



MAGYAR AGRÁR- ÉS
ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

BELSŐÉGÉSŰ MOTOR RÉSZECSCKE ÉS NO_x EMISSZIÓJA

DOI: 10.54598/007140

Doktori (PhD) értekezés

Szőllősi 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	6
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	9
1.1. A téma időszerűsége és jelentősége.....	9
1.2. Célkitűzések.....	11
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	13
2.1. A levegőtisztaság védelem	13
2.1.1. Szennyező anyag kibocsátások	13
2.1.2. Emisszió, transzmisszió, imisszió	16
2.1.3. Környezet károsító hatások	17
2.1.4. Egészségkárosító hatások.....	18
2.1.5. Antropogén hatások.....	19
2.2. Kibocsátási szabványok	21
2.2.1. Személygépkocsi kibocsátási normák	21
2.2.2. Nem közúti járművekre vonatkozó kibocsátási normák	25
2.3. Kipufogógáz károsanyag összetevők csökkentése	26
2.3.1. Emissziócsökkentési stratégiák a dízel motorban.....	27
2.3.2. A motor előtti csökkentési lehetőségek	27
2.3.3. A motorban megvalósítható lehetőségek	28
2.3.4. Kipufogógáz visszavezetés	28
2.3.5. A kipufogógázok utókezelése	30
2.3.6. Oxidációs katalizátorok.....	30
2.3.7. Dízel részecskeszűrő (DPF)	33
2.3.8. Szelektív katalitikus reduktor (SCR)	35
2.3.9. Modern emisszió kezelő rendszerek.....	35
2.4. Víz a belsőégésű motor üzemében	36
2.4.1. A víz égésterbe juttatása, múlt és jelen.....	36
2.4.2. A víz hatása a NO _x kibocsátásokra.....	37
2.4.3. A víz hatása a részecskékre	40
2.4.4. A víz hatása a motor működésére és hatékonyságára	41
2.4.5. A víz hatása a motor korróziójára és kopására.....	41
2.4.6. A víz égésterbe juttatásának lehetőségei	43
2.4.7. A víz hatása a kipufogógáz visszavezetésre.....	45
2.4.8. A víz hatása az utókezelő rendszer elemeire	46

2.4.9. A víz hatása a DOC-re	47
2.4.10. A víz hatása a DPF-re	47
2.5. Szakirodalom kritikai elemzése	48
3. ANYAG ÉS MÓDSZER	51
3.1. A felhasznált mérőberendezések	51
3.1.1. A részecskemérés berendezései	51
3.1.2. A részecskeszámláló átalakításának megoldásai, vízbefecskendezéses vizsg	53
3.1.3. Gázemissziómérő berendezések.....	55
3.1.4. Nyomás és hőmérséklet mérés berendezései	58
3.2. A Mérések típusai.....	59
3.2.1. Szűrési hatékonyság.....	59
3.2.2. Koromtöltés	61
3.2.3. Regeneráció.....	61
3.2.4. „Drop to Idle” vizsgálati módszer	63
3.3. Vízbefecskendezés.....	64
3.4. Vizsgálat során felhasznált motorok.....	66
3.4.1. PSA DV6 személygépjármű dízel motor	66
3.4.2. PSA DW10 személygépjármű dízel motor	67
3.4.3. Daimler OM926 könnyű tehergépjármű dízel motor	68
3.4.4. Volvo DI3C nehéz gépjármű dízel motor	68
3.5. Fékcellák, kiszolgáló gépészet és a hajtóanyag rendszer	69
3.6. A mérőrendszer kialakítása.....	73
3.7. Főbb számítások, felhasznált egyenletek.....	74
3.7.1. Páratartalom számítások	74
3.7.2. Szilárd részecske számítása	75
3.7.3. Gázkomponensek számítása	75
3.8. Az adatfeldolgozás folyamata, kiértékelési módszerek.....	76
4. EREDMÉNYEK.....	77
4.1. A dízel emisszió utókezelő rendszer jellemző hőmérsékletein végbemenő reakciók vizsgálata	77
4.2. A páratartalommal kapcsolatos vizsgálatok eredményei.....	81
4.3. A kipufogógáz visszavezetés vizsgálatai.....	87
4.4. A vízbefecskendezés teljes emissziókezelő rendszerre kifejtett hatása.....	89
4.4.1. Eredmények NEDC ciklussal.....	90
4.4.2. Eredmények WLTC ciklussal.....	93
4.4.3. Vízbefecskendezés hatása az ultrafinom (PN ₁₀) részecskékre	96
4.4.4. Vízbefecskendezés hatása az emisszió utókezelő rendszer hőmérsékleteire.....	101

4.5. A vízbefecskendezés hatása a részecskeszűrő regenerációjára	102
4.6. A EGR és vízbefecskendezés párhuzamos működése	104
5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	111
6. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	113
6.1. A vízbefecskendezés hatékonyság a modern technikával és környezetben	113
6.2. A vízbefecskendezéssel fellépő direkt és indirekt költségek és nyereségek	114
6.2.1. A vízbefecskendezés utólagos beépítése	114
6.2.2. A vízbefecskendezés hatása hajtóanyagfogyasztásra üzem közben.....	115
6.2.3. A vízbefecskendezés hatása a részecskeszűrő regenerációjára.....	116
6.3. A vízbefecskendezés hatékonyságának kiterjesztése	116
6.4. A víz emulzió és szívócsonk befecskendezés kombinációja	116
6.5. A részecskeszűrő berendezés módosítása a többlet víz kiszűrésére	117
7. ÖSSZEFOGLALÁS	118
8. SUMMARY	119
9. KÖSZÖNET	120
10. MELLÉKLET.....	121
M1. Irodalomjegyzék.....	121
M2. Értekezés témakörével kapcsolatos publikációk.....	134
M3. Reakciók a kipufogórendszer jellemző hőmérsékletein.....	136
M4. Páratartalom adatok, diagramok.....	137
M5. Teljes rendszerrel végzett mérések adatai, diagramjai.....	176
M6. EGR és vízbefecskendezés vizsgálat adatai, diagramjai	193
M7. Vízbefecskendezés hajtóanyag fogyasztásra gyakorolt hatása, adatok, diagramok	202
M8. PN ₁₀ emisszió változás helyének vizsgálata, adatok, diagramok.....	207
M9. Utókezelő rendszer hőmérsékleteinek vizsgálata, adatok, diagramok.....	210
M10. Utókezelő rendszer hőmérsékleteinek vizsgálata, adatok, diagramok.....	214

JELÖLÉSJEGYZÉK

Alkalmazott jelölések

<i>AH</i>	Abszolút páratartalom	[g/m ³]
<i>BTE</i>	Brake Thermal Efficiency – Termikus hatásfok	[%]
<i>BSFC</i>	Brake Specific Fuel Consumption – Fajlagos hajtóanyag fogyasztás	[g/kWh]
<i>c</i>	Fajhő	[J/gK]
<i>CO</i>	Szén-monoxid	[g/kWh]
<i>CO₂</i>	Szén-dioxid	[g/kWh]
<i>CO_{2m sum}</i>	Kumulált CO ₂ mért tömegadat	[g/kWh]
<i>CO_{2p}</i>	Számított CO ₂ koncentráció	[g/kWh]
<i>CO_{m sum}</i>	Kumulált CO mért tömegadat	[g/kWh]
<i>CO_p</i>	Számított CO koncentráció	[g/kWh]
<i>CA ATDC</i>	Crank Angle after Top Dead Center – Felső holtpont utáni főtengely szög	[°]
<i>EVF_{sum}</i>	Exhaust Volume Flow sum – Kumulált kipufogógáz térfogatáram	[cm ³]
<i>MAF</i>	Mass Air Flow – beszívott levegő tömegárama	[g/s]
<i>mf</i>	Hajtóanyag fogyasztás	[g/s]
<i>NO_x</i>	Nitrogén-oxid gáz emisszió	[g/kWh]
<i>NO_{xm sum}</i>	Kumulált NO _x mért tömegadat	[g/kWh]
<i>NO_{xp}</i>	Számított NO _x koncentráció	[g/kWh]
<i>O₂</i>	Oxigén	[g/kWh]
<i>O_{2m sum}</i>	Kumulált O ₂ mért tömegadat	[g/kWh]
<i>O_{2p}</i>	Számított O ₂ koncentráció	[g/kWh]
<i>OSC</i>	Oxygen Storage Capacity – Oxigén tároló kapacitás	[mmol/g]
<i>P</i>	Környezeti nyomás	[Pa]
<i>P_{boost}</i>	Töltőnyomás	[kPa]
<i>P_c</i>	Kritikus nyomás	[MPa]
<i>P_d</i>	Száraz levegő nyomása	[Pa]
<i>PM_{2.5}</i>	2.5 µm fölötti részecsketömeg	[µg/m ³]
<i>PM₁₀</i>	10 µm fölötti részecsketömeg	[µg/m ³]
<i>PN₂₃</i>	23 nm fölötti részecskeszám	[#/kWh]
<i>PN₁₀</i>	Ultrafinom 10 nm alatti részecskeszám	[#/kWh]
<i>P_w</i>	Vízgőz nyomása	[Pa]
<i>P_{ws}</i>	Telítési gőznyomás	[Pa]
<i>R²</i>	Korrelációs együttható	[-]
<i>R_d</i>	Száraz levegő fajlagos gázállandója	[J/kgK]
<i>RH</i>	Relatív páratartalom	[%]
<i>rpm</i>	Motor fordulatszám	[1/min]
<i>R_w</i>	Vízgőz fajlagos gázállandója	[J/kgK]
<i>SPN₁₀</i>	Szilárd részecskeszám 10 nm tartománytól (#/kWh)	[#/kWh]
<i>SPN₂₃</i>	Szilárd részecskeszám 23 nm tartománytól (#/kWh)	[#/kWh]
<i>T</i>	Környezeti hőmérséklet	[°C]
<i>T_c</i>	Kritikus hőmérséklet	[K]
<i>THC</i>	Total Hydrocarbon - Összes szénhidrogén	[g/kWh]
<i>THC_{m sum}</i>	Kumulált THC mért tömegadat	[g/kWh]
<i>THC_p</i>	Számított THC koncentráció	[g/kWh]
<i>W_{ciklus}</i>	Adott emissziós ciklus alatt végzett munka	[kWh]
<i>ΔH_{vap}</i>	Párolgáshő	[J/g]
<i>ρ</i>	Levegő sűrűsége	[kg/m ³]

Rövidítések

<i>AECC</i>	Automotive Edge Computing Consortium	[-]
<i>ASC</i>	Ammonia Slip Catalyst - Ammónia átalakító katalizátor	[-]
<i>ATS</i>	Aftertreatment System – Emisszió utókezelő rendszer	[-]
<i>BEV</i>	Battery Electric Vehicles – Akkumulátoros elektromos jármű	[-]
<i>BSFC</i>	Brake Specific Fuel Consumption – fajlagos hajtóanyag fogyasztás	[-]
<i>BTE</i>	Brake Thermal Efficiency – Effektív hatásfok	[-]
<i>CARB</i>	Californian Air Research Board – Kaliforniai légkutatási tanács	[-]
<i>C-DPF</i>	Catalised Diesel Particulate Filter – Kalatitikus bevonattal ellátott dízel részecskeszűrő	[-]
<i>CeO₂</i>	Cerium-oxide – Cérium oxid	[-]
<i>CLD</i>	Chemi-Luminescence Detector – Kemilumineszcens detektor	[-]
<i>CNG</i>	Compressed Natural Gas – Sűrített földgáz	[-]
<i>CO</i>	Carbon-monoxide – Szén-monoxid	[-]
<i>CO₂</i>	Carbon-dioxide – Szén-dioxid	[-]
<i>CPSI</i>	Cells Per Square Inch – Cellák száma egy négyzethüvelykben	[-]
<i>CS</i>	Catalytic Stripper – Katalitikus eltávolító	[-]
<i>CVS</i>	Continuous Volume Samplerr- állandó térfogatáramú mintavevő	[-]
<i>DOC</i>	Diesel Oxidation Catalyst – Dízel oxidációs katalizátor	[-]
<i>DOHC</i>	Double Over Head Camshaft – Dupla vezérműtengely	[-]
<i>DTI</i>	Drop to Idle test – Kontollálatlan korom regeneráció	[-]
<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>ECU</i>	Engine Control Unit - Motorvezérlő	[-]
<i>EGR</i>	Exhaust Gas Recirculation – Kipufogógáz visszavezetés	[-]
<i>ET</i>	Evaporation Tube – Elpárologtató cső	
<i>EU</i>	European Unio – Európai Unió	
<i>EUDC</i>	Extra Urban Driving Cycle – Országúti emissziós teszt ciklus	[-]
<i>FBC</i>	Fuel Born Catalyst – Üzemanyagba kevert katalizátoradalék	[-]
<i>FeO</i>	Iron-oxide - Vasoxid	[-]
<i>FID</i>	Flame Ionization Detector – Láng ionizációs detektor	[-]
<i>HC</i>	Hydrocarbon - Szénhidrogén	[-]
<i>HD</i>	Heavy Duty – Teher- (autó)	[-]
<i>HEPA</i>	High Efficiency Pariculate Air filter – Nagy hatékonyságú levegő szűrő	[-]
<i>HO₂</i>	Hydroperoxyl - Hidroperoxil	[-]
<i>H₂O</i>	Water - Víz	[-]
<i>ICE</i>	Internal Combustion Engine – Belső égésű motor	[-]
<i>IRD</i>	Infra-red detector – Infravörös detektor	[-]
<i>LD</i>	Light Duty – Könnyű teher- (autó)	[-]
<i>LNC</i>	Lean NO _x Catalyst – NO _x katalizátor	[-]
<i>LNG</i>	Liquid Natural Gas – Cseppfolyósított földgáz	[-]
<i>LNT</i>	Lean NO _x Trap – NO _x csapda	[-]
<i>LPG</i>	Liquefied Petroleum Gas - Autógáz	
<i>MPD</i>	Micro Photon Devices – Mikrofoton berendezés	[-]
<i>NDIR</i>	Non-dispersive Infrared Detector – Nem diszperzív infravörös detektor	[-]
<i>NEDC</i>	New European Driving Cycle – Új európai emissziós teszt ciklus	[-]
<i>NH₃</i>	Ammonia - Ammónia	[-]
<i>NH₄</i>	Ammonium – Ammónium ion	[-]
<i>NMVOCS</i>	Non-methane Volatile Organic Compounds – Nem metán illékony szerves vegyületek	[-]
<i>NRMM</i>	Non-Road Mobile Machinery – Nem közúti jármű	[-]
<i>NRSC</i>	Non-Road Steady-State Cycle – Nem közúti stacioner ciklus	[-]

<i>NRTC</i>	Non-Road Transient Cycle – Nem közúti tranziens ciklus	[-]
<i>NO</i>	Nitric-oxide – Nitrogén monoxid	[-]
<i>NO_x</i>	Nitrogen oxides – Nitrogén-oxidok	[-]
<i>N₂O</i>	Nitrous-oxide – Dinitrogén-oxid	[-]
<i>N₂</i>	Nitrogen - Nitrogén	[-]
<i>O</i>	Oxygen - Oxigén	[-]
<i>OBD</i>	OnBoard Diagnostics – Motor Fedélzeti diagnosztika	[-]
<i>OEM</i>	Original Equipment Manufacturer – Gyári alkatrész beszállító	[-]
<i>OFA</i>	Open Frontal Area – Szabad homlokfelület	[-]
<i>OH</i>	Hydroxyls – Hidroxil csoport	[-]
<i>OSC</i>	Oxygen storage capacity – Oxigén tároló kapacitás	[-]
<i>PB</i>	Propán-bután gáz	[-]
<i>PEMS</i>	Portable Emission Measurement System – Hordozható kibocsátásmérő rendszer	[-]
<i>PGM</i>	Platinum Group Materials – Platina csoport fémjei	[-]
<i>PID</i>	Proportional Integral Derivative Controller – Arányos integráló deriváló szabályozó	
<i>PLC</i>	Programmable Logic Controller – Programozható logikai vezérlő	[-]
<i>PM</i>	Particulate Mass – Részecske tömeg	[-]
<i>PMD</i>	Photon Multiplicity Detector – Foton többszöröző detektor	[-]
<i>PMR</i>	Power to Mass Ratio – Teljesítmény tömeg arány	[-]
<i>PC</i>	Personal Car - Személyautó	[-]
<i>Pd</i>	Palladium - Palládium	[-]
<i>PN</i>	Particle Number - Részecskeszám	[-]
<i>Pt</i>	Platinum - Platina	[-]
<i>RDE</i>	Real Driving Emission – Valós körülmények közti emissziós ciklus	[-]
<i>REC</i>	Retrofit Emission Control – Utólagos emissziócsökkentő átalakítás	[-]
<i>SCR</i>	Selective Catalytic Reduction – Szelektív katalitikus redukció	[-]
<i>SEM</i>	Scanning Electron Microscope – Elektronmikroszkóp	[-]
<i>SiC</i>	Silicon-carbide – Szilícium karbid	[-]
<i>SOF</i>	Soluble Organic Fraction – Oldható szerves frakció	[-]
<i>TWC</i>	Three Way Catalyst – Hármass hatású katalizátor	[-]
<i>ULSD</i>	Ultra Low Sulfur Diesel – Ultra alacsony kéntartalmú hajtóanyag	[-]
<i>VCR</i>	Variable Compression Ratio – Változó kompresszió viszony	[-]
<i>VOC</i>	Volatile Organic Compounds – Illékony szerves vegyületek	[-]
<i>V₂O₅</i>	Vanadium-oxide – Vanádium oxid	[-]
<i>WFR</i>	Víz és hajtóanyag arány	[-]
<i>WHSC</i>	Worldwide Harmonized Stationary Cycle - Világszerte harmonizált állandósult ciklus	[-]
<i>W.I.</i>	Water Introducing to combustion – Égéstérbe jutó víz	[-]
<i>WLTC</i>	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle	[-]
<i>WLTP</i>	Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure	[-]
<i>ZEV</i>	Zero Emission Vehicles – Nulla károsanyag kibocsátású jármű	[-]

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 esőkért 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) - pusztító erejének mértékét jól példázzák a nagy vulkánkitörések során a levegőbe jutott hamu és aeroszokok, 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. A korábbi, jellemzően belsőégésű motorokon alapuló közlekedés a következő évtizedekben várhatóan a városi/rövidtávú, hosszútávú, teherszállítás stb. felhasználásoknak megfelelően különböző technológiák párhuzamos elterjedéséhez fog vezetni. Az új (elektromos hajtás, hajtóanyagcella stb.) és a jelenleg is létező, de kevésbé elterjedt technológiák (CNG, LNG, LPG egyéb alternatív hajtóanyagok, adalékok, ide sorolható a 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 elkövetkező évekre várható rendkívüli mértékű emisszió csökkentési elvárásoknak a gyártók többlépcsős kipufogógáz utókezelő (ATS – After treatment system) rendszerekkel próbálnak megfelelni. Ezek a rendszerek egyre összetettebbek (és ezáltal egyre drágábbak is), egyre szűkebb hőmérséklettartományban és üzemeltetési feltételek mellett képesek optimálisan működni. 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 rendeletre irányuló javaslata. A belsőégésű motorok fél évszázados emissziócsökkentési múltjának megfelelően a mostani szigorodás is nagy kihívások elé állítja a gyártókat. Fontos, hogy az Euro-szabványok és a levegőminőségi szabványok által szabályozott szennyező anyagok nem igazodnak tökéletesen egymáshoz, mivel bizonyos szennyező anyagokat a levegőminőségi irányelvek szabályoznak, de az Euro-szabványok nem. Érdemes megjegyezni, hogy bár a környezeti levegőben nincs részecskeszám-határérték, a részecskeszám-szintek egyre nagyobb figyelmet kapnak. 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. A folyamatos emisszió csökkentési törekvésnek köszönhető, hogy az EURO 7 által meghatározott egyik új elem, a fékpör emisszió is jelenleg többszöröse a belsőégésű dízel/benzin belsőégésű motor számára megengedett részecskékibocsátásnak.

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. Az utólagos átalakításoknak lehetőleg minél egyszerűbbeknek és költséghatékonyabbaknak szükséges lennie. Ilyen lehetőség lehet a gépjárművek utólagos vízbefecskendező rendszerrel való ellátása is.

A víz a motorban/égéstérben nem új jelenség. Még a levegő páratartalma is jelentős hatással van a belsőégésű motorok kibocsátására, és mint ilyen, az első láthatatlanul is jelen lévő kibocsátás csökkentő technológiának tekinthető. A vízbefecskendezés emissziócsökkentő hatásait a '90 évektől kezdték el vizsgálni, de a kor akkori színvonalán nem nyújtott megfelelő eredményt.

A belsőégésű motoroknál a szívóoldali vízbeporlasztást ezidáig jellemzően teljesítmény növelési céllal alkalmazták. Azonban a vízbeporlasztás hűtő hatása révén, az égésfolyamat során keletkező nitrogén-oxidok mennyisége is csökkenthető. Kevés olyan technika létezik, amely képes e kibocsátások csökkentésére a keverékképzés javításán keresztül is, mint amilyen az égéstérbe juttatott víz. A magas hőmérséklet, oxigéndús környezet és a hosszabb égési idő lehetővé teszi a szénhidrogének (HC) megfelelő elégetését (Turns, 2000), ami a részecskékibocsátás csökkenését is eredményezheti. Ugyanakkor ezek a feltételek hozzájárulnak a NO_x-kibocsátás fokozódásához is. A szénhidrogének, a részecskeszám (PN) és a NO_x kibocsátás általában ellentétes tendenciát mutatnak: ha az egyik csökken, a másik emelkedik (Lin, et al., 2012, Fiebig, et al., 2014, Wang, et al., 2021, Ashwin, et al., 2022, Aminjan, et al., 2024). A víz alkalmazása az égés során egyes szakirodalmak szerint képes feloldani ezt a problémát, a nitrogén-oxidok (NO_x) és a részecskék (korom) kibocsátásának párhuzamos csökkenését tudja okozni, amely a belső égésű motorok egyik legnagyobb technikai kihívása. 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 égéstérben, 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 vízbefecskendezés ilyen irányú felhasználása, napjaink bonyolult dízel emisszió utókezelő rendszereiben, nem kellően feltárt kutatási területe a belsőégésű motorok emissziótechnikájának, a modern emissziókezelő rendszerekben a vízbeporlasztás kibocsátást csökkentő hatásáról nem elegendő ismeret áll rendelkezésre. Továbbá új szempontként

vizsgálni kell a víz hatását a kipufogógáz-utókezelő rendszer egyéb alkotóelemeire is, mint például a kipufogógáz-visszavezetésre (EGR) és az utókezelő rendszerek elemeire a kipufogócsőben. Ezeket nemcsak a kibocsátás, hanem más tényezők – például a hőmérséklet – szempontjából is figyelembe kell venni. 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. Emiatt a víz hatását ilyen szempontból a szakirodalomban vizsgálni fogom. 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. A vízbefecskendezés utólagos átalakításokban való használata jelentősen eltérő megközelítést igényel a korábbi évtizedekben megjelent szakirodalomhoz képest. 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.

Napjaink bonyolult dízel emisszió utókezelő rendszereiben, a vízbeporlasztás kibocsátást csökkentő hatásáról hiányosan állnak rendelkezésre ismeretek. 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 szeretném újra értékelni a vízbefecskendezést és annak alkalmazhatóságát, és a további emisszió redukálási törekvések egy lehetséges irányvonalát megmutatni.

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. Kifejleszttem és összeállítottam 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. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Mivel értekezésem az alternatív hajtóanyagok és a motor előtti emissziócsökkentő megoldások közé tartozik, ezért ezt részletesebben tárgyalni fogom. Illetve teszem ezt szintén az emissziókezelő rendszerekkel is, lévén értekezésem egyik alaptétele és célja ezek optimális összehangolása és a vízbefecskendezés emissziós rendszerbe foglalása. Fontos, hogy ismernünk kell az egyes kialakítások előnyeit és hátrányait, alkalmazhatóságának korlátait. Ezért célszerűnek tartom az eddig kidolgozott és alkalmazott eljárások, illetve eszközök rendszerező áttekintését szakirodalmi források alapján.

Mindezek előtt azonban szükségesnek tartom még a terület alapfogalmainak tisztázását, a szennyezőanyagok forrásainak azonosítását, illetve mennyiségük és arányaik alakulását, a jelenlegi állapot felmérését.

2.1. A levegőtisztaság védelem

Az ember és a földi élet fő színtere a körülbelül 80 kilométer magasságig tartó homoszféra ahol a számunkra megfelelő gázösszetétel állandónak mondható. Ezen belül a szűkebb életterünk a troposzféra melyben az erős vertikális irányú légmozgások okozzák a felszíni szennyezőanyagok keveredését.

Bár a levegőszennyezést manapság az antropogén szennyezőknek feleltetik meg, azonban az emberi tevékenységekből származó légszennyező anyagok egy jelentős részének természetes forrásai is vannak. Az EU jogszabályaiban meghatározott levegőminőségi előírások (EUR-Lex, 2015) teljesítése érdekében 2008 óta a Levegőminőségi Irányelv (Air Quality Directive) figyelembe veszi a természetes forrásokat az egyes országok kibocsátási határértékeinek meghatározásakor (European Environment Agency, 2012, Viana, et al., 2011).

Ebben a fejezetben a célom a járművekhez és a dízel motorokhoz köthető károsanyag emissziók pontos azonosítása, melyek eltávolítása az értekezés célja.

2.1.1. Szennyező anyag kibocsátások

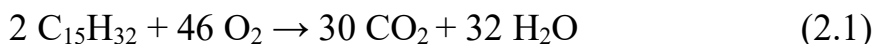
A légkörbe jutó természetes szennyező anyagok jelentős mennyiségéért cseppfolyós, illetve szilárd aeroszolk, részecskék a felelősek melyek az alábbi forrásokból származtathatók:

- hidroszféra (a föld felületének több mint 70 %-át teszi ki) eredetű főleg nátrium (Na), kálium (K), klorid (Cl) és szulfát (SO₄) ionokból álló vegyületek, vízpermet,
- litoszféra eredetű,
 - o sivatagi homok (SiO₂),
 - o a földfelszín, talaj, kőzet pora karbonátokból, szulfátokból és oxidokból áll (CaCO₃, CaSO₄, MgSO₄, Al₂O₃, SiO₂, Fe₂O₃),
 - o vulkáni eredetű hamu és korom részecskék,
 - o erdőtüzek, bozótüzek,
 - o spórák, pollenek.

Gáznemű szennyező anyagok keletkezhetnek hasonló forrásokból:

- vulkáni eredetű gázok, szén-monoxid (CO), szén-dioxid (CO₂), kén-dioxid (SO₂), hidrogén klorid/fluorid/bromid (HCl, HF, HBr) és metán (CH₄),
- anyagcsere és bomlástermékek a hidroszférából és a szárazföldi élőlényektől (CH₄, NH₃, H₂S),
- erdő és bozótüzek veszélyes szénhidrogének, szén-dioxid (CO₂), szén-monoxid (CO), nitrogén-oxidok (NO_x),
- gázkitörések szénhidrogén és metán (CH₄) kibocsátás,
- villámlások során nitrogén-oxidok (NO_x) [3].

Ezek közül a belsőégésű motorokhoz kapcsolódóan az alábbiakban tárgyaltak fontosak számomra. A víz (H₂O) a tökéletes égés eredménye, melyet a jellemző gázolaj összetevő a pentadekán példáján a 2.1 egyenletben láthatjuk. Önmagában veszélytelen összetevő, azonban a légkörben aeroszolként hordozó-, megkötő anyagjaként játszik szerepet, ezért káros hatásával is számolnom kell.



A szén-dioxid (CO₂) földtörténeti fejlődés során a szén-dioxid levegőben lévő koncentrációja folyamatosan csökkent. Ennek okai eleinte a lejátszódó kémiai reakciók voltak. Majd pedig a bioszféra létrejöttével koncentrációja egyensúlyba került ahogy a bomlási folyamatok, fotoszintézis, a légkör és a felszíni vizek közti folyamatai kialakultak. Jelenleg átlagosan 0,03 % a mennyisége a légkörben. Ennek kis mértékű változása is a környezet hűléséhez/melegedéséhez vezethet (üvegházhatás). A növények fotoszintézisének nélkülözhetetlen eleme. A CO₂ a vízzel együtt a tüzelőanyag tökéletes égésének terméke (2.1 egyenlet). Miután a szén-dioxid törvényszerűen keletkezik a fosszilis tüzelőanyagok égésekor, csökkentésének egyetlen módja a hajtóanyag-fogyasztás (felhasználás) csökkentése. A CO₂ levegőben feldúsulva fejfájást, szédülést, gyengeségérzetet, légszomjat, szapora érverést okoz. A megnövekedett légzésszám miatt további kedvezőtlen hatás, hogy megnő az egyéb belélegzett mérgező anyagok mennyisége.

A szén-monoxid (CO) a tökéletlen égés eredménye (2.2 egyenlet a pentadekán példáján), képződését a levegőfelesleg határozza meg, ezért a nagy légfelesleggel működő dízel motorokban a képződése minimális. Otto motoroknál a lokális oxigénhiány miatt keletkezik a robbanásszerű égés során.



A folyamat során ózon is keletkezik. Színtelen és szagtalan gáz, a vér oxigénszállításért felelős hemoglobinhoz nagyságrendekkel jobban kötődik, mint az oxigén. Emiatt koncentrációs zavarokat, lelassult reflexeket és zavarodottságot okoz (Asphyxiation), végül pedig halált okoz.

A szénhidrogének (HC-hydrocarbon) természetes forrásai a bozót és erdőtüzek, illetve gáz és vulkán kitörések, melyek során jellemzően alacsonyabb szénatom számú szénhidrogének keletkeznek. A motorban az elégetlen hajtóanyagból eredeztethető jelenlétük. Az égéster alacsonyabb hőmérsékletű részein, a nem megfelelően magas hőmérsékletek következtében képződik. Részben vagy pedig egyáltalán nem oxidált szénhidrogéneket tartalmazhatnak (alkánok, alkének, szén kettős hármass kötést tartalmazó HC-k, aromás többgyűrűs karcinogén mutagén anyagok stb.), az eredeti komponenseken felül, mint azok bomlástermékei illetve oxigéntartalmú származékjai (volatile organic compounds VOC – illékony szerves anyagok – alkoholok, aldehidek, ketonok). A kipufogógáz szénhidrogén összetétele sok motortényezőtől függhet, amely emisszió nagyon változatos, alkánoktól, alkénektől kezdve különböző aromás vegyületekig terjedhet. Hozzájárul a talajközeli ózon koncentrációjának növekedéséhez, ami például gyerekeknél hosszútávon mentális problémákat okozhat.

A kén-dioxid (SO₂) Az egyik legkárosabb levegő szennyező anyag. Természetes úton jelentős mennyiség vulkáni tevékenységek során keletkezik. A belsőégésű motorban a tüzelőanyag kéntartalmából keletkezik. A közlekedési SO₂-kibocsátás viszonylag szerény mértékű az egyéb antropogén forrásokhoz képest. A motorban fokozzák a dugattyú-lerakódásokat és korróziót okoznak. Nemesfém katalizátorokat elmérgezik (cérium). Tekintettel arra, hogy a tüzelőanyag minőségtől függ, konstrukciós eszközökkel nem befolyásolható. Az elemi kén forráspontja igen magas 444 °C, ez miatt a szénhidrogének frakcionáláskor a nehezebb párlatokban marad, mint amilyen a gázolaj is. A kén-dioxid színtelen, szúrós szagú gáz, amely könnyen cseppfolyósítható és vízben könnyen oldódik. Az SO₂ főleg a légutakat ingerli, görcsös köhögést okoz. Tartós hatás esetén mérgezési tünetek (fulladásérzés, mellkasi

fájdalom, hányinger, kötőhártyahurut) lépnek fel. A szabadba jutó SO_2 és SO_3 a savas esők előidézői.

A nitrogén-oxidok (NO_x) képződéséhez szükséges magas hőmérséklet természetes körülmények között villámlások esetén adott. Képződik még nitrogén-monoxid a dinitrogén-oxid fotokémiai bomlása révén is (2.3 reakció), amely reakció a sztratoszférában játszódik le. Jelentős mennyiségben a talaj-baktériumok révén is kerül a légkörbe.



