



MAGYAR AGRÁR- ÉS
ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

BELSŐÉGÉSŰ MOTOR RÉSZECSCKE ÉS NO_x EMISSZIÓJA

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Szóllósi Dániel

Gödöllő
2025

A doktori iskola

megnevezése: Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága: Agrárműszaki Tudományok

vezetője: Prof. Dr. Kalácska Gábor
egyetemi tanár, DSc
MATE
Műszaki Intézet

Témavezető(k): Prof. Dr. Kiss Péter
egyetemi tanár, PhD
MATE
Műszaki Intézet

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető(k) jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK	4
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	5
1.1. A téma időszerűsége és jelentősége.....	5
1.2. Célkitűzések.....	8
2. ANYAG ÉS MÓDSZER	9
2.1. A felhasznált mérőberendezések	9
2.2. A Mérések típusai	11
2.3. Vízbefecskendezés.....	13
2.4. A vizsgálatok során felhasznált motorok.....	14
2.5. Fékcellák, kiszolgáló gépészet és a hajtóanyag rendszer ..	14
2.6. A mérőrendszer kialakítása.....	16
3. EREDMÉNYEK.....	17
3.1. A páratartalommal kapcsolatos vizsgálatok eredményei...	17
3.2. A vízbefecskendezés teljes emissziókezelő rendszerre kifejtett hatása	20
3.3. A vízbefecskendezés hatása a részecskeszűrő regenerációjára.....	25
3.4. A EGR és vízbefecskendezés párhuzamos működése	25
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	28
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	31
5.1. A vízbefecskendezéssel fellépő direkt és indirekt költségek és nyereségek	31
5.2. A víz emulzió és szívócsonk befecskendezés kombinációja	31
6. ÖSSZEFOGLALÁS	33
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ TARTOZÓ PUBLIKÁCIÓK	35

JELÖLÉSJEGYZÉK

Alkalmazott jelölések

<i>AH</i>	Abszolult páratartalom	[g/m ³]
<i>NO_x</i>	Nitrogén-oxid gáz emisszió	[g/kWh]
<i>PN₂₃</i>	23 nm fölötti részecskeszám	[#/kWh]
<i>PN₁₀</i>	Ultrafinom 10 nm alatti részecskeszám	[#/kWh]
<i>Rd</i>	Száraz levegő fajlagos gázállandója	[J/kgK]
<i>rpm</i>	Motor fordulatszám	[1/min]
<i>T</i>	Környezeti hőmérséklet	[°C]
<i>W_{ciklus}</i>	Adott emissziós ciklus alatt végzett munka	[kWh]

Rövidítések

<i>ATS</i>	Aftertreatment System – Emisszió utókezelő rendszer
<i>CeO₂</i>	Cerium-oxide – Cérium oxid
<i>CNG</i>	Compressed Natural Gas – Sűrített földgáz
<i>DOC</i>	Diesel Oxidation Catalyst – Dízel oxidációs katalizátor
<i>DPF</i>	Diesel Particulate Filter – Dízel részecskeszűrő
<i>ECE</i>	Economic Committee for Europe Regulation 15
<i>ECE 15</i>	Urban driving Cycle – Városi vezetési ciklus
<i>EGR</i>	Exhaust Gas Recirculation – Kipufogógáz visszavezetés
<i>EU</i>	European Union – Európai Unió
<i>EUDC</i>	Extra Urban Driving Cycle – Országúti emissziós teszt ciklus
<i>HD</i>	Heavy Duty – Teher- (autó)
<i>LD</i>	Light Duty – Könnyű teher- (autó)
<i>LNG</i>	Liquid Natural Gas – Cseppfolyósított földgáz
<i>LPG</i>	Liquefied Petroleum Gas - Autógáz
<i>NEDC</i>	New European Driving Cycle – Új európai emissziós teszt ciklus
<i>NO_x</i>	Nitrogen oxides – Nitrogén-oxidok
<i>OBD</i>	OnBoard Diagnostics – Motor Fedélzeti diagnosztika
<i>PLC</i>	Programmable Logic Controller – Programozható logikai vezérlő
<i>PM</i>	Particulate Mass – Részecske tömeg
<i>PC</i>	Personal Car - Személyautó
<i>PN</i>	Particle Number - Részecskeszám
<i>WHSC</i>	Worldwide Harmonized Stationary Cycle - Világszerte harmonizált állandósult ciklus
<i>WLTC</i>	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle
<i>WLTP</i>	Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

Életünk nélkülözhetetlen közege a levegő, ami az évmilliók folyamán jelentős változásokon ment át. Jelenlegi összetevői biztosítják az általunk ismert földi környezetet, ökoszisztémát. Periodikus változásait megzavarni látszik az emberi tevékenységek által a légkörbe kibocsátott nagy mennyiségű szennyezőanyag.

Ezek nagy része már évmilliók óta megtalálható a légkörben különböző koncentrációkban. A NO_x (nitrogén-oxid) az ózon talajközeli képződésének prekursora, ami az élet számára nélkülözhetetlen ózonpajzsot kialakította. Azonban az emberi tevékenység eredményeképpen savas esőként és szmog kialakulásáért is felelős. A közlekedési ágazatban a dízelmotor továbbra is a NO_x -kibocsátás fő forrása (Lee, et al., 2013, Reşitoğlu, 2020)

A levegőben lévő aeroszol részecskék - élőlények légzőszerveire kifejtett káros hatása mellett (Kreyling, et al., 2010, 4. Behndig, et al. 2006, Mills, et al. 2005) - tisztító erejének mértékét jól példázzák a nagy vulkánkitörések során a levegőbe jutott hamu és aeroszolak, melyek több napig vagy akár hetekig tartó sötétséget, illetve napfénycsökkenést okozhatnak egy adott térségben, sőt, a globális éghajlatra is hatással lehetnek.

Jelen korunkban a szennyező anyagoknak való kitettség nem ennyire drasztikus, viszont emberi léptékkal mérve hosszú távon állandósult. Ezek csökkentése jelenleg fél évszázados múltra tekint vissza. A modern társadalmakba az emissziócsökkentés fogalma beivódott, és ennek reprezentatív területe a gépjárművek károsanyag kibocsátása.

1.1. A téma időszerűsége és jelentősége

A közlekedés legmegfoghatóbb, leginkább szem előtt lévő területe, a szárazföldi közlekedés, mely jelenleg paradigmaváltás előtt áll. Az új (elektromos hajtás, hajtóanyagcella stb.) és a jelenleg is létező, de kevésbé elterjedt technológiák (CNG, LNG, LPG, vízbefecskendezés, emulziók változó kompresszióviszony is) (Milojević, et al., 2024) egy részének technológiai megalapozottsága is erősen hiányos. Várhatóan ezekkel az új hajtásokkal kapcsolatos ismeretek kibővülésével az egyes technológiák teljes „életciklusa” során kibocsátott emissziója is egyre pontosabban meghatározhatóvá és ennek eredményeképpen megfelelően szabályozhatóvá válik. Mindezek fényében az új

technológiák részesedései a közlekedésben, várhatóan az évszázad közepére gyökeres változásokon fognak átmenni. A minden eddiginél szigorúbb, bevezetésre kerülő EURO 7 szabályozás is erre készül, már technológiafüggetlen emissziós határértékeket ír elő.

A legjobban ismert hajtásrendszer jelenleg a belsőégésű motorok technikája, melynek csak az emissziókezelése 50 éves múltra tekint vissza. Ezen belül is a dízel motor a leginkább elterjedt a nem közúti alkalmazásokban, teherautókban, melyek károsanyag kibocsátáskezelése a legösszetettebb (Kalghatgi, 2019, Ning, et al., 2020). Az emisszió utókezelő rendszerben végbemenő reakciók nagy száma miatt elkerülhetetlen, hogy a káros emissziót csökkentő reakciók esetlegesen egymás ellen hatnak. A nitrogén-oxidok (NO_x) és a korom részecskék ezen problémák egyik fő kiváltói. Csökkentésük egymásnak szembemenő üzemállapotokat, katalizátorokat kíván. Az utókezelő rendszer elemek közül a legismertebbek és legelterjedtebbek a kipufogógáz visszavezetés, az oxidációs katalizátor és a részecskeszűrő, melyek együtt (legalább) az EURO 5-ös emissziós normáknak megfelelő szintet tudják teljesíteni a fejlett motorvezérlés segítségével.

2022 év végén jelent meg az Európai Bizottság EURO 7 emissziós rendelethez irányuló javaslata. A belsőégésű motorok fél évszázados emissziócsökkentési múltjának megfelelően a mostani szigorodás is nagy kihívások elé állítja a gyártókat. A jövőbeni előírások, mint a legutóbbi javaslaton alapuló Euro 7, a szakma várakozásainak megfelelően egy új elem, a 23 nm alatti részecskékre is kiterjednek majd, ami tovább növeli a részecskeszámlálási technológia jelentőségét

Mindemellett, az EURO 7 szabályozás kiemelten törekszik arra is, hogy a jelenleg is futó közel 1.5 milliárd gépjármű közül minél több kaphasson utólagos emissziócsökkentő átalakításokat. Az Európai Unióban a gépjárművek átlagos kora közel 12 év és a meglévő járműpark egyik legjelentősebb részét a 2011-től megjelenő EURO 5-ös járművek adják, melyeket én is vizsgálok. Az utólagos átalakításoknak lehetőleg minél egyszerűbbeknek és költséghatékonyabbaknak szükséges lennie. Ilyen lehetőség lehet a gépjárművek utólagos vízbefecskendező rendszerrel való ellátása is.

A belsőégésű motoroknál a szívóoldali vízbeporlasztást ezidáig jellemzően teljesítmény növelési céllal alkalmazták. A vízbeporlasztás emissziócsökkentő hatását azonban kevésbé vizsgálták, a víz esetleges belsőégésű motorra kifejtett káros következményei miatt. Ilyen például a korrózió – különösen a

dízel hajtóanyagban jelen lévő kéntartalom eredménye képpen –, a kenési problémák, motoralkatrészek kopása, valamint a folyékony víz megjelenésére az égésterben, amelyek különböző emulziós és vízbefecskendezési eljárások következményeként fordulhattak elő (Chybowski, et al., 2015, Wróblewski, et al. 2018, Holtbecker and Geist 1998, Vollenweider, et al. 1995) és amelyek modern kori technikákkal és anyagminőségekkel megszüntethetővé váltak.

A valós alkalmazásokban, miután a víz bekerül a motor égésterébe, a felesleges víz a kipufogógázokkal együtt távozik, és áthalad az egész utókezelő rendszeren. Ez hatással van az ATS összes komponensére. Jelenleg azonban nem áll rendelkezésre konkrét információ arról, hogy az egyes utókezelő rendszerekkel való hatása hogyan befolyásolja a kipufogó végén megjelenő kibocsátásokat. Ennek tisztázása különösen fontos lehet az utólagos átalakítások területén, ami jelenleg feltáratlan kutatási terület.

