) gondolnak az erőforrásra, amely *kis helyigénye és jó hatásfoka miatt is ideális lehet ilyen célra.*

¹⁶ A „Hot-V” vagy HSI (Heisse Seite Innen – pl. Audi HSI) elrendezés lényege, hogy a kipufogó-oldal és a turbófeltöltők a V-motor középső, hengesorok közötti ágyában foglalnak helyet, ezzel a kipufogógáz gázhőmérséklete a turbófeltöltő belépő keresztmetszeténél elérheti akár a 860 °C értéket. Ezzel a HSI dízelmotor-konstrukció minden korábbi elrendezésnél jobb lehetőséget biztosít a kipufogógázok veszteség hőinek hasznosítására.

¹⁷ <https://thekneeslider.com/ilmor-5-stroke-engine-700cc-turbo-3-cylinder-130-bhp/>

2. A vízbefecskendezéses kompond-dugattyús („ötütemű”) motor egyes rész-konstrukciós megoldásainak háttere

2.1. A kompond rendszer és az Atkinson-ciklus, illetve a Miller-elv

A kompond-dugattyús („ötütemű”) motor működési elve – a kiterjesztett expanzió – hasonlít a Toyota hibridek benzinmotorjánál alkalmazott Atkinson-ciklusra, illetve a Miller-ciklusra.

Az **Atkinson-ciklus**¹⁸ a relatív expanzióviszony jelentős megnövelésével képes jobb hatásfokot elérni, mint a hagyományos Otto-motorok, amely a lökethossz-változtatással és/vagy szívószelep-vezérlés módosításával is megvalósítható. Az Atkinson-ciklusnál eltérő a sűrítés és a terjeszkedés aránya (kiterjesztett expanzió, növelt expanzióarány). Az Atkinson-ciklusnál öt fázisra négy ütem jut a működési ciklusban: 1. szívóütem; 2. visszaszívás (back-flow, késleltetett szívószelepszárással, mely belenyúlik a sűrítési ütembe); 3. sűrítés; 4. kiterjesztett – megnövelt arányú – expanzió; 5. kipufogás. Az Atkinson-ciklust pl. a Toyota hibridek benzinmotorjánál alkalmazzák előszeretettel. A hengerek résztöltése a szelepvezérlés módosítása által is elérhető, az ilyen motorok működési elvét az Atkinson-ciklus változata, a Miller-ciklus írja le. A Miller-ciklus alapján működő motorokat számos forrás az Atkinson-ciklusú motorok közé sorolja.

A **Miller-ciklus**¹⁹ a szívószelep alsó holtponthelyzetéhez képest módosított nyitvatartásával, a relatív expanzióviszony jelentős megnövelésével – egyfajta belső töltőlevegő-visszahűtési megoldásként – csökkentheti az alkatrészek hőterhelésének mértékét és a kipufogógázok esetleg túlzott hőmérsékletét is²⁰.

A kompond-dugattyús („ötütemű”) motor bizonyos rendszertani összefüggést mutat a **vízbefecskendezéses hatütemű motorral**. Ez olyan belső égésű dugattyús hőerőgép, amelynél a működés során **keletkező hulladékhőt két további ütemet beiktatva munkavégzésre hasznosítják**. 1883 óta több változatot is bemutatott a feltalálók, így többek között *Leonard Dyer* feltalálta az első hatütemű belsőégésű vízbefecskendezéses motort 1915-ben, amely nagyon hasonlít az amerikai

¹⁸ James Atkinson brit mérnök után elnevezett ciklus.

¹⁹ Ralph Miller amerikai mérnök után elnevezett ciklus.

²⁰ Dezsényi Gy. – Emőd I. – Finichiu L.: Belsőégésű motorok tervezése és vizsgálata. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1999. 202. o.

mérnök *Bruce Crower* találmányára. A *hatütemű motor az égésgázok távozásával kárba vesző hőenergiából igyekszik minél többet hasznosítani*. Ezt a hőt hasznosítja további két ütemmel: ennél a konstrukciónál **egy adagoló vizet fecskendez közvetlenül a hengerbe**, ahol az nagynyomású gőzzé alakul. Így az eddig felhasználatlanul távozó hőnek elméletileg mintegy harmada a második munkaütemben újra hasznosul, és mintegy 30%-kal emeli a teljesítményt, miközben az üzemanyagfogyasztása is mintegy 30%-kal alacsonyabb. Az első ütem: a szívóütem, a második: a sűrítés, a harmadik: a szikragyújtást követő terjeszkedés (a munkavégzés) és a negyedik: a kipufogás. Ekkor a hengerfal és környezetének hőmérséklete akár 500 °C-ra is felhevül. Miután a dugattyú ismét a legfelső helyzetbe kerül, záródik a kipufogószelep. **Az ötödik ütem: a gőz munkavégzése.** A forgattyús tengelyről vezérelt adagoló **vizet fecskendez közvetlenül a hengerbe, ahol az nagynyomású gőzzé alakul**, és ismét munkavégzésre készíti a dugattyút. Az ötödik ütemben tehát nem az elégsz benzint, hanem a falakból elvont veszteséghővel felhevített vízgőz tágulása végzi az úgynevezett munkaütemet. A hatodik ütem: a gőz kipufogása.