Általános esetben az égés során a levegőben lévő nitrogén nem lép reakcióba az oxigénnel, azonban a dízel motorokra jellemző inhomogén égés következményeképpen, 1600 °C-os hőmérséklettől kezdve a nitrogén már reakcióba lép az oxigénnel és NO_x emissziót hoz létre (2.4 reakció).



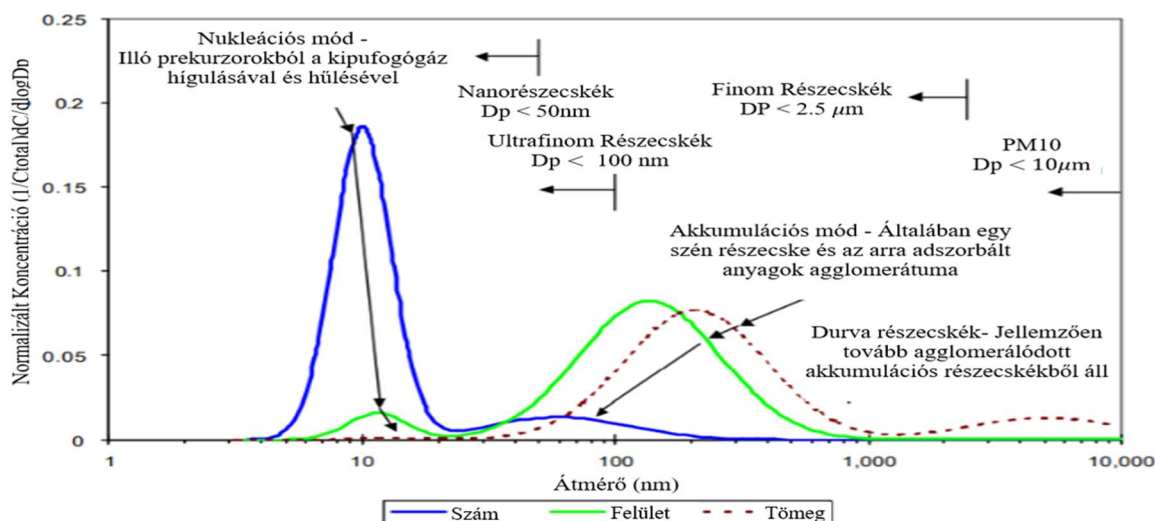
NO_x emisszió két fő összetevője az NO és a NO_2 . A jelentősen toxikusabb NO magas hőmérsékleteken (<1500°C) képződik, a légkör oxigénjének hatására gyorsan (30-40 másodperc) NO_2 -vé alakul (2.5 reakció). Színtelen, igen reakcióképes gáz.



A közúti forgalom okozza az antropogén NO_x kibocsátás 40-70 %-át, melynek körülbelül 85 %-a pedig a dízel motoros gépjárművekhez köthető. A nitrogén-dioxid (NO_2) nagyon reakcióképes, töményen vörösesbarna színű gáz. A levegőnél nehezebb, emberi egészségre ártalmas. A nitrogén-oxidok általában állatra és emberre egyaránt mérgezőek. Az NO_2 hatásmechanizmusa kettős. Egyrészt a légúti nyálkahártyához kapcsolódva salétrom-savvá alakul, és helyileg károsítja a szövetet. Másrészt felszívódva a véráramba jut, ahol a hemoglobin molekulát methemoglobinná oxidálja, így az nem képes oxigént szállítani a szervekhez. Heveny mérgezés tünetei: a légzőszervekben salétrom- és salétromossavvá alakul. Kötő- és nyálkahártya izgalom, köhögési, hányási inger, fejfájás, szédülés a jellemző tünetei. Ezek 1-2 órán belül lezajlanak, majd több órás tünetmentes időszak után kifejlődik a tüdővizenyő és a tüdőgyulladás. Szabad légköri körülmények között heveny mérgezés nem fordul elő. Huzamos hatás tünetei: az NO_2 csökkenti a tüdő ellenálló képességét a fertőzésekkel szemben, súlyosbítja az asztmás betegségeket, gyakori légúti megbetegedéshez, idővel pedig a tüdőfunkció gyengüléséhez, vérkép elváltozásokhoz vezethet.

A NO_2 általában nem közvetlenül kerül a levegőbe, hanem nitrogén-monoxid (NO) és egyéb nitrogén-oxidok (NO_x) más anyagokkal történő légköri reakciói során alakul ki. A NO_2 nedvesség jelenlétében savas kémhatású, ezért a fémeket és az építőanyagokat erősen korrodálja. A NO_2 szekunder részecskéket, nitrátokat alkot, amelyek ködöt képezhetnek, rontva a látási viszonyokat. A nitrogén-oxidok savas esők képződését is elősegítik. Az ózon képződésének is az egyik prekursora, ezáltal a szmog kialakulásában (fotokémiai) jelentős a szerepe.

A cseppfolyós és szilárd aeroszol részecskék ($10^{-3} - 10 \mu\text{m}$) egy része a föld, illetve az óceánok felszínéről diszpergálással kerül a levegőbe, emellett vulkáni kitörésekkel is számolni kell. Nagy hányad magában a levegőben képződik különféle reakciók következtében (2.1. ábra). A háttér-levegő 1 cm^3 -ében általában 250 – 500 db aeroszol részecske van (Radnainé, 2011).



2.1. ábra: Levegő szállópor méret koncentráció eloszlása (Kittelson, et al., 2002)

A belsőégésű motorban különböző részecskék agglomerációjával keletkeznek, melyek a következők lehetnek:

- szén,
- részlegesen elégett hajtóanyag,
- részlegesen elégett kenőolaj,
- hajtóanyagból és kenőolajból származó hamu,
- szulfátok,
- víz,
- fém részecskék (Agarwal, 2007).

A sok összetevőnek köszönhetően a részecskék igen komplexek. A fentebb felsorolt anyagok általában szén központi magra adszorbeálódva hozzák létre a jellemzően 15-40 nm nagyságú agglomerátumokat, amiknek hozzávetőlegesen 90 %-a kisebb 1 μm -nél (Falcon-Rodriguez, et al., 2016). Az emberi egészségre káros emisszió, tüdő és légúti problémákat okozhat, és a tudomány jelenlegi állása szerint nagymértékben hozzájárulhat a rákos megbetegedések kialakulásához (MECA 2007). Ha részecskékben akarjuk kifejezni a dízel motor 10^{14} részecske kibocsátással bír, ami 3 nagyságrenddel magasabb, mint egy benzines motor részecske kibocsátása.

2.1.2. Emisszió, transzmisszió, imisszió

Az előző fejezetben megismert káros szennyezőanyagok mindegyike a levegőbe különböző forrásokból került. Ezek a szennyezőanyagok összeadódnak, reakciókba léphetnek, terjedhetnek és kiülepedhetnek. Az ember által belélegzett károsanyagok, a kibocsátott szennyező anyagoknak az a jellemző koncentrációja, ami az ember életterének számító troposzférában és azon belül is leginkább a talaj közeli rétegben megtalálható. Ezt imisszióknak nevezzük. Fontos, hogy a légszennyezés folyamatát lássuk, a kibocsátóktól egészen a „befogadókig”.

Az emisszió különböző forrásokból származó kibocsátás, a szennyezőanyagnak a forrásoknál mért anyagárama. Jellemző mértékegységek az időre, a megtett távolságra, valamint a kibocsátás koncentrációjára vonatkoznak (emissziókoncentráció, g/m^3), például $\text{kg}/\text{óra}$, részecskeszám/ km , vagy ppm (parts per million – az egész milliommód része) (Mészáros, 2021). A transzmisszió során a levegőbe került szennyező anyagok hígulnak koncentrációjuk folyamatosan csökken, ülepednek, fizikai és kémiai változásokon mennek át. Megindulhat a biodegradáció, a természet öntisztuló folyamatai. A már említett imisszió pedig az ennek során kialakult levegőminőség.

A légszennyező források melyekről eddig szó volt, mind primer szennyező források voltak melyek közvetlenül a légkörbe juttatták a káros anyagokat. A szekunder forrásoknak, a levegőből valamilyen módon már távozott, kiülepedett, szennyező anyagoknak az újból légkörbe került elemeit tekintjük.

Ilyen másodlagos források lehetnek a vulkáni törmelékek, és erdő-, bozót tüzek hamuja, mely valamilyen folyamat (szél) eredményeképpen újból légkörbe kerül vagy hasonlóan antropogén forrásból cementgyárak utakra ülepedett pora, amit az autók felkavarnak. A légkörben végbemenő reakciók során is keletkeznek további anyagok, melyek veszélyességük alapján másodlagos szennyezők vagy pedig közömbös reakciótermékek lesznek.

Antropogén másodlagos források a szennyvíz- és szeméttárolók ahonnan pedig különböző reakciók eredményeképpen másodlagos szennyezők, gázok folyadékok távozhatnak.

A levegőt szennyező anyagokat halmazállapotuk szerint csoportosítva:

- szilárd,
- cseppfolyós és
- gáz halmazállapotú komponensekre lehet osztani.

A gáznemű közegben elosztott (diszpergált) részecskék ülepedés szempontjából a következőképpen csoportosíthatók:

- 1000 – 10 μm szemcseméretűek gyorsan ülepednek (pl. ülepedő porok),
- 10 – 0,1 μm szemcseméretű részecskék igen lassan ülepednek, stabil aeroszolt képeznek (pl. lebegő porok),
- 0,1 – 0,001 μm szemcseméretűek már nem ülepednek, hígulásuk a gázokéhoz hasonló.

E két utóbbi frakció a dízel részecskék mérettartománya is, nehéz kiülepedési hajlandósága miatt okozza az egészségügyi problémákat.

Három kategóriába sorolhatjuk a légkör tisztulásának folyamatait;

- a szennyező anyag a légkörből eltávozik,
- a szennyező anyag más (esetleg közömbös) anyaggá átalakul,
- a szennyező anyag koncentrációja csökken, tehát felhígul.

Az első csoportba tartozó lehetőségek egyike az ülepedés (szedimentáció), amellyel a szilárd vagy folyékony szennyeződés durva frakciója távozik az atmoszférából. Az ad- és abszorpció gáznemű szennyezőknél elsőrendű jelentőségűek. Elsősorban a tengerek nagy felülete jön számításba, de a talaj és az élővilág gázmegkötő képessége is tekintélyes. Jelentős folyamatok a kondenzálódás és a kimosódás is. Felhőképződéskor a szennyező anyagok kondenzációs magvakként szolgálhatnak, és a csapadékkal ők maguk is kikerülhetnek a légkörből. Emellett a csapadék kihullása során tekintélyes légrétegeket mos át (Radnainé, 2011).

A gépjárművek mozgó légszennyező pontforrásnak minősülnek, a forgalmas útszakaszokat pedig vonalas szennyezőforrásnak tekinthetjük egy modellben. Ezek ma már jól leírhatóak, modellezhetőek, a közlekedésből származó emissziók leírására területi koncentráció modellt (Gauss-Sutton-Pasquill) alkalmaznak (Sutton, 1947).

2.1.3. Környezet károsító hatások

Azokat a gázokat melyek a légkörben a rövidhullámú napsugárzást elnyelés nélkül átengedik, de a felmelegedett földfelszín hosszúhullámú hősugárzását jelentős mértékben elnyeli, üvegházhatású gázoknak nevezzük a jelenséget pedig üvegházhatásnak. Ezen gázok mennyiségének csökkenése a légkörben tehát lehűléshez, növekedése pedig felmelegedéshez vezet. Ennek a korábban állandónak tekintett komponensnek a koncentrációja a megfigyelések szerint századunk eleje óta növekszik a fosszilis tüzelőanyagok nagymértékű égetése, valamint a szénhidrogén származékokkal hajtott járművek egyre növekvő forgalma következtében.

Az alább felsorolt további üvegházhatású gázok közreműködésével létrejött hatás nem tekintendő egyértelműen káros jelenségnek, mivel teljes hiányában a Földön nem létezhetnének az életfeltételek, fagyos hideg, átlag mínusz 18 °C hőmérséklet uralkodna.

Jellemző üvegházhatású gázok:

- szén-dioxid,
- metán,
- dinitrogén-oxid,
- ózon,
- vízgőz.

A légszennyező anyagoknak az együttes hatása és a kedvezőtlen légköri, meteorológiai körülmények találkozása vezet a füstköd (szmog) kialakulásához, amely a levegőszennyeződési jelenségek legszélsőségebb formája. A füstködöknek vagy szmogoknak két alapvető típusát különböztetjük meg: a Londoni típusú szmogot, valamint a Los Angeles-i típusú szmogot. Elnevezésüket leggyakoribb előfordulási helyeikről kapták.

Londoni szmog: a füstköd egyik formája, amely a szén- és olajtüzelés következményeképpen főleg a téli időszakban, magas relatív nedvességtartalomnál szokott jelentkezni. A légszennyezést itt elsősorban kén-dioxid, szén-monoxid és korom okozza. A füstköd a hajnali órákban – amikor a leghidegebb van – alakul ki, amikor rendszerint inverziós állapot lép fel. Los Angeles-i szmog: a füstköd másik formája, amely főleg a nagy gépjárműforgalom következménye lehet erős napfénybesugárzás és a levegő magas abszolút nedvességtartalma mellett. A légszennyeződést nitrogén-oxidok és szénhidrogének okozzák. Ezekből a napfény katalizáló hatására új vegyületek keletkeznek, többek között ózon, peroxi-acil származékok és más bonyolult szerves vegyületek, amelyek mérgezőek, fojtó hatásúak. Ez a fajta füstköd nyáron, a déli órákban lép fel a leggyakrabban alacsony légmozgás mellett.

2.1.4. Egészség károsító hatások

A levegőszennyeződés élettani hatásai külső és belső tényezőktől függenek.

Külső tényezők:

- adott szennyező anyag koncentrációja, dózisa,
- az anyag toxicitása,
- más szennyező anyagok károsodást erősítő vagy gyengítő hatása,
- az expozíció időtartama és periódusai,
- valamint környezeti tényezők, úgymint a páratartalom, hőmérséklet stb.

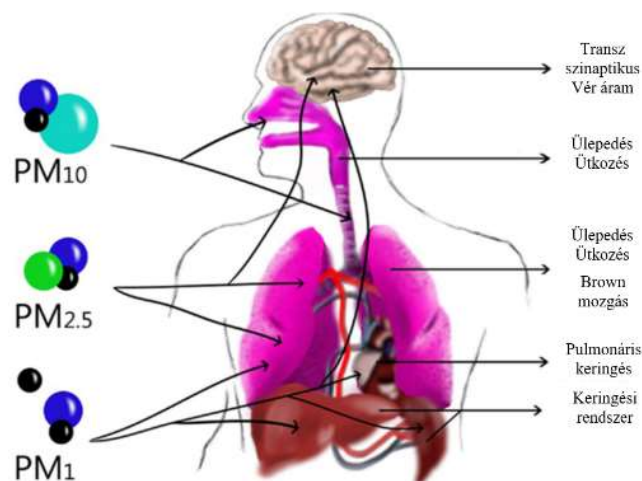
Belső tényezők:

- az exponált szervezet általános állapota,
- és érzékenysége az illető anyaggal vagy anyagokkal szemben.

Ennek eredőjeképpen a következő hatások jöhetnek létre az egyén esetében:

- halál,
- akut megbetegedés,
- krónikus betegség,
- fontos élettani folyamatok megváltozásai (pl. tüdőventilláció, oxigéntranszport),
- káros hatások (pl. szemirritáció) és kellemetlen hatások (pl. bűz),
- lehetségesek generatív, genetikai és populáció-genetikai hatások is, de ezek humán vonatkozásban nincsenek bizonyítva.

Lényeges megkülönböztetni a rövid időn belül (short term) hatásokat és a huzamos expozíció során, illetve hosszabb idő után bekövetkező (long term) hatásokat. A short-term hatásokra vonatkozóan viszonylag sok adattal rendelkezésre áll. A long-term hatások jórészt felderítetlenek, és valószínűleg sokoldalúbbak, mint amennyit a jelenlegi ismeretek alapján bizonyítani lehet.



2.2. ábra: Levegő szállópor méret koncentráció eloszlása (Falcon-Rodriguez, et al., 2016)

A levegőben lévő aeroszolok:

- 10 mikron alatt --> túljutnak a garaton (thorakális frakció),
- 4 mikron alatt --> bejutnak a tüdőbe (respirábilis frakció) de a kilégzéssel javarészt még mindig el is távoznak,
- 2,5 μm alatt --> már egyáltalán nem, vagy nehezen ürülnek ki a tüdőből (akkumuláció).

Egészségügyi szempontból a szakirodalom a 10 és 2,5 mikronos határt tartja jelentősnek. (2.2. ábra). Ezekre a PM_{10} és a $\text{PM}_{2,5}$ jelölést használjuk. Az emberi egészségre káros emisszió, tüdő és légúti problémákat okozhat, és a tudomány jelenlegi állása szerint nagymértékben hozzájárulhat a rákos megbetegedések kialakulásához.

Jelentős előrelépés történt az ultrafinom részecskék hatásának megértésében. Az ultrafinom részecskék képesek az alveoláris térből a szövetekbe transzlokálódni és rendszerszinten terjedni, elérve számos szervet, beleértve a szívet, a májat, a veséket és az agyat (Kreyling, et al., 2010).

A dízelmotor kipufogója PM-ben gazdag, többnyire 2,5 μm alatt. Egy nagy adatbázis mindenféle káros egészségügyi hatást ír le a dízelmotor kipufogógázának való kitettség miatt. A dízelmotor kipufogógázának egészséges önkénteseknél való kitettsége a légutak gyulladását okozza (Behndig, et al., 2006), és csökkenti az érrendszer működését (Mills, et al., 2005).

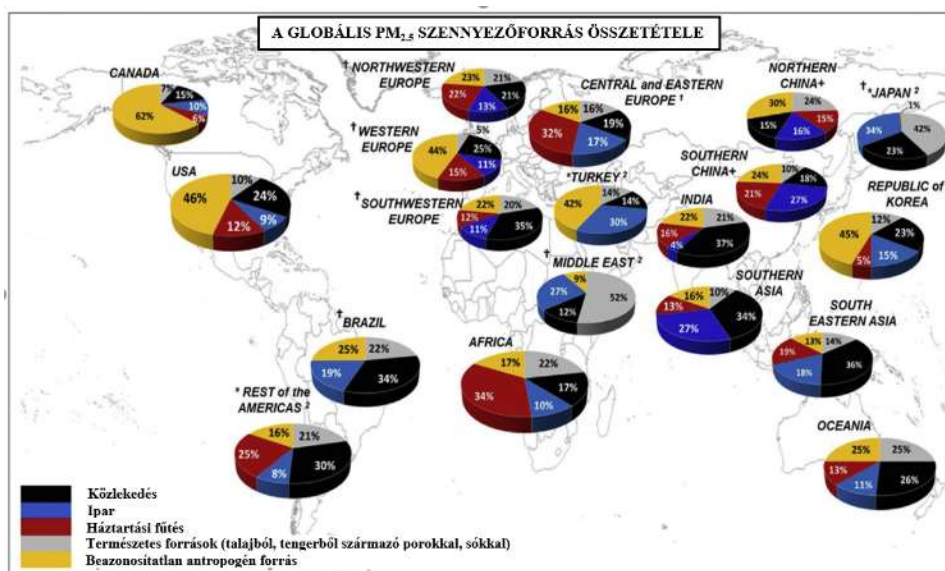
2.1.5. Antropogén hatások

A levegő ember és természet általi szennyezését elsősorban az égési folyamatok (oxidáció) okozzák, bárhol is mennek végbe: háztartásokban, hőerőművekben, a gépjárművek robbanómotorjaiban, vagy magában az emberi, állati növényi szervezetben

A mesterséges szennyező források egyik fő jellegzetessége, hogy általában területileg koncentráltan – nagy városokban vagy ipartelepeken – helyezkednek el, ezért a szennyező anyagokat erősen korlátolt kiterjedésű légtérbe bocsátják, és azoknak a környezet szempontjából ártalmatlan hígulására csak jóval a városok határain kívül kerül sor. Légszennyező minden berendezés, épület, jármű vagy szabadban elhelyezkedő anyag (meddőhányó, széntároló, szeméttlerakó hely), amely légszennyezést okoz.

Az antropogén légszennyezés forrásai nagyon változatosak lehetnek (2.3. ábra):

- ipar, vegyipari gyárak,
- erőművi termelés,
- mezőgazdaság,
- háztartások,
- közlekedés.



2.3. ábra: Antropogén + természetes PM légszennyező források 2015
(Karagulian, et al., 2017)

A közlekedést vízi, szárazföldi és légi elemekre lehet tovább bontani. A szárazföldi közlekedés által kibocsátott szennyezőanyagok forrásai tovább bonthatóak:

- belsőégésű motorok kibocsátása,
- fék és gumiabroncsokból származó por,
- utak kopása és a kiülepedett részecskék felporzása a közlekedés által.

A kipufogógáz-kibocsátás a közlekedéssel kapcsolatos szennyezés fontos forrása, és számos epidemiológiai és toxikológiai tanulmány összekapcsolta az ilyen kibocsátásokat az egészségre gyakorolt káros hatásokkal. A közúti kopás, a gumiabroncsok kopása és a fékkopás olyan nem kipufogógáz-kibocsátás, amely a kipufogógázok folyamatos csökkentésével egyre inkább előtérbe kerül. Ezen felül a jelenlegi toxikológiai kutatások szerint az olyan nem kipufogógáz-eredetű szennyező anyagok, mint a fékkopásból vagy a gumiabroncsból származó por, egységnyi tömegre vetítve hasonlóan mérgezőek, vagy akár mérgezőbbek is lehetnek, mint a dízelmotorból származó korom. (WHO REVIHAAP report, 2013).

Az is megállapításra került, hogy a koromrészecskék nem feltétlenül a finom részecske kibocsátás egyik fő közvetlen toxikus összetevője, de a tüdőre, a szervezet fő védelmi sejtjeire és (esetleg) a szisztémás vérkeringésre különböző toxicitású vegyi anyagok széles skálájának univerzális hordozójaként működhetnek (WHO, 2007)].

A rendelkezésre álló információk alapján a PM_{2.5}-ből származó városi környezeti levegőszennyezés globálisan 25 %-át a forgalom, 15 %-át az ipari, 20 %-át háztartási tüzelőanyag-égetéssel, 22 %-át nem meghatározott emberi eredetű forrásokból, 18 %-át pedig természetes por és só (Karagulian, et al. 2017).

Európában az aktív felnőtt városi lakosság átlagosan 85–90 %-át tölti otthon, 7–9 %-át a forgalomban, és csak 2–5 %-át a szabadban (Hänninen, et al., 2005, Schweizer, et al., 2007). A legkiszolgáltatottabb csoportok, mint például a csecsemők, kisgyermekek, idősek és krónikus betegek, idejük közel 100 %-át beltérben töltik (European Environment Agency 2021). A közúti forgalom okozza az antropogén NO_x kibocsátás jelentős részét, melynek körülbelül 85 %-a pedig a dízelmotoros gépjárművekhez köthető (Lee, et al., 2013). A dízelmotor jelentős mennyiségű levegőt használ fel működése során, 1 kg gázolaj égéséhez 18–28 kg (14–22 m³) levegő használandó el, a motorterhelés mértékétől függően (Bíró és Pillinger 2020).

Természetes égés során a levegőben található nitrogén nem lép reakcióba az oxigénnel, azonban a dízelmotorokra jellemző inhomogén, valamint magasnyomású (100–120 bar) égés

következményeképpen, 1500 °C-os hőmérséklettől kezdve a nitrogén már reakcióba lép az oxigénnel és NO_x emissziót hoz létre. A kibocsátott NO_x nagy része az égési folyamat elején képződik, amikor a dugattyú még a felsőholtpont közelében van. Ekkor a lánghőmérséklet és az égéster gáznyomása a legmagasabb (Jánosi és Kiss 1988). Ezért az emisszió mértéke nagyban függ a maximális égési hőmérséklettől, az oxigén koncentráció nagyságától, valamint az égés hosszától. Minden egyes 100 °C égési hőmérséklet emelkedés a NO_x képződés mennyiségét a háromszorosára növeli (Demers és Walters 1999).

2.2. Kibocsátási szabványok

Ahogy már az 1960-es évektől kezdődően felismerték, a szárazföldi közlekedés jelentős részben közrejátszik az akár súlyos éghajlatváltozást is kiváltható légköri szennyezők emelkedéséhez. 1968-tól (CARB – Kaliforniai Léggutatósi tanács) kezdődően a dízel motorok korom kibocsátását - a korábbi szubjektív, illetve kérdéses korrelációkon alapuló méréseket - már füstmérő berendezésekkel kezdték el mérni (Merrion, 2003, Szöllősi, et al., 2020), ezzel objektív számszerűsíthető keretekbe foglalták a belsőégésű motorok károsanyag kibocsátását. Innentől eredeztethető az emisszió kibocsátás törvényi szabályozása, amely válaszul az egészségügyi aggályokra, világszerte újabb és újabb egyre szigorodó emissziós értékeket vezet be az új dízel motorokra. Az aktuális emissziós kibocsátások a világon mindenhol rákényszerítenek a folyamatos fejlesztésekre és a rendszerszemléletre, ahol párhuzamosan kell használni és kombinálni a fejlett motorvezérlést a különféle kifinomult kipufogógáz utókezelő technológiákkal. A hatályos emissziós határértékeknek való megfelelés társadalmi elvárás is, melyet egyik autógyártó cég sem hagyhat figyelmen kívül (dízel botrány) (Lynch, et al. 2016). A belsőégésű motoroknak a tervezésénél az aktuális emissziós határértékeknek való megfelelés elengedhetetlen elem, a motorfejlesztési költségek jelentős részét adja. Ebben a fejezetben megvizsgálom a kibocsátáscsökkentési törekvések hatékonyságát, és hogy a vízbefecskendezéssel hol lehetne sikeresen további eredményeket elérni.

2.2.1. Személygépkocsi kibocsátási normák

Az emissziós kibocsátások szabályozásának egyik karakterisztikus területe az Európai Unió, ahol az első szabályozást az Euro 1-et 1992-ben vezették be.

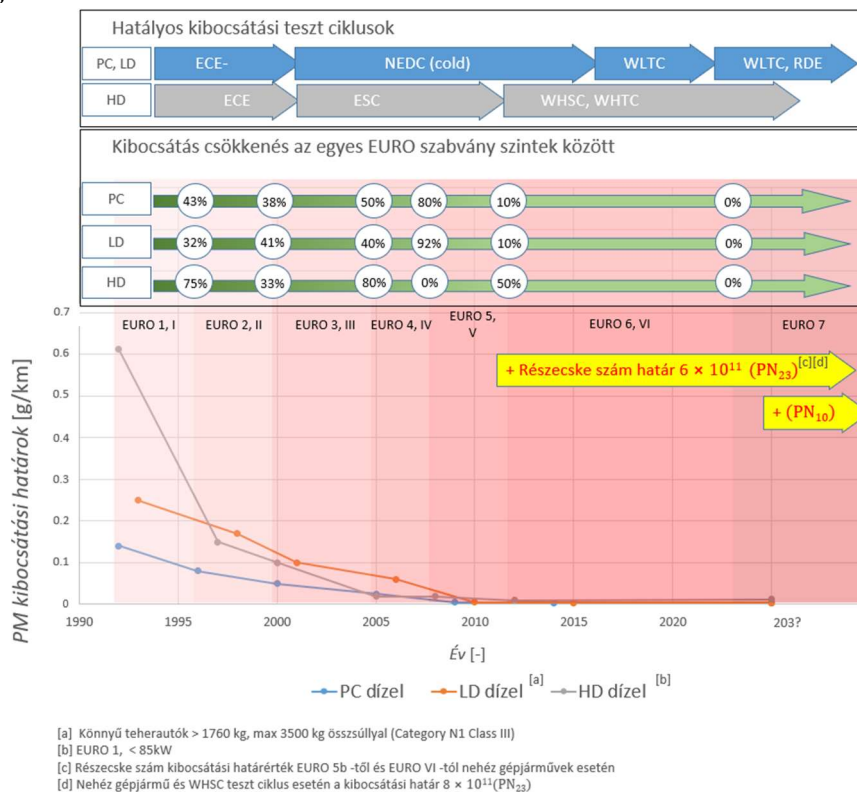
Az egyes Euro szabványok között, a személyautók (PC), a könnyű tehergépjárművek (LD) és a nehéz tehergépjárművek (HD) esetében, a részecskék és a nitrogén-oxidok kibocsátása rendre körülbelül 50 %-kal csökken, ahogy az az 2.4 és 2.5. ábrán látható.

Az Euro 6 szabványban egy új kibocsátási határértéket a részecskeszámot (PN₂₃ - 23 nm-nél nagyobb részecskeszám-eloszlás) is bevezették, ami azt eredményezte, hogy a részecskeszűrők fokozatosan elengedhetlenné váltak minden kipufogógáz kibocsátás-kezelési stratégiában.

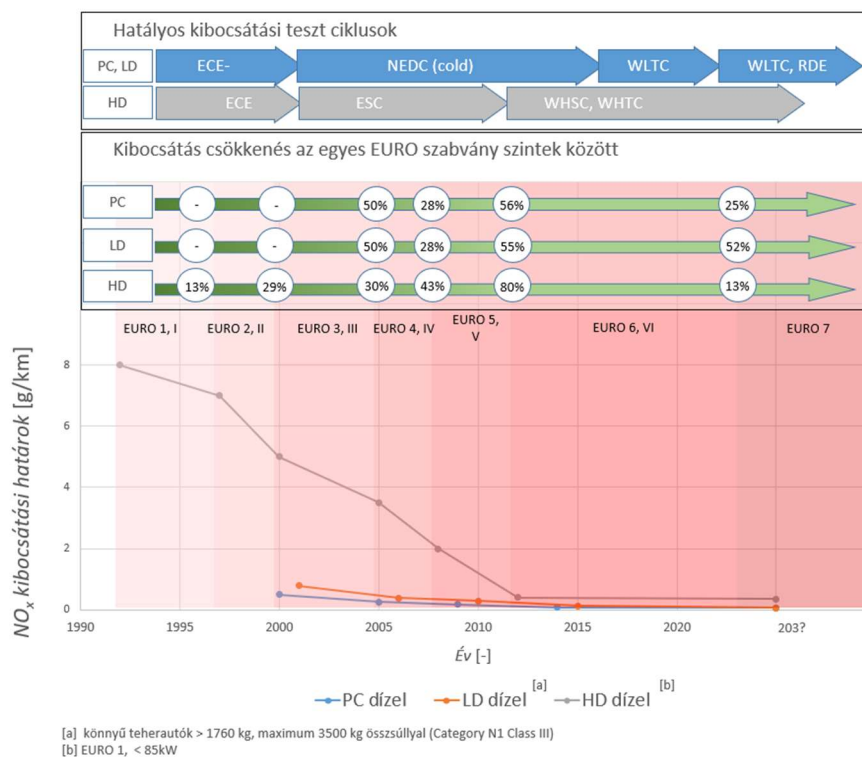
A szabványok a mérési eljárások és ciklusok fejlődésével egyre szigorúbbak lettek. Ez a tendencia a Euro 6-tól kezdve vált különösen hangsúlyossá (2.4. és 2.5. ábra). A cél az adott korszak forgalmi viszonyainak egyre pontosabb szimulálása, ezáltal a kibocsátások minél pontosabb megbecsülhetősége. Ennek eredményeként a "Euro 6d temp" szabványtól kezdve a valós vezetési kibocsátásokat (RDE) is bevezették, a hordozható kibocsátásmérő rendszerrel (PEMS) együtt, amely lehetővé teszi ezeknek a méréseknek a végrehajtását, és további erőfeszítéseket követel a gyártóktól a szabályozásnak való megfelelés érdekében.