A bevezetés alatt álló új EURO 7-es normák keretében a már említett utólagos emisszió csökkentő átalakítások mellett kiemelt figyelem helyeződik a 23 nm alatti részecskékre (PN₁₀) is, mellyel kapcsolatosan szintén nem áll rendelkezésre vízbefecskendezéssel foglalkozó irodalom. Az EURO 7 új fejleményei arra utalnak, hogy a belső égésű motorral hajtott járművek 2035-re tervezett betiltása módosításra kerülhet (EU proposal 2023). Ez összhangban lenne az EURO 7 alapvetően hajtáslánc-semleges megközelítésével, valamint az Európai Bizottság álláspontjával, miszerint az EU nem kíván előnyben részesíteni egyes technológiákat.

Az égés során alkalmazott víz, mint technológia, újraértékelésre szorul a jelenlegi modern környezetben költségek, eredmények és előnyök szempontjából is. Mivel a retrofitting már meglévő, különböző szintű kibocsátáscsökkentő rendszerekkel rendelkező járművekre vonatkozik, azok az alkalmazások, illetve tanulmányok, amelyek a motor nyers kibocsátásaira irányulnak – legyen az teljesítmény vagy kibocsátáscsökkentés – csak korlátozottan lesz számomra felhasználható. Kutatásom gyakorlati alapú eredményekre fókuszál, a szakirodalom áttekintése során különbséget kell tenni az elmélet és a gyakorlat, valamint azok alkalmazása között. Mivel jelenleg a bevezetés alatt álló EURO 7-en kívül nincs megfelelő szabályozási ösztönző az utólagos emissziócsökkentő átalakítások irányába, az ilyen, eltérő megközelítéseket alkalmazó jármű-átalakításokról szóló szakirodalom eddig igen korlátozott volt.

1.2. Célkitűzések

Doktori munkámban a jellemző dízel kipufogó károsanyag összetevők csökkentését tűztem ki célul és ezzel kapcsolatosan a motor szívócsónkba történő víz-beporlasztás emisszió csökkentő lehetőségeit kutatom.

Dolgozatomban a fent ismertetett tények alapján a következő célokat tűztem ki, melyeket az alábbi sorrendben hajtom végre:

1. Áttekintem a szakirodalmat a vízbefecskendezés és az emissziókezelő rendszerek vonatkozásában és a modern környezetben.
2. Kifejlesztem és összeállítom a vizsgálatokhoz szükséges mérőrendszereket.
3. Megvizsgálom a kipufogórendszerben a hőmérsékleteket és a végbemenő reakciókat, mellyel a vízbefecskendezés nélküli alaphelyzetet meghatározom.
4. Megvizsgálom a páratartalom hatásait a károsanyag emissziókra, melyekből a vízbefecskendezéses tesztek előtt már fontos következtetéseket tudok levonni.
5. Vizsgálom a vízbefecskendezés hatását a teljes emissziókezelő rendszerre és a károsanyag kibocsátásokra.
6. Vizsgálom az emissziókezelő rendszer vízbefecskendezéssel kapcsolatos összehangolásának lehetőségét, illetve szükségességét az utólagos átalakíthatóság kapcsán (EURO 7).
7. A vízbefecskendezés hatékonyságának kiterjesztésére irányuló vizsgálatok:
 - a vízbefecskendezés hatása a részecskeszűrő regenerációjára,
 - a hajtóanyag fogyasztás vizsgálata.
8. Valós kiépítés lehetőségeinek vizsgálata.
9. A vízbefecskendezés hatékonyságának értékelése a rendszerben, mint egy olyan technika, ahol az egyidejű NO_x és részecske-csökkentés is megvalósítható:
 - ezzel bizonyítani, hogy a modern kor körülményei között a technológiai fejlődéssel és a közlekedés változásával a vízbefecskendezés eredményesen használható,
 - utókezelő rendszerek hatékonyságát nem rontja a vízbefecskendezés,
 - az EGR és vízbefecskendezés üzemeltetése egymást kiegészítve lehetséges valós rendszerekben.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

Ahogy az emissziós szabályozások megjelentek, szükség lett olyan berendezésekre és eljárásokra, amelyekkel a világ minden pontján megismételhető és összehasonlítható módon lehet mérni a jármű motorok által kibocsátott károsanyagokat. A következőkben ezek közül a vizsgálataim során használtakat vesszük sorra. Minden egyéb nem részletezett esetben a részecskeszám (PN) mérésére vonatkozó jelenleg is érvényben lévő, szabványos mérési eljárásokat használok, elsősorban az EU 595/2009-es szabályozásban leírtak szerint, illetve a mellékletekben és a „Közös műszaki specifikációk” -ban megtalálható Harmonizált Könnyű Járművek Vizsgálati Eljárása (WLTP) és az Új Európai Vezetési Ciklus (NEDC) szerint. Ezt kiegészíti és részletezi a 2017/1151/EU rendelet is.

A kapcsolódó méréseimet is ezekkel a berendezésekkel, és további járműiparban használatos K + F célú mérőműszerekkel, dokumentált, megismételhető módon végeztem, a következő fejezetekben részletezett módon.

2.1. A felhasznált mérőberendezések

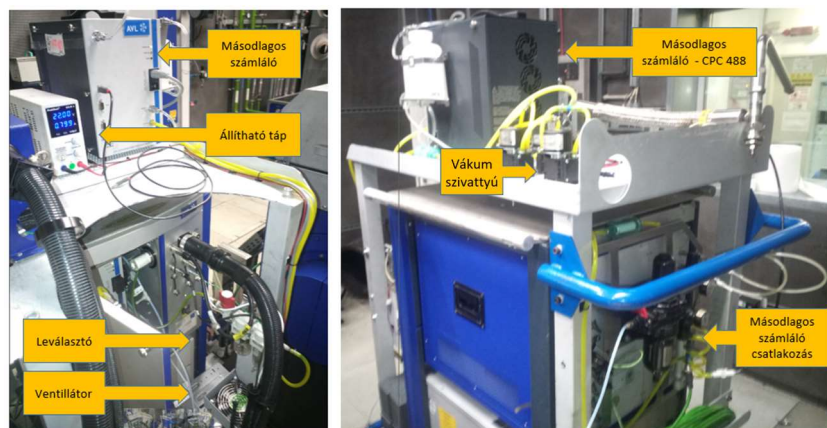
A DPF szűrési hatékonyságot mérő berendezés a jármű által kibocsátott részecskeszámot (PN - Particle number) számlálja. Ez a berendezés az AVL List GmbH gyártmányú Particle Counter Plus típusú berendezés. Ez egy kondenzációs részecske számláló (Condensation Particle Counter – CPC), ami széleskörben használt berendezés az aeroszolok részecskekoncentrációjának meghatározására az autóipari kutatások és fejlesztések területén (Kangasluoma és Attoui, 2019).

A kondenzációs részecskeszámlálóban az aeroszol szilárd részecskéit folyékony butanollal megnagyobbítják oly módon, hogy az a mintagázban lévő részecskékre kondenzálódik. A detektálókamrán való áthaladás során a megnagyobbított részecskék megszakítják a lézeres detektáló mechanizmust, mérhető jeleket generálva, amelyek lehetővé teszik az aeroszolimintában található részecskék pontos és megbízható megszámlálását és a térfogat egységenkénti részecskék ($\#/cm^3$) számának meghatározását. A mérésem az arányos részáramú hígító rendszerrel történik. Méréseim során nyers kipufogógázt 10000-es hígítási tényezővel a teljes rendszer után pedig 100-as hígítást használtam a részecskeszámláló eltömődésének elkerülése érdekében.

Hogy a tervezett eredményeket el tudjam érni, a 23 nanométeres mérések mellett a 10 nanométeres párhuzamos mérések lehetőségét is meg kell teremteni.

A részecskeszámláló (APC 489) másodlagos hígított kipufogógáz kimenetét (Exhaust Sec. Dil.) - ami részecske eloszlásmérő berendezés csatlakoztatására alakítottak ki - használtam fel a második részecskeszámláló (PNC External - CPC 488) csatlakoztatására. Így a másodlagos berendezés már az előkezelt és megfelelően hígított levegőt használja fel (2.1. ábra).

A berendezés különböző részeiben összegyűlt víz komoly problémákat, és károsodásokat tud okozni. Hogy a berendezés biztonságos üzemét biztosítsuk és megelőzzük az esetleges ezzel kapcsolatban felmerülő problémákat, a részecskeszámláló kipufogógáz bevezetése elé, levegőszűrő és páraleválasztó került beépítésre. A kiválasztás szempontja a könnyű kontrollálhatóság, (vizuálisan követhető a kondenzátum mennyisége) és a könnyű kiürítés, tisztíthatóság volt.



2.1. ábra: Az N kialakítás főbb elemei (Forrás: Szöllősi Dániel)

Az „Euro” jármű-kibocsátási irányelvek által szabályozott kipufogógáz-összetevők többsége túlnyomórészt gázhalmazállapotú szennyező anyagokból áll, melyek mérésére, a teszthelyiségekben AVL List GmbH gyártmányú AMAi60 típusú és egy HORIBA MEXA 7500 típusú többcsatornás folyamatos üzemű emissziómérő berendezéseket használunk. A berendezések 2 független mintavételezési csatornát alkalmaznak, ezáltal egyidőben tudnak NO_x (nitrogén-oxid), emissziót mérni a kipufogó rendszer 2 különböző pontján.

2.2. A mérések típusai

A vizsgálataim során használt AVL és a HORIBA motoros tesztcellák teljesen integrált rendszerek, amelyek a kondicionáló rendszerek, a motorfékpad, maga a motor, a kibocsátásmérő berendezések, az hajtóanyagrendszer, az adatrögzítő rendszer, valamint az üzemi szinten alkalmazott programozható logikai vezérlők (PLC-k) vezérlését egy, a vizsgálócellák előtt elhelyezett központi számítógépen keresztül valósítják meg.

Minden egyes kísérletet a vezérlőszoftver pontosan ugyanazon sorrendben és lépések szerint hajt végre, ezáltal biztosítva az eredmények megbízhatóságát és reprodukálhatóságát. Az egységes és műveleti utasításokba foglalt eljárások alkalmazása a vizsgálati ciklusok során lehetővé tette a kísérletek összehasonlíthatóságát és megismételhetőségét, ami elengedhetetlen a vizsgálatokból származó megbízható eredményekhez és hogy a megfelelő következtetéseket le tudjuk vonni.

A kibocsátási ciklusokat a gépjárművek jellemző üzemeltetési körülményeinek reprezentálása és azok próbapadi környezetben történő szimulációja céljából alakították ki. A kibocsátási előírások szigorodásával párhuzamosan egyre több hivatalos vizsgálati ciklus kerül bevezetésre. A ciklus típusa függ attól, hogy könnyű vagy nehézgépjárművekről (LD/HD) vagy személygépjárművekről (PC) van-e szó, valamint attól is, hogy a világ mely régiójában alkalmazzák. Ezenfelül különbséget kell tenni közúti és terephasználat (off-road) között is.

Vizsgálatam során az alábbi ciklusokat alkalmaztam:

- ECE 15, (Urban Driving Cycle – PC/LD),
- EUDC, (Extra Urban Driving Cycle – PC/LD),
- NEDC, (New European Driving Cycle – PC/LD),
- WLTC, (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle – PC/LD),
- WHSC, (Worldwide Harmonized Stationery Cycle – HD).