2.2. A vízbefecskendezés, különös tekintettel a hengerbe történő közvetlen vízbefecskendezésre

A vízbefecskendezés lényegében vízbejuttatás a belsőégésű hőerőgép körfolyamatába. A vízbefecskendezés különböző formáinak alkalmazásával lehetőség nyílik a termodinamikai körfolyamatok módosítására, esetleg kombinált körfolyamatok létrehozására is. Két (három) változata ismert:

- vízbefecskendezés (porlasztás, karburálás) a *szívócsőbe*, majd innen a hengertérbe jut a víz, melyet már Bánki Donát professzor is alkalmazott egy nagykompressziójú stabilmotoron;
- *vízbefecskendezés közvetlenül a hengertérbe* (amely külön befecskendező elemmel vagy az üzemanyagba kevert víz útján – üzemanyag – víz emulzió bejuttatásának formájában – is megvalósulhat, mivel a vizes üzemanyag-emulziók alkalmazása gyakorlatilag a vízbefecskendezés egy fajtája);²¹
- *a szívócsőbe és az égőtérbe történő kombinált vízbefecskendezés.*

²¹ Olaj-víz emulzió 10-20%-os víztartalommal keverés után 1-3% emulgeálószerrel időlegesen stabilizálható. Egy másik nagy csoport az ultrahangos emulgeáló berendezéseké. Alkalmaznak piezoelektromos berendezéseket is.

Az Ilmor-motornál egy új típusú vízbefecskendezést alkalmaznak: a kompond-dugattyú feletti munkatérbe fecskendeznek közvetlenül vizet, nem pedig a hagyományos Otto-ciklusú benzinmotor hengereibe.

A turbófeltöltéses **Otto-motorok** üzemi korlátait a kopogásos égés és a turbófeltöltő turbináján fellépő túlzottan magas hőmérséklet – amely akár a 900-1000°C maximális értéket is elérheti – képezik. A kopogásos égés markánsan korlátozza a benzinüzemű motoroknál alkalmazható maximális töltőnyomást, amelyet hatékony töltőlevegő-visszahűtéssel vagy **wízbefecskendezéssel** képesek csökkenteni a nagyteljesítményű versenymotoroknál, vagy a korábbi dugattyús vadászrepülőgép-motoroknál. Turbódízel motoroknál a szívócsőbe vagy hengerbe végzett **wízbefecskendezés egyúttal hatékonyan csökkentheti a NO_x-emissziót**, illetve – ultrahangos emulzióképző berendezés alkalmazása esetén – **csökkenti a korom-emissziót** is²². Hajómotoroknál széles körben alkalmazzák is a vízbefecskendezést az emissziós értékek javítása céljából.²³ A vízbefecskendezés – és egy változata, az üzemanyag-víz emulzió – alkalmazásának katonai vonatkozásai is vannak.²⁴ (A vizes üzemanyag emulziókban rejlő lehetőségek: környezetvédelem/üzemanyag-megtakarítás, amely a hajtóanyag mikroexploziós égésfolyamatán keresztül lehetővé teszi a fajlagos szénmonoxid-kibocsátás – és ezzel a karbonlábnyom – csökkentését; ill. a katonai vonalon a "robbanásbiztos tulajdonság", a tűzveszélyesség csökkenését.²⁵)

²² Hegedűs Ernő (konz: Dr. Turcsányi Károly): *Az egységes hajtóanyag koncepció alkalmazásának jelentősége haditechnikai eszközök üzemeltetésében, különös tekintettel a szénhidrogén-víz emulziókra*. XXVI. OTDK pályamunka, Haditechnika tagozat I. helyezés. 2003. ZMNE VSZTK Budapest.

²³ Hegedűs Ernő: A vízbefecskendezés és emulziós tüzelőanyagok teljesítménynövelő hatása a korszerű hőerőgépek működésére: Intézményi Tudományos Diákköri Konferencia, Szolnok, 1998. Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, Vezetés és Szervezéstudományi Kar, Repülőgép Sárkány-Hajtómű Tanszék. Továbbá Hegedűs Ernő: *Az egységes hajtóanyag koncepció alkalmazásának jelentősége haditechnikai eszközök üzemeltetésében, különös tekintettel a szénhidrogén-víz emulziókra*. XXVI. OTDK pályamunka, ZMNE VSZTK, Budapest, 2003. Haditechnika tagozat I. helyezés 67. p. OTDK után szakdolgozatban felhasználva. Illetve Hegedűs Ernő: *Az egységes hajtóanyag koncepció alkalmazásának jelentősége haditechnikai eszközök üzemeltetésében, különös tekintettel a szénhidrogén-víz emulziókra*. Hallgatói Közlemények, 2003. évi 2. sz. 5. p.

²⁴ Hegedűs Ernő: *Vízbefecskendezés, mint a katonai alkalmazású belsőégésű motorok hatásfoknövelésének és hőkibocsátás-csökkentésének új eszköze*. Katonai Logisztika, 2017/1-2. 36. o.

²⁵ Hegedűs Ernő: *Vízbefecskendezés és vizes üzemanyag emulziók alkalmazása belsőégésű hőerőgépeknél*. Magyar Szárnyak 2002 évi 30. évf. 1416-6577 6. p.

Hazánkban – a terület környezetvédelmi aspektusaira koncentrálna – a Budapesti Műszaki Egyetem egyetemi docense, Dr. Gács Iván okl. gépészmérnök a „Gázturbinák nitrogénoxid kibocsátásának csökkentése” című tanulmányában egyaránt vizsgálta – és összevetette – a vízbefecskendezés és a vizes olajemulziók emissziócsökkentő, illetve körfolyamatra gyakorolt hatását, már 1992-ben.²⁶ A vízbefecskendezés lehetővé teszi a kompresszió-munka csökkentését, ill. a turbina előtti gázhőmérséklet növelését gázturbinás hajtóművek esetén. Ez – időszakosan – növeli a teljesítményt, javítja a hajtómű hőkihasználtságát és növeli a gázturbina hatásfokát.²⁷