A részecsketömeg (PM) és a nitrogén-oxidok (NO_x) pontos kibocsátási határértékeitől függően elmondható, hogy az EURO 1 bevezetése óta a kibocsátási szintek szigorítása mintegy 95 %-os mértéket ért el. Ez azonban nem tartalmazza a folyamatosan szigorodó vizsgálati eljárások és tesztciklusok hatását. Az Automotive Edge Computing Consortium (AECC) (May, et al., 2014) által végzett egyik tanulmányban EURO 6b kategóriájú könnyűgépjárművek esetében az egyes járművek kibocsátása jelentős mértékben eltérő volt a különböző tesztciklusok – a

régebbi New European Driving Cycle (NEDC) és a legújabb RDE ciklus – szerint végzett mérések alapján.



2.4. ábra: Részecske (PM) és részecske szám (PN) EURO kibocsátási határértékek személyautók (PC), könnyű teherautók (LD) és nehéz teherautók (HD) esetén



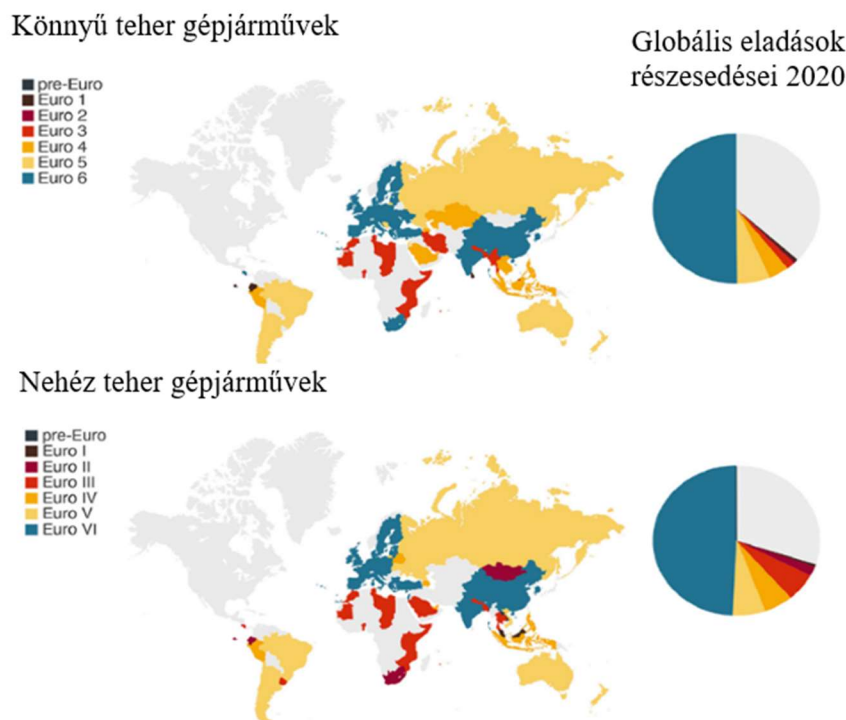
2.5. ábra: Nitrogén-oxid (NO_x) EURO kibocsátási határértékek személyautók (PC), könnyű teherautók (LD) és nehéz teherautók (HD) esetén

A PM és PN kibocsátások esetében a különbségek nem olyan jelentősek, ami elsősorban a dízel részecskeszűrők hatékonyságának tulajdonítható, ugyanakkor a NO_x kibocsátás értékei akár 10–30-szor magasabbak is lehetnek az RDE ciklus szerinti mérések során. Ennek alapján a nyers kibocsátási értékek az új tesztciklusokkal várhatóan lényegesen magasabbak lesznek. Bár az EURO 7 szabályozás eredeti szövegéhez képest már jelentős módosításokat hajtottak végre, az alapvető koncepció változatlan maradt: ez lesz a legszigorúbb, hajtóanyag- és technológiafüggetlen kibocsátási szabályozás. A rendelet nem csupán a járművekkel és azok kibocsátásával foglalkozik majd, hanem olyan járműalkatrészekkel is, mint a fékrendszerek és az abroncsok. Ezen túlmenően az EURO 7 jogszabálycsomag energetikai és elektrifikációs előírásokat is tartalmaz, többek között az akkumulátorok élettartamára és a járművek hatótávolságára vonatkozóan.

A közelgő szabvány legújabb változata megtartja az EURO 6-os előírások legalacsonyabb numerikus kibocsátási határértékeit, ugyanakkor számos új, környezeti szempontból kockázatot jelentő tényezőt is bevezet. A 10 nm-nél nagyobb részecskeméret-tartományba eső (PN_{10}) nukleációs részecskék súlyos egészségkárosító hatásai már a 2000-es évek eleje óta ismertek (Li, et al., 2008). Az elmúlt fél évtizedben elérhetővé vált fejlett mérőműszereknek köszönhetően (Biró, et al., 2023) egyre több tanulmány támasztja alá ezt a megállapítást (Vallabani, et al., 2023, Marval and Tronville, 2022). Bár jelenleg nem áll rendelkezésre kutatás a víz ezen részecskeméret-tartományra gyakorolt hatásairól, a páratartalom és a PN_{10} közötti összefüggéseket vizsgáló tanulmányok (Szöllösi and Kiss, 2023) arra utalnak, hogy a víz alkalmazása az égés során potenciális előnnyel járhat.

A HD dízelmotorokra vonatkozó ammónia (NH_3) kibocsátási határértéket először az EURO VI szabványban határozták meg; azonban az EURO 7-től kezdődően ezt egységesen minden hajtásláncra alkalmazzák. A hagyományos dízel kibocsátások mellett, amennyiben új adalékanyagokat vezetünk be a járművek emissziócsökkentő rendszerébe, ezek az új források további káros anyagok kibocsátásához vezethetnek. Ilyen adalékanyagok kerülhetnek az hajtóanyagba, vagy közvetlenül a kipufogógázba is befecskendezhetők. Az ammónia erre egy jó példa, amely a kipufogógázba juttatott karbamid (urea) injektálásával keletkezik. Az így képződő ammónia gáz a szelektív katalitikus redukciós rendszer (SCR) működéséhez elengedhetetlen, amelyet elsősorban a nitrogén-oxidok (NO_x) kibocsátásának csökkentésére alkalmaznak. A kipufogógázban természetesen jelen lévő vízgőz jelentős figyelmet kapott, mivel kimutatták, hogy számottevő hatást gyakorol az SCR katalizátorok teljesítményére (Guic, et al., 2022). A kipufogórendszer végén az ammónia-emisszió további csökkentéséért az ammónia átalakító katalizátor (ASC) felelős, amelyben a víz szintén katalitikus szerepet játszhat. A kibocsátás utókezelő elemek, valamint azok vízzel való kölcsönhatásai részletes vizsgálatra kerülnek a következő fejezetben.

Az Európai Bizottság 2022/0365 (COD) számú, eredeti EURO 7 javaslata (European Commission, 2022) már a bevezető bekezdésekben is megfogalmazta a következőket: „Megfelelő ösztönzők bevezetésére kerülhet sor annak érdekében, hogy a régebbi gépjárműveket utólagosan fel lehessen szerelni oly módon, hogy azok megfeleljenek az Euro 7 szabványnak – nemcsak a kipufogógáz-, hanem az abroncs- és fékrészecske-kibocsátás tekintetében is.” E törekvés alapjaként már korábban is indultak tanulmányok és projektek, többek között a Bizottság sikeres „2018 Horizon-díj: Motorok utólagos átalakítása a tiszta levegőért” című kezdeményezése, valamint a „Tanulmány az utólagos átalakítási technológiák személygépkocsik és könnyű haszongépjárművek kibocsátásának csökkentésére gyakorolt potenciáljáról” című projekt, amely 2020-ban indult. E célkitűzés megvalósíthatósága érdekében egyszerűen alkalmazható és költséghatékony megoldásokat szükséges javasolni, amelyek hozzájárulnak a járművek élettartamának meghosszabbításához, a károsanyag-kibocsátás csökkentéséhez, valamint adott esetben az hajtóanyag-hatékonyság növeléséhez is. Az hajtóanyag-fogyasztás csökkenésével együtt a CO_2 -kibocsátás is mérséklődik, mivel a szén-dioxid a tökéletes égés melléktermékeként, vízgőz mellett keletkezik. A CO_2 , mint elsődleges emissziós tényező, közvetlenül is szerepel a EURO 7 szabványban.



2.6. ábra: Az egyes EURO kategóriák részesedése a globális eladásokból (Mulholland, et al., 2022)

A víz égéstérbe történő bevezetése (az alkalmazott különböző technikákat összefoglalóan W.I.-ként, azaz Water Injection néven említjük) alacsony megvalósítási költsége révén újabb potenciális megoldást kínál a kitűzött célok elérésére. E szempontok mentén a W.I. részletesebb vizsgálatára a későbbiekben kerül sor e tanulmányban.

A 2.6. ábrán azt láthatjuk, hogy mely országok alkalmazzák az EURO szabványokat saját kibocsátási előírásaik alapjául. Az ábrák tanúsága szerint a világ országainak több mint fele az európai szabványokból vezeti le, illetve azokhoz igazítja kibocsátáscsökkentési intézkedéseit. Ausztráliában, Óceániában, Ázsiában, Dél-Amerikában és Európa egész területén az EURO 4–6/IV–VI normáknak megfelelő szabályozásokat alkalmaznak.

Az Egyesült Államokban a „Tier 3” és a „2007 Heavy Duty Highway Rule” előírások vonatkoznak a személygépkocsikra és könnyű haszongépjárművekre (PC/LD), valamint a nehézgépjárművekre (HD). Ezek a szabályozások általában szigorúbbak, mint az EU-szabványok, különösen a helyi levegőminőséget jelentősen befolyásoló szennyező anyagok – elsősorban a nitrogén-oxidok (NO_x) – tekintetében. Kanada harmonizálta jármű- és hajtóanyag-szabályozását az Egyesült Államokéval; például a könnyű gépjárművekre jelenleg a Tier 2 előírások vonatkoznak, míg a nehézgépjárművekre ugyanaz a „2007 Heavy Duty Highway Rule” érvényes, mint az Egyesült Államokban.

Afrikában jelenleg 8 ország alkalmaz kibocsátáscsökkentési szabályozásokat; az új járművek értékesítésénél ezekben az országokban jellemzően a EURO 2–3/II–III szabványokat követik (Ayetor, et al., 2021). A kontinens más országai is haladnak afelé, hogy saját kibocsátáscsökkentési célokat határozzanak meg.

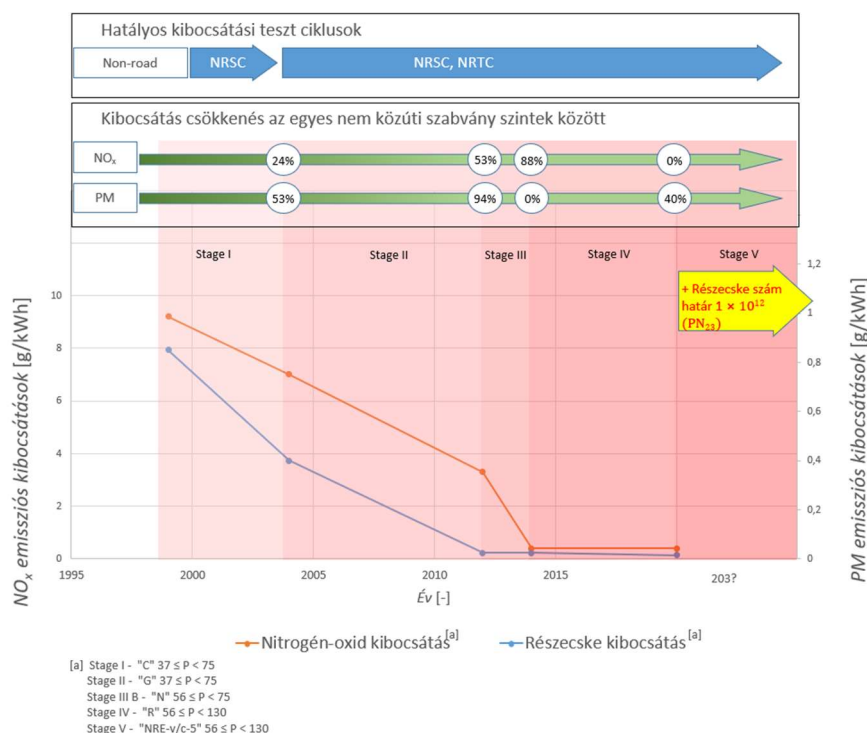
Ezek az adatok lehetővé teszik annak becslését, hogy ezekben az országokban a használt járműállomány túlnyomórészt EURO 4–5/IV–V, illetve Ausztrália, Dél-Amerika és Oroszország esetében ennél is alacsonyabb besorolású lehet. Afrikában várhatóan a legalacsonyabb a járműállomány szintje világszinten, és a használt gépjárművek esetében arányaiban több lehet a EURO 1–2/I–II szabványnak megfelelő, vagy akár kipufogógáz-kezelő rendszerrel nem rendelkező jármű (Deloitte Africa, 2016).

A jelenlegi kibocsátási szabályozások mellett az új járműeladások száma globálisan körülbelül 72,5 millióra tehető 2023-ban (ACEA, 2023). Ezzel szemben a használt gépjárművek száma világszinten megközelíti az 1,5 milliárdot. A használt járműállományban a EURO 3–5/III–V besorolású járművek vannak jelen legnagyobb arányban. E járművek utólagos átalakítása kínálja a legnagyobb kibocsátáscsökkentési potenciált, és gazdasági szempontból is reális megoldást jelenthet.

2.2.2. Nem közúti járművekre vonatkozó kibocsátási normák

Az európai, nem közúti szabályozások a mobil munkagépekre vonatkoznak, amelyek mezőgazdasági, erdészeti, betakarítási, sípályakarbantartó, építőipari munkagépek, telephelyi motorok, kerti gépek, valamint egyéb, elsődlegesen nem közúti használatra szánt járművek körébe tartoznak. E szabályozás első európai bevezetésére 1999-ben került sor. A nem közúti járművek szabályozása céljából széleskörű osztályozási rendszert alkalmaznak, amely többek között a hengerűrtartalom (néhány száz köbcentiméter nagyságrendűtől egészen a tengeri hajómotorokig), illetve a motorteljesítmény alapján történik. Ezek az osztályozások a szabvány különböző szakaszaiban változnak. A 2.7. ábrán az összehasonlíthatóság céljából a 60–70 kW teljesítményszint került kiválasztásra.

A szabályozás tárgyát a motor kipufogógáz-összetevői, valamint a részecskekibocsátás (PM) képezik. A részecskeszám (PN) korlátozását a legújabb, EU Stage V szakaszban vezették be a nem közúti járművekre vonatkozóan, amely a dízel részecskeszűrők (DPF) alkalmazásának kötelezővé tételét is eredményezte. Az egyes szakaszok között körülbelül 45 %-os csökkenés figyelhető meg mind a részecske-, mind a nitrogén-oxid kibocsátás tekintetében. A Stage I bevezetése óta, a PM és NO_x konkrét határértékeitől függően, a kibocsátási határértékek szigorítása rendre 98 %, illetve 95 %-os mértéket ért el. Ugyanakkor az új emissziós ciklusok és vizsgálati eljárások bevezetése következtében bizonyos esetekben magasabb kibocsátási értékek is várhatóak.



2.7. ábra: Részecske (PM), részecske szám (PN) és Nitrogén-oxid (NO_x) EURO kibocsátási határértékek nem közúti járművekben (NRMM) használt belsőégésű motorokra

Az Egyesült Államokban a nem közúti motorok szabályozása kezdetben hasonló módon történt az EU-s előírásokhoz, azonban a Tier 3/4 és a hozzájuk korreláló Stage III/IV szakaszoktól kezdve a szabályozási irányvonalak távolodni kezdtek. A világ más részein jellemzően az 1–3. szintű (Tier/Stage 1–3) szabványokat vették át.

Mivel e gépek túlnyomó többsége nincs nyilvántartásba véve, mennyiségi meghatározásuk nehézségekbe ütközik, ugyanakkor kibocsátásuk minden bizonnyal meghaladja a közúti járművékét (Hagan, et al., 2023, Zhang, et al., 2020). E kibocsátások szabályozása érdekében különböző emissziós leltárak készülnek, illetve bizonyos esetekben már rendelkezésre is állnak. Ezek az emissziós leltárak – például a kipufogógáz-kibocsátási adatokra, az hajtóanyag-összetételre, a földrajzi sajátosságokra és egyéb tényezőkre támaszkodva – egy adott területre vonatkozóan becslést adnak a kibocsátások mértékéről. Ezen adatok segítségével nyomon követhető a kibocsátáscsökkentési intézkedések hatékonysága (Hagan, et al., 2023). Mivel több európai országban is rendelkezésre állnak ilyen típusú emissziós leltárak, lehetőség nyílik az egyes országok nem közúti mobil gépeinek (NRMM) és közúti járműveinek kibocsátásainak összehasonlítására. Az eredmények azt mutatják, hogy a nitrogén-oxidok (NO_x) esetében a NRMM kibocsátása körülbelül 1,5–3,5-szer magasabb a közúti járművekhez viszonyítva. A részecskeemissziók (PM) esetében ugyanez az arány 2,3–11,9 között mozog, átlagosan 6,6-os értékkel (Lončarević, et al., 2022). Ez jól szemlélteti az utólagos technológiai beavatkozásokban rejlő lehetőségeket ezen a területen, még akkor is, ha a technológiailag kevésbé fejlett térségek esetében a pontos arányok meghatározása korlátozott.

Mindezek mellett globális szinten a nem közúti munkagépek esetében az hajtóanyag-specifikációk is jóval kevésbé szigorúak. A közúti járművek esetében – különösen a katalizátoros rendszerek (EURO 1/I) bevezetése óta – alapvető követelmény az hajtóanyag kéntartalmának csökkentése. Napjainkban a világ nagy részén közúti járművekhez már alacsony kéntartalmú, úgynevezett „ultra-low” sulfur (ULSD) hajtóanyagokat alkalmaznak. Ezzel szemben a nem közúti mobil gépek (NRMM) esetében sok térségben az hajtóanyagokra vonatkozó előírások sokkal kevésbé szigorúak. A kén jelenléte az hajtóanyagban katalizátormérgezést okoz, különösen a cerium-oxid (CeO_2) deaktiválásán keresztül (Luo and Gorte, 2004). Magas kéntartalmú hajtóanyag használata esetén a katalizátorokkal történő utólagos felszerelés technológiailag nem megvalósítható.

A nem közúti gépek közé tartoznak az ipari építőipari berendezések, hajózási eszközök, valamint egyéb nagy értékű alkalmazások, amelyek esetében a beruházási költségek aránya a működési költségekhez viszonyítva kisebb hatással bír. Egyes gépek élettartama jelentősen meghaladja a személygépkocsikét, ezekenél az amortizáció alacsonyabb, így az utólagos átalakítás költséghatékony megoldást jelenthet.

2.3. Kipufogó gáz káros összetevők csökkentése

Ahogy az emissziós szabályozások megjelentek, szükség lett olyan berendezésekre is, amelyekkel a világ minden pontján megismételhető és összehasonlítható módon lehet mérni a járműmotorok által kibocsátott emisszióját.

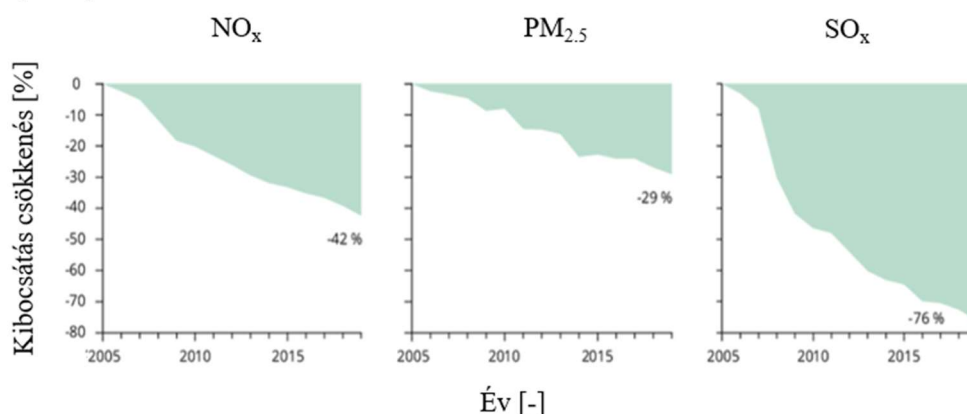
Az emissziómérést a fejlesztési szakaszban jellemzően motorfékpadon végzik, függetlenül attól, hogy a motor előtti, a motoron belüli vagy a kipufogógázok utókezelését érintő megoldásokat vizsgálják. A mérőberendezések terjedelmes, jellemzően akár teljes fékcellát elfoglaló méretűek manapság is. Csak a legutóbbi években jutott el odáig a technika, hogy kompakt személyautókra is felszerelhetővé vált. Ezáltal lett lehetőség a valós forgalmi körülmények közötti mérésekre is. Ebben a fejezetben megvizsgálom károsanyag csökkentő technológiákat, ismert, illetve vizsgált kölcsönhatásaikat, különösen a vízbefecskendezéssel kapcsolatban. Nagyon fontos lépés, hogy megfelelően fel tudjam mérni, milyen módon lehet a vízbefecskendezést ebben a rendszerben helyesen elhelyezni.

2.3.1. Emissziócsökkentési stratégiák a dízel motorban

A belsőégésű motor káros anyag kibocsátásának csökkentésére helyileg 3 lehetőség adott:

- A motor előtti eljárások (a motorba bejutott hajtóanyag és egyéb hajtóanyag(ok)),
- Motorban megvalósuló eljárások (EGR, optimalizált motorvezérlés),
- Motor utáni rendszerek (katalizátorok, szűrők, utókezelők) (Lan, et al., 2018).

A 2. és 3. kategória széles körben ismert és kutatott. Az első, a motor előtti eljárások témaköre azonban kevésbé tárgyalt terület. Egy jól felépített és összehangolt emissziókezelő rendszerben annak egyes elemei egy rendszerként egymás hatását erősíteni tudják, így további jelentős emissziócsökkenés érhető el. Ezeknek a rendszereknek a fejlesztése folyamatos, a gépjárművek fejlesztése során az emissziókezelő rendszerek a fejlesztési költségek jelentős részét emésztik fel. Ezen törekvések eredményeképpen még az utóbbi évtizedekben is további jelentős emissziócsökkenések érhetőek el (2.8. ábra), ami igazolja ezen tevékenységek szükségességét.



2.8. ábra: A globális antropogén kibocsátás csökkenése 2005-2019 (European Environment Agency, 2021)

2.3.2. Motor előtti csökkentési lehetőségek

Számos előnye ellenére, több hátránya is van a dízel technikának. Ahogy a legtöbb fosszilis hajtóanyagnak, a dízel hajtóanyagnak is szén és hidrogén az alapvető összetevője. Ideális termodinamikai egyensúly esetén a dízelmotorban csak széndioxid (CO₂) és vízgőz (H₂O) képződne. A motorokban lejátszódó égés sajátosságai miatt a hajtóanyagból származó égéstermékek összetétele más, mintha ugyanazt az energiahordozót egyéb körülmények között égetnénk el. A kipufogógázban mintegy négyszáz féle összetevő mutatható ki, amelyek közül a legtöbb csak nyomokban lelhető fel. Az alkotók közül csak a nitrogén, az oxigén és a vízgőz környezetbarát, az összes többi szennyezőanyag. Erre a problémára azonban a hajtóanyag hajtóanyagok összetételével is megpróbálhatunk válaszolni. Ide tartoznak a következők:

- kőolajipar oldaláról a
 - o korszerű, csökkentett kén- és aromástartalmú dízelgázolaj előállítása (Nagy, et al., 2006),
 - o csökkentett aromástartalmú hidrokrakkolt vagy szintetikus (Fischer–Tropsch) alapolajok előállítása és felhasználása (Baladincz, et al., 2006, Pölczmann, et al., 2007),
 - o korszerű, fém- és hamumentes adalékok felhasználása elsősorban a motorolajban (Baladincz, et al., 2007),
 - o égésvajító adalék alkalmazása a dízelgázolajban,
- alternatív hajtóanyagok, földgáz, PB (propán-bután) gáz, alkohol, biodízel,
- víz-víz, víz-etanol/metanol befecskendezés (Moser, et al., 2004).

Mivel a munkám az alternatív hajtóanyagok és a motor előtti emissziócsökkentő megoldások közé tartozik ezért ezt a későbbiekben külön vízbeporlasztás fejezetben részletesebben tárgyalni fogom.

2.3.3. Motorban megvalósítható lehetőségek

A modern dízel autók kiemelkedő hatásfokuk és alacsony fogyasztásuk miatt lényegesen hozzá tudnak járulni a flottaszintű CO₂ emissziós kvótához. Nagyszerű vezethetőségük és egyre kifinomultabb járásuk és motorzajuk miatt az elmúlt évtizedekben Európában és a világon egyre inkább elterjedtek. Ezek mögött az eredmények mögött jelentős technológiai fejlesztések álltak, mint a közös nyomócsöves rendszer, turbófeltöltés, hűtött EGR és folyamatosan finomodó motorvezérlő rendszerek.

A '60-as '70-es években a káros emisszió csökkentését a hajtóanyag levegő keverék szegényítésével, az előgyújtás csökkentésével próbálták elérni. Ezzel elérték, hogy:

- csökkentek a CO, HC emissziók, viszont,
- növekedett némileg az NO_x, és az hajtóanyag fogyasztás,
- motor teljesítmény is jelentősen visszaesett.

Az égési hőmérséklet csökkentésének egyik lehetősége (amellyel akár 50 %-os NO_x csökkenés is elérhető) a kipufogógázvisszavezetés (EGR) alkalmazása melyet '70-es évek elejétől kezdtek el alkalmazni. A másik általánosan használt lehetőség, ha az hajtóanyagot több kisebb adagban égetjük el, vagyis több kisebb dózisban történik a befecskendezés (magasnyomású, Common Rail rendszerek alkalmazása) és nem egy nagy dózisban. További előnye ennek a módszernek, hogy csökken a motor zajszennyezése is (Bíró, et al., 2021).

Ezek mellett, az alábbi technológiákkal – az utókezelő rendszerekkel kialakulásával párhuzamosan – a motoron belüli emissziócsökkentés fejlődése is folyamatos volt:

- égéstér optimalizálás,
- levegő-levegő köztes hűtés,
- elektronikai rendszerek,
- változó geometriájú turbó,
- EGR majd hűtött EGR,
- közös nyomócső (common rail),
- hajtóanyag befecskendezés:
 - o befecskendezési időzítés,
 - o befecskendezési nyomás,
 - o többszöri befecskendezés.

2.3.4. Kipufogógáz visszavezetés

A vízbefecskendezés mellett az egyik fő NO_x csökkentő technika az EGR, melynek vízbefecskendezés melletti működése sarkalatos pontja az értekezésnek, ezért erről külön fejezetet szentelve beszélek.

A kipufogógáz visszavezetés (Exhaust Gas Recirculation, EGR) alkalmazása az 1970-es évektől kezdődött. Az EGR működési elve azon alapul, hogy a kipufogógáz meghatározott hányadát – a motor terhelésétől függően – visszavezeti a motor égésterébe, ezáltal csökkentve a nitrogén-oxidok (NO_x) kibocsátását. A NO_x-képződés a magas hőmérsékletű diffúziós lángzónában megy végbe, a befecskendezett hajtóanyag és a környező friss levegő határfelületén. A NO_x képződés mértéke exponenciálisan függ a láng hőmérséklettől.

Az EGR hőmérséklet csökkentő fizikai hatása – a levegő / hajtóanyag hígító hatás – hasonló a vízbefecskendezés elvéhez. Az oxigénkoncentráció csökkentésén keresztül ez az EGR legjelentősebb NO_x kibocsátás mérséklő hatása. Egyes szakirodalmi források megkülönböztetik a termikus fojtási hatást a hígítási hatástól. A termikus fojtás során a visszavezetett magas hőmérsékletű kipufogógáz növeli a beömlő gázkeverék hőmérsékletét,

miközben a sűrű hideg levegőt kevésbé sűrű, meleg kipufogógázzal helyettesíti. Ez a folyamat csökkenti a beáramló levegő tömegáramát, ami egyúttal a térfogati hatásfokot is befolyásolja (Ladommatos, et al., 1998a).

Az égés során az oxigén (O) és a nitrogén-oxid (NO) gyökök felelősek a NO_x képződéséért. A kipufogógáz-visszavezetés (EGR) hatására a beszívott levegő összetétele megváltozik, megjelenik benne a vízgőz és a szén-dioxid (CO₂). Míg a vízgőz már eleve jelen van a folyamatban a levegő páratartalma révén, addig a CO₂ új komponensként kerül be az égéstérbe. Az égés során fellépő magas hőmérsékleten mindkét komponens képes disszociálni, és a disszociációs termékek részt vehetnek az égési reakciókban (Wang és mtsai, 2013). Ez az EGR kémiai hatásának tekinthető.

A víz égésre gyakorolt kémiai hatása két fő kategóriába sorolható: közvetlen reakciós hatás és közvetett katalitikus reakciós hatás. A két reakcióút párhuzamosan megy végbe. A víz „third body” közvetett hatása annak köszönhető, hogy molekulamérete körülbelül tízszerese a nitrogén (N₂) molekulájának. Ennek következtében az ütközések gyakorisága nő, ami elősegíti a „third body” reakciók bekövetkeztét. Ezek a reakciók negatívan befolyásolják a közvetlen reakciófolyamatot (2.6. egyenlet), amely során a H₂O közvetlenül serkenti az OH-gyökök képződését



A „third body” reakciók intenzitásának növekedése olyan alternatív reakcióút felé tereli a folyamatot, amely végső soron leállítja a gyökök képződését (Meng, et al., 2016). A kipufogógáz-visszavezetés során visszajutó másik komponens, a CO₂ szintén gátolja az O- és OH-gyökök képződését. A kipufogógáz-visszavezetési arány (EGR) maximum 30–40 %-os értéke mellett (Brady, 2013) ez jelentős mértékben csökkentheti az NO_x-képződésért felelős gyökök keletkezését.

Az EGR beszívott levegő hőmérsékletére gyakorolt hatása – a termikus fojtáson túl – a hengerben kialakuló magasabb hőmérsékletek révén negatív hatással lehet a kibocsátásra is. Bár ez a hatás kisebb mértékű hűtött EGR alkalmazása esetén, magasabb EGR-arány mellett továbbra is érvényesül (Ladommatos, et al., 1998b).

Ladommatos vizsgálatai szerint a termikus hatás és a termikus fojtás gyakorlatilag nincs érdemi hatással az NO_x-kibocsátásra. A beszívott levegő hőmérsékletének emelkedése azonban jelentős mértékben növeli az NO_x mennyiségét: a hőmérséklet 40 °C-ról 120 °C-ra történő növelése az összes kibocsátott NO_x körülbelül 40 %-ért felelős a kipufogórendszer végén mérve. A hígítási hatás mintegy 75 %-os csökkenést eredményez az NO_x-kibocsátásban, míg a kémiai hatás hozzávetőlegesen 4,5 %-os csökkenésért felelős (Ladommatos, et al., 2000). A kipufogógáz-visszavezetés fizikai kialakítása alapján két fő típust különböztethetünk meg: nagynyomású és kisnyomású rendszert (más források szerint „rövid útvonalú” és „hosszú útvonalú” rendszerek) (Reifarth és Ångström, 2009). Létezik egy úgynevezett „motoron belüli” (in-engine) megoldás is, amely a szelepvezérlés segítségével juttatja vissza a kipufogógázt az égéstérbe, azonban ez jelen vizsgálat tárgyát nem képezi. A nagynyomású rendszer esetében a kipufogógázt a turbófeltöltő turbinaoldala előtt vezetik el, és a szívóoldali kompresszor után vezetik vissza. Előnye, hogy a visszavezetett kipufogógáz hőmérséklete magas, ami különösen előnyös a motor bemelegedési fázisában. Az EGR-hűtő és a szabályozó szelep alkalmazásával a lehűtött levegő kevésbé rontja a motor hatásfokát, miközben a bemelegedési fázisban továbbra is érvényesülhet a kedvező hatás (Gumus és Otkur, 2023). Hátrányt jelent a rendszerben természetesen előforduló magas üzemi hőmérséklet, valamint az a tény, hogy a tisztítatlan kipufogógáz kerül visszavezetésre, amely lerakódásokat okoz az EGR-járatokban és a hűtőegységben. A kisnyomású rendszer esetében a kipufogógázt a turbófeltöltő turbinakerekének kilépése után vezetik vissza a kompresszorkerekhez. A legtöbb esetben a visszavezetés a turbina és az emissziócsökkentő rendszer után történik, így az inert, azaz szén-monoxid- és szénhidrogén-mentes gáz kerül vissza a kompresszorkerekhez. Amint

a motorban az üzemi hőmérséklet elérésre kerül, a kisnyomású rendszer előnyösebb választás, mivel a kisnyomású kipufogógáz hőmérséklete alacsonyabb, jobban keveredik, és szűrésen is átesett (Lapuerta, et al., 2019). Ennek megfelelően a korszerű rendszerekben mindkét típus együttesen kerül alkalmazásra: a nagynyomású rendszer a motor bemelegedési fázisában működik, míg az üzemi hőmérséklet elérését követően a kisnyomású rendszer vagy akár a szelektív katalitikus redukciós (SCR) technológia veszi át a szerepet.