2017 óta az Európai Unióban bevezetésre került az új, Világszerte Harmonizált Könnyűgépjármű-teszteljárás (Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure, WLTP), valamint az ehhez tartozó új vizsgálati ciklus, a Világszerte Harmonizált Könnyűgépjármű-tesztciklus (Worldwide harmonized Light vehicle Test Cycle, WLTC) (Varella, et al., 2018).

Az új szabványt annak érdekében alakították ki, hogy jobban tükrözze a valós és korszerű vezetési körülményeket, ezáltal a

laboratóriumi körülmények között mért hajtóanyag-fogyasztási és kibocsátási értékek jobban megfeleljenek a valós közúti vezetési körülmények között tapasztalt adatoknak

A World Harmonized Steady State Cycle (WHSC) egy állandósult üzemállapotokat tartalmazó motorfékpadi vizsgálati ciklus, amelyet a Globális Műszaki Szabályozás (Global Technical Regulation, GTR) 4. számú előírása határoz meg (EUR-LEX, 2007). A WHSC ciklus, amely (ellentétben az NEDC és WLTC ciklusokkal) kizárólag állandó motorüzemi állapotokat foglal magában, az Európai Unió, az Egyesült Államok, Japán és Ausztrália jellemző közlekedési szokásainak lefedésére került kidolgozásra. Ennek megfelelően a WHSC ciklus került kiválasztásra jelen kutatás során is a páratartalom mérések elvégzésére. Ez a ciklus lehetővé teszi az eredmények egyszerű összehasonlíthatóságát a gyártói és más kutatási adatokkal.

A lehetőségekhez képest több módszer is létezik a korom töltésére. Ha a motor vezérlő egysége nem elérhető és nem lehetséges abban módosítást eszközölni, akkor a motor kondíció térkép alapján kell kiválasztani azt a kondíciót, ahol a motor leginkább kormol. Amennyiben lehetséges a motorkondíciókon változtatni abban az esetben a befecskendezési kondíciókon változtatva lehet elérni a motor jelentős kormolását. Jellemzően használt módszer a közös nyomócső nyomásának csökkentése.

A motor üzeme során a korom folyamatosan felhalmozódik a részecskeszűrőben (DPF). Amikor a DPF felfogja a szilárd részecskéket (PM), a kipufogógáz a koromrétegen való áthaladásakor ellenállásba ütközik, amely nyomáscsökkenést eredményez. Ahogy egyre több korom kerül kiszűrésre, ez a nyomásvesztés visszahat a motor működésére, teljesítménycsökkenést és hajtóanyag-fogyasztás növekedést okozva. Ennek következtében szükségessé válik a szűrőben felhalmozódott korom eltávolítása oxidáció útján.

Nagy kihívást jelent elegendő energiát biztosítani a részecskék égéséhez szükséges hőmérséklet – azaz körülbelül 600 °C – eléréséhez, és az ehhez alkalmazott technikák jelentősen bonyolítják és növelik a rendszer méretét.

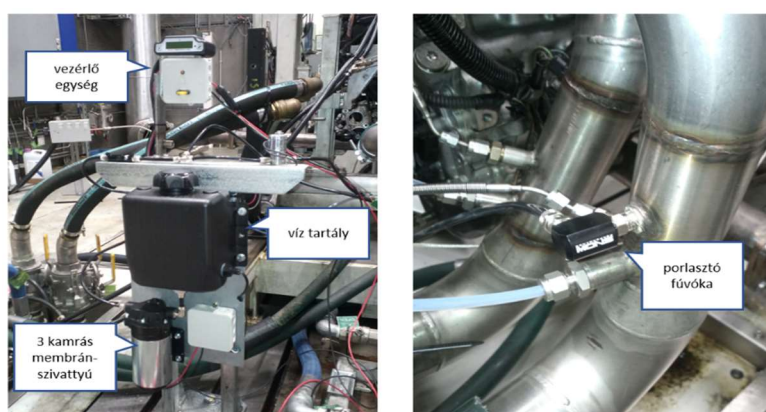
A szükséges regenerációs hőmérséklet elérésére két fő stratégia létezik: a passzív és az aktív regeneráció.

A jelenlegi mérési elrendezésemben katalizátorral bevont szűrőt alkalmaztam aktív regenerációval kombinálva. Az aktív rendszerben a regenerációhoz szükséges hőenergia a motor hengerein belüli égéstérhőmérsékletéből származik, amely meghaladhatja a 2200 °C-ot. E hőmennyiség hatékony kihasználását úgynevezett „utóbefecskendezéses” regenerációs

technikával érjük el, amely során többfázisú befecskendezést alkalmaztam a motor égésterébe. E két technika, a bevont DPF és az aktív regeneráció együttes alkalmazásával biztosítható a korom oxidációjához szükséges hőmérséklet elérése.

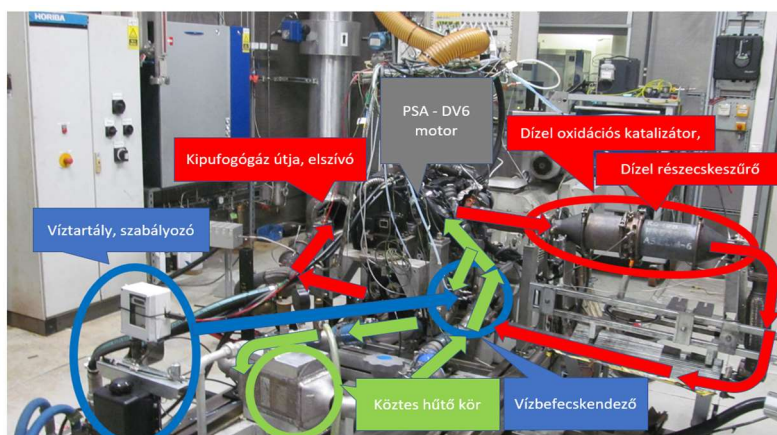
2.3. Vízbefecskendezés

A vízbefecskendező rendszer kiválasztásánál fontos szempont volt a kereskedelmi forgalomban való könnyű beszerezhetőség, ez által az utólagos átalakításnak való megfelelés. Erre a célra egy „Snow Performance Stage 3 TD MPG-MAX” rendszert választottam ki, mely a teljes teljesítményskálán végzi a befecskendezést. A befecskendező rendszer kiépítése a 2.2. ábrán látható



2.2. ábra: A telepített szívócsonk vízbefecskendező rendszer

A teljes kialakítás a 2.3 ábrán látható a DV6-os személyautó motoron. A tesztek során tisztított, ioncserélt vizet használtam.



2.3. ábra: Tesztcella a teljes mérőrendszerrel

2.4. A vizsgálatok során felhasznált motorok

A kutatásom során fontos szempont, hogy a kapott eredmények olyan reprodukálható és motortípustól független mérési eredmények legyenek melyek biztosítják a kutatás általánosíthatóságát és tudományos érvényességét. Ennek megfelelően a kutatás során alkalmazott motorok parametrizálhatók, vagyis fontosabb jellemzőik tetszőlegesen módosíthatók. Ez lehetővé teszi, hogy a motortípusoktól függetlenül, egyedi beállításokat alkalmazzak az egyes erőforrásokon, miközben biztosított, hogy a mérések során minden motor alrendszere egységes, rögzített paraméterekkel üzemel. Eközben a vizsgálat tárgyát képező paraméter célzottan változtatható.

A vizsgálatok során 2 személyautó, egy könnyű tehergépjármű és egy nehéz dízel gépjármű motort használtam fel (2.1. táblázat). A mérőrendszer aktuális kialakítását az eredmények fejezetben, minden vizsgálat esetében bemutatom.

2.1. táblázat: A mérésekhez használt motorok összefoglaló táblázata

Motor típusa	PSA DV6	PSA DW10	OM926LA	Volvo D13TC
Hengerek száma [-]	4	4	6	6
Furat, löket [mm]	75 x 88.5	85 x 88	106 x 136	131 x 158
Lökettérfogat [cm ³]	1560	1997	7201	12800
Teljesítmény [kW]	80	103	210	372
Nyomaték [Nm]	260	340	1120	2840
Kompresszió viszony [-]	16.0:1	17.3:1	17.5:1	18.0:1

2.5. Fékcellák, kiszolgáló gépészet és a hajtóanyag rendszer

A vizsgálatokat AVL és Horiba személyautó, Horiba könnyű kisteher és AVL nehéz teher fékpadokon végeztem. Teljes kondicionáló rendszereket tartalmaznak a folyadékok (hűtő, hűtött víz, hajtóanyag) és a levegő kontrollálására. A motoros tesztcellák, más néven motorfékpadok, olyan speciális vizsgálórendszerek, amelyek lehetővé teszik a belső égésű motorok különféle üzemi paramétereinek, például a teljesítmény, nyomaték és hajtóanyag-fogyasztás pontos mérését szabályozott körülmények között. A motorfékpadok előnye, hogy laboratóriumi pontosságot biztosítanak valósághű motorüzem

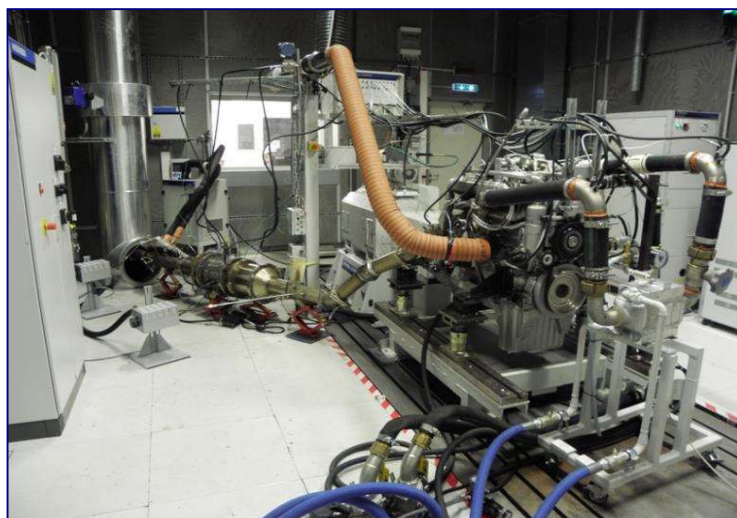
mellett (Steiber, et al., 2006). A tesztelési berendezések összefoglalása az 2.2. táblázatban található.

A kísérleteket az Ibsiden Hungary Ltd. kutatás-fejlesztési központjában végeztem el Magyarországon, ahol a fent említett kondicionáló berendezések és a teljes motoros dinamométeres tesztcellák megtalálhatók (2.4. ábra).