2.3. Néhány példa a közvetlen vízbefecskendezés alkalmazására

1. 1952-ben a Hofherr-traktorok (1945-től Vörös Csillag Traktorgyár) 35-ös változatának fejlesztése során: „A motorok teljesítménye elméletileg emelhető lett volna a sűrítőtér (káros tér) csökkentésével. A sűrítési végnyomást a gázolaj gyulladási határának alsó értékére emelni lehetett volna, de ez nagyban függött a levegő külső hőmérsékletétől, valamint a motor belső részének hőfokától is. *A nagyobb kompresszió-végnyomás bevezetéséhez felvetődött a már régen ismert vízbefecskendezés alkalmazása a 35-ös traktoroknál.* A kísérleti gépeken (G, GS, R) a szükséges vizet az üzemanyagtartály jobb oldalára erősített készenléti víztartály tárolta. A vízadagolás egy szabályzószelepen át a nyersolajadagolás és a fordulatszám függvényében került egy keverő elosztón keresztül az üzemanyagáramba. A gázolajszivattyú együtt szívta be a vizet és a gázolajat, erősen összekeverte őket és a tejszerű emulziót a porlasztón át a hengerbe fecskendezte, megfelelően lehűtve a túlmelegedett izzókúpot. A laboratóriumi vizsgálatok sikeresek voltak.”²⁸

2. 1973-ban Miskolcon, a Nehézipari Egyetemen kétütemű léghűtéses Otto-motor (Pannonia P 10) hengerébe fecskendezett víz hatásait vizsgálták az üzemanyagdózisnál 1,2-2,5-szer nagyobb vízdózisok esetén közvetlenül az égésfolyamat során.²⁹ Dr. Nánási Tibor habilitált docens a mérési eredmények alapján megállapította, hogy mivel a víz elpárolgásához szükséges rejtett hő az égésnél felszabaduló hőből

²⁶ Dr. Gács Iván: Gázturbinák nitrogénoxid kibocsátásának csökkentése Energia-gazdálkodás, 1992. évi 33. évfolyam, 11. szám 492-497. o.

²⁷ Hegedűs Ernő: Vízbefecskendezés és emulziók alkalmazása repülőgép hajtóműveknél. Haditechnika, 2000. évi 2. sz. 5. p.

²⁸ Dr. Stieber József: A G-35/GS-35 típusú mezőgazdasági traktorok és traktormotorok fejlesztésének története 1952-1956. 2. rész. 33-34. o.

²⁹ Nánási Tibor dr.: Kétütemű, léghűtéses Otto-motor hengertérbe történő vízbefecskendezés vizsgálata, Tatabányai szénbányák közleményei, 1973. 2.k.

vonódik el, az égéstermék belső energiája csökken, továbbá az égéstermékekkel távozó vízgőz egy bizonyos mennyiségű látens hőt tartalmaz, így elméletileg romlik a körfolyamat termikus hatásfoka. (Veszteséget jelent az, hogy a kondenzátlanul távozó vízgőz párolgáshő formájában elviszi a hőenergia egy részét.) A vízbefecskendezés falakra gyakorolt hűtőhatása és a visszamaradó kipufogógázok nedvességtartalmának antidetonációs hatása folytán viszont *a kompresszióviszony jelentős mértékben növelhető, így – a vízbefecskendezésből fakadó elméleti hatásfokromlás ellenére – olyan termikus hatásfokú motorikus működés valósítható meg, amely vízbefecskendezés nélkül nem elképzelhető.* (A kísérleti erőforrás kompresszióviszonyát azonban nem módosították.) A teljesítmény, illetve fajlagos fogyasztás paraméterei 1,2-szeres, üzemanyaghoz viszonyított vízmennyiség mellett a termikus hatásfok csökkenése miatt várható 3%-os elméletileg számított romlás helyett 3,5% javulást mutattak. **A 6,5%-os fajlagos paraméterjavulás oka: a falaktól a belső hűtés által elvont hőmennyiség a víz elgőzölöggtetésére fordítódik, és hasznos munkát végez.** Tehát a befecskendezett vízmennyiség nemcsak az égéstől von el hőt, hanem a falfelületektől is, még hozzá jelentős mértékben. Ez a falaktól elvont hőmennyiség viszont eleve veszteség, mivel egyébként is elvonásra került volna a külső hűtés által. Így viszont a víz által a falaktól elvont hőmennyiség (veszteség) a gőzképződés következtében hasznos munkát végez. A befecskendezhető vízmennyiség magas, 1:2,5 víz-arányig is növelhető volt égéselnyújtó hatás nélkül.

3. 1975-ben az US Army üzemanyag-kutatólaboratóriuma célul tűzte ki egy csökkentett hőkibocsátású harcjármű-**dízelmotor** kifejlesztését. Ennek érdekében közvetlen vízbefecskendező rendszerrel láttak el egy $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ hűtőfolyadék-hőmérsékletű turbófeltöltéses harcjármű-dízelmotort.³⁰ Ezzel 1:3,5 üzemanyag-víz arány mellett teljes terhelésnél úgy érték el 10% teljesítménynövekedést, hogy eközben a fajlagos fogyasztás 20%-kal csökkent, és mintegy 80%-kal csökkentették az NO_x koncentrációt.

4. 1978-ban Dr. Gneipek mérései szerint a dugattyús kompresszor izoterm hatásfokjavulása 4,5% vízbefecskendezés esetén.³¹ (Ez rávilágít a szívócső-vízbefecskendezés egyidejű alkalmazásának előnyeire.)

³⁰ Melton, R. B. – Lestz, S. J. – Quillian, R. D. – Rambie E. J. : Direct Water Injection Cooling for Military Engines and Effects on the Diesel Cycle. U. S. Army Fuels and Lubricants Research Laboratory, San Antonio, Texas, Symposium (International) on Combustion, Volume 15, Issue 1, 1975, 1389-1399. o.