Ugyanakkor magas motorterhelés mellett az EGR negatívan befolyásolja a motor teljesítményét és hatásfokát, elsősorban az alacsony levegő hajtóanyag arány és a szivattyúzási veszteségek miatt, ezért ilyen körülmények között az EGR működése felfüggesztésre kerül (Jacobs, et al., 2003; De Serio, et al., 2017).

2.3.5. A kipufogógázok utókezelése

A '60-as évek végén már megindultak az emissziócsökkentési törekvések, eleinte a motor szabályozásával próbálták visszafogni a kibocsátásokat azonban ez a motorteljesítmény drasztikus csökkenéséhez is vezetett. A '70-es években több vállalat is jelentős erőfeszítéseket tett új eljárások bevezetésére melyekkel új lehetőségek nyíltak a légköri szennyezőknek a csökkentésére. Az eredményeik kapcsán születtek meg különböző költséghatékony technológiák és bizonyították, hogy képesek jelentősen csökkenteni ezen káros emissziókat, mindezt pedig úgy, hogy az már nem járt a jármű teljesítményének csökkenésével. A jellemző emisszió utókezelő rendszerek az alábbiak:

PM/PN és szénhidrogén HC csökkentő technológiák:

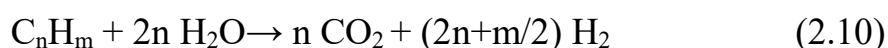
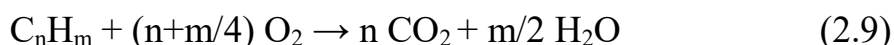
- oxidációs katalizátorok (egy-, kettő-, háromutas katalizátorok, DOC),
- dízel részecskeszűrő (DPF).

NO_x csökkentő technológiák:

- szelektív katalitikus redukció (SCR),
- NO_x katalizátor (LNC),
- NO_x csapda (LNT).

2.3.6. Oxidációs katalizátorok

Oxidációs katalizátorokat akkor alkalmaznak, ha a füstgázban oxigén van jelen. Az oxidációs katalizátorok átalakítják a szén-monoxidot (CO) és a szénhidrogéneket szén-dioxiddá és vízzé ahogy azt a 2.7 – 2.10 egyenleteknél látjuk.



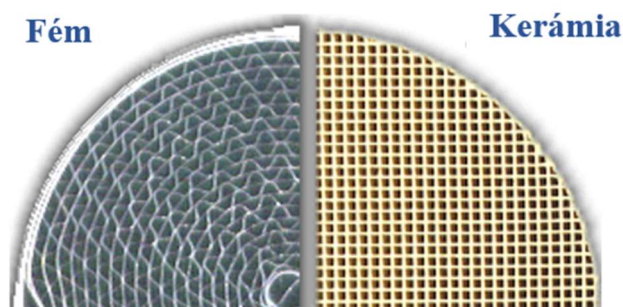
A kezdeti időszakban 2 fő típusa alakult ki a katalizátoroknak:

- Szemcsés töltetű katalizátor, melyben gamma – alumina szemcsékkel ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) töltötték meg a konverter dobát. A kipufogó rendszer rázkódása miatti sűrűlódás következményeképpen azonban gyorsan eltömődött, élettartam szempontjából nem tudta felvenni a versenyt a,
- méhsejt szerkezetű katalizátorral. Itt a hordozó, kerámia (Cordierite) vagy pedig fém anyagú volt.

Fém katalizátorokat a mai napig használnak, fő előnye, hogy a cellafal jelentősen vékonyabb tud lenni, mint a kerámia esetében, így:

- az alacsonyabb tömeg miatt, ez a katalizátor fajta gyorsabban fel tud melegedni, így a katalizáció a motor indítása után hamarabb el tud kezdődni.
- A vékonyabb cellafal miatt egységnyi térfogatban több cella fér bele (CPSI – cells per square inch – cellák száma egy négyzethüvelykben) így ugyanakkora térfogaton, nagyobb aktív katalizátorfelületet biztosít (2.9. ábra).
- A homlokfelületen a nyílt cellák aránya nagyobb (OFA- open frontal area), így alacsonyabb a levegő torlódása.

A kerámia monolit ezzel szemben jelentősen olcsóbb, mindemellett a CPSI és az OFA itt is bőven kielégítő.

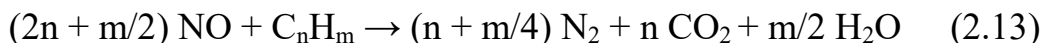
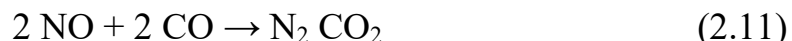


2.9. ábra: Katalizátor szerkezetek (Leman, 2016)

A kerámia/fém monolitot $\text{Al}(\text{OH})_3$ csapadékos szuszpenzióba mártják, szárítják $110\text{ }^\circ\text{C}$ -on, majd termikusan aktiválják $3\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$ -on. Ezen a módon alakítják ki a $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ „wash coat” réteget, mellyel a katalizátor $1\text{--}2\text{ m}^2$ felületét $20\,000\text{--}30\,000\text{ m}^2$ -re lehet megnövelni.

Katalitikus bevonatként a Pt/Pd (platina/palládium) nemesfémek bizonyultak megfelelőnek, melyeket sóként oldanak ezzel impregnálják a hordozót, majd annak felületén hőközléssel fémmé redukálják. A katalizátort dezaktiválódásához vezetett a magas hőmérséklet, kén tartalom (dízel hajtóanyag), ólom (oktánszám növelő adalék) alkalmazása a hajtóanyagban.

A '80-as évektől a NO_x csökkentését a motorban kialakított kipufogógáz visszavezetés mellett utókezelő rendszerekkel is elkezdtek csökkenteni. Itt két katalizátorágyat alakítottak ki (kétágyas katalizátor), melyből az első katalizátorágyban megy végbe az NO_x redukciója az alábbiak szerint:

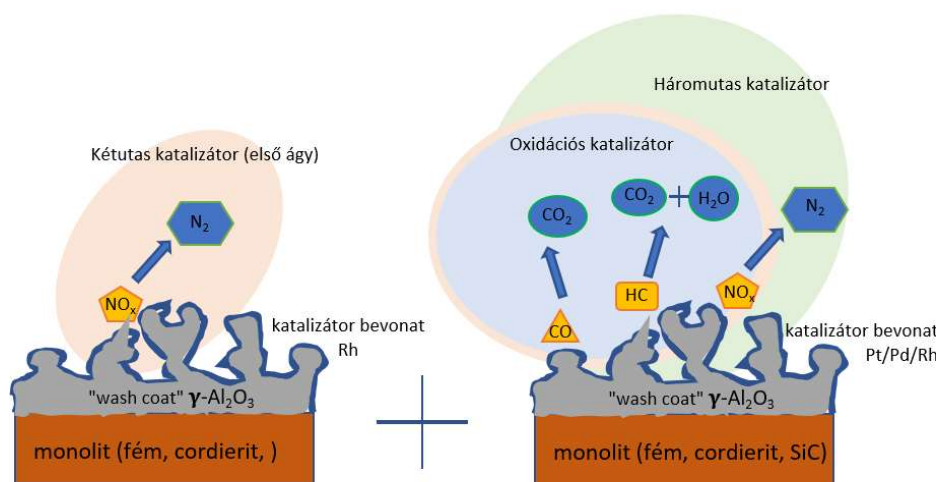


Az első konverter is méhsejt szerkezetű hordozó, a megfelelő katalizátoranyagnak pedig ródium (Rh) bizonyult. A második oxidációs katalizátorágy megfelelő működéséhez, pótlevegő bevezetést alakítottak ki elé. A katalizátorágyon a hőmérséklet függvényében az alábbi folyamatok mennek végbe;

- $200\text{ }^\circ\text{C}$ -ig a katalizátor nem aktív (1-2 perc), elektromos fűtéssel ez csökkenthető,
- $230\text{--}270\text{ }^\circ\text{C}$ üzem kezdete. Élettartamtól függően ennek hőmérséklete lassan emelkedik,
- $400\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$ üzemi hőmérséklet,
- $800\text{--}900\text{ }^\circ\text{C}$ rövid ideig elviseli a katalizátor, visszafordíthatatlan folyamatok nem mennek végbe,

- 1000-1100 °C a gamma-alumina átalakul jelentősen kisebb felületű alfa-aluminává (korund), így aktivitása már drasztikusan csökken,
- 1200 °C – „wash coat” leválik,
- 1380 °C – itt már a kordierite monolit is megolvad.

A háromutas (TWC – three way catalyst) katalizátoron már az első katalizátorágyban megy végbe párhuzamosan az NO_x redukciója is (nem szelektív katalitikus eljárás). A katalizátor megfelelő működéséhez a légfelesleg tényezőnek 1 (λ)-nek kell lennie. A légfelesleg tényezőt λ szonda szabályozza az oxigén parciális nyomás alapján. Az üzemi hőmérséklet 300-350 °C a szondának. A leghatékonyabbnak a Rh/Pt katalizátoranyagok bizonyultak. A katalizátor fontos összetevője a cérium, mely oxigéntároló hatású, dús keverék esetén C⁴⁺, C³⁺ redukálódik és oxigént ad át és így pozitív hatással van a katalizátor működésére. A katalizátorok működését összefoglalóan a 2.10. ábrán láthatjuk.



2.10 ábra: Az egy-, két-, és háromutas katalizátor szerkezete és folyamatai

A dízel oxidációs katalizátor (DOC) különböző kipufogógáz-komponens oxidációját elősegíti oxigénnel, amely nagy mennyiségben jelen van a dízel kipufogógázban. A katalizátor lényegében hasonló a hármashatású katalizátorhoz, de az oxigén jelenléte miatt nem képes az NO_x-ot redukálni. Ha oxidációs katalizátort használunk, az alábbi dízel szennyező anyagok oxidálhatók ártalmatlan égéstermékekké, és így a DOC segítségével szabályozhatóak;

- szén-monoxid (CO),
- gázfázisú szénhidrogének (HC),
- a dízel részecskék szerves része (SOF).

A platina katalizátoranyag segítségével a 600-650 °C fok helyett már 300 °C körül végbemegy a koromrészecskék eltávolítása. A dízel oxidációs katalizátoron több olyan folyamat is végbemegy, ami a nitrogén-oxidok, illetve a PM szempontjából érdekes. A NO oxidációja NO₂-ig elengedhetetlen a modern dízelkibocsátás-csökkentő rendszerek működéséhez (2.14 reakció). Itt a DOC egy segéd katalizátorként is funkcionál, amely támogatja más típusú katalizátorok teljesítményét - az oxidációs katalizátor után elhelyezve -, amelyek magas NO₂/NO arányt igényelnek. Nitrogén-dioxidra van szükség a különböző típusú SCR katalizátorok teljesítményének növeléséhez, valamint a dízel részecskeszűrők (DPF) passzív regenerálódásának elősegítéséhez. A DPF/SCR alkalmazásokban használt DOC-kat általában nagy NO₂-termelésre optimalizálják.



Az oxidációs katalizátorokkal rendelkező megnövekedett NO₂/NO arányok – bár elengedhetetlenek a dízel utókezelő rendszerek működéséhez – szintén viták forrása volt. A NO_x-kibocsátás két összetevője közül az NO₂ nagyobb toxicitást mutat, mint a NO. Egyes alkalmazásokban a megnövekedett NO₂-kibocsátás hozzájárulhat a levegőminőségi problémákhoz (Russell és Epling, 2011, Czerwinski, et al., 2013).

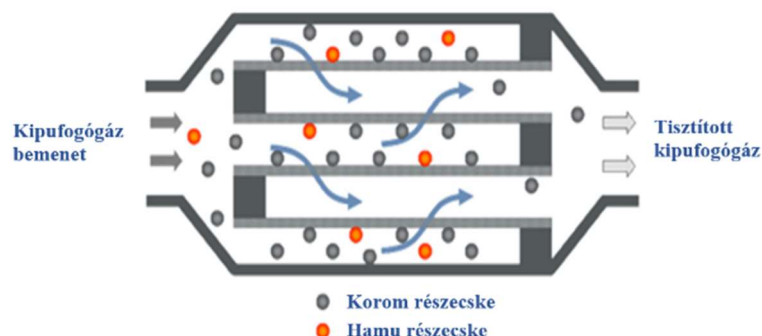
Szintén nagyon fontos, azonban nem kívánt reakciók is végbe mennek a katalizátoron kén-dioxiddal. Oxidációja során kén-trioxid keletkezik, ami a későbbiekben kénsav (H₂SO₄) keletkezéséhez vezet.



Ezek a reakciók több szempontból is aggályosak, egyrészt a kipufogó végén a kihűlt gázban szulfát részecskék képződnek, melyek jelentős PM emisszióért felelősek, másrészt a kénsav erősen korrozív anyag.

2.3.7. Dízel részecskeszűrő (DPF)

A dízel részecskeszűrők általánosan alkalmazott technológia. Méhsejt szerkezetűek hasonlóan az oxidációs katalizátorhoz, itt viszont mindig a szemben levő oldalukon a cella zárt. A szűrés mechanikusan a cellafalak pórusain megy végbe (2.11. ábra).

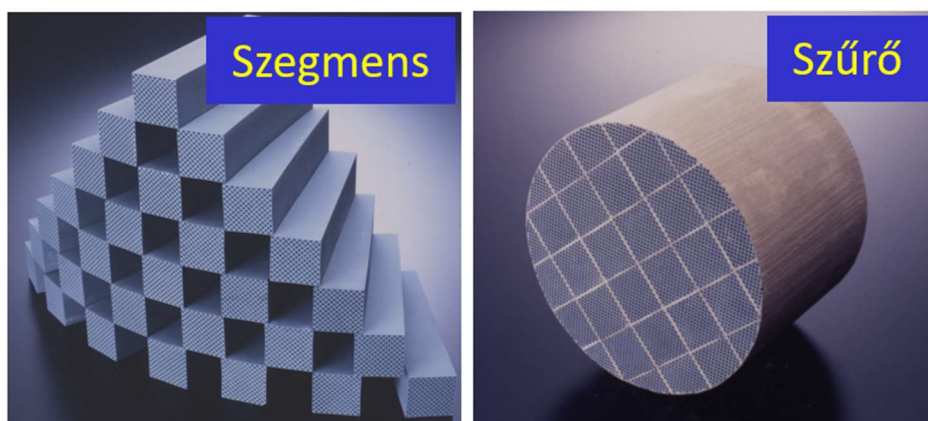


2.11 ábra: A részecskék szűrésének mechanizmusa (Ibiden Hungary Kft.)

A két legjobban elterjedt alapanyaga a részecskeszűrő kerámiatestének a Cordierite (2MgO–2Al₂O₃–5SiO₂) és a szilícium-karbid (SiC) (2.12. ábra). A cordierite filterek az előállítási technológiájuk miatt jelentősen olcsóbbak, nagyon jó részecskeszűrési tulajdonságaik mellett. Ez szintén igaz a SiC filterekre is, viszont ez a technológia beruházás igényes, amit az kompenzál, hogy jelentősen robusztusabb, szélsőségesebb motorkondíciókat képes elviselni. A mai modern részecskeszűrők beszéljünk akár Cordierite vagy pedig SiC típusról, a motor részecske kibocsátásának 90-99,9 %-át képesek kiszűrni.

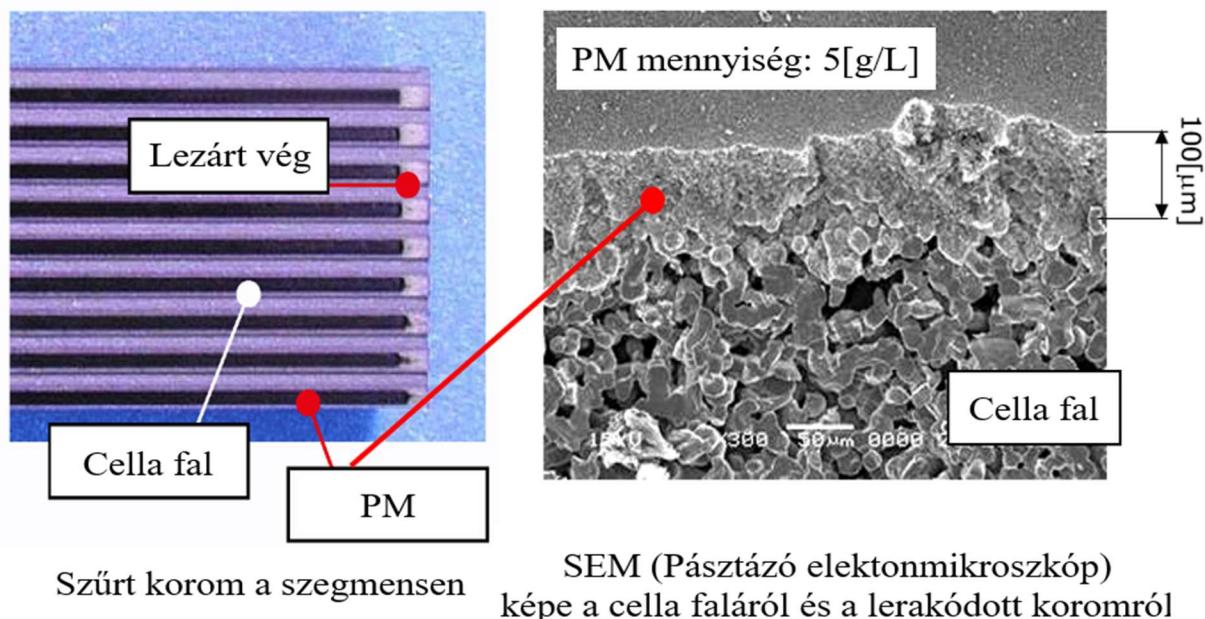
A filterben felgyűlt kormot (2.13. ábra) időről időre kiégetéssel el kell távolítani. Ez lehet passzív és aktív regeneráció útján.

Passzív regeneráció során a kipufogógáz hőmérsékletét használják ki a regenerációra. A dízel kipufogógáz terheléstől függően 200-300 °C hőmérsékletű, viszont a korom részecskék 600 °C hőmérsékleten égnek ki. Katalitikus bevonattal látják el a szűrő bemenő oldalát mely aktiválja a koromrészecskék oxidálását 250- 300 °C hőmérsékleten. A regeneráció itt jellemzően nagyobb terhelésen megy végbe amikor a kipufogógázok hőmérséklete emelkedik.



2.12. ábra: Szegmentált SiC filterek (Ibiden Hungary Kft.)

Aktív regeneráció során lényegében a kipufogási ütemben is fecskendez be tüzelőanyagot a motorvezérlő utasítására az injektor, amely nem az égéstérben hanem az oxidációs katalizátorban ég el. Ezzel a megoldással 100 %-os hatékonysággal regenerálható a DPF filter. A kényszerregenerációt motorvezérlés indítja a kipufogórendszerben érzékelt, előre beállított nyomásesés elérésekor (Ohno, 2006).



2.13. ábra: DPF-ben összegyűlt korom (Ibiden Hungary Kft.)

A katalitikus kerámia szűrők célja a korom oxidációs hőmérsékletének csökkentése és a passzív DPF regeneráció megkönnyítése. Az autógyártók az aktív regenerálás helyett a passzív regenerálást részesítik előnyben, mivel alacsonyabb hőmérsékleten történik (jótékony hatással van a szűrő tartósságára), és csökken az hajtóanyag felhasználás. Három alapvető konfiguráció lehetséges (a méréseimben kialakított EURO 5 -ig bezárólag), a katalizátor helyétől függően:

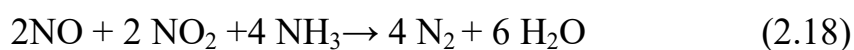
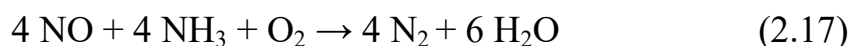
- katalitikus bevonattal ellátott dízel részecskeszűrő (C-DPF),
- oxidációs katalizátor + katalizálatlan DPF,
- oxidációs katalizátor + C-DPF (Konstandopoulos, et al., 2007).

Ezekon a megoldásokon felül elterjedt még a motorhajtóanyagban felhasznált, a részecskék égési hőmérsékletét csökkentő úgynevezett FBC (FBC: Fuel Born Catalysts) adalékok használata (Hancsók, 1999). Számos, gázolajban is oldható fémtartalmú szerves vegyületet fejlesztettek ki, amelyek csökkentik a részecskék égéshőmérsékletét. A jelenleg felhasznált

adalékok cérium-, cirkónium-, réz-, vas-, kobalt-, stroncium- vagy platinaoxidot, esetleg ezek kombinációját tartalmazzák (Sui, et al., 2007, Wu, et al., 2007).

2.3.8. Szelektív katalitikus reduktor (SCR)

NO_x emissziók csökkentésének két, alapvetően különböző katalitikus útja lehetséges attól függően, hogy milyen a katalizátorágyba lépő gázelegy sztöchiometriai összetétele. Ha a gázban egyenértéknyi, vagy fölös mennyiségben vannak a redukáló anyagok az oxidáló anyagokhoz képest, az NO_x-t a nem oxidálódott komponensekkel (CO, H₂, HC) katalitikusan redukálhatjuk (nem szelektív katalitikus redukció), ha viszont a gázban több az oxigén, mint ami a jelenlévő redukáló komponensek teljes oxidációjához szükséges, a nitrogén-oxidok redukciója ez utóbbiakkal már csak szelektív katalizátoron valósítható meg. A végbemenő főbb reakciók:



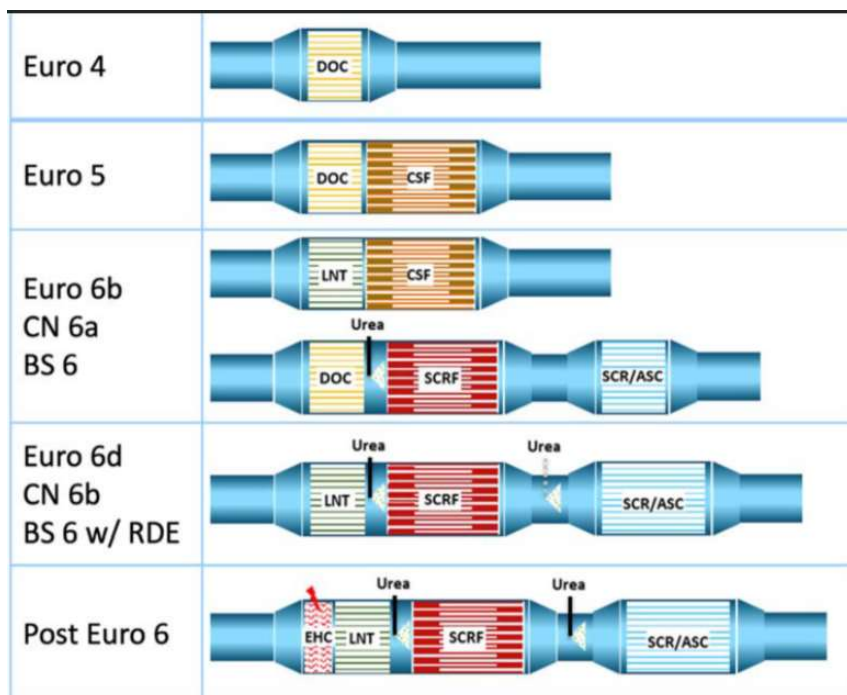
A redukcióhoz ammóniát (NH₃) használnak. Az ammónia erősen mérgező gáz amelynek tárolása a gépjárműben megengedhetetlen kockázatot jelentene. Az ammóniát így termikus bontással a felhasználás helyén a forró kipufogógázokba fecskendezve hozzák létre. Erre karbamid ([NH₂]₂CO) 32,5 %-os elegyét használják demineralizált vízben. Ez 132 °C fokon bomlik ammóniára, melynél azonban jóval magasabb hőmérsékletet kell elérni mielőtt a befecskendezést elkezdhetnénk. Ez azért fontos, mert a folyamat során 200 °C alatt robbanásveszélyes NH₄NO₃ képződhet ezért a rendszer szabályozásánál ezt nem lehet figyelmen kívül hagyni. Alacsony hőmérsékleten platina bázisú katalizátort használnak. A minimum hőmérséklet 200 °C és maximum 225 °C fok fölé nem szabad menni, hogy az NH₃ ne oxidálódjon. Magasabb hőmérsékletű alkalmazásoknál V₂O₅, és zeolit katalizátort alkalmaznak.

A folyamat során:

- NO_x eltávolítás (akár 75-90 % hatékonyság),
- mellett további jelentős, 80 %-os szénhidrogén,
- további 20-30 % szilárd részecske csökkenés érhető el.

2.3.9. Modern emisszió utókezelő rendszerek

Jelenleg a részecske kibocsátás (PN – Particle Number – Részecske Szám) szempontjából a DPF (Diesel Particulate Filter – Dízel Részecskeszűrő) jelenti a legbiztonságosabb technológiát. A nitrogén-oxidok csökkentésére pedig a legelterjedtebben használt technológia a kipufogógáz visszavezetés, illetve jellemzően EURO 6-tól pedig a Szelektív Katalitikus Redukció (SCR). A jellemző, jelenleg a világban legjobb elterjedt emisszió utókezelő rendszereket a 2.14 ábrán láthatjuk. Hogy a jelenlegi és a jövőbeli kibocsátási normáknak meg tudjon felelni, a dízel motoroknak további NO_x és PN csökkentési lehetőségeket kell alkalmazni (Pischinger, et al., 2007).



2.14. ábra: Jellemző emisszió utókezelő rendszerek (Selleri, et al., 2021.)

2.4 Víz a belsőégésű motor üzemében

A víz égéstérbe juttatása (W.I.), mint motor előtti emisszió csökkentési folyamat, jelentős hatással van a motor teljes emissziókezelő rendszerére. A befecskendezett víz, az égési folyamatokra gyakorolt hatása révén, befolyásolja a motoron belüli folyamatokat, mint például a kipufogógáz-visszavezetést. Ezt követően az égéstérből távozva a kipufogórendszeren keresztül tovább halad, és potenciálisan befolyásolhatja az emisszió utókezelő rendszerek működését és hatásfokát is. Ezért szükség van a víz utókezelő rendszerre (ATS) gyakorolt hatásának átfogó vizsgálatára is. Különösen fontos ez „retrofitting” esetén, amikor meglévő járműveket utólagosan szerelnek fel W.I. technológiával.

Egy hatékony emissziócsökkentő rendszerben az egyes elemeknek összehangoltan kell működniük annak érdekében, hogy a tervezett paraméterek teljesüljenek. Mivel munkámban a cél az utólagos beépítés, és ezzel kapcsolatos átfogó tanulmány nem létezik, ezért vizsgálni kell a víz hatását az összes releváns és potenciális emissziókezelő rendszerre az EURO 1/I normáktól kezdődően. Az olyan főbb komponensek esetében, mint a dízel oxidációs katalizátor (DOC), a dízel részecskeszűrő (DPF) vagy a szelektív katalitikus redukciós rendszer (SCR), külön-külön értékelni kell a vízbefecskendezés hatását. Az utólagos beépítés során a W.I. rendszert egy már meglévő emissziócsökkentő rendszerbe integráljuk, ezért a lehetőségeket számba véve kérdéskört részleteiben kell megvizsgálni.

2.4.1. A víz égéstérbe juttatása, múlt és jelen

A W.I. technikája nem új keletű, a Német Légierő már a 1940-es években, a második világháború során több vadászpilótaegységén is sikeresen alkalmazta a teljesítmény növelése érdekében (Gunston, 1989)

A szakirodalom tanúsága szerint azonban egészen az 1980-as évekig nem vizsgálták az emissziócsökkentő potenciálját. Ezt követően azonban előtérbe került, jellemzően víz-etanol/metanol emulzió befecskendezés formájában. A témában túlnyomórészt szimulációk és kísérleti motorokon végzett vizsgálatok születtek. A 2000-es években, a kor műszaki színvonalán, a W.I. alkalmazását kevésbé ígéretes technológiának tekintették, a kockázatokat

és az elérhető eredményeket figyelembe véve. Mindig léteztek olyan kibocsátás csökkentő módszerek, amelyek egy-egy káros emissziós komponens eltávolításában hatékonyabbnak bizonyultak. Ezzel szemben az a tény, hogy a W.I. gyakorlatilag az egyetlen jelentős technika, amely képes a dízelmotor égése során egyidejűleg csökkenteni a részecskekibocsátást és a nitrogén-oxidokat, háttérbe szorult.

Napjainkban azonban a W.I.-vel kapcsolatos problémák már kezelhetők és technikailag kiküszöbölhetők. A korábban használt hajtóanyagok kéntartalmát jelentősen csökkentették az ultraalacsony kéntartalmú (ULSD) hajtóanyagok révén, így a korrózióért felelős kénsav és kénessav képződésének kockázata ma már elhanyagolható mértékű. A korróziós problémák ezen felül megfelelő anyaghasználattal, fejlett anyagtechnológiák alkalmazásával, a műanyag alkatrészek fokozott beépítésével, valamint korszerű motormenedzsment rendszerekkel elkerülhetők (Milojevic, et al., 2024, Berni, et al., 2015, Raut and Mallikarjuna, 2021).

A nem közúti szektorban található példák a W.I. technológia gyakorlati alkalmazására dízelmotorok esetében, különösen tengeri alkalmazásokban (Turns, 2000, Imahashi, et al., 1995). A kereskedelmi célú hajózás területén jelenleg nincs életképes alternatívája a dízelmotorok széles körű alkalmazásának (Senčič, et al., 2019).

Általánosságban elmondható, hogy a közúti szektorban lényegesen szigorúbbak a kibocsátási előírások. A korszerű dízelmotorokhoz kapcsolódó bonyolult utókezelő rendszerek (ATS) esetében jelenleg hiányosak az ismereteink a vízbefecskendezés egyes alkatrészekre, valamint a teljes ATS rendszerre gyakorolt hatásáról.

2.4.2. A víz hatása a NO_x kibocsátásokra

A víz jelentős hatást gyakorol az égési folyamatokra a belső égésű motorokban. A dízelmotorok légfelesleggel működnek, így üzemük során a levegő páratartalma révén jelentősen több mennyiségű víz jut be az égéstérbe a szikragyújtású (Ottó-ciklusú) motorokhoz képest. Már kis mennyiségű víz is nyomon követhető, jelentős hatást fejthet ki.