2.2. táblázat: A mérésekhez használt tesztcellák összefoglaló táblázata

	HORIBA TITAN T250	AVL Load System 220 kW	HORIBA TITAN T460	AVL Load System 500 kW
Dinamométer	Dynas3 HT250	DynoRoad 204/8	Dynas3 HT460	DynoRoad 504/4.6
Max. sebesség [1/min]	10 000	8000	8000	5000
Max. nyomaték [Nm]	700	934	1500	3000
Max teljesítmény [kW]	250	220	460	500
Teszt vezérlő rendszer	STARS 1.6	Puma Open 1.5.1	STARS 1.6	Puma Open 1.5.1
Hűtő közeg kond.	CM 15-200	ConsysCool	CM 30-400	ConsysCool
Kenőanyag kond.	CM 15-200	ConsysLube	CM 30-400	ConsysLube
Égéslevegő kond.	Comb. Air	ConsysAir	Comb. Air	ConsysAir
Töltőlevegő kond.	Charg. Air	ConsysBoost	Charg. Air	ConsysBoost
Hajtó. ellátó rendsz.	KMA 4000	KMA 4000	KMA 4000	KMA 4000
Részecskeszámláló	APC 489/488	APC 489/488	APC 489/488	APC 489/488
Gáz analízátor	MEXA 7500	AMA i60	MEXA 7500	AMA i60

A tesztciklusok kiértékeléséhez a mérési adatok rögzítéséhez pontos időpontjainak ismerete is elengedhetetlen. A rögzített mérési adatok magukban foglalták a motor üzemi paramétereit (például fordulatszám és motornyomaték), a környezeti feltételeket (például tesztcella levegőhőmérséklet, beszívott levegő nyomása, páratartalom, stb...), valamint a gáznemű és szilárd szennyező anyagok mennyiségét.



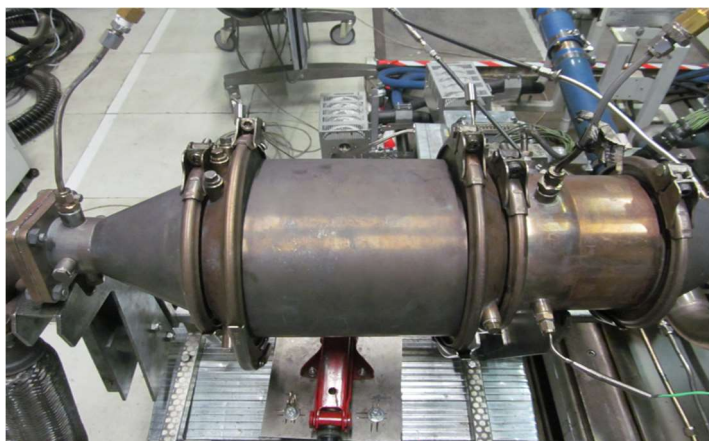
2.4. ábra: HORIBA MD Titan T460 motoros fékcella

Ezenkívül lehetőség van a motor fedélzeti diagnosztikai (OBD) érzékelőinek adatait is rögzíteni és a motorvezérlő egység által alapvetően szabályozott aktuátorok módosítására is.

2.6. A mérőrendszer kialakítása

Az emisszió utókezelő rendszer általam használt két eleme a DOC és a DPF.

A méréshez $1,8 \text{ dm}^3$ térfogatú platina-palládium nemesfémeket tartalmazó bevonatolt katalizátort (DOC) használtam. A felület növelésére gamma alumina ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) „washcoat” anyagot (felület növelő anyag), illetve a katalizáció elősegítésére cérium oxidot (CeO_2) is tartalmaz. A részecskeszűrő $3,8 \text{ dm}^3$ liter térfogatú katalitikus anyaggal ellátott (Johnson Matthey) Renault (RSA) kerámia szűrő (DPF).



2.5. ábra: Kipufogórendszer gyors csatos kialakítással

A DOC-t és a DPF -et is, rázkódás elnyelő és szigetelő anyaggal becsomagolva fém házakba nyomtam bele, melyeket úgy alakítottam ki, hogy könnyen eltávolíthatók és visszaszerelhetők legyenek a kipufogó rendszerbe (2.5. ábra).

3. EREDMÉNYEK

A méréseimet a 2. pontban bemutatott felszerelésekkel, anyagokkal és módszerekkel végeztem. A nagy mennyiségű tervezett méréseket modern EURO 5-6 besorolású, dízel személy-, könnyű tehergépjármű és nehéz tehergépjármű motorokon végeztem. Az egyes motorokat a vizsgálat céljának megfelelően választottam ki. Az eredményeimet időrendben, illetve logikailag felépítve mutatom be, az időközben fellépett problémákat és megoldásaikat az eredetileg nem tervezett vizsgálatokat így érthetővé téve.

3.1. A páratartalommal kapcsolatos vizsgálatok eredményei

A belsőégésű motorok működése során az égési folyamat fő alkotórészei az hajtóanyag és a levegő. A hajtóanyag összetevő lehetőségeit és hatásait széles körben vizsgálták, de a másik összetevőre, a levegőre jelentősen kevesebb figyelmet fordítanak. Ezt fix paraméternek tekintik, de legalább az egyik összetevője, a páratartalom, a környezeti körülményektől függően nagymértékben változhat, és nagy hatással lehet a motor működésére.

A kísérletekhez a korábban a 2. fejezetben bemutatott statikus WHSC ciklust választottam, amely biztosítja az eredmények jobb összehasonlíthatóságát. Az abszolút páratartalom kiszámításához a relatív páratartalom, hőmérséklet és nyomás az motor szívócsövénél kerültek rögzítésre.

2022 augusztusától 2023 júniusáig a fentebb bemutatott 3 fő lépésből álló ciklust futtattam le 18 alkalommal. A lehetséges páratartalom értékek így egy teljes évben nyomon követhetők, melyek reprezentatívak a mérsékelt égövben elhelyezkedő Magyarországra, ahol a kontinentális éghajlat mellett óceáni és mediterrán hatások is jellemzők.

Varianciaanalízist használtam a modell relevanciájának ellenőrzésére (3.1. táblázat), mely alapján a PN_{10} , PN_{23} és NO_x modellek alkalmazhatóak. A korreláció keresés során a vártaknak megfelelően a páratartalom és a PN_{10} , PN_{23} , NO_x között megfelelően erős a korreláció (3.2 táblázat).

3.1. táblázat: Varianciaanalízis a páratartalom és a részecske és gázemissziók között

	PN_{10}	PN_{23}	NO_x
p szignifikancia szint	0,0085	0,0090	0,0000

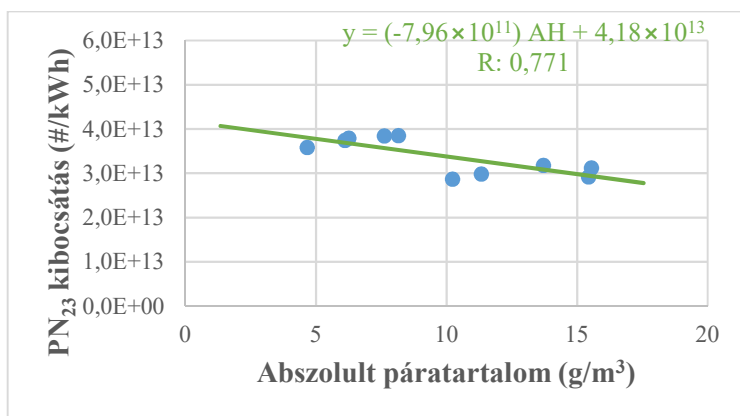
3.2. táblázat: Korreláció vizsgálat a páratartalom és a részecske és gázemissziók között

	<i>Páratartalom</i>	<i>PN₁₀</i>	<i>PN₂₃</i>	<i>NO_x</i>
R érték	1,000	-0,718	-0,771	-0,897

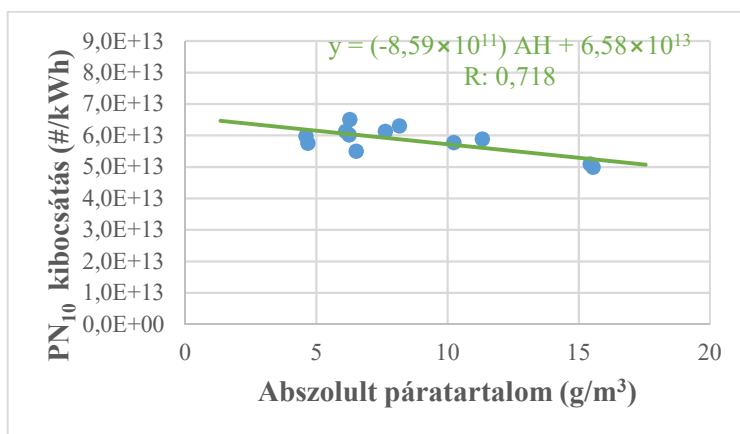
A regressziós vizsgálatok alapján lineáris függvénykapcsolat áll fenn a változók között. Az eredmények 3.1., 3.2., és a 3.3.-es ábrákon láthatók.

A felállított regressziós modellek és az illeszkedésük jósága:

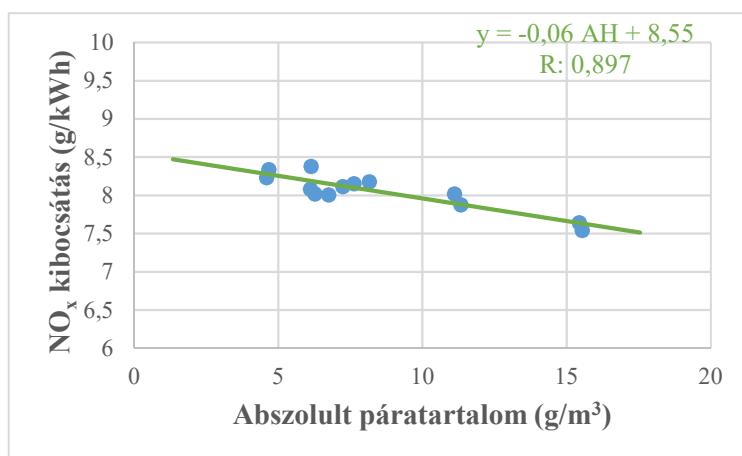
- 23 nm fölötti részecskék esetén $PN_{23} = (-7,96 \times 10^{11}) AH + 4,18 \times 10^{13}$,
- 10 nm fölötti részecskék esetén $PN_{10} = (-8,59 \times 10^{11}) AH + 6,58 \times 10^{13}$,
- Nitrogén-oxid kibocsátás esetén $NO_x = -0,06 AH + 8,55$.