³¹ Dr. ing. G. Gneipek: Dugattyús kompresszorok hatásfokának növelése belső hűtéssel Energiagazdálkodás, 1978 19. évfolyam, 2-3. szám 115. o.

5. 1980-ban a német W. Häberle 4 hengeres kétütemű forgótolyatytűs vezérlésű motort alakított át úgy, hogy az együtt járó 2-2 hengerből az egyik benzin-, a másik vízbefecskendezéses „gőzüzemben” dolgozott, utóbbinál egy hőcserélőt is beépítettek.³²

6. 1996-ban a német MTU vállalat által épített V8-as, 720 kW teljesítményű kísérleti **dízelmotorra** két adagolószivattyút építettek: az egyik adagoló a tüzelőanyagot, a másik a vizet szállította.³³ Az 1:1 arányú vízbefecskendezés egy közös fúvókán keresztül történt, amelyet rétegesen töltöttek fel gázolajjal és vízzel, így először a tüzelőanyag, majd rögtön utána a víz került befecskendezésre. A kísérleti motorral kiváló emissziós értékeket értek el, és a teljesítmény-paraméterek is javultak.

7. 2003-tól már gyártják a Wärtsilä 8L32 Common Rail diesel típusú, közvetlen vízbefecskendező rendszerrel rendelkező **hajódízelmotort**, amely egy 400 bar nyomású közvetlen vízbefecskendező rendszerrel rendelkezik. A víz és a gázolaj bejuttatásra szolgáló csatornák egy közös befecskendező fúvókában kaptak helyet. Az NO_x emissziót 60%-kal csökkentette a vízbefecskendező rendszer. A befecskendezett víz és az üzemanyag aránya 0,4:1 – 0,7:1 volt.³⁴

8. A **Mitsubishi** cég is gyárt vízbefecskendezéses dízelmotort, az UEC 52/105 D WFI típusút.³⁵

9. 2015-ben a BMW konszern által bemutatott, **közvetlen vízbefecskendezéses Otto-motorja** 10%-os teljesítménynövekedés mellett valósít meg 13%-os fajlagos fogyasztáscsökkenést a BMW M4 GTS gépkocsiba építve.³⁶ A szívócsöbe és az égőtérbe történő kombinált vízbefecskendezésre is jó példa a BMW által alkalmazott motor,

³² Varga Zsolt: 2x2 ütemmel kétütemű Autó-Motor, 1981. január-június 34. évfolyam, 11. szám 46-47. o. illetve Wilhelm Haerberle: Heat engine with rotary output - is driven by sequential expansion and contraction of wires under tension <https://patents.google.com/patent/DE2360535A1/en>

³³ Von Amin Velji – Erwin Eichel – Wernner Rimmels – Franz Haug: Diesel engines with Water Addition Meet Future NOx and Soot Limits, MTZ 57. (1996) 7/8, 400-407.

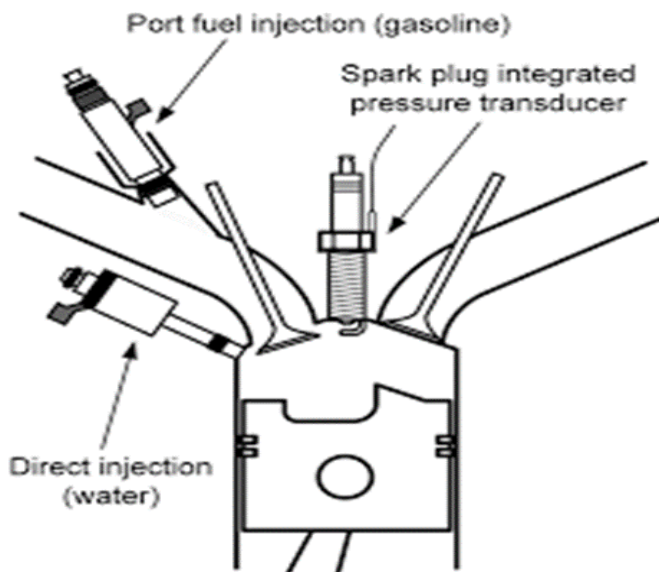
³⁴ Hargitai L. Csaba - Simongáti Győző: Hajógépek. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar – Typotext, Budapest, 2017. 37. o.

³⁵ How Water Injection System Works-UE Engine's technology Vol.1- /層状水噴射技術 https://www.youtube.com/watch?v=vbqboZWPYUQ&ab_channel=J-eng (2024.02.03.)

³⁶ Water injection from the BMW M4 GTS is coming to the mass market - Bosch is now offering the system to other automakers. <http://www.autoblog.com/2016/08/31/bmw-m4-gts-water-injection-bosch-massmarke>

amely esetében nagy terhelésnél és fordulatszámnál *akár 30% is lehet a befecskendezett víz aránya a benzinhoz képest.*³⁷

10. A Korea Advanced Institute of Science and Technology (AIST) intézet fejlesztőmérnökei szívócső-benzinbefecskendezéses, *közvetlen vízbefecskendezéses* kísérleti Otto-motort építettek 2015-ben, annak érdekében, hogy megvizsgálják a közvetlen vízbefecskendezésnek a motor teljesítményére és a károsanyag-kibocsátásra gyakorolt hatását.³⁸



5. számú ábra. A koreai AIST intézet szívócső-benzinbefecskendezéses, közvetlen vízbefecskendezéses kísérleti Otto-motorjának működési sémája 2015-ből³⁹

³⁷ Hegedűs Ernő: Vízbefecskendezés, mint a katonai alkalmazású belsőégésű motorok hatásfoknövelésének és hőkibocsátás-csökkentésének új eszköze. *Katonai Logisztika*, 2017/1-2. 63. o.