Páratartalom esetén a NO_x -kibocsátás csökkenésének fő fizikai mechanizmusai a hígítási hatás, valamint a fajhővel összefüggő (úgynevezett termikus) hatás. A víz fajhője ($2,03 \text{ J/(gK)}$) magasabb, mint a keveréklevegőé ($1,01 \text{ J/(gK)}$) és az hajtóanyagé ($2,09 \text{ J/(gK)}$). A nagyobb fajhőjű és nagyobb tömegű levegő/hajtóanyag keverék következtében az égési hőmérséklet jelentősen csökken (Andrews, et al., 1988, Ishida and Chan, 1994, Wan, et al., 2021, Prasad, et al., 2015). Egy másik fontos fizikai mechanizmus a víz hígító hatása, amely szintén a nagyobb tömegű keverékkel áll összefüggésben. Ez csökkenti az égéstérbe jutó hajtóanyag és oxigén koncentrációját, így az égés során felszabaduló energia is mérséklődik (Prasad, et al., 2015, Sun, et al., 2022, Quader, 1971). A diffúz lángban a NO_x -képződése szintén csökken a teljes égési idő rövidülése miatt. Ennek oka, hogy a keverékképzés felgyorsul, valamint a gyújtási késedelem megnövekszik, ami a premixált égés részarányának növekedéséhez vezet (Sawa and Kajitani, 1992, Paltrinieri, et al., 2019, Miyamoto, et al., 1995, Schihl, et al., 2006). Nagyobb motorterhelés mellett a W.I. jelentősebb NO_x -csökkenést eredményez (Hountalas, et al., 2006, Sun, et al., 2017, Neshat, et al., 2019). A premixált égés során, alacsonyabb hőmérséklet és szegény keverékviszonyok mellett a „gyors NO ”, más néven a Fenimore reakciók (2.20-2.22) (Fenimore, 1971) gátoltak, és a termikus (Zeldovich) mechanizmus jelentősége is csökken.





Ezzel szemben a dinitrogén-oxid (N_2O) köztes mechanizmusának reakciója kinetikailag kedvező (2.26 – 2.28 reakciók) (Turns, 2000, Bowman, 1992):



Összességében megfigyelhető, hogy a nitrogén-oxid kibocsátás csökken a domináns termikus mechanizmus arányának visszaesésével.

A premixált égéssel induló égési folyamatot követően a megnövekedett nyomás összesűríti és felmelegíti az égéstérben maradó, még el nem égett keveréket, ezáltal lerövidítve a gyulladáshoz szükséges időt. Ilyen esetekben, amikor a levegő hajtóanyag arány meghaladja a 25:1 értéket (összességében szegény keverék), az égést a hajtóanyag levegő keveredési sebessége határozza meg mindaddig, amíg az összes befecskendezett hajtóanyag el nem ég. Ez a folyamat magában foglalja a folyamatos porlasztást, párolgást, az hajtóanyag-gőz és a levegő keveredését, valamint magát az égést is (Dempsey, et al., 2021). Ebben a heterogén égési folyamatban a hőmérséklet elérheti, sőt meghaladhatja az 1600 °C-ot is. Ilyen körülmények között (nem premixált égés esetén) a termikus mechanizmus reakciókinetikai szempontból előnyössé válik (2.29 – 2.31 reakciók) (Rente, 2004, Glarborg, 2019).



Mesterségesen megnövelt mennyiségű, folyékony halmazállapotú víz alkalmazása esetén megjelenik a fázisátalakulással járó hőelvonási hatás (más néven „charge cooling” hatásként is ismert a szakirodalomban), valamint a hígítási hatás is hangsúlyosabbá válik. A víz párolgási entalpiája (2256 J/g) mintegy nyolcszorosa a dízel hajtóanyaghoz viszonyítva (277 J/g). Amikor a víz folyékony formában kerül befecskendezésre, fajhője (4,18 J/(gK)) kétszerese a gőz formájában mért értékének (2,03 J/(gK)). Ezek az értékek jól szemléltetik a fázisátalakulás során történő hőelnyelés mértékét a fajhőn túlmenően is. Az itt megadott értékek szobahőmérsékleti körülményekre vonatkoznak, amelyek a hengerben uralkodó viszonyok között eltérhetnek. Neshat 2019-es tanulmánya (Neshat, et al., 2019) szerint a fajhővel összefüggő termikus hatás 3–4-szer nagyobb befolyással bír a NO_x -képződésre, mint a hígítási hatás.

Az égés során hő hatására bekövetkezhet a víz (H_2O) disszociációja, és az így keletkező reakciótermékek aktívan részt vehetnek az égési folyamatban (Wang, et al., 2013). Az égés jellemző körülményei között ezeknek a termékeknek két fő reakcióútja ismert: közvetlen és közvetett. Ezeket a reakciókat összefoglaló néven a víz kémiai hatásaiként tartja számon a szakirodalom (Meng, et al., 2016). Az égésfolyamat a dízel hajtóanyag (jellemzően C_{12} – C_{20} szénatomszámú szénhidrogének) reakciójával indul, amely során H-gyök keletkezik, amint azt a 2.32 reakcióban is láthatjuk. Magas hőmérsékleten a keletkezett hidrogéngyök (H) oxigénnel

reagálva hidroxilgyököt (OH), valamint oxigénygyököt (O) eredményez (2.33. reakció) (Neshat, et al., 2019, Blocquet, et al., 2013).



A víz a közvetlen kémiai hatásával gátolja a termikus NO képződését azon a módon, hogy felhasználja az O-gyököket (2.34 reakció) melyek a láng utáni tartományban az elindítói a termikus NO képződésnek (Wang, et al., 2013, Meng, et al., 2016).

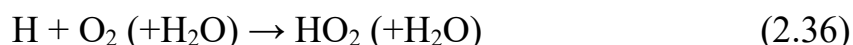


Ennek eredményeként megnövekszik a hidroxilgyökök (OH) képződése, amelyek kiváló oxidálószer, így előtérbe kerül a szén-monoxid (CO) oxidációjának fő reakciója (2.35 reakció) (Srinivasan and Michael, 2006, Dryer, 2022).



Ez a reakció növeli a hengerben kialakuló hőmérsékletet, amelynek következtében csökken a szénhidrogének képződése (Hountalas, et al., 2006, Neshat, et al., 2019). Ez lehet az egyik olyan mechanizmus, amelyen keresztül a víz egyidejűleg képes mérsékelni a nitrogén-monoxid és a szénhidrogén kibocsátást, szemben az ezen komponensek között jól ismert kompromisszummal.

Ugyanakkor, a befecskendezett víz mennyiségének növekedésével – mint nagy méretű, többatomos molekula – fokozódnak a víz közvetett, „third body” reakciói, amelyek megnövekedett mennyiségű hidroperoxil (HO_2) gyök keletkezéséhez vezetnek (2.36 reakció). Ezek a gyökök az égés befejező lépésében vízzé (H_2O) és oxigénné (O_2) alakulnak (2.37 reakció) (Neshat, et al., 2019, Meng, et al., 2016, Jasper, 2022).



Egyes kutatók további hatásokat is megkülönböztetnek, például a termikus fojtást (thermal throttling), amelyet elkülönítenek a hígítási hatástól. A víz hozzáadásával nemcsak az oxigénkoncentráció növekszik (hígítási hatás), hanem a sűrűség növekedésével együtt a beszívott levegő tömegárama is megnő – ezt nevezzük termikus fojtásnak. A víz hozzákeverése a beszívott levegőhöz a töltetcsere hatásfokát (volumetrikus hatásfok) is javítja (Ghaly, et al., 2017, Ladommatos, et al., 1998a). A termikus fojtás és a hígítási hatás mellett a beszívott levegő hőmérsékletének különbsége is jelentős hatást gyakorol az égési folyamat során kialakuló hőmérsékletre – ezt nevezzük beszívott levegő hatásnak (inlet temperature effect). Fontos megjegyezni, hogy ez a számítás nem veszi figyelembe a fázisátalakulásból eredő hőelnyelést, kizárólag a beáramló keverék hőmérsékletének hatását vizsgálja (Ladommatos, et al., 2000).

A nyers dízelmotor kibocsátások esetében a nitrogén-oxidok csökkentésének leghangszúlyosabb mechanizmusai a termikus és a hígítási hatások. A termikus NO_x -képződés egyik elsődleges befolyásoló tényezője az oxigén rendelkezésre állása, amely magas a dízelmotorok működése során. A dízelmotorokban az égés jellemzően inhomogén és keverés vezérelt, így a levegő hajtóanyag keverék helyileg dús lehet, ami jelentős NO_x -kibocsátást

eredményez. Az égés időtartama – a hőmérséklet mellett – szintén kulcsfontosságú paraméter ebben az összefüggésben.

Bár a kémiai hatások szerepe sem elhanyagolható, a nitrogén-oxidok képződésére gyakorolt hatásuk általában korlátozott, mivel a folyamat számos, egymással ellentétes irányú reakcióúton keresztül zajlik. A NO_x -kibocsátás a motor különböző terhelési állapotai mellett is változhat, még azonos vizsgálati körülmények között is. Az eredmények nagymértékben függenek a mérési elrendezéstől. Általánosságban elmondható, hogy minden egyes százaléknyi víz hajtóanyag arány növekedés nagyjából fél százalékos NO_x -csökkenést eredményez (Hounthals, et al., 2006, Holtbecker and Geist, 1998, Odaka, et al., 1991).

2.4.3. A víz hatása a részecskékre

A részecskék összetettségét a számos komponens együttes jelenléte adja. A fent felsorolt anyagok rendszerint adszorbeálódnak egy szénalapú központi magra, és így képeznek agglomerátumokat (Agarwal, 2007, Falcon-Rodriguez, et al., 2016). A koromrészecskék képződése – amely az égési folyamat során zajló összetett jelenség – négy fő szakaszra osztható: nukleáció, felületi növekedés/koaguláció, agglomeráció és oxidáció. E szakaszok a koromrészecskék fejlődésének egymást követő állomásait jelentik, kezdve a kezdeti magvak kialakulásától egészen azok végső oxidációjáig és lebomlásáig (Li, et al., 2023).

A dízelmotor nyers kibocsátásában az 50 nm alatti átmérőjű nanorészecskék számottevően csak alacsony terhelési állapotok mellett jelennek meg, amikor az olajfogyasztás jellemzően a legmagasabb. A motor terhelésének növekedésével nagyobb mennyiségű hajtóanyag kerül befecskendezésre, és a kibocsátott részecskék száma is növekszik. Ilyen körülmények között elsősorban az úgynevezett felhalmozódási tartományba eső részecskék (körülbelül 50–1000 nm) találhatók meg, melyeken belül a 100 nm alatti átmérőjű részecskék (ultrafinom részecskék) a leggyakoribbak. Ezek mérete jellemzően csökken a terhelés növekedésével, mivel a részecskék tartózkodási ideje lerövidül, így kevesebb lehetőségük van agglomerálódni és illékony anyagokat adszorbeálni a széntartalmú magjukra. A 100 nm-nél nagyobb tartományban már a koromrészecskék, illetve a kipufogórendszer mentén kialakuló agglomerátumok figyelhetők meg (Ushakov, et al., 2013, Liati, et al., 2018).

Egy kizárólag dízel részecskeszűrőt (DPF) alkalmazó vizsgálat – alacsony és közepes terhelés mellett – két nagyságrenddel (~99 %) csökkentette a nanorészecskék kibocsátását. Ez a csökkentés legalább 90 %-os maradt a 10–50 nm-es tartományban, sőt még a 10 nm alatti mérettartományban is (Rossomando, et al., 2021).

A víz égéstérbe juttatásával hígító hatása révén csökkenti az égés lánghőmérsékletét oly módon, hogy a felszabaduló égéshő megnövekedett gáztérfogatba oszlik el. Nagyobb motorterhelés esetén a víz elsődleges termikus hatása (fázisváltás és fajhő) továbbra is az égés rontása nélkül csökkenti a hőmérsékletet. Ez viszont az égés során elégtelen és részben elégett szénhidrogének (HC) növekedéséhez vezet, amelyek a koromrészecskék és a nagyobb részecske-agglomerátumok fő forrásai. Ez a jelenség csak azzal a korábban ismertetett mechanizmussal mérsékelhető, amely során az oxidáló hatású OH-gyökök alacsony vízmennyiségek mellett képesek elnyomni a HC-képződést (Bedford, et al., 2000).

Ez a víz egyedülálló hatása, amellyel képes áthidalni a belső égésű motorok égésére jellemző, jól dokumentált NO_x és PN/HC kibocsátások közötti kompromisszumot, ahol az egyiket csak a másik kárára lehet csak csökkenteni.

A víz bejuttatásával a motorba elkerülhetetlenül megnő a nyers kipufogógázban megjelenő folyadéktartalom. Ez jelentős különbséget eredményezhet a részecsketömeg (PM) és a részecskeszám (PN) mérések eredményeiben. A PN-mérés során a mintát jellemzően 350 °C-ra hevítik, katalitikus leválasztó vagy párologtató cső alkalmazásával, amely során az oldható szerves frakció (SOF), valamint minden folyékony komponens szándékosan eltávolításra kerül. Így a mérőberendezés kizárólag a szilárd részecskéket számolja.

Ezzel szemben a PM-mérés során a folyékony halmazállapotú részecskék is beleszámítanak az eredménybe. A víz megnövekedett jelenléte esetén ez jelentős bizonytalanságot visz az eredmények értékelésébe.

A jelenlegi utókezelő rendszerek figyelembevételével – egy jellemző Euro 5 rendszer (DOC + DPF) alkalmazásával – a részecskék számának legalább 96 %-a kiszűrésre kerül, elsősorban az ultrafinom mérettartományban. A legalacsonyabb szűrési hatékonyság a folyékony PM-ek esetén figyelhető meg, amelyek nagyrészt víz eredetűek. A DPF (dízel részecskeszűrő) elsősorban a szilárd részecskéket távolítja el, míg a DOC (dízel oxidációs katalizátor) a SOF-ot – szénhidrogén formájában – oxidálja (Ladommatos, et al., 1998a, Rounce, et al., 2012). Ilyen utókezelő rendszerek esetén szinte kizárólag a NO_x marad vissza a kipufogógázban, és a kérdés az, hogy ezt hogyan lehet tovább csökkenteni az EGR és a vízbefecskendezés összehangolt alkalmazásával.

2.4.4. A víz hatása a motor működésére és hatékonyságára

Alacsony és közepes motorterhelés mellett a víz hozzáadása a hengerben lévő keveréket a hőmérséklet csökkentésével dúsítja, amely alacsony vízbefecskendezési szintek (1–3 %) esetén a motor teljesítményének akár 5 %-os növekedéséhez is vezethet. Nagyobb mennyiségű víz alkalmazása esetén azonban a hígítási hatás következtében csökken a lejátszódó kémiai reakciók száma, ami a teljes hőfelszabadulás és ezáltal a motor teljesítményének csökkenését eredményezi (Holtbecker and Geist, 1998, Neshat, et al., 2019).

A legtöbb publikáció a hengerfalon keresztüli hőátadás növekedéséről számol be, amely negatívan befolyásolhatja a motor globális hatásfokát (Tauzia, et al., 2010, Worm, 2017, Prasad, et al., 2018). Az effektív hatásfok (BTE) változásait a kipufogógáz entalpiájának növekedése is okozhatja. Bár a vízbefecskendezés következtében jelentősen csökken a kipufogógáz hőmérséklete, az összesített entalpiaérték mégsem feltétlenül változik számottevően, mivel az adagolt víz következtében megnövekedett a kipufogógáz tömegárama. Ez a megnövekedett tömegáram azonban hasznosítható a turbófeltöltő működtetéséhez is (Worm, 2017, Prasa, et al., 2018, Pamminger, et al., 2020).

A különböző vizsgálatok alapján magas motorterhelés mellett a vízbefecskendezés a fajlagos hajtóanyag-fogyasztás (BSFC) csökkenését eredményezi (Tsukahara, et al., 1989, Chen, et al., 2022, Sahin, et al., 2014). Ugyanakkor alacsony terhelésnél vagy nagy mennyiségű víz alkalmazása esetén jellemzően BSFC-romlás figyelhető meg (Prasad, et al., 2018, Sahin, et al., 2014).

Számos ellentmondásos eredmény található ezen a kutatási területen, amely feltehetően abból adódik, hogy az eredmények nagymértékben motorfüggők, és befolyásolhatja őket a mérőberendezések típusa, a mérés állandósult vagy tranziens jellege, valamint a különböző vízbefecskendező rendszerek kialakítása és működési körülményei.

2.4.5. A víz hatása a motor kopására és korróziójára

A motorba juttatott víz egyik visszatérő problémája lehet a kenőolaj-filmre gyakorolt hatása. Itt a folyékony halmazállapotú víz okozza a problémát, ami káros hatással van a kenőanyag-filmre. Ezért kiemelten fontos, hogy a hengerfal ne kerüljön közvetlen érintkezésbe vízcseppekkel (Holtbecker és Geist, 1998). Amint a víz elpárolog, kenőolaj-filmre gyakorolt hatása is megszűnik.

A motor saját injektoraival és a modern befecskendezőrendszerekkel, precíz befecskendezési időzítésekkel ez elkerülhető. A jelenleg kereskedelmi forgalomban kapható, utólagos vízbefecskendező rendszerek is nagy, akár 20-100 bár nyomáson működnek, mellyel a folyékony víz bejutása a motorba elkerülhető.

A víz által okozott kopás leggyakrabban vizsgált és legismertebb formája az hajtóanyagrendszerben jelentkezik. Nagy kéntartalmú hajtóanyag alkalmazása esetén, mint

ami jellemző például az NRMM (nem közúti mozgó gépekre) és tengeri alkalmazásokra, már az hajtóanyagtartályban is korrózió alakulhat ki, amely a rozsdarészecskék révén jelentős károsodást okozhat a teljes hajtóanyag ellátó rendszerben. A korrózió túlmenően a víz az hajtóanyag kenőképeségét is rontja, ezáltal az injektor élettartamát is csökkenti.

Ez azokban az esetekben jellemző, amikor a vízbefecskendezés nem külön erre a célra kialakított rendszerrel történik, hanem a motor saját injektorait használják (például emulziós technológiák esetén). Ezekben az esetekben - mivel a rendszert nem erre tervezték -, ekkor az injektorban fokozott kopás léphet fel. Valós járműveken végzett kísérletek kimutatták, hogy az emulziós rendszer jelentős kopást idézhet elő a jármű saját befecskendező rendszerében a fémek oxidációja, a kavitáció és a csökkent kenőképeség következtében (Kim et al., 2021). A kavitációs hatás közvetlen befecskendezés és porlasztásos (fumigation) vízbevitel esetén is megjelenhet. Az oxidáció mindhárom fő W.I. technológia esetén előfordulhat, savas közeg jelenlétében – amely függ az alkalmazott hajtóanyag típusától, kéntartalmától (Chybowski, et al., 2015, Wróblewski, et al., 2018). A kifejezetten vízbefecskendezésre tervezett injektorrendszerek – típustól függetlenül – lényegesen ellenállóbbak a korrózióval és a gyenge kenőképeséggel szemben. Egy beszívott levegőbe történő porlasztásos befecskendezéssel (intake fumigation) végzett vizsgálat során nem mutatkoztak visszafordíthatatlan elváltozások a motor saját injektorában sem (Wróblewski, et al., 2018).

A korróziós jelenségeket széles körben vizsgálták tengeri és egyes nem közúti (non-road) alkalmazásokban, ahol az hajtóanyagok tulajdonságai kevésbé szigorúan szabályozottak. A hengerpersely és a dugattyúgyűrű jellemző korrózióknak kitett alkatrészek. A szakirodalom szerint a korróziót leginkább befolyásoló tényezők a hengerpersely hőmérséklete, a beszívott levegő páratartalma, valamint az hajtóanyag kéntartalma. Tanulmányok kimutatták, hogy a kénsav kondenzációja lineáris összefüggést mutat mind az hajtóanyag kéntartalmával, mind a vízgőz teljes tömegével (Rao, et al., 2022, Karvounis, et al., 2018).

A motor szívóoldalán az alkalmazott műanyagok és korszerű anyagok, valamint az alacsony kéntartalmú hajtóanyagok miatt a korrózió előfordulásának valószínűsége minimálisnak tekinthető. Ezzel szemben a kipufogórendszer és az ahhoz kapcsolódó utókezelő rendszerek esetében a korrózió problémaként jelentkezhet. Az égéstermékek vízgőztartalma, valamint a környezeti pára a kipufogórendszer hidegebb felületein kondenzálódhat. Egy olyan vizsgálat, amely az emisszió-utókezelő rendszerek fémházaiban fellépő korróziós folyamatokat tanulmányozta 10%-os vízgőz tartalmú környezetben, azt találta, hogy a szulfidképződés valószínűsíthetően hozzájárul a rozsdamentes acélmintákon megfigyelt korrózióhoz (Nockert, et al., 2012).

A kondenzátum savassága döntő tényező a korrózió kialakulásában, amit a savas közegben megfigyelhető korrózió növekedése is alátámaszt. A szulfát-ionok jelenléte arra utal, hogy nagy koncentrációjú kénsav képződése is lehetséges, amely elősegítheti a korrózió kialakulását (Hashimoto, et al., 2013). Ennek ellenére továbbra is kevés információ áll rendelkezésre a víz teljes kipufogógáz-utókezelő rendszerre gyakorolt hatásairól, ami hangsúlyozza a téma további kutatásának szükségességét.

Összefoglalva, a korróziós és kopási problémák napjainkban az alábbi módokon mérsékelhetők:

- fejlettebb anyagminőségek alkalmazása, műanyag alkatrészek beépítése,
- precíziós befecskendezőrendszerek és nagy befecskendezési nyomások használata,
- ultraalacsony kéntartalmú (ULSD) hajtóanyagok alkalmazása, valamint az olyan motorüzemi körülmények előfordulásának elhanyagolható aránya, amelyek kedveznének a kénes és kénsavas vegyületek képződésének (Vollenweider, et al., 1995).

2.4.6. A víz égésterbe juttatásának lehetőségei

A víz, valamint különféle emulzióinak motor égésterbe juttatására az alábbi módszerek alkalmazhatók:

1. Szívóoldali porlasztás:
 - víz,
 - gőz,
 - (emulziók).
2. Közvetlen vízbefecskendezés:
 - Különálló injektorokon keresztül:
 - víz,
 - (emulziók).
 - A motor saját injektorain keresztül:
 - emulziók.

Az emulziók típusai lehetnek:

- víz és hajtóanyag együttes befecskendezése nem stabil emulzió formájában,
- stabil emulziók, mint helyettesítő hajtóanyag befecskendezése (Wan, et al., 2021, Tauzia, et al., 2010, Prasad, et al., 2018, Pamminger, et al., 2020, Canfield, 1999, Zhu, et al., 2019, Subramanian, 2011, Serrano et al., 2019).

Általánosságban belső égésű motorok (ICE) esetében az emulziós rendszerben az emulzió meghatározható, mint egy olyan folyadék, amelyben víz vagy más másodlagos, az hajtóanyaggal nem elegyedő folyadék kerül diszpergálásra dízel-, benzin-, vagy egyéb szénhidrogén-tartalmú közegben, specifikus adalékanyagok és felületaktív anyagok (tenzidek) segítségével a rendszer stabilizálása érdekében. A víz és hajtóanyag emulziók alkalmazása dízelmotorokban elterjedtebb, mivel azok magasabb égési nyomással és hőmérséklettel működnek, így a víz jelenlétéből eredő hatások hatékonyabban hasznosíthatók (Cook and Law, 1978).

Amennyiben a motor saját befecskendező rendszerét használjuk, az emulziós technológia kisebb mértékű járműátalakítást igényel, mint más vízbefecskendezési rendszerek. Ugyanakkor további optimalizálás lehetséges a motorvezérlő rendszer módosításával. A rendszer korlátait a motorhoz tartozó injektor kialakítása és annak szállítóképessége határozza meg. Amennyiben az emulzió közvetlenül helyettesíti a hagyományos hajtóanyagot, a motor teljesítménye nem éri el az eredeti szintet, továbbá a víztartalom is korlátozott a megfelelő működés fenntartása érdekében. Egyes tanulmányokban a víztartalmat 40–45 %-ig vizsgálták, azonban az optimális érték jellemzően 10–20 % körül van. Ezen a tartományon belül a BSFC csökkenése is megfigyelhető (Odaka, et al., 1991, Lif and Holmberg, 2006).

Ezzel a rendszerrel körülbelül 2–3 %-os NO_x-csökkenés érhető el minden egyes százaléknyi víztartalom növelésével (Park, ejt lá., 2001, Formanera, te la., 2000). Ilyen esetekben a víz közvetlenül a lángzónát hűti, nem pedig az egész égésteret, ami kedvezően hathat a termikus hatásfokra is. A víz befecskendezés után hirtelen elpárolog, és a térfogat kb. 1600-szorosára nő (mikro robbanás-jelenség), ami javítja a keverékképzést, ezáltal csökkenti a koromképződést (Tsao and Wang, 1986, Antonov, et al., 2021, Rostampour, et al., 2023).

A nagyobb befecskendezők beépítésével javítható a rendszer teljesítménye (beleértve a kibocsátást és a motor teljesítményét is), azonban ettől a ponttól kezdve jelentős módosítások válnak szükségessé. További hátrány, hogy az hajtóanyagban lévő víz aránya előre meghatározott, és nem állítható az aktuális üzemi körülményekhez. Ennek következtében a korábban tárgyalt vízbevitellel járó előnyök – mint például a termikus fojtás és a beszívott levegő hőmérsékletére gyakorolt hatás – megvalósulása korlátozott. Ugyanakkor az eredeti, vagy akár a nagyobb méretű injektorok alkalmazásával a hengerfal nedvesedés kockázata a legalacsonyabb a vízbefecskendezési rendszerek között.

A technológia egyik fő problémája az üledékképződés és az összetevők szétválása. Az emulziók stabilitásával szembeni követelmények közé tartozik a széles hőmérsékleti tűréshatár, valamint az, hogy az összetevők minél hosszabb ideig egyfázisú emulzióban maradjanak. Az idő előrehaladtával azonban az emulzió elkerülhetetlenül lebomlik. Egy lehetséges megoldás a komponensek külön tartályban történő tárolása, és azok közvetlenül a befecskendezés előtti összekeverése. Ez az eljárás azonban további infrastrukturális fejlesztéseket igényel. Ezen túlmenően az emulziókhoz alkalmazott felületaktív anyagokat úgy kell megválasztani, hogy azok koromképződés nélkül elégenek, és a lehető legkevesebb ként, nitrogént, valamint aromás szénhidrogéneket tartalmazzanak (Lif and Holmberg, 2006), ezzel is csökkentve a részecske-kibocsátást.

A közvetlen vízbefecskendezés során a víz egy független befecskendező rendszeren keresztül közvetlenül az égéstérbe kerül. Ez lehetővé teszi az alkalmazáshoz megfelelően méretezett befecskendezők használatát is, ami nagyobb mennyiségű víz bejuttatását is lehetővé teszi. Ennél a technikánál így nincs szükség azokra a kompromisszumokra, ami az emulzióknál is látható volt, a teljesítmény és a károsanyag-kibocsátás között, mivel az üzemeltetési paraméterek széles tartományban változtathatók. A víz/hajtóanyag arány itt szabadon állítható, ami különösen előnyös változó, tranzienst üzem körülmények esetén, lehetőséget adva az egyes üzemállapotokhoz történő további optimalizálásra. Megfelelő tervezéssel kihasználható az a lehetőség is, hogy a befecskendezés célzottan, a lángzónába történik, a megfelelő időpontban, ezáltal a falon történő hőleadás minimalizálható, valamint a korom- és nitrogén-oxid képződés is alacsony szinten tartható. Az injektorok elhelyezésének gondos megtervezése, a befecskendezési időpontok pontos meghatározása, valamint a víz mennyiségének optimalizálása kulcsfontosságú az olajfilm sérülésének és a motor károsodásának elkerülése érdekében. Ezeknek a tényezőknek köszönhetően a közvetlen vízbefecskendezés elsősorban az eredeti berendezés gyártók (OEM-ek) alkalmazási területe, nem pedig utólagos beépítésre szánt technológia. A kapcsolódó módosítások magas költségekkel járnak, és több szakterület – mint például a motorelektronika, a mechanika – szaktudását igénylik, illetve a különálló tartály- és hajtóanyagrendszer szükséges hozzá. Az emulziókhoz hasonlóan ebben az esetben sem realizálódnak a vízbevitellel járó egyes jótékony hatások, mint például a termikus fojtás és a beszívott levegő hőmérsékletének csökkentése.

A szívócsőbe történő befecskendezés, az egyik legköltséghatékonyabb megoldásnak tekinthető, továbbá viszonylag egyszerűen módosítható és telepíthető bármely dízelmotorra. Ezenfelül ez a rendszer a legnagyobb tartóssággal rendelkezik, alacsony meghibásodási arány mellett, és lehetőséget biztosít arra, hogy a rendszer bármikor lekapcsolható legyen. A motor akkor is tovább működhet, ha a víz elfogyott. A víz-hajtóanyag arány adott alkalmazásokban akár valós időben szabályozható, azonban más módszerekhez ez a megoldás kisebb szabadságfokot kínál a befecskendezési paraméterek beállításában.

Ennek következtében a szakirodalomban ezt a technikát tekintik a falnedvesedés szempontjából a legkockázatosabbnak (Wan, et al., 2021, Park, et al., 2020), ami a hőátadást is növelheti a hengerfal felé. Az emulziós vagy közvetlen vízbefecskendezéssel összehasonlítva a kutatások alacsonyabb vízhasznosítást mutatnak a NO_x csökkentés térfogategységére vetítve (Naik and Dharmadhikari, 2023). Azonban a kibocsátáscsökkentés szempontjából ez a hatás részben ellensúlyozható a tömegáram növelésével (termikus fojtás) és a beszívott levegő hőmérsékletére gyakorolt hatással.

Mindezeket a tényezőket figyelembe véve a szívócsőbe történő vízbefecskendezés (fumigáció) jelenti a legmegfelelőbb megoldást az utólagos beépítések területén. A víz égéstérbe juttatása többféle technikával is megvalósítható, azonban általánosságban azonos nagyságrendű kibocsátáscsökkentést okoznak. Az előnyök és hátrányok mérlegelése mellett megfigyelhető, hogy azon kevés esetekben, amikor a vízbefecskendezést sorozatgyártású gépjárművekben alkalmazták (pl. Saab 900, BMW M4 GTS vagy Oldsmobile Jetfire (Mobility Engineering, 2015, Falfari, et al., 2018, BMW group, 2016)) – és bár ezek az esetek szinte kizárólag teljesítménynövelési célokat szolgáltak – a megvalósított megoldás minden esetben a

szívócsőbe történő vízbefecskendezés volt. Hasonlóképpen, tengeri alkalmazásokban is szinte kizárólagosan emissziócsökkentési célból alkalmazzák ezt a technológiát (Turns, 2000, Imahashi, et al., 1995). A rendszer telepítéséhez kiegészítő víztartály beépítése szükséges, ugyanakkor a szükséges desztillált víz bármely töltőállomáson elérhető, így nincs szükség további infrastrukturális beruházásra.

Napjainkban a kereskedelmi forgalomban elérhető vízbefecskendező rendszerek szinte kivétel nélkül szívócső-fumigációs rendszerek. Ezeket jellemzően teljesítménynövelés céljából alkalmazzák, azonban a 2000-es évek óta egyre nagyobb figyelmet kapnak az emissziócsökkentés és az hajtóanyag-fogyasztás mérséklése terén is. Alapvetően a szívócsőbe történő vízbefecskendezés alacsony nyomású eljárás, amely legfeljebb 20 bar nyomással működik (Zhu, et al., 2019, Falfari, et al., 2018), de az utóbbi időben már 350 bar nyomású rendszerek is megjelentek, amelyek tovább növelhetik a technika határfokát (Mobility Engineering 2015, Bosch Mobility Solutions 2016).

2.4.7. A víz hatása a kipufogógáz visszavezetésre

A nitrogén-oxidok eltávolításának legalapvetőbb technológiája, az ún. kipufogógáz-visszavezetés (EGR), gyakorlatilag minden emissziócsökkentő rendszerrel ellátott gépjárműben megtalálható. Ez a rendszer a motor terhelésétől függően a kipufogógáz egy meghatározott részét visszavezeti az égéstérbe, ezzel csökkentve a NO_x -kibocsátást. Az első alkalmazások már az 1970-es években megjelentek. Emiatt az utólagos vízbefecskendezéses (W.I.) rendszerek kialakítása esetén az EGR az elsődlegesen figyelembe veendő és alapvető technológia.