3.1. ábra: PN_{23} kibocsátás a páratartalom függvényében



3.2. ábra: PN_{10} kibocsátás a páratartalom függvényében



3.3. ábra: NO_x kibocsátás a páratartalom függvényében

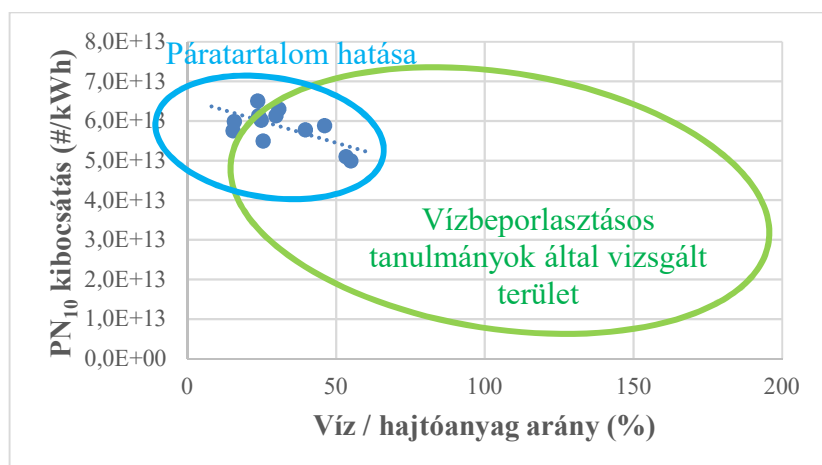
Az eredmények alapján megállapíthatjuk, hogy az abszolút páratartalom növekedésével a három fő dízelmotor emisszió csökkenő tendenciát mutat. Az év során mért legalacsonyabb (2,34 g/m³) és legmagasabb (15,55 g/m³) páratartalom közötti kibocsátások közötti különbségeket és a legnagyobb megállapított kibocsátáscsökkenést a 3.3 táblázatban láthatjuk.

3.3. táblázat: Kibocsátások csökkenése a modellek alapján az évi páratartalom ingadozásokkal

	PN ₂₃	PN ₁₀	NO _x
Évi maximum páratartalom esetén	2,94E+13	5,24E+13	7,63
Évi minimum páratartalom esetén	3,99E+13	6,38E+13	8,41
Kibocsátás különbség	26,35 %	17,80 %	9,29 %

A legjelentősebb kibocsátásokban mért különbséget a 23 nm fölötti részecskék esetén láthatjuk, ami 26,35 %. Ezt követi az ultrafinom részecskék eredménye 17,80 %-kal, illetve a nitrogén-oxidok 9,29 %-os eltérése.

Az eredményeket átszámoltam a víz/hajtóanyag arányra melyet a vízbefecskendezéssel kapcsolatos tanulmányok használnak mértékegységeként a hengertérbe bejuttatott vízmennyiség meghatározására. A jellemzően vizsgált befecskendezési mennyiségek mellett (Hadidi, et al., 2023; Pamminer, et al., 2020; Wei, et al., 2022), a 3.4. ábrán feltüntettem a páratartalomból adódó eredményeket, amellyel jelentős átfedés mutatkozik.

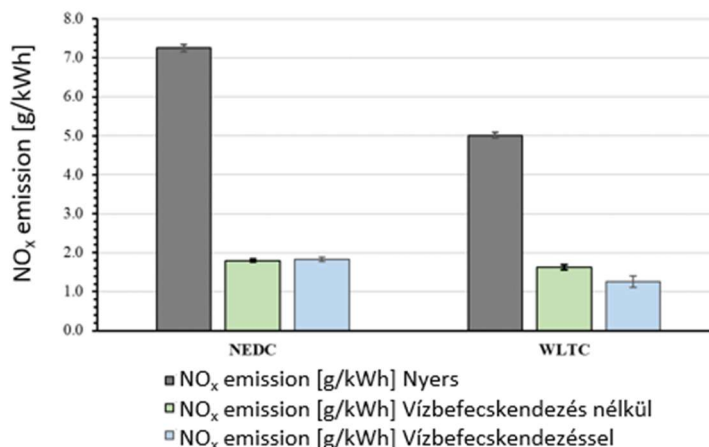


3.4. ábra: A részecskeszám eredmények a víz/hajtóanyag arány függvényében, a vízbefecskendezési vizsgálatok jellemző tartományával

A páratartalommal nem kalkulálva az eredményekben így jelentős torzulásokat okozhat a levegőben jelen lévő változó mennyiségű páratartalom.

3.2. A vízbefecskendezés teljes emissziókezelő rendszerre kifejtett hatása

A 3.5. és 3.6. ábrán láthatjuk a nyers emisszió mellett a teljes emissziókezelő rendszerben a vízbefecskendezés hatását az NEDC és a WLTC ciklussal, amely eredményeket összefoglalva az látszik, hogy a NO_x csökkenése mellett a kibocsátott részecskék száma is csökken a PN₂₃ mérettartományban.

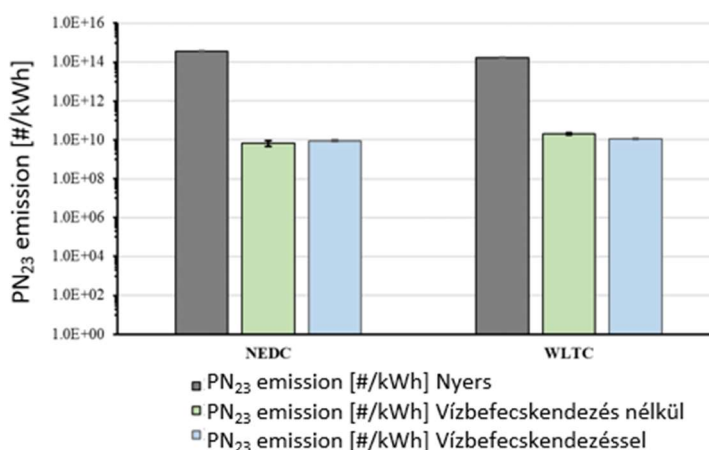


3.5. ábra: NO_x kibocsátás változása balról jobbra növekvő terhelésű ciklusok esetén

3.4. táblázat: NO_x kibocsátások csökkenése a teljes rendszerben, vízbefecskendezéssel és nélkül, a nyers kibocsátáshoz képest

	<i>Teljes rendszer</i>	<i>Teljes rendszerrel és vízbefecskendezés</i>
NEDC	-75,23 %	+ 1.75 %
WLTC	- 67,46 %	- 22,95 %

Ahogy a 3.4. táblázatban is láthatjuk, a teljes rendszerben vízbefecskendezés nélkül, az emissziócsökkenés visszaesik ~8 %-al, -75,2 %-ról -67,5 %-ra a nyers kibocsátáshoz képest. A Vízbefecskendezés hozzáadásával először nem volt jelentős kibocsátásváltozás az alacsony terhelésű NEDC ciklusnál. A WLTC-nél viszont ~23 %-kal kisebb lett az emisszió a vízbefecskendezés nélküli mérésekhez képest. Az NEDC-hez képest így 24,7 % a változás.



3.6. ábra: PN₂₃ kibocsátás változása balról jobbra növekvő terhelésű ciklusok esetén

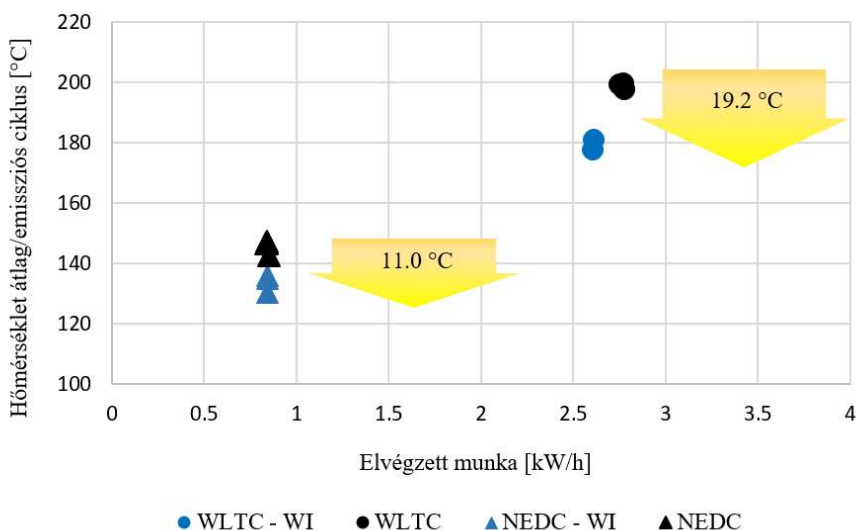
Ahogy a 3.5. táblázatban és a 3.6. ábrán is láthatjuk, a teljes rendszerben vízbefecskendezés nélkül az emissziócsökkenés, a részecskeszűrő jelenléte miatt gyakorlatilag 100 %.

3.5. táblázat: PN₂₃ kibocsátások csökkenése a teljes rendszerben, vízbefecskendezéssel és nélkül, a nyers kibocsátáshoz képest

	<i>Teljes rendszer</i>	<i>Teljes rendszerrel és vízbefecskendezés</i>
NEDC	-100,00 %	33,02 %
WLTC	-99,99 %	-46,76 %

Ehhez képest további jelentős 47 %-os csökkenés látható a legújabb jelenleg is érvényben lévő nagy terhelésű WLTC ciklussal. Az NEDC-hez képest így 79,8 % a változás

A 3.7. ábrán jól látszik, hogy 60 %-kal nagyobb az elért hőmérsékletcsökkenés a WLTC ciklus alatt, ami jól bizonyítja, hogy nagyobb terhelések esetén, magasabb fajlagos teljesítményű ciklusnál a hőmérsékletcsökkentő hatása jelentősen nagyobb a vízbefecskendezésnek.



3.7. ábra: a vízbefecskendezés hőmérsékletcsökkentő hatása

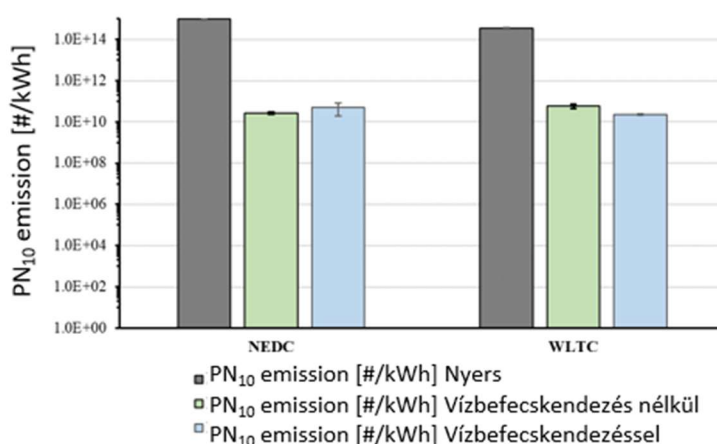
Az, hogy a vízbefecskendezés nagyobb terhelési tartományokban működik, egybe esik a jelenlegi kor „downsizing”, méretcsökkentéses törekvéseivel, amely a motorok terhelési szintjének növekedésével jár együtt (3.5., 3.6. ábra).

Ahogy bizonyítottam, a szívócsonk vízbefecskendezés károsanyag csökkentő hatékonysága növekedik a terhelés növekedésével és ez egybe esik a valós felhasználásokban található jellemzően teljesítménynövelésre használt befecskendezőrendszerek működési tartományával is.

Mindezek alapján az eredeti célkitűzéseimnek megfelelően (célkitűzések 5. pont) a jelen közlekedési környezetben a szívócsonk vízbefecskendezés eredményes alkalmazhatósága bizonyított egy jellemző EURO 5-ös dízel emissziós rendszerben. Az alapján, hogy milyen irányban változtak a forgalom körülményei az elmúlt 30-35 évben, a jövőbe tekintve a vízbefecskendezés alkalmazása egyre inkább kedvező.