https://epa.oszk.hu/02700/02735/00084/pdf/EPA02735_katonai_logisztika_2017_1-2_036-084.pdf illetve Romain Nicolas: BMW tries direct water injection in its 3-cylinder gasoline engine. *Car engineer*. <http://www.car-engineer.com/bmw-tries-direct-waterinjection-in-its-3-cylinder-gasoline-engine/> (07-3-2015)

³⁸ Jaeheun Kim - Hyunwook Park - Choongsik Bae: Effects of water direct injection on the torque enhancement and fuel consumption reduction of a gasoline engine under high-load conditions. *International Journal of Engine Research*, Volume 17, Issue 7., November 2, 2015. <https://doi.org/10.1177/1468087415613221>

³⁹ Jaeheun Kim - Hyunwook Park - Choongsik Bae: Effects of water direct injection on the torque enhancement and fuel consumption reduction of a gasoline engine under high-load conditions. *International Journal of Engine Research*, Volume 17, Issue 7., November 2, 2015. <https://doi.org/10.1177/1468087415613221>

A tesztmotor egy 1,6 literes szívómotor volt 1:13,5 növelt sűrítési aránnyal. A benzinmotorba a vizet közvetlenül a hengerbe fecskendezték be 5 MPa befecskendezési nyomással. A víz befecskendezéséhez kereskedelmi forgalomban kapható közvetlen benzinbefecskendező injektorokat használtak. A víz befecskendezése fix időzítéssel történt, 120 foknál a felső holtpont után.

A víz befecskendezésével egyfelől sikerült mérsékelni a detonációs (kopogásos) égést, másfelől lehetővé vált a gyújtásidőzítés előrébb toléása; így összességében javult a fajlagos üzemanyag-fogyasztás.

A befecskendezett víztömeg további növelése során létezett egy optimális víztömegarány. E felett a túl sok víz már rontotta az égés hatékonyságát, növelte és károsan elnyújtotta az égésfolyamat időtartamát.

11. Négyütemű motorhoz képest a **koreai Hanyang Egyetem** szakemberei a *termikus hatásfok 8,72% -os növekedését* mérték egy *hatütemű* közvetlen vízbefecskendezéses motoron 2023-ban.⁴⁰

A CIKKBEN ISMERTETETT, FŐBB VÍZBEFECSKENDEZÉSES MOTOROK
2. számú táblázat

Motor típusa	Körfolyamat és szerkezeti kialakítás	Vízbefecskendezés jellege	Effektív hatásfok, gazdaságosság, károsanyag-emisszió
Hofherr G-35	Dízel, kétütemű egyhengeres	Víz tartályos emulziós	n.a. (növelt kompresszió)
MNE Pannónia P10	Otto, kétütemű egyhengeres	Közvetlen befecskendezés	6,5%-os fajlagos paraméterjavulás
US Army harcjármű-dízelmotor	turbódízel, négyütemű, 160 °C hűtőfolyadék-hőmérséklet	Közvetlen befecskendezés	10% telj. növ.; 20% fajt. fogy. csökkenés; NO _x 80% csökken

⁴⁰ Yubeen Yang - Hoseung Yi - Seungho Yang - Sungwook Park: Challenges and feasibility of a six-stroke engine using water direct injection. Applied Thermal Engineering, Volume 230, Part A, 25 July 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431123007822>

Wärtsilä 8L32 Common Rail diesel	turbódízel, négy- ütemű, folyadékhű- téses	Közvetlen befecskende- zés	Az NO _x emissziót 60%-kal csökken- tette
Mitsubishi UEC 52/105 D WFI dízelmotor	turbódízel, négy- ütemű, folyadékhű- téses	Közvetlen befecskende- zés	n.a.
koreai AIST in- tézet	1,6 l szívó Otto-mo- tor, hengerbe tör- ténő benzinbefecs- kendezéssel	Közvetlen vízbefecs- kendezés	1:13,5 volt a a sú- rítési arány növe- lése, a hatásfok nőtt
BMW M4 GTS	Otto-motor turbófel- töltéssel, négyütemű, folya- dékhűtés, közv. benzinbefecs.	Szívócső- befecskende- zés és emulziós be- fecskende- zés	10% teljesítmény- növekedés, 13% fajt. fogy. csökkenés
koreai Hanyang Egyetem hatütemű mo- tor	Otto-motor hatütemű	Közvetlen befecskende- zés	8,72% termikus hatásfok növeke- dése
Ilmor-motor	Otto-motor turbófel- töltéssel és kom- pound dugattyúval	Közvetlen befecskende- zés a kompound dugattyúnál	36,1% effektív ha- tásfok

Összegzés és következtetések

Négyütemű motorhoz képest a koreai Hanyang Egyetem szakemberei a *termikus hatásfok 8,72%-os növekedését* mérték egy *hatütemű* közvetlen vízbefecskendezéses motoron 2023-ban.⁴¹ *Ezzel összevetve a vízbefecskendezéses kompond-dugattyús („ötütemű”) motor gazdaságossági (effektív) hatásfoka 36,1%, a hatásfoknövekedés – pl. egy 24%-os Otto-motor hatásfokához képest – több mint, 10%.*⁴² Ez azt mutatja, hogy az Ilmor vízbefecskendezéses motor

⁴¹ Yubeen Yang - Hoseung Yi - Seungho Yang - Sungwook Park: Challenges and feasibility of a six-stroke engine using water direct injection. Applied Thermal Engineering, Volume 230, Part A, 25 July 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431123007822>

⁴² M. Palanivendhan - Hitesh Modi - Garvit Bansal: Five Stroke Internal Combustion Engine. IJCTA, 9(13) 2016, pp. 5855-5862© International Science Press

esetében célszerűen alakítottak ki nagy átmérőjű kompond-hengert, ahol a kompond-rendszer és a vízbefecskendezés együttműködése kedvező hatást fejt ki a motor hatásfokának növelésére.