A W.I. alkalmazásakor nemcsak a dízelmotor nyers emissziós értékeinek összehasonlító vizsgálata szükséges, hanem az EGR és a W.I. közötti esetleges kölcsönhatások értékelése is kiemelten fontos. Az EGR hőmérséklet csökkentő fizikai hatásmechanizmusa, a hígítási hatás, ami a vízbefecskendezésnél is megjelenik, az EGR-nek a legjelentősebb NO_x -csökkentő hatása. A termikus fojtás, a beszívott levegő hőmérsékletének befolyásolása, valamint bizonyos kémiai hatások, melyekről korábban szó volt a vízbefecskendezés kapcsán is, különböző mértékben vannak jelen az EGR esetében, akár a kibocsátásokra gyakorolt hatásuk iránya is eltérhet. Ezeket az eltéréseket az 2.1. táblázat foglalja össze.

2.1 táblázat: A kipufogógáz visszavezetés és a víz főbb hatásai, illetve azok különbségei a belsőégésű motor égésterében („-x” a legalacsonyabb, „xxx” a legmagasabb hatás) (Sun, et al., 2017, Neshat, et al., 2019, Ladommatos, et al., 2000, Bedford, et al., 2000, Hountalas, et al., 2007, Kim, et al., 2016, Charlton, 2005).

	EGR	W.I.
NO_x csökkentés	xxx	xxx
Részecske csökkentés	-x	-
Hígítási hatás	xxx	xx
Termikus hatás	-	xxx
Kémiai hatás	x	x
Termikus fojtás	-x	x
Beszívott levegő hatás	-x	x

Amikor a levegőtöbblet magas – például dízelmotor üzeme során –, és a motor terhelése alacsony, az EGR képes a NO_x -kibocsátás jelentős csökkentésére anélkül, hogy számottevően növelné a részecske (PM) kibocsátást. Ilyen körülmények között az EGR gyakorlati szempontból előnyösebbnek tűnik a W.I.-nél, mivel nem igényel másodlagos folyadékot (pl. vizet).

Az EGR rendszer nem képes jelentősen csökkenteni a NO_x kibocsátást magas terhelés esetén, mivel az hajtóanyag-levegő arány további csökkenése jelentős PM kibocsátás növekedéséhez

vezet (Tauzia, et al., 2010). Emellett a hígítási hatás jelentősen csökkenti a maximális teljesítményt és hatékonyságot, ami romló égéshez és megnövekedett szivattyúvesztességhez vezet (Jacobs, et al., 2003, De Serio, et al., 2017). Ezen okok miatt a járművek üzemeltetése során magas terhelések esetén az EGR működését korlátozzák vagy teljesen kikapcsolják (Lee, et al., 2013, Yutaka, et al., 2005, Vojtisek-Lom, et al., 2009).

A beszívott levegőbe történő vízbefecskendezés csökkentheti a NO_x kibocsátást magas terhelésű üzemi körülmények között anélkül, hogy jelentősen növelné a PM kibocsátást, mivel a hígítási hatás a vízbefecskendezés esetén kisebb mértékű, a friss levegő áramlása is viszonylag állandó marad. Magas terhelés esetén a fő termikus hatás továbbra is sikeresen csökkenti a henger hőmérsékletét a többi motorparaméter jelentős romlása nélkül. Ezen körülmények között a fő termikus hatás mellett a termikus fojtás és a beszívott levegő hőmérsékletcsökkentő hatása is hatékonyan hozzájárul a NO_x csökkenéshez (Ladommatos, et al., 1998a, Ladommatos, et al., 2000, Ladommatos, et al., 1998b).

Ha ezeket a tényezőket együtt vesszük figyelembe, belátható, hogy a két technika kiválóan kiegészíti egymást a belsőégésű motor teljes teljesítménytartományában. A gyakorlatban megfigyelhető, hogy a kereskedelmi forgalomban kapható vízbefecskendező rendszerek közepes és magas terhelésre vannak optimalizálva, ami azt jelenti, hogy könnyen alkalmazhatom a szívócső vízbefecskendezést amivel így további emissziócsökkentést érhetek el a motorvezérlő módosítása nélkül is. Az EGR-t és a vízbefecskendezés működését szinkronizálva (motorvezérlés módosításával) további hatékonyság növekedés is elérhetővé válhat.

2.4.8. A víz hatása az utókezelő rendszer elemeire

A motorvezérlésen keresztüli emissziócsökkentési kísérletek a 1960-as évek végén kezdődtek, de ez a motor teljesítményének jelentős csökkenéséhez vezetett. Az 1970-es években számos vállalat jelentős erőfeszítéseket fektetett új eljárások bevezetésébe, amelyek új lehetőségeket teremtettek a légszennyezés csökkentésére. Ezen törekvések eredményeként számos költséghatékony megoldás született, amelyek bizonyították, hogy képesek drasztikusan csökkenteni a veszélyes kibocsátásokat a jármű teljesítményének veszélyeztetése nélkül (Szöllősi és Kiss, 2023a).

A víz folyamatosan jelen van az utókezelő rendszerekben a levegő páratartalma és az égésfolyamatok miatt. A 2.1. reakció a teljes égés folyamatát mutatja be a dízel olaj egyik jellemző összetevőjén (penta-dekán), mely során az egyik termékként is a víz jelenik meg. A 2.2 reakció során viszont láthatjuk, hogy hiányos égés akkor következik be, ha nem áll rendelkezésre elegendő levegő vagy oxigén az hajtóanyag teljes elégetéséhez. A folyamat során a szén és a hidrogén oxidálódik, víz, szén és szén-monoxid keletkezik. A dízelmotorok üzemeltetése során jelentős levegőfelesleg van, ami korlátozza a keletkező szén-monoxid mennyiségét (Szöllősi és Kiss, 2023b).

Az égéstérbe juttatott víznek alapvetően két fő hatása van a kipufogógáz utókezelő rendszerekre a bemeneti égés termékeire vonatkozóan:

- Csökkentett kipufogógáz hőmérséklet: A vízbefecskendezés hűtő hatása miatt a kipufogógáz hőmérséklete csökken.
- Növekedett vízmennyiség és kapcsolódó vegyületek, gyökök az égés után: A vízbefecskendezés növeli a kipufogógázban lévő víz és kapcsolódó vegyületek (pl. hidroxilgyökök) mennyiségét, amelyek befolyásolják az utókezelő rendszerek működését.

A vízbefecskendezés hatásai a kipufogógáz utókezelő rendszerekre összetettek, és a konkrét hatások a motor típusától, az üzemi körülményektől és a vízbefecskendezés rendszerének kialakításától függenek.

2.4.9. A víz hatása a DOC-re

A dízelmotorokban az oxidációs katalizátorok elengedhetetlenek a CO és a szénhidrogének oxidációjához. Bár eredetileg a gáznemű kibocsátások minimalizálására tervezték őket, hatékonynak bizonyultak a részecske kibocsátás csökkentésében is, amely akár 20-50 % (a teljes részecske tömeg) is lehet (MECA 2007).

A víz kulcsfontosságú szerepet játszik a Pd katalizátoron alapuló DOC reakciókban, különösen alacsony hőmérsékleten, amely a motor hidegindítási körülményei esetén fordulnak elő. A kipufogógázokban, ahol a víz mindig jelen van, a CO és HC oxidációjának fő mechanizmusa – ahol az oxigén szerepe csak másodlagos - magában foglalja a vízzel vagy víz eredetű vegyületekkel való reakciót (Caporali, et al., 2014). A Pd katalizátor további köztitermékeket termel, például karboxilcsoport vegyületeket és hidrogén/bidentát karbonátot, ami fokozza a CO és a szénhidrogének abszorpcióját. A "Light off" hőmérséklet (a katalizátor 50 %-os átalakítási hatékonysága) a víz jelenlétében csökken a vízzel és a hidroxil (OH) vegyületekkel való kölcsönhatás miatt. A Pt-alapú katalizátor esetében a víz verseng a CO adszorpciójával a Pt-alapú katalizátor aktív helyein, és így gátolja a CO oxidációját víz jelenlétében.

A nitrogén-monoxid (NO) nitrogén-dioxiddá (NO₂) történő átalakítása a DOC egyik kulcsfontosságú funkciója a modern dízel utókezelő rendszerekben, mivel a NO₂ gáz szükséges a dízel részecsqueszűrők működésének fenntartásához, és az SCR katalizátoroknak is szüksége van rá a NO_x redukcióhoz. Pt-katalizátorral a víz és a NO₂ szénhidrogén-oxidálószerként működik, ahol a szénhidrogének elfoglalják a Pt aktív helyeit. Ez a folyamat gátolja a NO NO₂-dá történő oxidációját. Ezért az emisszió utókezelő rendszerben megjelenő többlet víz esetén a Pd-t tartalmazó dízel oxidációs katalizátort használata előnyösebb (Karre, et al., 2023, Al-Aqtash, et al., 2023).

2.4.10. A víz hatása a DPF-re

A dízel részecsqueszűrők egy méhsejt alakú kerámia monolítból állnak, ahol minden cella ellentétes oldala mindig zárt. Így a szűrés a cellafal pórusain keresztül történik. A szilícium-karbid (SiC) és a kordierit (2MgO-2Al₂O₃-5SiO₂) a két leggyakrabban használt alapanyag a részecsqueszűrő kerámia testéhez. Bármelyiket használjuk is fel, segítségével a motor részecske kibocsátásának 99,9 %-át el lehet távolítani (Szöllősi és Kiss, 2023b).

A korom folyamatosan felhalmozódik a részecsqueszűrőben a motor üzemeltetése során. Időről időre el kell távolítani a szűrőből, hogy elkerüljük a teljesítményvesztést és a fogyasztás növekedését, amelyek a korom felhalmozódása miatt növekvő ellennyomás következtében jelentkeznek (Konstandopoulos and Kostoglou, 2000). A korom eltávolításának folyamata a regeneráció mely során az elsődleges oxidálószer a NO₂. A nitrogén-dioxiddal a korom égésének folyamata már alacsony hőmérsékleten is végbemegy amikor az oxigénnel való reakció végbemenetele nem jelentős. A korom oxidációja gyorsabban zajlik NO₂ és O₂ jelenlétében, mint O₂ vagy tiszta NO₂ jelenlétében, ami azt jelzi, hogy a korom NO₂-vel való égéséhez molekuláris oxigén jelenléte szükséges. A hőmérséklet szintén elősegíti a korom oxidációját NO₂ és NO₂/O₂ jelenlétében. Alacsonyabb hőmérsékleten a víz hozzáadása a gázhoz tovább növeli a NO₂ által segített oxidáció sebességét. A víz oxigénatomjai azonban nem vesznek részt közvetlenül a folyamatban, hanem a víz lehetővé teszi a salétromsav és a salétromossav képződését, amelyek savas, aktív felületi helyeket hoznak létre a széntartalmú anyagokban, amelyek így már alacsony kipufogógáz hőmérsékleten is CO₂-re bomlanak. A víz kedvező hatásához NO₂ jelenléte itt is szükséges (Christensen, et al., 2017, Matarrese, et al., 2017).

Az oxidációs hőmérséklet tovább csökkenthető katalizátor alkalmazásával. A katalizátor lehet hajtóanyag-adalékanyag, például cérium-oxid (CeO₂), vas-oxid (FeO) vagy más, kiváló oxigéntároló kapacitással (OSC) rendelkező vegyület, vagy katalizátor-hordozó szűrők,

amelyek a kerámia hordozóhoz adagolt katalizátor anyagot (platina csoport anyag - PGM) tartalmaznak.

A fő regenerációs mechanizmusok a passzív és az aktív regeneráció. A passzív technika alacsonyabb hőmérsékleten regenerálja a PM-t, katalizátort használva a részecskék oxidációjához és égetéséhez szükséges aktiválási energia csökkentésére. Az aktív rendszerben a korom regenerációhoz szükséges energiát a többlet befecskendezett hajtóanyag elégetésével nyerik utóbefecskendezéssel vagy egy további külön befecskendezővel a részecskeszűrő előtt. Ahogyan fentebb már tárgyaltam, a víz fokozhatja a passzív regenerációt, növelve az oxidációt alacsonyabb hőmérsékleten. Ez hajtóanyag-megtakarításhoz vezethet a rendszerben, alacsonyabb ellennyomással és az aktív regenerációk közötti hosszabb időszakokkal, a regenerációk számának csökkenésével.

2.5. Szakirodalom kritikai elemzése

A kipufogó károsanyagok csökkentésének már több mint 50 éves múltja van. Jellemzően a motorban megvalósuló eljárások (kipufogógáz visszavezetés, optimalizált motorvezérlés), és az emisszió utókezelő rendszerek (katalizátorok, szűrők, utókezelők) a legismertebbek. Mindezek mellett azonban a motor előtti technikák, mint alternatív hajtóanyagok, adalékok, vízbefecskendezés kevésbé ismertek. A vízbefecskendezést csak a 90-es évektől vizsgálták ilyen szempontból, pedig az mellett, hogy egyszerű technológia a két fő dízel károsanyag emisszió párhuzamos csökkentésének lehetőségei is magában hordozza.

Célom, hogy megvizsgáljam a szívócsonk befecskendezés lehetséges előnyeit a jelenlegi kibocsátás-szabályozási technológiák és a legújabb emissziós előírások, trendek fényében. A modern technikákkal a vízbefecskendezés problémás aspektusai, a korrózió és a kenési problémák megszüntethetők, és a vízbefecskendezés előnyei az EURO 7-es normák keretében is felértékelődnek.

A valós alkalmazásokban, miután a vizet a motor égésterébe juttatják, az a kipufogógázzal együtt távozik, és áthalad a teljes emisszió utókezelő rendszeren, miközben a rendszer minden részét érinti. Jelenleg nem állnak rendelkezésre információk a különböző utókezelő rendszerek esetében a lehetséges hatásokról, sem pedig az egyes részelemeken kifejtett hatásokról. A kutatás hiánya rávilágít arra, hogy átfogó elemzésre van szükség a vízbefecskendezés által a dízelüzemű járművek kibocsátásának javításában rejlő lehetőségekről. Ezeknek a szempontnak a tisztázása különösen fontos lehet az utólagos átalakítás területén is. Az Európai Bizottság egyre inkább ösztönzi e tevékenységeket utólagos beépítéssel projekteken keresztül, és a bevezetés alatt álló EURO 7 is foglalkozik vele. Eddig azonban a szabályozási ösztönzők bevezetése nélkül, az érdeklődés hiánya miatt a jármű utólagos felszerelésével kapcsolatos szakirodalom ilyen megközelítéssel nagyon korlátozott volt. Jelenleg ez egy feltáratlan kutatási terület, ahol az alap információk hiánya és rendszerek komplexitása miatt szimulációk alkalmazása sem lehetséges. Ezzel a háttérrel kezdtem el vizsgálni a víz hatását a szakirodalomban.

Az itt tett megfigyelések és a korábbi félévek eredményeképpen, eddig a következő megállapításokat tettem:

1. Az a következtetés vonható le, hogy sokkal nagyobb mértékű kibocsátás-csökkentés érhető el az utólagos átalakítások révén, mint a kibocsátási normák további szigorításával:
- A levegőtisztaságvédelmi adatokat áttekintve láthattuk, hogy a közlekedés és azon belül is a dízel motorok kibocsátásának az aránya a PM-ben és még inkább a NO_x-ben jelentős, azonban mint láthattuk 2005 és 2019 között egy rövid intervallumban, ezen összetevők csökkenése napjainkban is nagy mértékű (29, illetve 42 %). Mindeközben a természetes források pedig nem csökkentek, így a közlekedés aránya tovább csökken. Ez az arány a hathatós emisszió redukálási törekvéseket igazolja, és azt, hogy az irányvonal jó ezért szükség van ezeket a tevékenységeket tovább folytatni.

- A jelenlegi részecske és NO_x kibocsátási határértékek ismeretében, mióta bevezették az EURO 1/I és NRMM (nem közúti munkagépek) szabályozásokat, a kibocsátási szintek szigorítása legalább 95 %-os csökkenést eredményezett.
 - A jelenlegi kibocsátási szabályozásokkal 2023-ban világszerte körülbelül 72,5 millió új autó értékesítése történt. Ezzel szemben a használt autók száma világszerte körülbelül 1,5 milliárd. Az Euro 3-5/III-IV közötti használt autók volumene várhatóan a legnagyobb, és ezek esetében lehetne a legnagyobb eredményeket elérni globálisan az utólagos átalakítások révén, amelyek gazdaságilag is megoldhatók lennének.
 - Az NRMM hajtóanyag-igénye sokkal kevésbé szigorú. Mivel ezeknek a gépeknek a többsége nem regisztrált, nehéz meghatározni a pontos számukat, de valószínű, hogy a kibocsátásuk jelentősen magasabb, mint a közúti járművéké. A kéntartalom a katalizátorok mérgezését okozza a CeO₂ deaktiválódásán keresztül. Magas kéntartalmú hajtóanyag esetén ezért az általános nézet szerinti hagyományos katalizátorokkal történő utólagos átalakítás nem kivitelezhető.
 - A nem közúti munkagépek élettartama sokkal hosszabb, mint a személygépkocsiké, ahol az amortizáció sokkal kisebb, így az utólagos átalakítás költséghatékony megoldás lehet.
2. Megállapítható továbbá, hogy a vízbefecskendezés hatékonyan alkalmazható különböző emisszió utókezelő rendszerekben, és további kibocsátás-csökkentést eredményezhet a kipufogócső végén:
- A kipufogógáz visszavezetés (EGR) - az oxigéntartalom csökkentés révén - a motor terhelt üzemmódjában jelentősen csökkenti a maximális teljesítményt. Emiatt magas teljesítményeken való üzemelés során korlátozzák, illetve teljesen kikapcsolják az EGR rendszert. Azonban a szívócsonk vízbefecskendezés képes csökkenteni a NO_x kibocsátást magas terhelésű üzemeltetési körülmények között anélkül, hogy jelentősen növelné a részecske kibocsátást, mivel az alapvető hűtésmechanizmusai (fajhő, párolgáshő) itt is csökkentik a hengerhőmérsékletet. A szívócsonk befecskendezés párhuzamos használata az EGR mellett, további kibocsátás csökkenést eredményezne a motor teljes működési tartományában.
 - A palládium bevonatú dízel oxidációs katalizátor (DOC) számára előnyös, a többlet víz jelenléte a kipufogógázokban. Alacsony hőmérsékleten javul a CO és a szénhidrogén-abszorpció, és ezáltal csökkennek a kiindulási hőmérsékletek.
 - A víz jelenléte elősegítheti a passzív regenerálódást a dízel részecske szűrőben (DPF) az oxidáció fokozásával alacsonyabb hőmérsékleten. Ennek eredményeként hajtóanyag-megtakarítás érhető el a rendszerben, alacsonyabb nyomásesésekkel és hosszabb időtartamokkal az aktív regenerációk között.
3. Következtetések a teljes emissziókezelő rendszer kibocsátásairól:
- Olyan járműveknél, amelyek nem rendelkeznek emissziókezelő rendszerekkel (még EGR-rel sem), a szívócsonk befecskendezés egy univerzális és költséghatékony utólagos átalakítási lehetőség lehet.
 - Szívócsonk befecskendezés alkalmazásával EGR rendszerrel rendelkező járműveken, a két technológia hatékonyan kiegészítheti egymást a belső égésű motor teljes teljesítménytartományában. További kibocsátás-csökkentés érhető el a motorvezérlés módosítása nélkül.
 - Egy jellemző Euro 5/V rendszer, amely DOC-t és DPF-et tartalmaz, legalább 96 %-ban kiszűri a részecskéket számszerűsítve. A DPF a szilárd részecskéket szűri ki, míg a DOC a szénhidrogén (HC) formájában lévő oldható szerves vegyületeket távolítja el. Ilyen utókezelő rendszerekben már csak a NO_x marad, amelyet a vízbefecskendezés és EGR kombinációja tovább csökkenthet.

- A vízbefecskendezés során általában növekvő CO és HC értékeket tapasztalnak, ami hátrányként jelenik meg a technológiával kapcsolatban. Azonban ez a plusz terhelés a vízbefecskendezés eredményeképpen az oxidációs katalizátoron könnyen eltávolítható.
- Nincs elérhető kutatás a vízbefecskendezés hatásairól a PN₁₀ részecskék méretosztályában. A szívóoldali levegő nedvességtartalommal kapcsolatos vizsgálatok azt sugallják, hogy a víz használatának potenciálisan hasznos hatásai lehetnek ezen a területen.
- Gyakorlati szempontból fontos eredmény, hogy a vízbefecskendezés hűtő hatása nem függ a forgalmi viszonyoktól. Ezt a hűtési hatást jellemzően a mozgó jármű magas légáramlása biztosítja, amely csökkenti a komprimált töltet (turbófeltöltés esetén) és az EGR által visszavezetett levegő hőmérsékletét. A vízbefecskendezés hűtőhatása továbbra is képes hűteni a töltőlevegőt városi környezetben, akkor is, ha nincsenek jelentős légáramlások üresjáratban vagy kigyorsítások esetén.
- A belsőégésű motorok jelenlegi trendek szerinti „downsizing” -ja miatt nő a belső égésű motorok terhelése, ami a szívócsonk befecskendezés alkalmazását egyre előnyösebbé teheti.

A szívócsonk befecskendezés – mint utólagosan is könnyen beépíthető technika - lehetőséget nyújthat a jelenlegi gépjárműpark utólagos átalakításával, hogy az emissziókat tovább csökkentsem. A rendelkezésre álló szakirodalom túlnyomó része a közvetlen víz emulzió befecskendezéssel, illetve külön befecskendezéssel foglalkozik annak precíz kontrollálhatósága miatt és hogy a motor károsodásának lehetősége ezeknél a technológiánál a legalacsonyabb. Ezen tanulmányok hivatkozásaiiban java részt a 2000-es évek publikáció szerepelnek. Ezzel kapcsolatosan a szakirodalmi összefoglaló írása során az alábbi észrevételeket tettem;

- a technológia, mint korábban láttuk, a plusz injektorok beépítésével, a befecskendezés vezérlésének kiépítésével, annak a motorvezérlő rendszerrel való összehangolásával, az emulziók előkészítésével, beszerzésével, infrastruktúrájának a kialakításával, jelentős felkészültséget, forrásokat kíván és kivitelezése nehézkes a nagyon széleskörű ismeretek szükségessége miatt. Véleményem szerint ezért van az, hogy a fellelhető tanulmányoknak szinte 100 %-át csak egy-két hengeres kísérleti motorokon, kísérleti befecskendező rendszerekkel végezték el, a kialakítás bonyolultsága miatt.
- Ennek ellenére az autóiipari gyártók, mint például a BMW a legutóbbi M4 GTS szériájában, ami jelen idők első széria vízbefecskendezéses autója, szívócsonk befecskendezést használ. A Bosch, mint meghatározó gyártó ezen a területen szintén szívótorok befecskendezésre ajánl megoldásokat.
- A korrózió problémája a belsőégésű motorban szorosan összefügg a kénvegyületekkel a kénsav, kénessav keletkezésével. Mint láthattuk az összefoglalóban, az utóbbi 15 évben az antropogén kibocsátást tekintve a kénvegyületek kibocsátása, hozzávetőlegesen 75 %-kal csökkent. Ez a dízel gépjárművek kibocsátásában az hajtóanyagok kéntartalmának csökkentésével függ össze, amit Európában '94-től kontrollálnak és az akkori körülbelül 5000 ppm-ről a legutóbbi 2009-es szabályozás után 10 ppm-re csökkent.

Illetve a szakirodalom áttekintése után is fennál az a tézisem, hogy a vízbefecskendezést hatását nem vizsgálják a teljes emisszió kezelő rendszerben, az emisszió kezelő elemeket nem együttesen rendszerként kezelik. Ebben a vonatkozásban is úgy gondolom, hogy hiánypótló lenne a munkám.

3. 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 használom, 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.

3.1. A felhasznált mérőberendezések

Az általam használt AVL és Horiba berendezések évente átesnek az eredeti gyártók által végzett kalibrálási eljáráson. Ez a kalibrálási folyamat egységesen alkalmazandó a fékpadi rendszerekre és a mérőberendezésekre.

A részecskeszám-mérő eszköz (AVL APC489) kalibrálása kondenzációs részecskeszámláló referenciaműszer alkalmazásával történik, míg a gázanalizátorok (AMA i60, MEXA 7500) kalibrálása tiszta szintetikus gáz etalonnal valósul meg. A mérési bizonytalanság ellenőrzése az „ISO/IEC 17025” [9] szabvány előírásainak megfelelően történik. A mérések összesített megbízhatósága legalább 95 %-os.

3.1.1. Részecske mérés berendezései

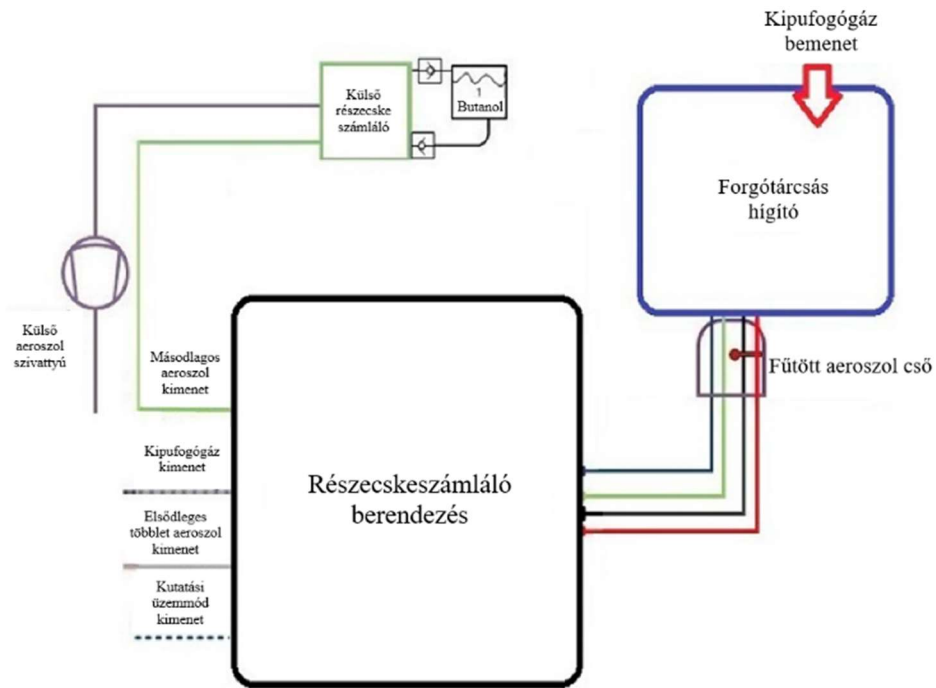
A DPF szűrési hatékonyságot mérő berendezés a jármű által kibocsátott részecskeszámot (PN - Particle number) számlálja. Ez a berendezés az AVL List GmbH gyártmányú Particle Counter Plus típusú berendezés (3.1. ábra). Ez egy kondenzációs részecske számláló (Condensation Particle Counter – CPC), ami széleskörben használt berendezés az aeroszolok részecskekoncentrációjának meghatározására az autóipari kutatások és fejlesztések területén (Kangasluoma és Attoui, 2019).



3.1. ábra: APC 489 CAD rajza

A berendezést a „UNECE-R83, 5. revízió” és a „UNECE-R49, 6. revízió, 4. melléklet (Kompressziógyújtású és gázüzemű szikragyújtású motorok kibocsátásai járművekben való felhasználásra)” előírásainak megfelelően használjuk (Amanatidis, et al., 2013). Ezen jól meghatározott szabályozási keretrendszerek irányadók a különböző járműkategóriák részecskeszám-kibocsátásának szigorú értékelésében (OICA, 2021).

A szilárd részecske méréseknél a mintagáz előkészítése meghatározó szerepet játszik abban, hogy pontos és megbízható adatokat kaphassak. Ennek során a kipufogógáz először egy elsődleges hígító egységbe (Chopper diluter – 3.2. ábra) jut be, ahol HEPA (nagy hatékonyságú szűrő) szűrővel szűrt sűrített levegővel hígul.



3.2. ábra: APC 489 vázlatos rajza

Ezek után egy fűtött csövön vezetik tovább, majd pedig hőkezelésnek vetik alá, ahol a hígított gáz olyan mértékben felhevül, hogy az összes illékony anyag elpárolog és csak a szilárd részecskék maradnak a hígított mintagázban. A 23 nm-nél nagyobb átmérőjű szilárd részecskék mérése esetén a hőközlésre elpárologtatató csövet (evaporation tube, ET) használnak a kívánt mérési eredmények eléréséhez. Ezzel szemben, ha a 10 nm-nél nagyobb átmérőjű szilárd részecskéket is mérni szeretnénk, katalitikus eltávolító (catalytic stripper, CS) használata szükséges (Giechaskiel, et al., 2019). Mind az ET, mind a CS esetén a mintagáz hőmérsékletét 350 °C fölé emeljük, elősegítve ezzel a folyadékfázisú komponensek elpárologtatását, így biztosítva, hogy a további mérési eljárásokban már kizárólag csak szilárd részecskék vegyenek részt. Utána egy másodlagos hígítóban hígul tovább a mintagáz és bejut a kondenzációs részecskeszámlálóba (PNC).

A PNC-ben az aeroszol szilárd részecskéit folyékony butanollal megnagyobbítják oly módon, hogy az a mintagázban lévő részecskékre kondenzálódik. Ezt követően a megnagyobbított részecskék egy rendkívül érzékeny detektálókamrán haladnak keresztül, amely lézernyalábot, valamint fejlett fényérzékelő optikai rendszert tartalmaz, amelyet kifejezetten a részecskék pontos analízisére és számszerűsítésére terveztek (Giechaskiel and Melas, 2022). A detektálókamrán való áthaladás során a megnagyobbított részecskék megszakítják a lézeres detektáló mechanizmust, mérhető jeleket generálva, amelyek lehetővé teszik az aeroszolmintában található részecskék pontos és megbízható megszámlálását és a térfogat

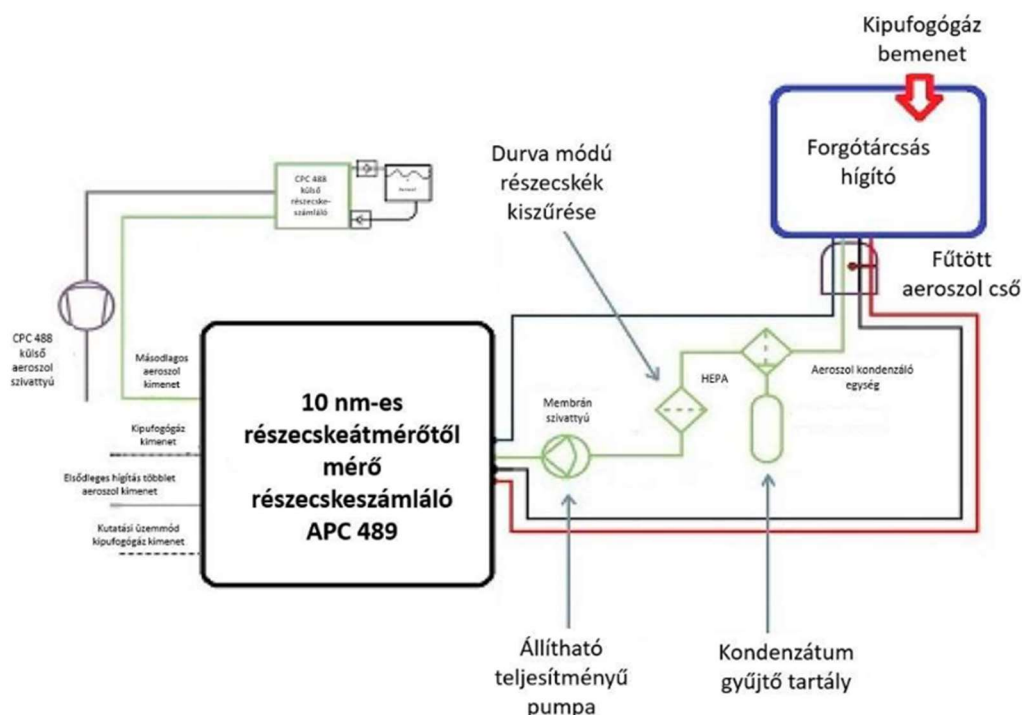
egységenkénti részecskék ($\#/cm^3$) számának meghatározását. Ezen mérések során a mintavételi eljárás következetesen vagy állandó térfogatáramú mintavevő (CVS) alagút, vagy arányos részarányú hígítórendszer alkalmazásával történik. Mindkét mintavételi módszert széles körben alkalmazzák az autóiipari vállalatok körében a kipufogógáz-kibocsátások megbízható és pontos rögzítésére tesztelési és gyártásmegfeleléségi (Conformity of Production, CoP) vizsgálatok során (Khan, et al., 2018). A mérés az arányos részarányú 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.