A 23 nm alatti ultrafinom részecskék kibocsátásának vizsgálatával a vízbefecskendezés kapcsán még nem állnak rendelkezésre eredmények a szakirodalomban. Ennek oka az, hogy a mérés szükségessége és lehetősége is nagyon új.

A vízbefecskendezés az optimális üzemet az ultrafinom részecskék esetében is a nagyobb terhelésű WLTC ciklus alatt éri el. Ahogyan a 3.6. táblázatban és a 3.8. ábrán is láthatjuk, a teljes rendszerben vízbefecskendezés nélkül az emissziócsökkenés, a részecskeszűrő jelenléte miatt gyakorlatilag 100 %. Ehhez képest is további jelentős 62 %-os csökkenés látható a legújabb jelenleg is érvényben lévő nagy terhelésű WLTC ciklussal.



3.8. ábra: PN10 kibocsátás változása balról jobbra növekvő terhelésű ciklusok esetén

3.6. táblázat: PN₁₀ kibocsátások csökkenése a teljes rendszerben, vízbefecskendezéssel és nélkül, a nyers kibocsátáshoz képest

	<i>Teljes rendszer</i>	<i>Teljes rendszer és vízbefecskendezés</i>
NEDC	-100,0 %	+ 78,19 %
WLTC	-99,98 %	- 62,35 %

A jelenlegi eredményeim alapján a személyautó belsőégésű dízelmotor EURO 5-ös teljes emissziókezelő rendszer végén a hatályban lévő WLTC tesztciklussal és vízbefecskendezéssel a részecske kibocsátás szintén jelentős csökkenést mutat.

Ha az emissziókezelő rendszer minden egyes eleme után részecskeszám mérést végzek, meghatározhatóvá válik a részecskeszám csökkenés helye. Mivel emissziókezelő rendszer nélkül a páratartalomról már rendelkezésemre áll eredmény, ezért ezt követően a nyers kibocsátást vizsgáltam meg az emissziókezelő rendszer minden eleme, EGR, DOC, DPF után.

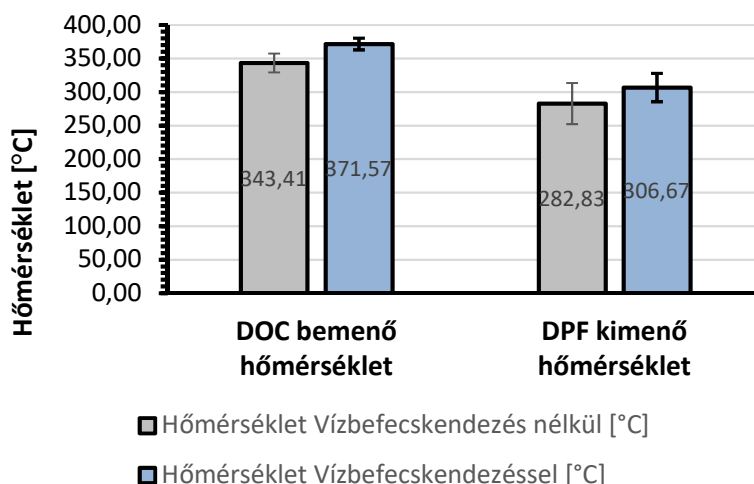
3.7. táblázat: PN_{10} kibocsátások csökkenése az emisszió utókezelő rendszer egyes elemei után NEDC ciklussal

	Vízbefecskendezés nélk.	Vízbefecskendezéssel	Változás
EGR	1,28E+15	1,45E+15	13,04 %
DOC	1,24E+15	1,15E+15	- 7,10 %
DPF	2,76E+10	4,91E+10	78,19 %

Az NEDC eredmények alapján az látható, hogy az EGR után a PN_{10} részecskekibocsátás növekedik hasonlóan a PN_{23} -hoz a szakirodalom alapján (3.7 táblázat).

Annak ellenére, hogy az NEDC ciklus alatt a DOC nem éri el a „light off” hőmérsékletét, így is jelentős a csökkenés (3.7 táblázat) látható a PN_{10} kibocsátásokban. A DPF-en nem jelenthető ki meghatározó változás. Ezek alapján bármilyen emissziócsökkentő mechanizmus, agglomeráció, vagy egyéb folyamat legalább is a DOC-n bizonyosan végbe megy a vízbefecskendezés eredményeképpen.

A vízbefecskendezés használatával is meggyőződtem az egyes utókezelő rendszer elemek hőmérsékleteiről. NEDC és WLTC ciklus használatával mind normál mind pedig a vízbefecskendezés esetében optimálisan tud üzemelni az emisszió utókezelő rendszer (3.9. ábra). A hőmérsékletek változása WLTC esetén a DOC bemenetén és a DPF kimeneti pontján is egyaránt + 8 % a vízbefecskendezés használatával.



3.9. ábra: Hőmérséklet maximumok EURO 5 emissziókezelő rendszer elemein WLTC tesztciklussal

Ebben a fejezetben a célkitűzéseim 5. pontjának megfelelően megállapítottam a vízbefecskendezés emissziócsökkentő hatását az ultrafinom PN_{10} károsanyag kibocsátásokra és további vizsgálatokkal meghatároztam az emissziócsökkenés helyét is, melyek új eredmények a vízbefecskendezéses szakirodalomban, illetve az EURO 7 kapcsán pedig kiemelt jelentőségű új eredmény.

3.3. A vízbefecskendezés hatása a részecskeszűrő regenerációjára

A motor működése során a korom folyamatosan felhalmozódik a részecskeszűrőben. A felhalmozott korommennyiséget időről időre el kell távolítani a korom oxidálásával (2.2. fejezet).

A nyomásesés és a tömegmérés alapján 3-7 %-os hatékonyság növekmény látható a víz jelenlétében végzett regeneráció során (3.8 táblázat).

3.8. táblázat: Regeneráció hatékonysága vízbefecskendezéssel és nélkül

	Teljes rendszer	Teljes rendszer + Vízbef.
Nyomásesés változás	-61,6 %	-68,8 %
Koromtömeg változás	-84,3 %	-87,6 %

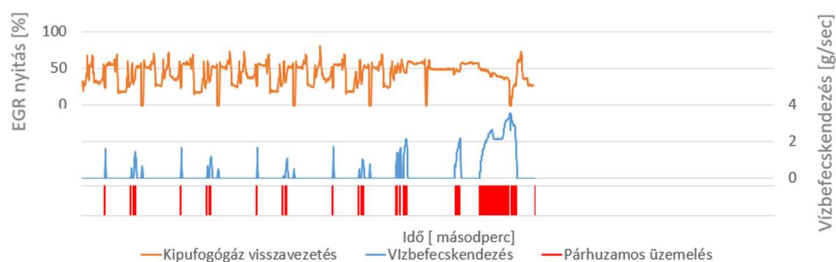
Ebben a fejezetben a célkitűzéseim 7. pontjának megfelelően a vízbefecskendezés hatékonyságának kiterjesztésére irányuló vizsgálatokat végeztem. A részecskeszűrő regenerációjára kapott eredmények bizonyítják a víz jelenlétében zajló regeneráció megnövekedett hatékonyságát, mellyel a gépjármű élettartama alatt jelentékeny hajtóanyagcsökkenés érhető el, és mellyel a részecskeszűrő versenyképessége direkt módon javulhat.

3.4. EGR és vízbefecskendezés párhuzamos működése

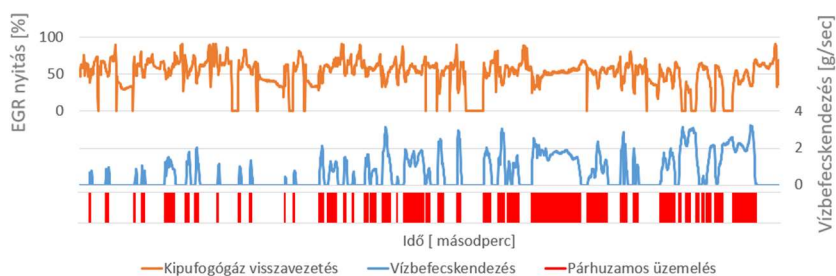
A publikációk alapján a rendszer túlszabályozottá válik, a vízbefecskendezés és az EGR együtt a hatékonyság csökkenéséhez vezet. A szakirodalomban fellelhető publikációk esetén, kísérleti környezetben vagyunk, jellemzően fix kondíciókon, együtt működtetik a két berendezést (konstans EGR nyitási értéken és vízbefecskendezéssel) kísérleti vízbefecskendező rendszereket használnak. Az EGR jellemzően alacsonyabb terheléseken működik, az égés rontásával csökkentjük a hőmérsékletet, a vízbefecskendezés pedig

jellemzően nagy terheléseken a fajhő és a fázisváltás hőelvonó hatása révén működik. Amikor a jármű nagyobb terheléseken halad, a vízbefecskendezés mennyisége növekedik az EGR nyitása pedig csökken. Ez a szakirodalomhoz képes mindenképpen új megállapítás.

Az, hogy a vízbefecskendezés nagyobb terhelési tartományokban működik megfelelően, egybe esik a jelenlegi kor „downsizing”, méretcsökkentéses törekvéseivel, amely a motorok terhelési szintjének növekedésével jár együtt. A közlekedés tempójának növekedése is látható, melyet az EURO szabályozások is próbálnak lekövetni újabb és újabb emissziós ciklusokkal, melyeknek fő jellemzője az agresszívabb vezetési stílus átvétele intenzív terhelésváltásokkal, szintén a magasabb teljesítmény szintekkel. Ennek megfelelően az újabb ciklusokkal (WLTC - Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle) is kiegészítő méréseket végeztem. Megvizsgáltam ezt a jelenséget, azokat a pontokat, ahol a vízbefecskendezés és az EGR párhuzamosan működik, és a feltételezések szerint ezen a módon egymás hatékonyságát csökkentik. A 3.10. és 3.11. ábrán láthatjuk, hogy mennyivel többet üzemel a vízbefecskendezés a WLTC alatt az NEDC ciklushoz képest, mégis a káros anyag emissziók csökkenése látható.



4.10. ábra: EGR és vízbefecskendezés üzeme közti átfedések NEDC ciklus alatt



4.11. ábra: EGR és vízbefecskendezés üzeme közti átfedések WLTC ciklus alatt

A jelenlegi közlekedéshez jóval közelebb álló WLTC ciklus alatt a nagyobb terhelések miatt a hőmérsékletek is jóval magasabbak így nincs túlhűtés a rendszerben.

Ezt bizonyítja a vizsgálatom is ahol az oxigénfelhasználást az oxidációs katalizátoron hasonlítottam össze és ezzel indirekt módon, az oxidációs katalizátoron végbemenő alábbi reakciók végbemeneteléről kaptam képet. A motorból kilépő és a katalizátor utáni oxigéntartalom alapján, WLTC ciklus esetén az oxigén felhasználás 56 %, míg vízbefecskendezéssel szintén 56 % adódik. Ez azt mutatja, hogy az oxidációs katalizátor konverziója megfelelő a WLTC ciklus alatt. Ennek eredményeképpen az oxidációs katalizátor teljesítménye nem degradálódik, így a szénhidrogének konverziója, ami a részecske kibocsátásért is felelős, nem romlik.