6. számú ábra. A vízbefecskendezéses kompond-dugattyús három-hengeres motort egy motorkerékpárba építették be, amely ezáltal egy dízelmotor gazdaságosságával üzemelhetett⁴³

https://www.researchgate.net/publication/308673879_Five_Stroke_Internal_Combustion_Engine

⁴³ <https://www.visordown.com/news/general/ilmor-develop-5-stroke-motor-what>

Az Ilmor 700/1500 köbc centiméteres turbófeltöltős ötütemű kom-pound vízbefecskendezéses motorja 130 LE teljesítmény mellett 166 Nm nyomatékot teljesít, amely 7 LE-vel több, mint a Ford – azonos méretű – 1 literes turbófeltöltéses benzines EcoBoost motorjának teljesítménye. A gyártó szerint **az Ilmor-motor 20%-kal kisebb térfogatú** a hasonló teljesítményű négyütemű motorokhoz képest.

Az Ilmor-motor üzemanyag-fogyasztása – teljes terhelésen – 30%-kal alacsonyabb a hagyományos négyütemű üzemmódú motorokhoz képest, valamint hasonló a korszerű dízelmotorokéhoz, a részecske- és NO_x-kibocsátás dízelekre jellemző problémája nélkül.

A vízbefecskendezéses kom-pound-dugattyús motor előnye a vízbefecskendezéssel elért magas hatásfok, míg hátránya a kipufogógáz vízbefecskendezés miatt adódó alacsony munkavégző képessége a motor részterhelése esetén. A vízbefecskendezéses kom-pound-dugattyús motor így kizárólag teljes terhelésen mutat kedvező hatásfokeredményeket. A motor – a vízbefecskendezés kivételével – kizárólag hagyományos kialakítású, szabványos alkatrészekből áll, mindössze a középső kom-pound-dugattyú átmérője nagyobb. Kialakításánál és a teljes terhelésnél jelentkező hatásfoknövekedés miatt jellemzően a hibrid gépkocsik hatékony range extendereként lehetne alkalmazni a jövőben.

A vízbefecskendezéses kom-pound-dugattyús („ötütemű”) Ilmor-motor **továbbfejlesztése az alábbi területeken lehet célszerű:**

- V-6 variáns létrehozása a kedvezőbb turbófeltöltés érdekében;
- vízbefecskendezési eljárások kombinálása;
- **vízvisszanyerés** érdekében vízbefecskendező-kipufogógáz-hűtő rendszerek fejlesztése. Az Ilmor-motor **vízfogyasztása** nem ismert, de 1:1,2 – 1:2,5 érték közé adódhat. Nem célszerű a vizet külön tartályban hordozni. Ezzel összefüggésben szükség van a kipufogó kondenzvíz recirkulációjára a vízbefecskendező rendszer számára, amellyel *így kiküszöbölhető a külön víztartály alkalmazása és annak rendszeres feltöltése az üzemeltetés során.* Ilyen pl. az US Army üzemanyag-kutatólaboratórium kipufogógáz-visszahűtéses vízrecirkulációs konstrukciója⁴⁴. A vízbefecskendezés folyamatos (önellátó) vízellátásának

⁴⁴ Melton, R. B. – Lestz, S. J. – Quillian, R. D. – Rambie E. J. : Direct Water Injection Cooling for Military Engines and Effects on the Diesel Cycle. U. S. Army Fuels and Lubricants Research Laboratory, San Antonio, Texas, Symposium (International) on Combustion, Volume 15, Issue 1, 1975,1389-1399. o.

biztosítása lehetséges pl. a klímaberendezésből nyert kondenzvízzel (BMW), de ezzel összefüggésben Peltier-hőelemekből összeállított kipufogódob-hűtés, a kipufogógáz visszahűtése termoelektromos generátor működtetéséhez (szintén pl. BMW) is megemlíthető.⁴⁵ Utóbbi megoldás egyúttal elvégzi a teljes kipufogógáz-mennyiség visszahűtését is, és a vízellátást a kipufogógáz visszahűtéséből származó kondenzvízzel oldja meg.⁴⁶ A kondenzálatlanul távozó vízgőz párolgáshő formájában elvinné a hőenergia jelentős részét, és ezzel veszteséget okozna, a Peltier-hőelemes áramforrásban viszont kondenzálódik a víz, ezzel nyomáscsökkenést okoz, és javítja a turbófeltöltő, illetve a turbocompaund gépcsoportok nyomásviszonyát, amely összességében hasznos munka megjelenését eredményezi. Elképzelhető a vízvisszanyerő módszerek kombinációja is (kipufogógázból és légkondicionáló rendszerből).

2019-ben a **Széchenyi István Egyetem Belsőégésű Motorok és Járműhajtások Tanszék** kutatói vizsgálták a vízbefecskendezés alkalmazásának lehetőségeit a környezetvédelmi normák teljesítésének elősegítése érdekében. „Az FEV független gépjármű fejlesztéssel foglalkozó világméretű cég ... mérése alapján a vízbefecskendezés alkalmazásában magas potenciál rejtőzik. ... A feldolgozott irodalmak alapján a vízbefecskendezés alkalmazásával ... az elégtelen szénhidrogén-kibocsátás nagymértékben redukálható, mellyel párhuzamosan *csökkenthető a járművek fogyasztása és annak egyéb károsanyag-kibocsátása is.* A Széchenyi István Egyetemen végzett kutatás során egy Otto-motorra kerülő vízbefecskendező rendszer tesztelése következik.”⁴⁷ Ezt a **vízbefecskendezéses turbómotort 2020-ban megépítették és tesztelték.**⁴⁸ Ugyanennek az egyetemnek a mérnökei és kutatói 2021-ben megállapították, hogy „*A vízbefecskendezés nagyban hozzájárulhat az EURO 7 norma teljesítéséhez* a jövőben, hiszen képes biztosítani Otto-motoroknál a $\lambda=1$ üzemet teljes terhelésen is. Akár

⁴⁵ A regeneratív hőhasznosító termoelemek a veszteségű villamos energia formájában hasznosítják. Az 1000 wattos termoelektromos átalakító 10%-kal is csökkentheti az üzemanyag-fogyasztást.