3.1.2. A részecskeszámláló átalakításának megoldásai vízbefecskendezéses vizsgálatokhoz

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

- részecskeszámláló párhuzamos mérési megoldását, és
- a vízbeporlasztás során a kipufogóban megjelenő nagyobb mennyiségű víz eltávolítására (részecskeszámláló előtt), kialakított megoldásokat szeretném bemutatni.

A 3.1.1. fejezetben bemutatott részecske számláló berendezések méréseimhez való használatához 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 az N-elrendezéssel már a megfelelően hígított levegőt használja fel (3.3. ábra).

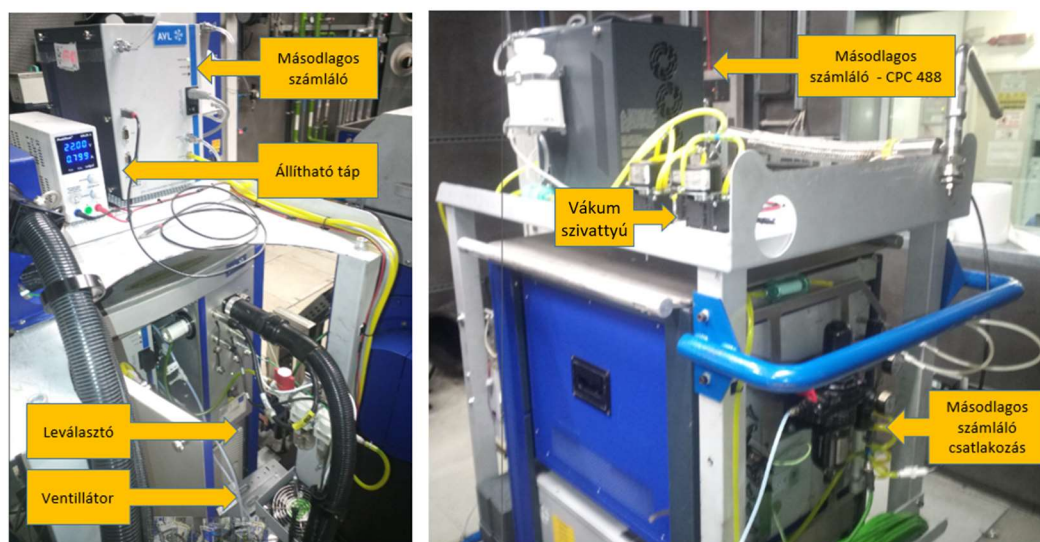


3.3. ábra: APC 489 fejlesztett N-elrendezéssel (Bíró és Szöllősi, 2023)

A berendezés különböző részeiben összegyűlt víz komoly problémákat, és károsodásokat tud okozni. A vízbeporlasztásos vizsgálatok során jelentősen növekedhet a lehetősége annak, hogy páralecsapódás lépjen fel a berendezésben az aeroszol útjának hidegebb hőmérsékletű szakaszaiban. A kondenzátum és a szilárd részecskék jelenléte együtt a mintavételi járatok szűküléséhez és az azokban kialakuló nyomásesés növekedéséhez, eltömődésekhez vezethetnek.

Hogy a berendezés biztonságos üzemét biztosítsuk és megelőzzük az esetleges ezzel kapcsolatban felmerülő problémákat, a mérőrendszer elé a víz eltávolítására az alábbiakban tárgyalt megoldásokat alakítottam ki. A változtatásokról részletesen és azok eredményességéről egy impakt faktoros (scopus Q2) publikációban foglalkoztam részletesen (Bíró és Szöllősi, 2023).

A részecskeszámláló kipufogógáz bevezetése elé, levegőszűrő (SMC AF30) és páraleválasztó (SMC AFM30) került beépítésre. A kiválasztás szempontja a könnyű kontrollálhatóság, (vizuálisan követhető a kondenzátum mennyisége) és a könnyű kiürítés, tisztíthatóság volt.



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



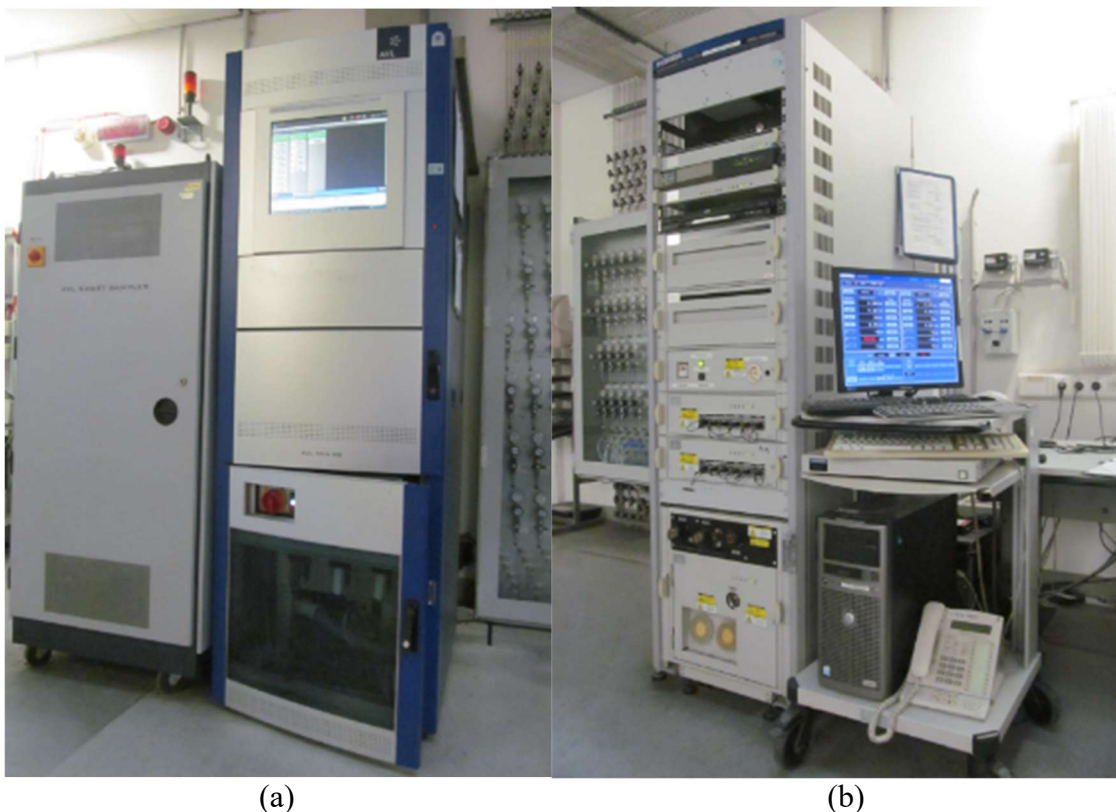
3.5. ábra: A vízleválasztás kialakítása (Forrás: Szöllősi Dániel)

A szűrő és leválasztó által okozott nyomásvesztéset membránszivattyú beépítésével kompenzáltam, melynek teljesítményét beépített állítható tápegységgel is tudtam szabályozni. A leválasztás hatékonyságának növelésére egy ventilátort (DC Centaur 25 III) is beépítettem, amellyel a leválasztót hűtöttem. A vízleválasztókat és a ventilátort a 3.4. ábra szerint építettem ki. A szivattyúhoz és a ventilátorhoz szükséges áramot egy pluszban beépített (PeakTech 6225 A – 3.5. ábra) táppal oldottam meg.

3.1.3. Gázemissziómérő berendezések

Az „Euro” jármű-kibocsátási irányelvek által szabályozott kipufogógáz-összetevők többsége túlnyomórészt gázhalmazállapotú szennyező anyagokból áll.

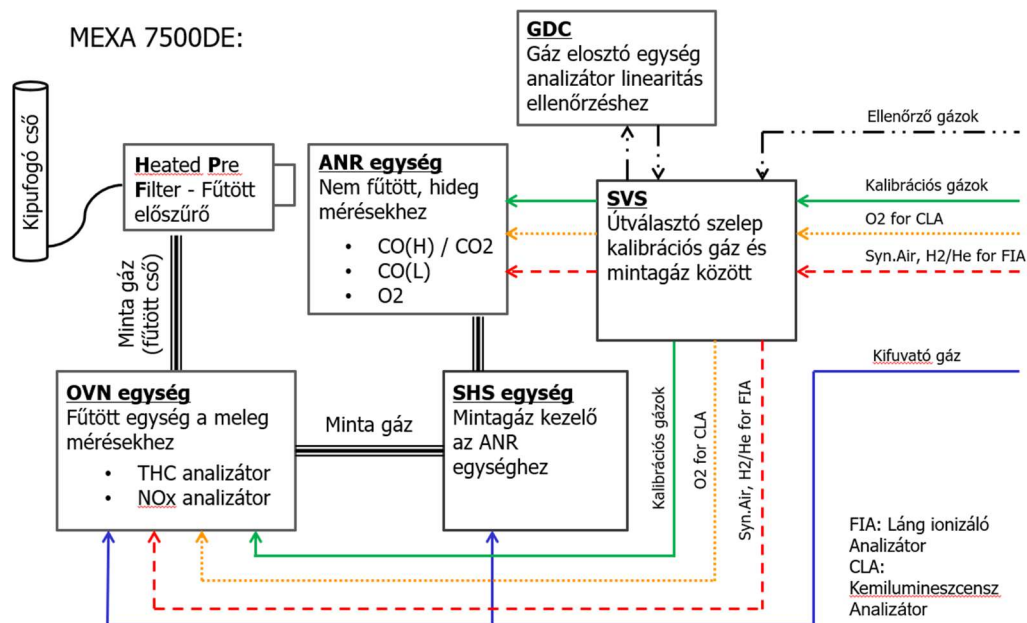
A teszhelyiségekben AVL List GmbH gyártmányú AMAi60 típusú és egy HORIBA MEXA 7500 típusú többcsatornás folyamatos üzemű emissziómérő berendezések működnek. (3.6. ábra) A berendezések 2 független mintavételezési csatornát alkalmaznak, ezáltal egyidőben tudnak emissziót mérni a kipufogó rendszer 2 különböző pontján.



3.6. ábra: HORIBA MEXA 7500 (a) és AVL AMAi60 (b) kipufogógáz elemző berendezések

Az AMA i60 és a MEXA 7500 analizátorok is széles mérési tartománnyal rendelkeznek, és alkalmasak különféle gázhalmazállapotú komponensek pontos mérésére. Minden egyes csatorna különböző gázkomponens mennyiségét tudja mérni, kijelzi és rögzíti. A méréseim során szükséges főbb gázkomponenseket: THC (teljes szénhidrogén), NO_x (nitrogén-oxidok), NO (nitrogén-monoxid), CO₂ (szén-dioxid), CO (szén-monoxid), O₂ (oxigén), mindkét berendezés nagy érzékenységgel képes detektálni.

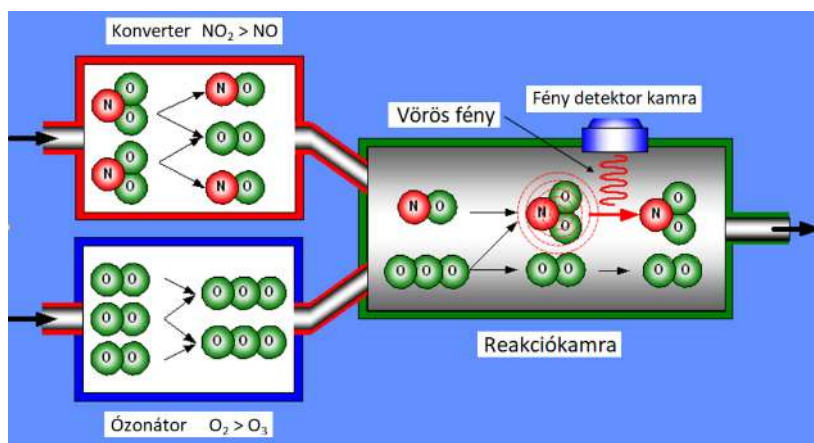
A mintagáz a fűtött (190°C) előszűrő egység után - ahol a szilárd részecskék (korom) kiszűrése történik-, szétválasztásra kerül. Erre azért kerül sor mert a különböző gázkomponensek mérési elvei eltérnek egymástól, az aeroszolok elemzésére külön analizátorokat kell alkalmazni. Így jut be a mintagáz az analizátor egységekbe (FID, CLD, IRD). Ezt az elrendezést a Mexa 7500 sematikus ábráján láthatjuk (3.7. ábra).



3.7. ábra: HORIBA MEXA 7500 kipufogógáz analizáló berendezés teljes sematikus gázáram ábrája

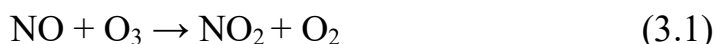
Kutatási szempontból különös jelentőséggel bír a NO_x , mint kibocsátási komponens (Šarkan, et al., 2022), amelynek mérését kemilumineszcencia-elvű (CLD) analízátor végzi. Ez a módszer kulcsfontosságú a NO_x -kibocsátás pontos detektálása és mennyiségi meghatározása szempontjából.

A reakcióhoz szükséges mennyiségű ózon (O_3), tiszta oxigénből (O_2) képződik, a készülékbe integrált elektromos ózonátor segítségével (lásd a 3.8. ábra bal alsó részében: Ózonátor). Az NO_x meghatározásához a mintagázt egy termokatalitikus konverteren keresztül vezetik át ($\text{NO}_2 > \text{NO}$ konverter). A konverter belsejében a mintagázban lévő NO_2 átalakul NO gázzá, amit a kemilumineszcens detektor mérni képes.



3.8. ábra: A Kemilumineszcens detektor sematikus ábrája

A fűtött reakciókamrában a NO és O_3 gázokat gyorsan és hatékonyan összekeverik. A reakciójuk során fényenergia szabadul fel, a 600 - 3200nm hullámhossz tartományban. Ez a hullámhossz tartomány a kemilumineszcens sugárzás tartománya. A kemilumineszcens fénysugárzás nagysága arányos a NO koncentrációval.



A 3.1 reakció során a gerjesztett NO₂ elektromágneses kemilumineszcens sugárzást bocsát ki, illetve kinetikus formában is ad le energiát. A fényt kibocsátó átalakulások aránya a reakciónyomástól, a reakciópartnerektől és a reakciókamra fizikai kialakításától függ. Minél kisebb a reakciónyomás, annál nagyobb a valószínűsége, hogy egy gerjesztett NO₂ molekula fény formájában szabadítja fel energiáját. A kibocsátott fény átkerül az fény érzékelő kamrába, (lásd a 3.8. ábra jobb felső részében: Fény detektor kamra) ahol a fénydetektor a keletkezett fényintenzitással arányos elektromos áramot generál. Ez továbbítódik egy elektromos mérő erősítőbe, amely feldolgozza az eredményt.

A kondenzvíz kicsapódásnak és NO₂ veszteségeinek elkerülése érdekében CLD analízátorokat magasabb harmatpontú gázok mérésére tervezték, sorban a gázcsövek, a szűrők, a mintagázelosztószelep, a kapillárisok és a reakció kamra is fűtött egységek. A konverter egység is fűtött, (~400 °C), a jobb átalakítási határfok (NO₂ > NO) érdekében.

A kétszatornás CLD analízátor egység két független érzékelőrendszerrel rendelkezik. Az analízátor működéséhez szükséges gázok:

- oxigén (O₂) az ózon előállításához és a pneumatikus rendszer működéséhez,
- kalibráló gáz (span gas), Nitrogén-monoxid (NO) nitrogénben (N₂) elegyítve,
- zérógáz (semleges nullgáz) nitrogén (N₂).

Az IRD (Infravörös detektor) vagy NDIR (Nem diszperzív infravörös detektor) analízátorokat szén-monoxid, szén-dioxid és egyéb speciális komponensek koncentrációjának meghatározására alkalmazzák. Az NDIR mérések során az infravörös sugárzás egy gázmintán halad keresztül. A gázban lévő molekulák elnyelik az adott gáztípusra jellemző hullámhossztartományokat, amelynek eredményeként egy úgynevezett abszorpciós spektrum keletkezik. A mérés során az elnyelt hullámhossztartomány a gáz típusát, míg az elnyelés mértéke a vizsgált komponens koncentrációját jelzi. Az infravörös sugárzás, amely a gázon áthalad, egy detektorra érkezik, amely az adott mérendő gáztípussal van töltve. Ez a detektor az el nem nyelt infravörös sugárzást elektromos jellé alakítja át. A koncentráció meghatározásához szükséges, hogy az infravörös sugárzás először egy olyan referencia gázon haladjon át, amely nem tartalmazza az analizálandó gázkomponenst. Ez azt jelenti, hogy a megfigyelni kívánt abszorpciós spektrum tartományában nem történik elnyelés. Ennek segítségével meghatározható az úgynevezett „nulljelet” (alapszint). A koncentrációfüggő mért érték és a nulljel közötti különbség adja meg a mintagázban lévő komponens koncentrációját.

Az FID típusú analízátorokat a gázminták – például a belső égésű motorok és dízelmotorok kipufogógázainak – szénhidrogén-tartalmának (THC – Total Hydro Carbon) meghatározására használják. A hidrogénlángban lévő szerves szénatomok ionizálhatók. Az ionizált gázminta gyenge elektromos áramot hoz létre két potenciálkülönbséggel rendelkező elektróda között. Az áramerősség arányos a mintában lévő szénatomok számával. A mérési eljárás relatív mérésnek minősül. A mért áramerősséget egy ismert koncentrációjú referencia gázból származó ismert mérési értékkel vetik össze, és ebből számítják ki a mérési eredményt. Az így kapott értékek megadása során meg kell jelölni az alkalmazott referenciaértéket. Ha propánt vagy metánt használnak referencia gázként, a mérési eredményeket ppm C₃ vagy ppm C₁ egységben adják meg.

A PMD (foton többszöröző detektor) vagy MPD (mikro foton detektor) típusú analízátorokat az oxigén (O₂) koncentrációjának meghatározására alkalmazzák különféle gázmintákban, például belső égésű motorok és dízelmotorok kipufogógázában. Az oxigén (O₂) paramágneses tulajdonságú, ami azt jelenti, hogy mágneses tér hatására az oxigénmolekulák a tér középpontja felé mozdulnak el. Ezt a sajátosságot használják ki az oxigén koncentrációjának meghatározására.

A mérés során azt az erőt detektálják, amelyet a mágneses tér középpontjában lévő oxigén egy forgatható mérőtestre gyakorol, amelyet így kitérít eredeti helyzetéből. A mérőtest elmozdulását egy ellenerőt kifejtő elektromágneses tér kompenzálja. Az az elektromos áram,

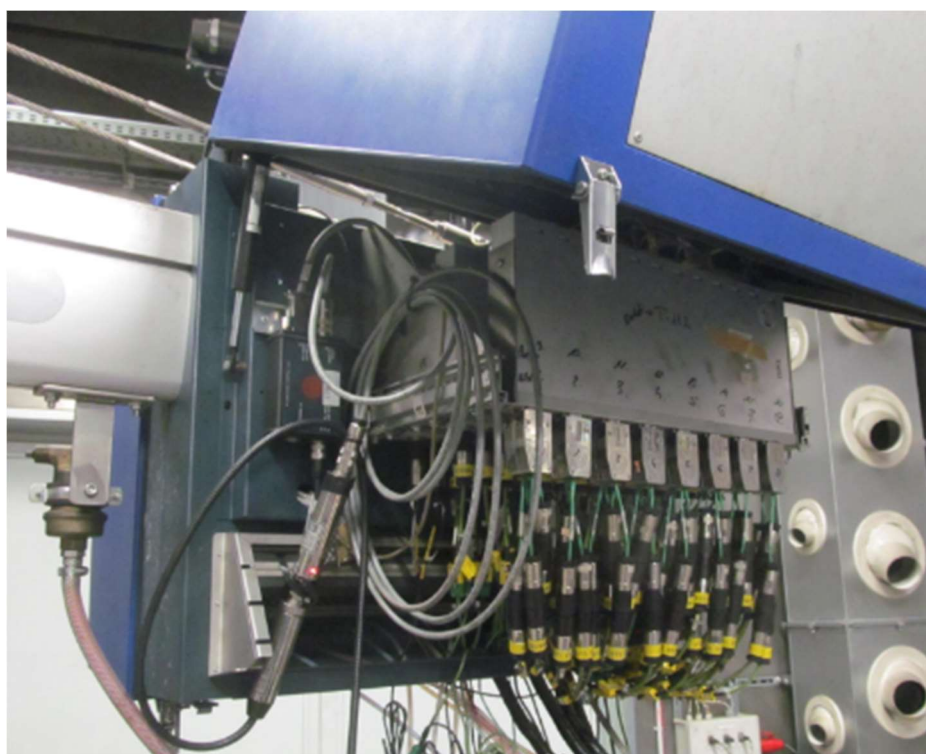
amely a forgó mozgás kiegyenlítéséhez szükséges, arányos az oxigén koncentrációjával, így ez szolgál a mérés alapjául.
A mérőberendezéseket és gázkomponenseket összefoglalóan a 3.1 táblázatban tekinthetjük meg.

3.1 táblázat: A különböző gázkomponensek mérő berendezései és mérési elvei

Gáz összetevő	Mérőberendezés – AVL AMA i60	Mérőberendezés – HORIBA MEXA 7500	Mérés elve
NO _x	CLD	CLD	kemilumineszcens fénysugárzás
CO, CO ₂	IRD	NDIR	infravörös sugárzás elnyelés
THC	FID	FID	ionizálható szénatomok
O ₂	PMD	MPD	O ₂ paramágneses tulajdonsága

3.1.4. Nyomás és hőmérséklet mérés berendezései

A tervezett tesztjeim nyomásmérés és hőmérséklet méréseket is tartalmaznak. Ennek érdekében egyedi szenzorokat is felhasználtam, melyeknek összesített adatfelvételére is lehetőség van a fékpadi infrastruktúra felhasználásával. A hőmérsékletmérésekhez a kipufogógáz utókezelő rendszerben 3,5 mm átmérőjű K-típusú termoelemeket alkalmaztam, valamint egy nyomásmérő berendezést analóg-digitális jeltovábbító egységgel kiegészítve. Akár 11 nyomás mérő és 64 hőmérséklet mérő pont kialakítására is van lehetőség. Az általam használt úgynevezett „boom box” illetve „szenzor sziget” látható a 3.9. ábrán.



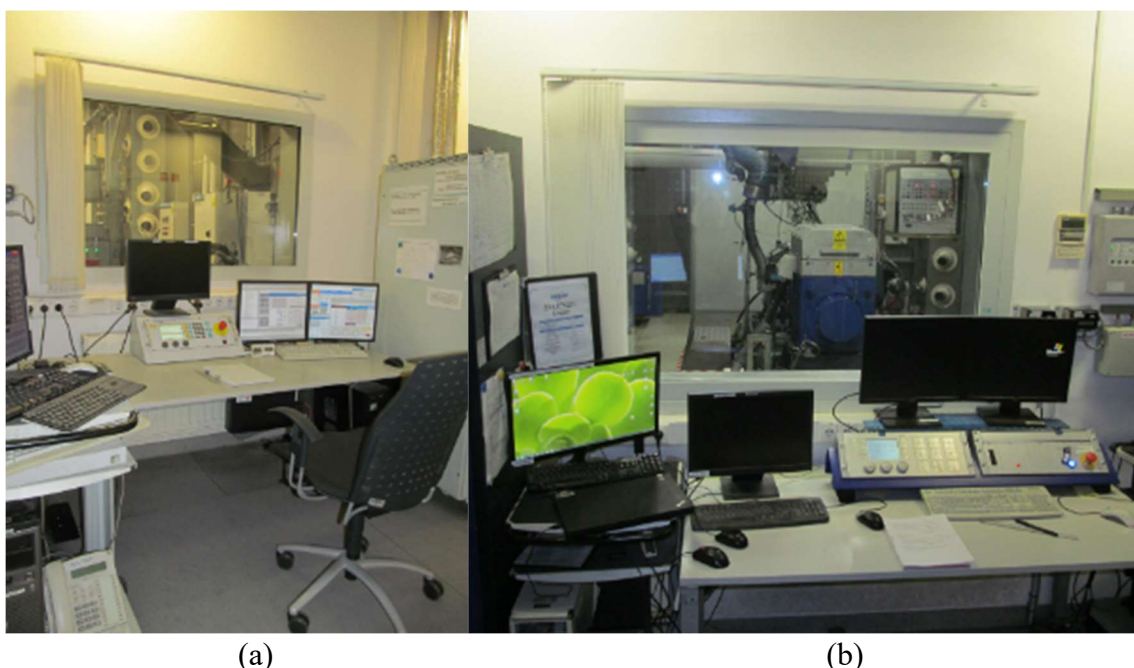
3.9. ábra: AVL „szenzor sziget” a telepített szenzorokkal

Mivel a motor saját fedélzeti (on-board) szenzorai gyakran nem nyújtanak megfelelő mintavételi frekvenciát, kalibrálhatóságot vagy rugalmasságot, a kutatási célú tesztek során kiegészítő, külső szenzorokat alkalmaznak. A „boom boks” lehetővé teszi ezen szenzorok integrált és moduláris elrendezését, biztosítva az adatok gyors, zavartalan begyűjtését, valamint a szenzorok egyszerű cserélhetőségét és pozicionálását. A hőmérséklet és

nyomásmérés tág határok között végezhető, az egyes tesztekhez igazítva a mintavételezés tartományát a szenzorok tulajdonságainak megválasztásával.

3.2. 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 (3.10. ábra). Ez az integrált megoldás lehetővé tette a cellák működésének átfogó irányítását és szinkronizálását, ezáltal növelve a vizsgálati folyamatok hatékonyságát és pontosságát.



3.10. ábra: HORIBA (a) és AVL (b) motoros tesztcellák vezérlői

Minden egyes kísérletet a vezérlőszoftver pontosan ugyanazon sorrendben és lépések szerint hajt végre, ezáltal biztosítva az eredmények megbízhatóságát és reprodukálhatóságát. Ilyen pontosság manuális vezérléssel nem lenne elérhető (Bielaczyc, et al., 2019). 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.

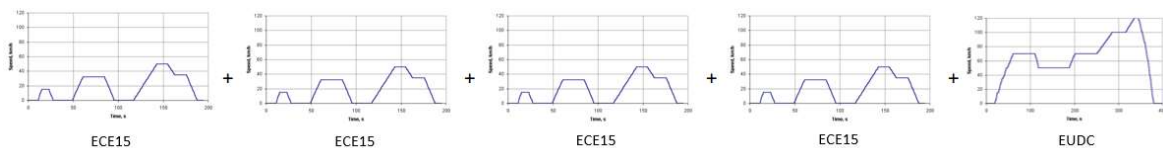
3.2.1. Szűrési hatékonyság

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. A ciklusok részletes információkat tartalmaznak a motorüzemi állapotokról, például terhelésről, fordulatszámról stb., annak érdekében, hogy biztosítsák a mérési eredmények reprodukálhatóságát és összehasonlíthatóságát.

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).

A vízbefecskendezéses vizsgálatokat valós NEDC (New European Driving Cycle) emissziós ciklusokkal is futtattam, ami 4 ECE 15 ciklusból majd pedig egy EUDC ciklusból áll. Az ECE 15 ciklus a városi közlekedést, az EUDC (Extra Urban Driving Cycle) pedig agresszívabb autópályás közlekedést képez le. Az összesített menetidő 1180 másodperc, miközben a járműmotor 267 másodpercet pihen alpjáraton, a további időben 10931,4 métert halad a jármű 120km/h maximális sebességgel (3.11. ábra).



3.11. ábra: NEDC összetett teszt ciklus menetdiagramja (Dieselnet, 2013)

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. Ennek a célnak az elérése érdekében a WLTP tesztciklus időtartamát 30 percre növelték, ami 10 perccel hosszabb a NEDC 20 perces ciklusánál. Ez a meghosszabbított időtartam lehetővé teszi a vezetési helyzetek szélesebb skálájának szimulációját. Ezenfelül a WLTP egy dinamikusabb sebességprofilot alkalmaz, amelyet gyakoribb és intenzívebb gyorsítások, valamint rövid fékezési szakaszok jellemeznek, így hatékonyabban tükrözi a korszerű városi és autópályás közlekedés változékonyságát. A WLTP teszt során megtett összes távolság 23,25 kilométer, amely több mint kétszerese a NEDC 11 kilométeres távjának, ezáltal is hozzájárulva a járművek valós üzemi teljesítményének realitásabb értékeléséhez.

Három különböző WLTC menetciklust dolgoztak ki (class 1-3), amelyek három eltérő járműosztályt reprezentálnak a jármű teljesítmény-tömeg aránya (PMR) és maximális sebessége alapján. A legnagyobb teljesítmény-tömeg arányú járműosztályként a class 3. WLTC osztály jól reprezentálja az Európában és Japánban közlekedő járműtípusokat. A class 2. az Indiában közlekedő járműtípusokat, valamint a Japánban és Európában használt alacsony teljesítményű járműveket reprezentálja. A legalacsonyabb teljesítmény-tömeg aránnyal rendelkező Class 1. osztály pedig az Indiában használt járműtípusokra jellemző.

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. A WHSC vizsgálati ciklus a nagy teljesítményű járművek kibocsátásainak globális harmonizációját célzó, összetett típusjóváhagyási rendszer kulcsfontosságú eleme. 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. Az egyes ciklusokkal kapcsolatban további részletek az M10 mellékletben találhatók.

A szűrési hatékonyság teszt során először meg kellett győződni arról, hogy a szűrő nem tartalmaz koromrészecskéket, ezért a folyamatot egy 650 °C-on, kemencében végzett koromégetéssel kell kezdeni. Ezt követően a szűrő tömegét 150 °C-on mértem, hogy elkerüljem a víz jelenlétéből adódó mérési hibákat. Hidegindításos teszt esetén megvártam, hogy rendszer hőmérséklete lehűljön, ezt a pontot az olajhőmérséklet 25°C fok alá csökkenéséhez kötöttem. Ezt követően indítottam el a választott emissziós ciklust. A ciklus végén ismét megmértem a szűrő tömegét. A tömegmérések alapján azonosítható bármilyen rendellenes motorműködés; a három ismétlés során mért tömegnövekménynek ± 1 grammos tartományon belül kell maradnia. Ezt az eljárást legalább három alkalommal ismételt meg.

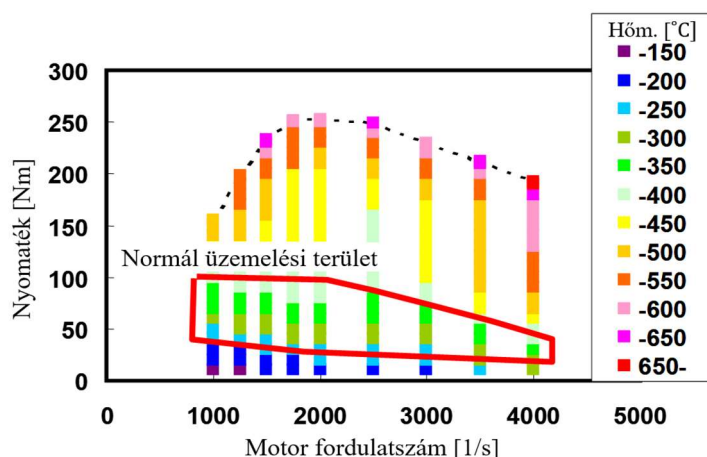
3.2.2. Koromtöltés

A koromtöltéshez szükségem van a filter alaptömegének meghatározására, az előző fejezetben leírt módon kemencében hőkezelttem, és a végén 150 °C-on lemértem a tömegét. A filtert beszerelve figyelni kell, hogy megfelelő irányban legyen az áramláshoz képest. 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. Másik lehetőség, hogy a filter töltését tranziens ciklusokkal végezzük, a kondícióváltásoknál megnövekedő részecske kibocsátást kihasználva. 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 töltés során a korom felhalmozódását a nyomásesés növekedésével követjük nyomon. Erre Emerson-Rosemount abszolút, differenciál típusú nyomásmérőket használtam. Adott beállításokkal a motor kormolásának mértéke, a korom töltési sebessége jó megközelítéssel kiszámítható, azonban a biztonság kedvéért a töltést több részletben kell végezni, hogy adott esetben több tíz órás töltés sikeressége ne legyen kockáztatva. A korom mennyiségét mindig a filter méretéhez kell viszonyítani, és ennek megfelelően g/liter mértékegységben kell kalkulálni vele. A töltés során a megengedett eltérés $\pm 0,2$ g/liter. A megtöltött filter tömegét 150 °C-os tömegméréssel kell ellenőrizni. A korom szerkezetének változását elkerülendő, a teszteket mihamarabb elvégeztem a filtereken.