Ebben a fejezetben a célkitűzéseim 6. és 9. pontjának megfelelően megállapítottam, hogy az utókezelő rendszerek hatékonysága nem romlik, az EGR és vízbefecskendezés üzemeltetése egymást kiegészítve lehetséges valós rendszerekben. Mindezek alapján, nincs szükség az emissziókezelő rendszer és a vízbefecskendezés külön szoftveres összehangolására sem.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Tézis

Emissziótechnikai mérések alapján megállapítottam, hogy **a szívócsonk vízbefecskendezés kedvezően befolyásolja a teljes EURO 5 emissziókezelő rendszer együttes emissziótechnikai hatásfokát.** Ez a kedvező hatás a vizsgált emissziókezelő rendszer esetében a következők szerint nyomon követhető:

- az emissziókezelő rendszer hőmérséklete nem degradálódik, ami a szükséges reakciók végbemeneteléhez elengedhetetlen. A gázhőmérsékletek változása a rendszer jellemző pontjain, a DOC bemenetén és a DPF kimeneti pontján is egyaránt + 8 % vízbefecskendezéssel (3.2. fejezet),
- az oxidációs katalizátor konverziós hatékonysága nem változik, a károsanyagok átalakítási hatásfoka vízbefecskendezéssel és nélkül is 56 % (3.4. fejezet),
- a vízbefecskendezés képes az EGR-t kiegészítve teljes emissziókezelő rendszerekben üzemelve rendre további ~45 % PN_{23} , ~60 % PN_{10} és 23 % NO_x emissziócsökkenéseket okozni (3.2. fejezet)

A vizsgálatot közvetlen befecskendezéses, turbófeltöltéses személyautó dízelmotorral, illetve kereskedelmi forgalomban elérhető szívócsonk vízbefecskendező rendszerrel végeztem el a WLTC (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle) vizsgálati ciklus alkalmazásával.

2. Tézis

Méréseim alapján (3.1. fejezet) **megállapítottam, hogy a dízelmotorok működése során a beszívott levegő páratartalma az alábbi összefüggések szerint, kedvezően befolyásolja a károsanyag-kibocsátás mértékét.** Az abszolút páratartalom emelkedésével csökken a PN_{10} és PN_{23} részecskeszám, valamint a NO_x kibocsátása is – az éves páratartalom-ingadozáshoz kapcsolódóan – melyek mértéke rendre ~ 17-18 %, ~ 26 % és ~ 9 % és a következő egyenletekkel írhatóak le:

- 23 nm fölötti részecskék esetén $PN_{23} = (-7,96 \times 10^{11}) AH + 4,18 \times 10^{13}$,
- 10 nm fölötti részecskék esetén $PN_{10} = (-8,59 \times 10^{11}) AH + 6,58 \times 10^{13}$,
- Nitrogén-oxid kibocsátás esetén $NO_x = -0,06 AH + 8,55$.

Ahol AH: abszolút páratartalom [g/m^3]

Ezek a megállapítások a WHSC (World Harmonized Stationary Cycle) ciklus teljes terhelési tartományának figyelembevételével érvényesek. A károsanyag-kibocsátási értékek a teljes ciklusra vonatkozó kumulált adatok alapján kerültek meghatározásra. A vizsgálatot közvetlen befecskendezéses, turbófeltöltéses személyautó dízelmotorral, illetve kereskedelmi forgalomban elérhető szívócsonk vízbefecskendező rendszerrel végeztem el.

3. Tézis

Méréseim során **megállapítottam, hogy vízbefecskendezés használatával, EURO 5-ös teljes emissziókezelő rendszer végén, a hatályban lévő nagy teljesítményű WLTC emissziós ciklussal, ~ 45 %-os PN_{23} részecske kibocsátás és ~ 23 %-os NO_x kibocsátás csökkenés tapasztalható. A korábbi, 45 éven keresztül használt NEDC ciklussal végzett vízbefecskendezéses méréshez képest ez rendre ~ 25 % javulást ad az NO_x esetén és ~ 80 %-ot PN_{23} esetén.**

A vizsgálatot közvetlen befecskendezéses, turbófeltöltéses személyautó dízelmotorral, illetve kereskedelmi forgalomban elérhető szívócsonk vízbefecskendező rendszerrel végeztem el (3.2. fejezet).

4. Tézis

Méréseim során **megállapítottam, hogy vízbefecskendezés használatával, EURO 5-ös teljes emissziókezelő rendszer végén, a hatályban lévő nagy teljesítményű WLTC emissziós ciklussal, ~ 60 %-os PN_{10} részecske kibocsátás csökkenés tapasztalható.**

A vizsgálatot közvetlen befecskendezéses és turbófeltöltéses személyautó dízelmotorral, illetve kereskedelmi forgalomban elérhető szívócsonk vízbefecskendező rendszerrel végeztem (3.2. fejezet).

5. Tézis

Méréseim során **megállapítottam, hogy a vízbefecskendezés által kiváltott emissziócsökkentő hatás lokalizálható az EURO V emissziókezelő rendszer egyes elemein belül és a dízel oxidációs katalizátorban (DOC) fejt ki hatását** (3.2. fejezet). NEDC ciklussal végzett méréseim alapján a vízbefecskendezés mellett:

- **az EGR után a PN_{10} , ultrafinom részecskeszám ~ 13 %-kal nőtt,**

- **a DOC után** ~ 7 %-os csökkenés jelentkezett a víz égésre gyakorolt katalitikus hatásának eredményeképpen, annak ellenére, hogy a katalizátor nem érte el a „light-off” hőmérsékletet,
- **a DPF után** a részecskeszám alakulásában nem volt kimutatható változás.

A vizsgálatot közvetlen befecskendezéses, turbófeltöltéses személyautó dízelmotorral, illetve kereskedelmi forgalomban elérhető szívócsonk vízbefecskendező rendszerrel végeztem el. Az EURO 7-ben megjelenő ultrafinom részecskék vonatkozásában ezek az eredmények újdonságot képviselnek a vízbefecskendezés szakirodalmában.

6. Tézis

Közvetlen befecskendezéses, turbófeltöltésű motorral, EURO 5 emissziós rendszerben végzett terhelés alatti mérések során aktív regenerációt végeztem vízbefecskendezés alkalmazásával és anélkül (3.3 fejezet). A vizsgálatokból kapott eredményeim alapján, **megállapítottam, hogy a vízbefecskendezéssel támogatott aktív regeneráció során a dízel részecskeszűrő (DPF) regenerációs hatékonysága 3–7%-kal növelhető a hagyományos (vízbefecskendezés nélküli) módszerhez képest.**

A nyomásesés- és tömegmérés alapján a víz jelenléte katalizálta az oxidáció folyamatát, mellyel jelentősen javította a regeneráció hatékonyságát:

	Teljes rendszer	Teljes rendszer + Vízbef.	Hatékonyság növekedés
Nyomásesés változás	-61,6 %	-68,8 %	7,2 %
Koromtömeg változás	-84,3 %	-87,6 %	3,3 %

A regeneráció teljesebb volt, amit a részecskeszűrő homlokfelületének vizuális elemzése is alátámasztott. A vízbefecskendezéssel elért hatékonyabb regeneráció hozzájárulhat a hajtóanyag-fogyasztás mérsékléséhez és a részecskeszűrők versenyképességének növeléséhez.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

5.1. A vízbefecskendezéssel fellépő direkt és indirekt költségek, nyereségek

Ebben a fejezetben a célkitűzéseim 7. pontjának megfelelően a vízbefecskendezés hatékonyságának kiterjesztésére irányuló vizsgálatok kapcsán a hajtóanyag fogyasztás változásait vizsgáltam. Teljes emissziókezelő rendszerrel végeztem méréseimet vízbefecskendezéssel és nélkül, NEDC és WLTC ciklusok esetén is. Az eredmények összefoglalóan a 5.1 táblázatban láthatók.

5.1. táblázat: Hajtóanyag felhasználás változása a vízbefecskendezéssel

	Vízbefecskendezés nélkül [kg/h]	Vízbefecskendezéssel [kg/h]	Változás [%]
NEDC	1512,26	1538,24	1,72
WLTC	3249,63	3196,25	-1,64
Hajtóanyag felhasználás változása	-	-	-3,36

Az eredmények alapján a nagy teljesítményű ciklusokkal a többlet fogyasztás átfordulni látszik, az NEDC alatt 1,72 %-kal nagyobb fogyasztás látható, míg a WLTC alatt már 1,64 %-kal kisebb a fogyasztás a vízbefecskendezéssel.

5.2. Víz emulzió és szívócsonk befecskendezés kombinációja

Ebben a fejezetben a célkitűzéseim 8. pontjának megfelelően a valós kiépítés lehetőségeit vizsgálom.

Mint ahogy arról korábban már volt szó a szívócsonk befecskendezés leghatékonyabban nagyobb terheléseken használható, ahol az EGR hígító, oxigén csökkentő hatása már jelentős teljesítménycsökkenést okoz, valós rendszerekben kikapcsolásra kerül. Ezzel szemben a vízbefecskendezés fajhőből, fázisváltozás hőjéből és kémiai hatásából adódóan nagy teljesítménynél is jelentős nitrogén-oxid csökkenést okoz teljesítmény csökkenés nélkül.

Alacsony terheléseken az EGR -el összehasonlítva egy másik vízbefecskendezési technika a víz-hajtóanyag emulzió a szakirodalom alapján kedvezőbb az emissziócsökkentés és a

motor teljesítményére és fogyasztására is. Minimális módosítást és befektetést igényel, ha a motor saját befecskendező rendszerével használjuk. Hátránya is ebből fakad, hogy a motor saját befecskendezőjével csak korlátozottan, 20-25 térfogat százalékig (hajtóanyaghoz viszonyítva), illetve alacsony terheléseken használható. Az EGR-nek azonban – alapesetben - ezzel szemben itt továbbra is meg lehet az az előnye, hogy nem kell további tartály, beszerelés után nem igényel folyamatos felügyeletet a tartály feltöltése.

Ezzel szemben, ha az emulziót a szívócsonk befecskendezéssel együtt használnám, egy tartályról üzemeltetve, befecskendezés előtt keverve az emulziót is, akkor ez az előny eltűnik annak fényében, hogy egy olyan emissziócsökkentő rendszert kapok, ami a teljes teljesítményskálán tudja párhuzamosan a nitrogén-oxidokat és a részecskékibocsátást is csökkenteni a dízel emisszióban is. Utólagos átalakításokra alkalmas, a katalizátor elmergezésétől sem kell tartanunk. Az emulzió hátránya, hogy a motor saját injektorával korlátozottan használható, itt nem jelentkezik, hiszen nagyobb teljesítményen a szívócsonk befecskendezés venné át a szerepet, ami pedig egyébként is a közepes, illetve nagyobb terheléseken működik optimálisan.