⁴⁶ Csonka J.: Belsőégésű motorok hajtóanyag-megtakarító és szennyezéscsökkentő rendszere, U.S. Patent, 1981.

⁴⁷ Sass Péter - Tóth Máté: Vízbefecskendezés alkalmazásának lehetőségei a környezetvédelmi normák teljesítésének elősegítése érdekében Tavaszi Szél – Spring Wind 2019. tanulmánykötet. DOSZ, Budapest, 2020. 118-129. o.

⁴⁸ Tóth Máté, Gyuris Attila, Rácz Balázs, Sass Péter, Rohde-Brandenburger Jan: Design and Testing of a Water Injection System of a Turbocharged Spark Ignition Engine in Testbench Environment LECTURE NOTES IN MECHANICAL ENGINEERING 22 pp. 321-333. Paper: Chapter 29 , 13 p. (2021)

további eljárások alkalmazása nélkül is biztosítható a sztöchiometrikus keverék a teljes jellegmezőben vízbefecskendezés alkalmazásával, viszont a rendszer kiépítése pénzügyi szempontból: ... *egy komplett vízbefecskendezési rendszer bekerülési költsége összemérhető nagyságrendű a belsőégésű motor költségeivel.*"⁴⁹

Vízbefecskendező rendszerek belsőégésű hőerőgépeken való alkalmazása tehát elsősorban a gyártási költség és az emissziócsökkentési kényszer egyensúlyának függvénye lehet a gépjárműiparban. Természetesen továbbra is jelen vannak olyan megoldásra váró műszaki problémák, mint a víz tárolása, a fagyásveszély vagy a motoralkatrészek korróziója, a forgattyús mechanizmus központi olajozása (víz-olaj keveredése a munkaütem során). (A korróziós probléma megoldására alkalmas lehet pl. az Inconel ötvözet vagy kerámiák alkalmazása.)

Források

Csonka J.: Belsőégésű motorok hajtóanyag-megtakarító és szennyezéscsökkentő rendszere, U.S. Patent, 1981.

Dezsényi Gy. – Emőd I. – Finichiu L.: Belsőégésű motorok tervezése és vizsgálata. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1999. 202. o.

Do More Strokes Mean Better THERMAL EFFICIENCY?! - 5 STROKE ENGINE https://www.youtube.com/watch?v=r0e9RT9pGFU&ab_channel=Ft-shareInternational (2023.12.06.)

Dr. Gács Iván: Gázturbinák nitrogénoxid kibocsátásának csökkentése Energiagazdálkodás, 1992. évi 33. évfolyam, 11. szám 492-497. o.

Dr. ing. G. Gneipek: Dugattyús kompresszorok hatásfokának növelése belső hűtéssel Energiagazdálkodás, 1978 19. évfolyam, 2-3. szám 115-119. o.

Dr. Stieber József: A G-35/GS-35 típusú mezőgazdasági traktorok és traktormotorok fejlesztésének története 1952-1956. 2. rész. 32-36. o.

Gabriel Brindusescu: Five-Stroke Engine Works and Might Enter Production. <https://www.autoevolution.com/news/five-stroke-engine-works-and-might-enter-production-video-87083.html> (26. Sep. 2014.)

Hegedűs Ernő (konz: Dr. Turcsányi Károly): Az egységes hajtóanyag koncepció alkalmazásának jelentősége haditechnikai eszközök üzemeltetésében, különös tekintettel a szénhidrogén-víz emulziókra.

⁴⁹ Szűcs Herman - Vehovszky Balázs: Vízbefecskendezés alkalmazása az EURO 7 kibocsátási norma teljesítéséhez. XXIX. Nemzetközi Gépészeti Konferencia OGÉT–2021. <https://ojs.emt.ro/oget/article/view/469> 254.o.

XXVI. OTDK pályamunka, Haditechnika tagozat I. helyezés. 2003. ZMNE VSZTK Budapest.

Hegedűs Ernő: A vízbefecskendezés és emulziós tüzelőanyagok teljesítménynövelő hatása a korszerű hőerőgépek működésére: Intézményi Tudományos Diákköri Konferencia, Szolnok, 1998. Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, Vezetés és Szervezéstudományi Kar, Repülőgép Sárkány-Hajtómű Tanszék.

Hegedűs Ernő: Az egységes hajtóanyag-koncepció alkalmazásának jelentősége haditechnikai eszközök üzemeltetésében, különös tekintettel a szénhidrogén-víz emulziókra. Hallgatói Közlemények, 2003. évi 2. sz. 5. p.

Hegedűs Ernő: Vízbefecskendezés és emulziók alkalmazása repülőgép-hajtóműveknél. Haditechnika, 2000. évi 2. sz. 5. p.

Hegedűs Ernő: Vízbefecskendezés és vizes üzemanyag emulziók alkalmazása belsőégésű hőerőgépeknél. Magyar Szárnyak 2002 évi 30. évf. 1416-6577 6. p.

Hegedűs Ernő: Vízbefecskendezés, mint a katonai alkalmazású belsőégésű motorok hatásfoknövelésének és hőkibocsátás-csökkentésének új eszköze. Katonai Logisztika, 2017/1-2.

https://epa.oszk.hu/02700/02735/00084/pdf/EPA02735_katonai_logisztika_2017_1-2_036-084.pdf

How BMW Used Water To Make +50 Horsepower https://www.youtube.com/watch?v=PhShcJZ3JAK&ab_channel=EngineeringExplained

<https://autopult.hu/hirek/2-utan-4-aztan-5-otutemu-motort-mutattak-be-a-britek.html>

<https://thekneeslider.com/ilmor-5-stroke-engine-700cc-turbo-3-cylinder-130-bhp/>

<https://www.ilmor.com/home>

<https://www.visordown.com/news/general/ilmor-develop-5-stroke-motor-what>

Ilmor 5 Stroke Engine https://www.youtube.com/watch?v=u0uPmrSRM7w&ab_channel=IlmorEngineeringLtd.

Jaeheun Kim - Hyunwook Park - Choongsik Bae: Effects of water direct injection on the torque enhancement and fuel consumption reduction of a gasoline engine under high-load conditions. International Journal of Engine Research, Volume 17, Issue 7., November 2, 2015.

<https://doi.org/10.1177/1468087415613221>

M. Palanivendhan - Hitesh Modi - Garvit Bansal: Five Stroke Internal Combustion Engine. IJCTA, 9(13) 2016, pp. 5855-5862© International Science Press https://www.researchgate.net/publication/308673879_Five_Stroke_Internal_Combustion_Engine

Melton, R. B. – Lestz, S. J. – Quillian, R. D. – Rambie E. J. : Direct Water Injection Cooling for Military Engines and Effects on the Diesel Cycle. U. S. Army Fuels and Lubricants Research Laboratory, San Antonio, Texas, Symposium (International) on Combustion, Volume 15, Issue 1, 1975,1389-1399. o.

Nánási Tibor dr.: Kétütemű, léghűtéses Otto-motor hengertérbe történő vízbefecskendezés vizsgálata, Tatabányai szénbányák közleményei, 1973. 2.k.

NEW Water Injected Hydrogen Engine Is The End Of EVs! https://www.youtube.com/watch?v=Eb9060BVE4w&ab_channel=TechMachine

Patent ES0156621, F Jimeno-Cataneo, 1942;

Patent ES0433850, C Ubierna-Laciana, 1975.

Romain Nicolas: BMW tries direct water injection in its 3-cylinder gasoline engine. Car engineer. <http://www.car-engineer.com/bmw-tries-direct-waterinjection-in-its-3-cylinder-gasoline-engine/> (07-3-2015)

Sass Péter - Tóth Máté: Vízbefecskendezés alkalmazásának lehetőségei a környezetvédelmi normák teljesítésének elősegítése érdekében Tavasz Szél – Spring Wind 2019. tanulmánykötet. DOSZ, Budapest, 2020. 118-129. o.

Schmitz G., Five-stroke internal combustion engine, Patent US6553977B2, USA; April 29, 2003.,

Schmitz G., Five-Stroke Internal Combustion Engine-A new concept for internal combustion engines, St.Vith 2011, Belgium;5T Beschreibung & Studie

Scuderi Engine - How It Works (by www.caroto.gr) https://www.youtube.com/watch?v=BK2Mm7TYHuk&ab_channel=carotogr

The 5 stroke engine with water injection // Tested in Golf MK5 https://www.youtube.com/watch?v=muq1xIF8Gu4&ab_channel=Repairman22

Tóth Máté, Gyuris Attila, Rácz Balázs, Sass Péter, Rohde-Brandenburger Jan: Design and Testing of a Water Injection System of a Turbocharged Spark Ignition Engine in Testbench Environment

LECTURE NOTES IN MECHANICAL ENGINEERING 22 pp. 321-333. Paper: Chapter 29, 13 p. (2021)

US640890 JW Eisenhuth, 1900;

Using Exhaust Water To Make More Horsepower! https://www.youtube.com/watch?v=LB48sawbWAs&ab_channel=EngineeringExplained

Varga Zsolt: 2x2 ütemmel kétütemű Autó-Motor, 1981. január-június 34. évfolyam, 11. szám 46-47. o.

Von Amin Velji – Erwin Eichel – Wernner Remmels – Franz Haug: Diesel engines with Water Addition Meet Future NOx and Soot Limits, MTZ 57. (1996) 7/8, 400-407.

Water injection from the BMW M4 GTS is coming to the mass market - Bosch is now offering the system to other automakers. <http://www.autoblog.com/2016/08/31/bmw-m4-gts-water-injection-bosch-mass-marke>

Water-Powered ICE Is Here!!! | The Revolutionary 6-Stroke Engine https://www.youtube.com/watch?v=gMe8D_PbJ30&ab_channel=Ft-shareInternational

www.5-stroke-engine.com

Yubeen Yang - Hoseung Yi - Seungho Yang - Sungwook Park: Challenges and feasibility of a six-stroke engine using water direct injection. Applied Thermal Engineering, Volume 230, Part A, 25 July 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431123007822>

Hargitai L. Csaba - Simongáti Győző: Hajógépek. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar – Typotext, Budapest, 2017.

How Water Injection System Works-UE Engine's technology Vol.1- /層状水噴射技術 https://www.youtube.com/watch?v=vbq-boZWPUYQ&ab_channel=J-eng (2024.02.03.)

Marcin Noga: Selected Issues of the Indicating Measurements in a Spark Ignition Engine with an Additional Expansion Process. Appl. Sci. 2017, 7(3), 295; <https://doi.org/10.3390/app7030295>

Szűcs Herman - Vehovszky Balázs: Vízbefecskendezés alkalmazása az EURO 7 kibocsátási norma teljesítéséhez. XXIX. Nemzetközi Gépészeti Konferencia OGÉT–2021. <https://ojs.emt.ro/oget/article/view/469> 251-254.o.