Az úgynevezett FWE (fuel-water emulsion injection) rendszerben külön víztartályból és normál hajtóanyag tartályból történik az emulzió létrehozása. A vizet az hajtóanyag rendszerbe nagy nyomáson fecskendezik és homogenizálják. Az így létrehozott emulzió rögtön befecskendezésre is kerül a hengertérbe, a felesleg pedig recirkulációs vonalon keresztül távozik. Ezen rendszerbe tervezem beleilleszteni a szívócsonk vízbefecskendezést, melynek eredményeképpen a motor teljes teljesítmény skáláján optimálisan működtethető rendszert kapunk. Olyan esetekben amikor nyers emissziót kell csökkenteni ez különösen eredményes technika lehet, megvalósulás esetén érdemes szintén összehasonlítani teljes emissziós rendszerekkel és mellett is.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A jövő mobilitásával foglalkozó doktori témám a szárazföldi közlekedés környezeti hatásainak csökkentésére koncentrál, azon belül is a dízel belsőégésű motorok emissziójának mérséklésére. Mint ilyen, utólagos emissziócsökkentő technika, a 2000-es években az akkori technikai színvonalon, a vízbefecskendezés alkalmazása az esetleges kockázatok és elérhető eredmények mérlegelése alapján, kevésbé ígéretes technikának bizonyult. A jelenlegi technikai és technológiai háttérrel kutatásom során, újra értékeltem a vízbefecskendezést és annak alkalmazhatóságát. A szakirodalmi összefoglalóban körüljártam a károsanyag emissziókat, a levegőtisztaságvédelmet, emissziós szabványokat és a kibocsátások csökkentésére tett eddigi erőfeszítéseket. Alapvető problémákat tártam fel az utólagos emissziócsökkentő kutatásokban, illetve azok hiányában és a vízbefecskendezés belső égésű motor emissziókezelő rendszerben való elhelyezésében és – itt is szintén – hiányában. Értekezésem időrendi sorrendben vizsgálja a dízelüzemű motorok égésébe történő vízbefecskendezéssel kapcsolatos szakirodalmat, az elmúlt három évtizedben bekövetkezett változásokra összpontosítva. Ezután elemzi és újraértékeli a vízbefecskendezést a jelenlegi technológia és a közelgő Euro 7 szabályozási kontextusában, összehasonlítja a következtetéseket a jelenlegi autóiipari felhasználásokkal és mobilitási trendekkel, hogy bemutassa a lehetséges előnyöket és a leendő kutatási irányokat ebben az ágazatban.

Annak érdekében, hogy ezekre a hiányosságokra megfelelően választ tudjak adni, széleskörű alapozó vizsgálatokra volt szükségem, melyek segítségével lehetővé vált, hogy újszerű megállapításaimat bizonyossággal tudjam megtenni és alátámasztani.

Az emisszió utókezelő rendszerben, - a gépjármű kipufogó rendszerében – végbemenő folyamatok a kipufogógáz hőmérsékletével szoros kapcsolatban állnak. Ennek megfelelően ebben az irányban is méréseket végeztem a tipikus hőmérsékletek megállapítására a tervezett emisszió utókezelő rendszer elemein. Összesítettem az itt végbemenő meghatározó reakciókat a dízel oxidációs katalizátoron (DOC), a dízel részecskeszűrőn (DPF), és ezeket táblázatosan is összefoglaltam, mely nagyban segítette későbbi eredményeim megértését.

A vízbefecskendezéses tesztek megkezdése előtt felmértem a páratartalommal már eleve a hengertérbe jutó víz hatását és megállapítottam, hogy az égéstérben végbemenő reakciók a páratartalom következtében magasabb víztartalmú levegő esetén a tökéletes égés felé tolódnak el. Ennek eredményeképpen az emissziók csökkenése során új eredményként már itt is láthattuk a

PN₁₀ részecskeméret csökkenését, amely a megjelenő EURO 7 emissziós szabályozás egyik új eleme.

Méréseket végeztem, hogy a vízbefecskendezés hőmérsékletre kifejtett hatását megállapítsam a motor után, illetve az emisszió utókezelő rendszer mentén. Itt megállapítottam, hogy az oxidációs katalizátor konverziója megfelelő és a hőmérsékletek sem degradálódnak az egyes emissziókezelő elemeken

Kutatásommal bizonyítottam, hogy a jelenkor technikai környezetében a „downsizinggal” és a jelenlegi közlekedést leképző nagy terhelésű ciklusokkal (WLTC) a szívócsonk befecskendezés jól tud teljesíteni. Valós körülmények között a kipufogógáz visszavezetés a jellemző dízel károsanyag emissziókat a NO_x -kat és a PN₂₃ -at csökkenteni képes. A bevezetés előtt álló EURO 7 kapcsán fontos új eredmény, hogy PN₁₀ részecskeméret kibocsátásra is pozitív hatással van, és a csökkenés helyét is meghatároztam.

A gyakorlatias és valós alkalmazásokat preferáló anyag és módszerhasználat eredményeképpen eredményeim könnyen átültethetők és felhasználhatóak vízbefecskendezéssel kapcsolatos utólagos átalakításoknál. Vizsgálataim eredményeképpen látható, hogy a költséges motorvezérlés módosítása nélkül is képes a szívócsonk vízbefecskendezés pozitív emissziós hatásokat felmutatni. A vízbefecskendezés használata mellett nem tapasztaltam többlet hajtóanyag fogyasztást a teljes emissziókezelő rendszer használatával, azonban a dízel részecskeszűrő regenerációjára – a korom égésére - kifejtett pozitív katalitikus hatás eredményeképpen az utóbefecskendezés időtartama csökken, ami a hajtóanyag felhasználást csökkenti.

7. ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

Lektorált cikk világnyelven

1. **Szőllősi, D.**, Kiss, P. (2024): Effects of Water Injection in Diesel Engine Emission Treatment System—A Review in the Light of Euro 7. *Energies*, 17 (20), Paper: 5107, 29 p., <https://doi.org/10.3390/en17205107> (Scopus: Q1, IF = 3.0)
2. Bíró, N., Kiss, P., **Szőllősi, D.** (2024): The Emission of off-Road Vehicles and Their Reduction Options. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1311 (1), Paper: 012010, 9 p., <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1311/1/012010>
3. Bíró, N., **Szőllősi, D.**, Kiss, P. (2024) Evaluation of NO_x and PN Emission in Relation to Actuator Control. *Sensors*, 24 (14), Paper: 4430, <https://doi.org/10.3390/s24144430> (Scopus: Q1, IF = 3.4)
4. Bíró, N., **Szőllősi, D.**, Kiss, P. (2023) Particle Counter Design Upgrade for Euro 7. *Atmosphere*, 14 (9), Paper: 1411, <https://doi.org/10.3390/atmos14091411> (Scopus: Q2, IF = 2.9)
5. **Szőllősi, D.**, Kiss, P., (2023): Reactions on the typical temperatures of the diesel aftertreatment system. *Mechanical Engineering Letters: R and D: Research and Development*, Vol. 24, pp. 179-198., 20 p., HU ISSN 2060-3789
6. **Szőllősi, D.**, Kiss, P. (2023): Soot accumulation in the diesel particulate filter and its effect on the filtration efficiency. *Mechanical Engineering Letters: R and D: Research and Development*, Vol. 22, pp. 61-69., 9 p., HU ISSN 2060-3789
7. Bíró, N., Pillinger, Gy., Kiss, P., **Szőllősi, D.**, Ohira, A. (2021): Reducing nitrogen oxides in ICE R&D laboratory environment. *Mechanical Engineering Letters: R and D: Research and Development*, Vol. 20, pp. 50-58., 9 p., HU ISSN 2060 3789
8. Bíró, N., Pillinger, Gy., Kiss, P., **Szőllősi, D.**, Ohira, A. (2020) Experimental SCR System for Engine Dynamometer Applications. *Hungarian Agricultural Engineering*, Vol. 38, pp. 56-62. 7 p., <http://doi.org/10.17676/HAE.2020.38.56>

Lektorált cikk magyar nyelven

9. Csankó, Cs., Bíró, N., **Szőllősi, D.**, Kiss, P. (2021) Belső Égésű Motor Részecskeszűrési Hatékonyságának Változása Az Üzemóra Függvényében. *MEZŐGAZDASÁGI TECHNIKA*, 62 (12), pp. 2–5., 4 p., ISSN 0026-1890
10. Csankó, Cs., **Szőllősi, D.**, Bíró, N., Kiss, P. (2021) Dízelmotor NO_x Kipufogógáz-Emissziójának Mérése. *MEZŐGAZDASÁGI TECHNIKA*, 62 (9), pp. 2–5., 4 p., ISSN 0026-1890

11. **Szőllősi, D.**, Bíró, N., Kiss, P. (2020) A Dízel Részecskeszűrő (DPF) Koromszűrési Hatékonyságának Megállapítása. *MEZŐGAZDASÁGI TECHNIKA*, 61 (9), pp. 2–5. 4 p., ISSN 0026-1890

Nemzetközi konferencia kiadvány

12. **Szőllősi, D.**, Kiss, P. (2024): The combination of exhaust gas recirculation and water injection in a modern diesel engine, *21st International and 12th Asia-Pacific Regional Conference of the ISTVS*, Paper 1902., 9 p., <https://doi.org/10.56884/XAK8652F>, Yokohama, Japán, 2024, October 28-31.
13. **Szőllősi, D.**, Kiss, P. (2023): Effects of Humidity on the emissions of the diesel engines, *16th European-African Regional Conference of the ISTVS*, Paper 4816., 6 p., <https://doi.org/10.56884/IGQO3531>, Lublin, Lengyelország, 2023, October 11-13.

Nemzetközi konferencia abstract

14. Bíró, N., **Szőllősi, D.**, (2023): Emission Quantification for Sustainable Heavy-Duty Transportation, The 10th World Sustainability Forum: Basel Hub - Sustainable Transition p. 31 Paper: sciforum-073454, <https://sciforum.net/event/WSF-10>, Basel, Svájc, 2023, Szeptember 14.

Idézetek

A „**Particle counter design upgrade for EURO 7**” publikációt idézték:

15. Giechaskiel, B.; Melas, A.; Broekaert, S.; Gioria, R.; Suarez-Bertoa, R. (2024): Solid Particle Number (SPN) Portable Emission Measurement Systems (PEMS) for Heavy-Duty Applications. *Appl. Sci.* 2024, 14, 654., ISSN: 2076-3417, <https://doi.org/10.3390/app14020654> **IF 2.7, Scopus Q2**

Az „**Effects of Water Injection in Diesel Engine Emission Treatment System—A Review in the Light of EURO 7**” publikációt idézték:

16. Sharkey, A.; Zare, A.(2024) The Impact of Water Injection and Hydrogen Fuel on Performance and Emissions in a Hydrogen/Diesel Dual-Fuel Engine. *Energies* 2024, 17, 5838. <https://doi.org/10.3390/en17235838> **IF 3.0, Scopus Q1**
17. Başaran, B.Ü. (2025) Advanced Technologies to reduce nitrogen oxide emissions in diesel engine systems, *Makine Mühendisliği Konuları* 2025, pp.1-21, 22 p., E ISBN, 978-625-5547-75-0 (mtmt-ben még nem jelent meg)