3.2.3. Regeneráció

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 nyomásesést 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. Ezt az eljárást regenerációnak nevezzük. A teljes regenerációhoz legalább 550 °C feletti hőmérséklet szükséges (Konstandopoulos and Kostoglou, 2000).

A különböző motorüzemi tartományokra jellemző kipufogógáz-hőmérsékletek a 3.12. ábrán láthatók. DPF-fel felszerelt járművek üzemeltetése során jelentős eltérés figyelhető meg a részecskeszűrő regenerációjához szükséges hőmérséklet és a valós kipufogógáz-hőmérséklet között. 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.



3.12. ábra: Dízel személyautó kipufogógáz hőmérsékletek (Ohno, 2008)

A szükséges regenerációs hőmérséklet elérésére két fő stratégia létezik: a passzív és az aktív regeneráció. A passzív regeneráció során a részecskék (PM) folyamatos oxidációja alacsonyabb hőmérsékleten megy végbe, amit katalizátor alkalmazásával az oxidációs és égési reakciók aktiválási energiájának csökkentésével érnek el. Az oxidáció katalizálására két általános megközelítés létezik. Az egyik módszer hajtóanyag-adalékokat alkalmaz, például CeO_2 -t vagy FeO -t, illetve más, kiváló oxigéntároló kapacitású (OSC) vegyületeket, amelyek jellemzően szerves komplexekben jelen lévő fémes elemek (pl. Ce és Fe). A katalizátorral bevont szűrő (catalyst support filter) olyan megoldás, ahol a katalizátort közvetlenül a DPF felületére viszik fel. Az ilyen rendszerek konfigurációja egyszerűbb, mint az hajtóanyag adalék katalizátorokat alkalmazó megoldásoké, mivel nem igényelnek külön folyadéktartályt és adagoló berendezést. A PM regenerációja során a HC (szénhidrogének), CO (szén-monoxid) és az SOF (a PM-ben jelen lévő el nem égett hajtóanyag) oxidációja és égése révén felszabaduló hő kerül hasznosításra. E reakciókat nemesfémek – például platina (Pt) – katalizálják (Bisett és Shadman, 1985; Koltsakis és Stamatelos, 1996). Bár a katalitikus úton történő folyamatos regeneráció kívánatos, ez kizárólag speciális üzemi körülmények között valósítható meg, mivel a regenerációhoz szükséges hőmérséklet meghaladja a dízelmotorok kipufogógázainak szokásos hőmérsékletét.

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. Miután a fő befecskendezéssel biztosítjuk a jármű mozgathatóságához szükséges nyomatékot, néhány ezredmásodpercre további hajtóanyag kerül befecskendezésre („utóbefecskendezés”) a hengerbe. A Dízel motor a működése során több levegőt használ, mint amennyi a tökéletes égéshez szükséges (légfelesleges üzemállapot), a felesleg kijut a kipufogó rendszerbe, és ez az oxigén szükséges a DPF regenerációjához és egyébként a DOC-ben végbemenő folyamatokhoz is. E két technika, a bevont DPF és az aktív regeneráció együttes alkalmazásával biztosítható a korom oxidációjához szükséges hőmérséklet elérése.

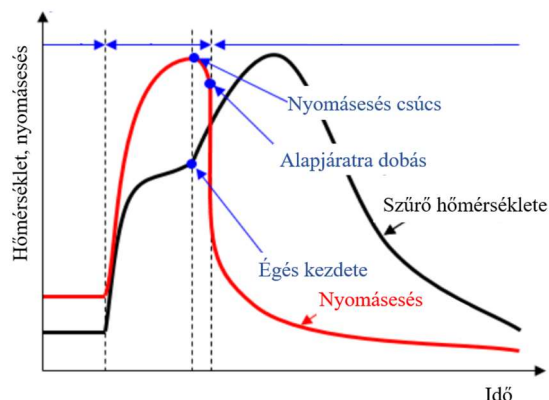
A koromregenerációs vizsgálataim elvégzéséhez az alábbi eljárást követtem. Első lépésként a részecskeszűrő 650 °C -on kiégetésre került, hogy a benne felhalmozódott dízel részecskék (dízel korom) maradvány nélkül eléjjenek, vagy is a szűrő visszanyerje a kezdeti állapotát. Majd ezt követően tömegmérést végeztem, hogy megkapjam a filter alaptömegét. A korom töltését fix motorkondíción hajtottam végre, amely során nyomásérzékelőket alkalmaztam a szűrő előtti és utáni pontokon, hogy nyomon követhessem a koromfelhalmozódáshoz (és a későbbiekben az -égetéshez) kapcsolódó nyomásváltozásokat. A kívánt koromtömeg elérését szintén tömegméréssel ellenőriztem. A regeneráció során, a munkaütem vége közelében (még égés közben) a kipufogási ütem előtt a hengerekbe hajtóanyagot fecskendeztem, amely kijut a

kipufogó rendszeren keresztül a dízel oxidációs katalizátorba (DOC) és ott oxidálódik (elég), ezáltal megemeli a kipufogógáz hőmérsékletét a DPF szűrő előtt. Ezt a hőmérsékletet közvetett módon az utóbefecskendezett hajtóanyag mennyiséggel lehet állítani a központi motor vezérlő (ECU) elektronikában. A hőmérsékletet ezen a módon $\sim 600^\circ\text{C}$ -ra növeltem, majd az utóbefecskendezést addig folytattam, amíg a szűrőn mért nyomásesés stabilizálódott, jelezve, hogy a kerámiamonolitból az összes korom kiégett. Ezt követően az eljárást a kezdetektől kiindulva további két alkalommal megismételtem. A koromregeneráció során a teljes ciklus alatt állandó, nagy terhelést alkalmaztam, hogy a motorral is a lehetséges legmagasabb kipufogógáz hőmérsékletet hozzak létre.

3.2.4. „Drop to idle” vizsgálati módszer

A regenerációs határértékek meghatározására szolgáló módszer a járműben előfordulható legkedvezőtlenebb regenerációs körülményeket szimulálja. Ilyen esetben a normál (nem hibás üzemű) körülmények között előfordulható legmagasabb a hőmérséklet a kipufogó rendszerben a DPF-nél, ami annak károsodását is okozhatja. Ezért ennek a teszt ciklusnak a figyelembevételével is állítják be a jármű gyártók a normál regenerációhoz tartozó maximális koromtöltetet is, amellyel ilyen kondíciók között sem kap végzetes hőmérsékleti terhelést a DPF kerámia váza.

A vizsgálat során az O_2 -koncentráció alacsony, miközben a kipufogógáz hőmérséklete emelkedik, például amikor a jármű nagy sebességgel, alacsony fokozatban, emelkedően halad. Ennek következtében részecskeszűrőben lerakódott korom meggyullad. Miután a jármű eléri a hegytetőt, ereszkedni kezd, miközben motorféket alkalmaz (innen a név, „Drop to idle”). A hirtelen megnövekvő O_2 -koncentrációval friss levegő jut a szűrőbe, ami túlzottan gyors és erőteljes égést idéz elő. Minél több korom van jelen, az égés annál intenzívebb lesz. (Ohno, 2008). Ennek tesztelési körülményekre lefordított megfelelőjét a 3.13.-es ábrán láthatjuk.



3.13. ábra: a beállított motorkondíciók „Drop to idle” teszt közben

Az ellenőrizetlen regeneráció súlyos körülményeinek szimulálása érdekében, a regenerációnál már tárgyalt módon, először 650°C -on kiégettem a szűrőt, majd meghatároztam annak tömegét. Ezt követően korommal töltöttem meg a szűrőt, és lefuttattam a 3.13. ábrán bemutatott eljárást. A szűrőt nagy terhelésű fix kondícióban üzemeltettem, és amikor azt tapasztaltam, hogy a szűrőn mért nyomásesés éppen csökkenni kezdett (ami a korom gyulladására és annak elkezdődő égésére utalt), a motort alapjáratra állítottam, ezáltal ellenőrizetlen égést idézve elő a szűrőben. A vizsgálatot három alkalommal ismételt meg.

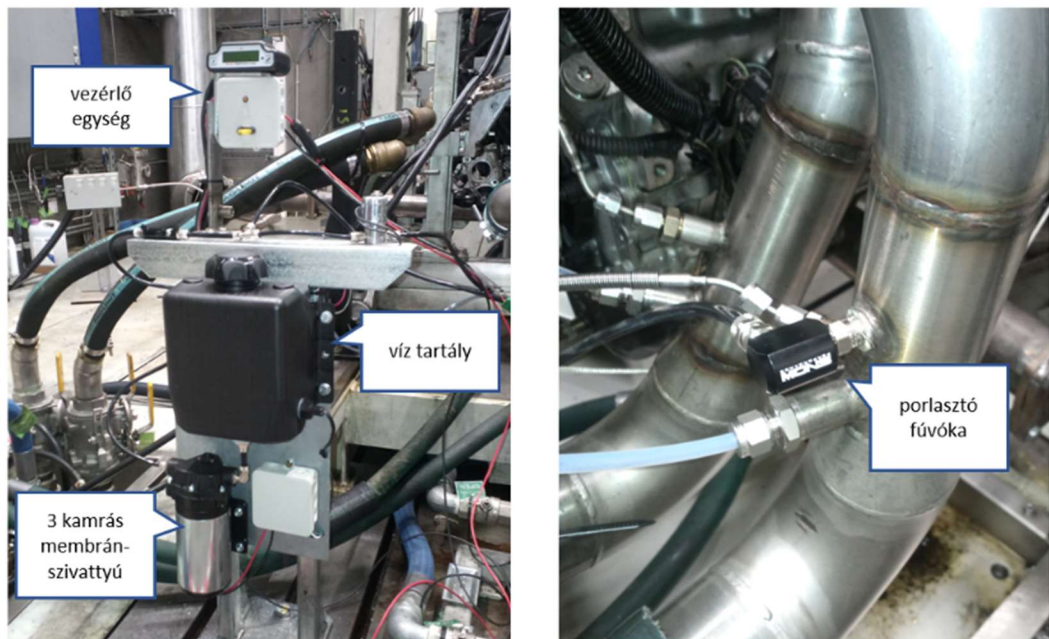
3.3. Vízbefecskendezés

A vízbefecskendező rendszer kiválasztásánál fontos szempont volt a kereskedelmi forgalomban való könnyű beszerezhetőség, ez által az utólagos átalakításnak való megfelelőség. Erre a célra egy „Snow Performance Stage 3 TD MPG-MAX” rendszert választottam ki, mely a teljes teljesítményskálán végzi a befecskendezést. A befecskendezés kontrollálása a töltőnyomás és a kipufogó leömlő hőmérséklet alapján történik.

A vízbefecskendező rendszer főbb elemei:

- három kamrás nagy teljesítményű (~20 bar) membrán szivattyú,
- különböző teljesítményű fúvóka (60 ml/perc teljesítményű került alkalmazásra a méréseimben),
- nyomásmérővel egybeépített vezérlő egység,
- víztartály.

Ha a befecskendezés a turbófeltöltő elé kerül beépítésre, a kompresszorkeréken keresztül jutó folyadék – amely kompresszor percenként 50 000-tól akár 250 000-es fordulatszámmal is foroghat – erodálhatja a finom alumíniumból készült lapátszéleket. Az ez irányban végzett kutatások (Pierre, et al., 2016, Takács, et al., 2024) arra a következtetésre jutottak, hogy a turbófeltöltő előtti befecskendezés hosszú távon kavitációt idéz elő a turbókerék élfelületein. A vízbefecskendezés helyét és a vezérlő számára szükséges töltőnyomás mintavételi pontját is ennek megfelelően a töltőlevegő hűtő után építettem be. A víztartályt a szivattyú fölé, de a fúvóka alá kell telepíteni. Ez biztosítja a szivattyú folyamatos feltöltött állapotát, és megakadályozza, hogy a vízbefecskendező rendszer inaktív állapotában folyadék jusson a fúvókába. . A befecskendező rendszer kiépítése a 3.14. ábrán látható



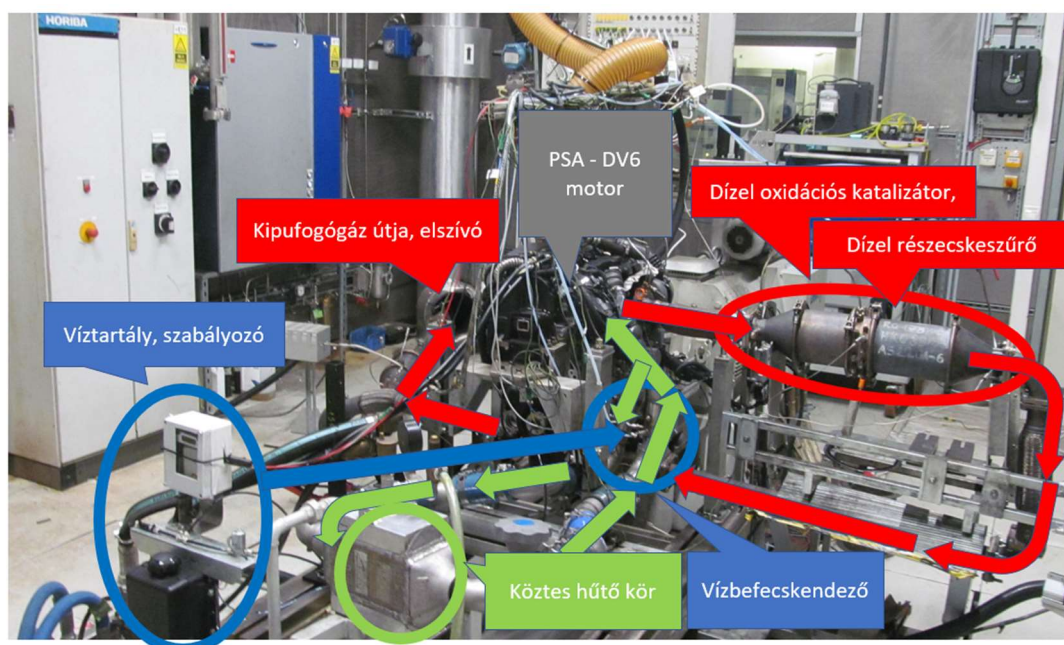
3.14. ábra: A telepített szívócsonk vízbefecskendező rendszer

Az installáció során szempontként merült fel a vízbeporlasztó rendszer könnyű mozgathatósága, így a későbbiekben az eredmények validálása más motorokon is lehetőségessé válik (3.15. ábra).



3.15. ábra: A vízbefecskendező rendszer védő borítása és az oldható kialakítás

A teljes vízbefecskendező rendszer a pumpával, a víztartállyal és a szabályozóval együtt egy állványra helyeztem, ami egy csavar oldásával a fékcella alaplapjáról eltávolítható és más cellákba ezen a módon könnyen áthelyezhető. A befecskendező és a töltőnyomás szenzor csatlakozása megegyezik a fékcellákban használt standard mérőpontokéval, így is biztosítva a berendezés viszonylagosan egyszerű mozgathatóságát. A félév során a vezérlő egységre egy további borítást eszközöltem annak védelmére az esetlegesen fröccsenő folyadékok ellen. A teljes kialakítás a 3.16 ábrán látható a DV6-os személyautó motoron. A tesztek során tisztított, ioncserélt vizet használtam.



3.16. ábra: Tesztcella a teljes mérőrendszerrel

3.4.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.

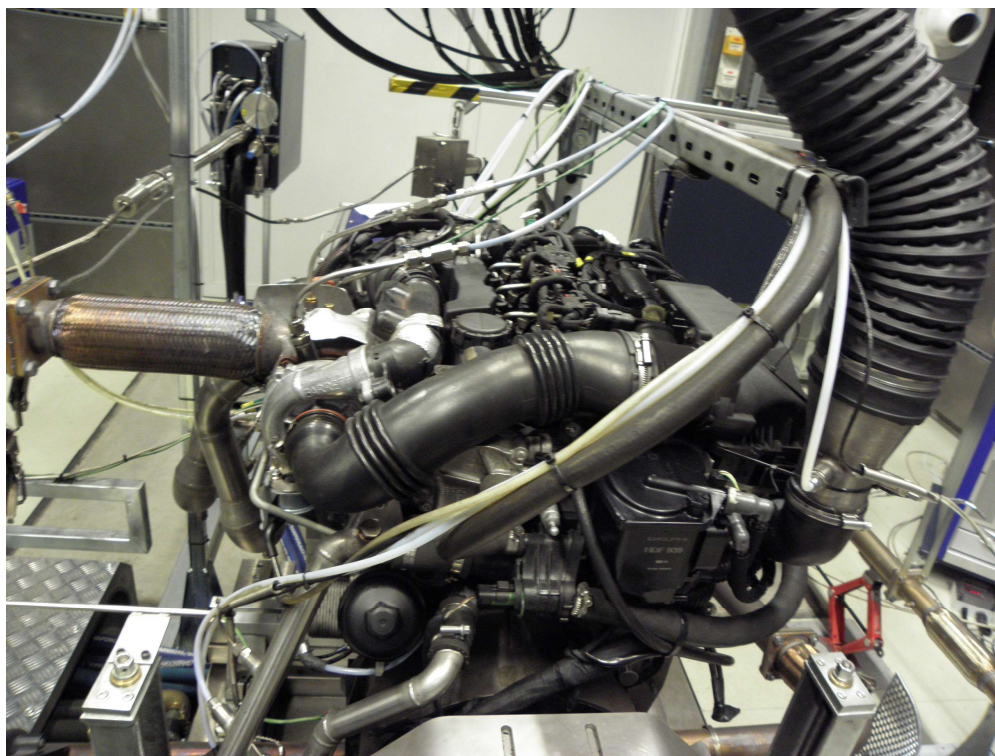
A vizsgálatok során 2 személyautó, egy könnyű tehergépjármű és egy nehéz dízel gépjármű motort használtam fel (3.2. táblázat). A mérőrendszer aktuális kialakítását az eredmények fejezetben, minden vizsgálat esetében bemutatom.

3.2. 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

3.4.1. PSA DV6 személygépjármű dízel motor

Egyes mérések kivitelezésére egy PSA HDI (high-pressure direct injection) közvetlen befecskendezéses DV6 1.6 L (1560 cm³, 3.17 ábra) motort használtam.



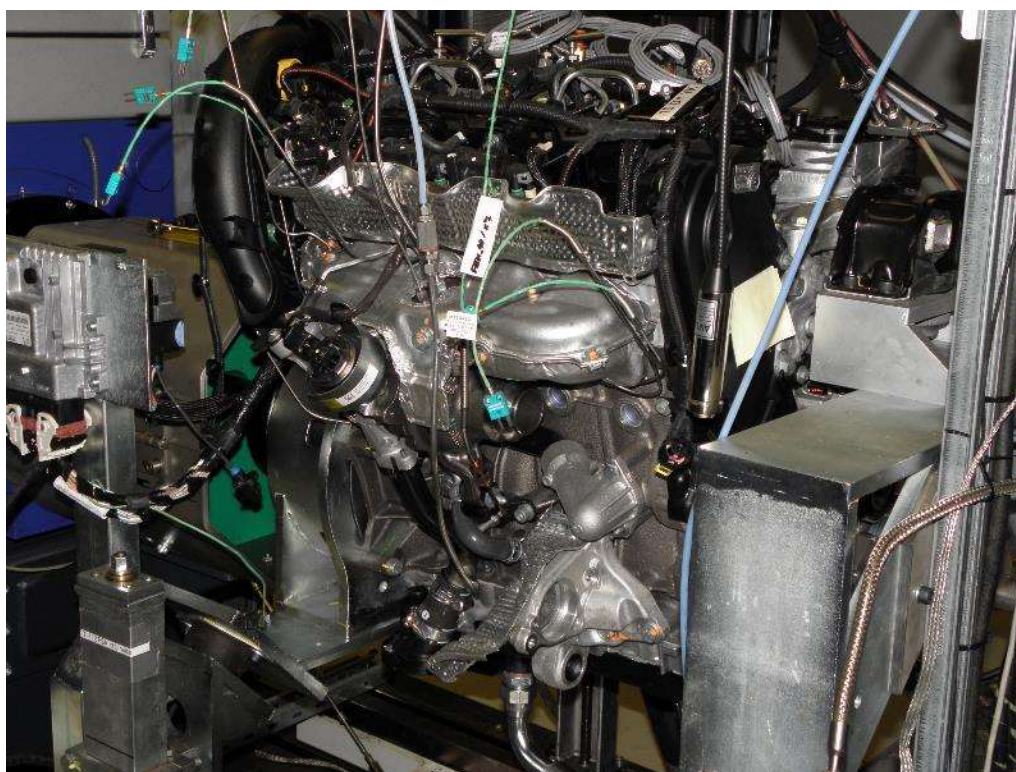
3.17. ábra: PSA DV6 motor, Horiba PC Titan T250 motorfékpadra telepítve.

A motor eredeti konfigurációjában a 3.2.3. pontban bemutatott hajtóanyag adalék katalizációs metódust (EOLYS II - FBC) használja. A motorblokk és a hengerfej is teljesen alumínium, hengerenként 4 szeleppel. Kovácsolt főtengelye 5 helyen csapágyazott. Feltöltő rendszere változó geometriájú turbó köztes hűtővel. Bosch közös nyomócsöves rendszere már 2. generációs, 160 MPa csúcsnyomással. Az injektor 6 befecskendező furattal rendelkezik, és többszörös befecskendezésre is lehetőség van. Mindezek eredményeképpen a motor legnagyobb teljesítménye 80 kW 4000 1/min. fordulatszám, míg maximális nyomatéka 240 Nm 1750 1/min. A három felső sebességfokozatban a nyomaték értéke elérheti a 260 Nm-t is 1750 1/min.-nél, köszönhetően az úgynevezett „overboost” funkciónak, amely teljes motorterhelés mellett, 1500 és 3750 1/min. közötti tartományban ideiglenesen megnöveli a beszívott levegő és az hajtóanyag mennyiségét.

A motor külső nagy nyomású EGR-rel (kipufogógáz visszavezetés) és EGR hűtővel is ellátott. Az EGR nélküli méréseimhez annak kikapcsolását szoftveresen végeztem el. A nagy nyomású EGR jó párosítás a vízbefecskendezés mellett, hiszen a motor gyors hidegindítás utáni üzemmeleg állapot elérését is elősegíti, a kipufogó leömlő utáni meleg kipufogógáz visszavezetéssel.

3.4.2. PSA DW10 személygépjármű dízel motor

A vizsgálatokhoz egy 2.0 L (2000 cm³ – 3.18. ábra), soros elrendezésű, négyhengeres, turbófeltöltős DW10 típusú motort használtam, amely szintén EOLYS II katalizátor adalékanyaggal üzemel és megfelel az EURO 5 károsanyag-kibocsátási előírásoknak.



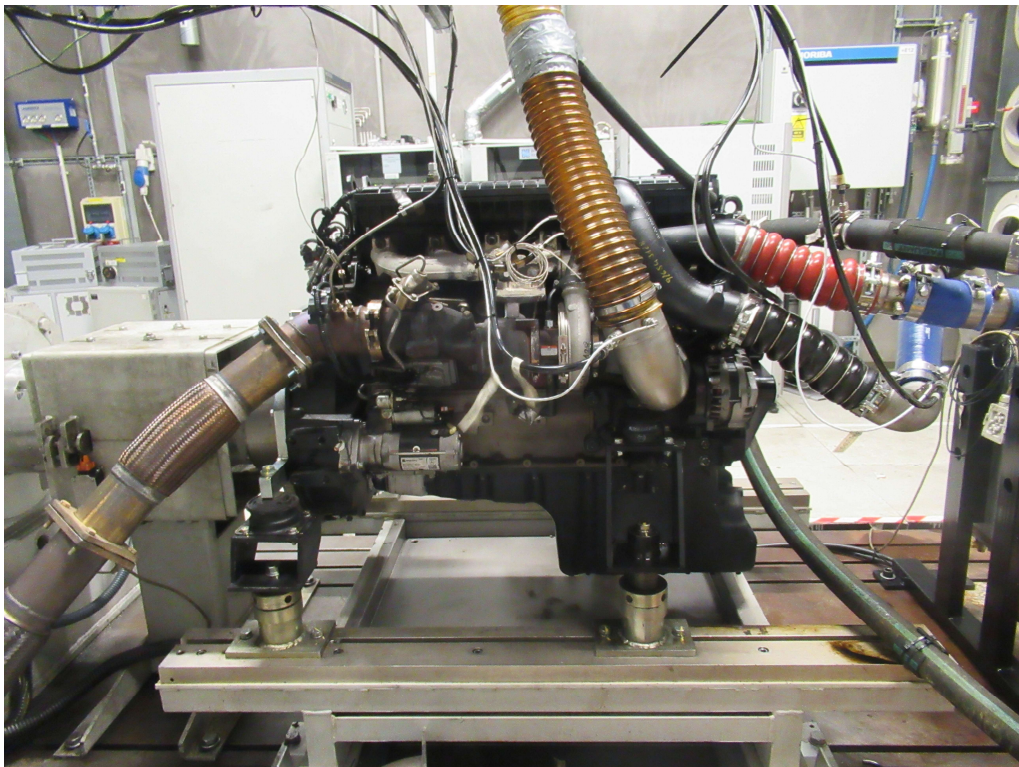
3.18. ábra: PSA DW10 motor, AVL PC Load System 220kW motorfékpadra telepítve.

A motorblokk öntöttvas, a hengerfej pedig alumínium hengerenként 4 szeleppel. A motor feltöltését Garrett gyártmányú, változó geometriai kialakítású turbófeltöltő látja el, amely vákuum vezérelt nyomáscsökkentő szeleppel és köztes hűtővel rendelkezik. A kovácsolt főtengely itt is 5 helyen csapágyazott. A motor közvetlen hajtóanyag-befecskendezéssel,

DOHC (Double Over Head Camshaft – dupla vezérműtengely) kovácsolt vezérműtengelyekkel, 16 szelepes, alumíniumötvözetből készült hengerfejjel rendelkezik. Hajtóanyagrendszere szintén II. generációs Bosch rendszer, itt 1650 bár maximális nyomással. Legnagyobb teljesítménye 103 kW (2000 1/min), maximális nyomatéka 340 Nm (4000 1/min) az „overboost” funkcióval. A motor gyárilag EGR rendszerrel szerelt.

3.4.3. Daimler OM926 könnyű tehergépjármű dízel motor

A páratartalomra vonatkozó adatok vizsgálatához, egy könnyű teherautó, EURO V/EEV szabványnak megfelelő, soros elrendezésű, hathengeres dízelmotort választottam (OM926LA - 3.19. ábra). Ez a motor széles körben alkalmazható közúti és nem közúti járművekben, többek között arató- és betakarítógépekben, ratrakokban, valamint közösségi közlekedési eszközökben. A motor feltöltést Borg Warner turbófeltöltő végzi egy köztes hűtőn keresztül. A motor löketterfogata 7200 cm^3 , teljesítménye pedig 210 kW és 1120 Nm 1100 1/min fordulaton. A kiválasztott motortípus nem alkalmaz EGR rendszert, amely lehetővé teszi a páratartalom és az EGR hatásainak átfedéséből eredő interferenciák elkerülését (Ishida és Chen, 1994; Wei, et al., 2022), ezáltal a víz jelenlétéből származó különbségek tisztábban értelmezhetők.



3.19. ábra: Daimler OM926 motor, Horiba MD Titan T460 motorfékpadra telepítve.

3.4.4. Volvo D13TC nehéz tehergépjármű dízel motor

A kísérleti vizsgálatokhoz egy nehézgépjárművekbe tervezett, közvetlen befecskendezésű, közös nyomócsöves dízelmotor került alkalmazásra, amelyet a Volvo Trucks fejlesztett ki (Volvo D13TC). A motor konfigurációja, felépítése és elhelyezése a 3.20.-es ábrán látható, míg a legfontosabb műszaki jellemzőit a 3.2-es táblázat foglalja össze.

A D13TC motor $12\,800 \text{ cm}^3$ hengerűrtartalommal rendelkezik, maximális teljesítménye 372 kW, amelyet 1300–1600 fordulat/perc (1/min) közötti tartományban ad le. Maximális nyomatéka 2840 Nm, amely már 900–1300 1/min között elérhető. Ez az alacsony

fordulatszám-tartományban leadott magas nyomaték- és teljesítményszint hozzájárul a motor élettartamának meghosszabbításához is, mivel csökkenti a mechanikai igénybevételt és a termikus terhelést. Mindemellett, a fejlett kenéstechnológia, valamint a robusztus turbófeltöltő együttese lehetővé teszi, hogy a motor becsült élettartama elérhesse a 2 millió kilométert. A motor olajcsere-intervalluma normál üzemeltetési ciklus esetén, elérheti a ~ 90000 kilométert. A motor fix geometriájú turbófeltöltővel felszerelt, amely optimalizált töltési nyomást biztosít a teljes fordulatszám-tartományban.

A motort az Ibsiden Hungary Kft. Technical Center telephelyén használtam fel vizsgálati célokra, ahol egy 200 000 kilométer futásteljesítménynek megfelelő ekvivalens üzemidővel rendelkező példány állt rendelkezésre a teszteléshez. Ez a motorállapot ideális feltételeket biztosított a különböző paraméterek reprodukálható vizsgálatához, miközben a valós üzemi körülményeket is reprezentálta.



3.20. ábra: Volvo D13-TC motor, AVL HD Load System 500kW-os motorfékpadra telepítve.

3.5. 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 motor közvetlenül egy fékberendezést hajt meg, így a főtengelyről nyert adatok rendkívül pontosak. A tesztcellák kialakítása lehetővé teszi különböző típusú motorok gyors és biztonságos rögzítését, miközben a környezeti feltételek – például a levegő- és hűtőfolyadék-hőmérséklet – szoros ellenőrzés alatt tarthatók. A motorfékpadok előnye, hogy laboratóriumi pontosságot biztosítanak valósághű motorüzem mellett (Steiber, et al., 2006). A fékpadok úszó alapon helyezkednek el, hogy a fékpad működése során keletkező rezgéseket elnyelje és megakadályozza azok

áttérjedését az épület szerkezetére. Az úszó alap egy beton tömeg, ami pneumatikus rezgéscsillapító légpárnákon helyezkedik el.

A gáz- és folyékony közegek (hűtőfolyadék, olaj, beszívott levegő és töltőlevegő) jelentős hatással vannak a motor működésére (Yu, et al., 2021). A kondicionáló modulokat kifejezetten belsőégésű motoros használatra fejlesztették ki. A rendszerek képesek ezeket a közegeket előre meghatározott hőmérsékleten tartani minden üzemi körülmény között. Ezek a modulok a motor közegeinek kondicionálására szolgálnak, lehetővé téve a meghatározott közeg-hőmérsékletek rendkívül pontos és gyors beállítását. A rendkívül pontos és reprodukálható tesztek végrehajtása rögzített környezeti feltételeket igényel. A tesztelési berendezések összefoglalása az 3.3. táblázatban található.

A kísérleteket az Ibiden Hungary Ltd. kutatás-fejlesztési központjában végeztem el Magyarországon, ahol a fent említett kondicionáló berendezések és a teljes motoros dinamométeres tesztcellák megtalálhatók (3.21. és 3.22. ábra).

3.3. táblázat: A mérésekhez használt tesztcellák összefoglaló táblázata

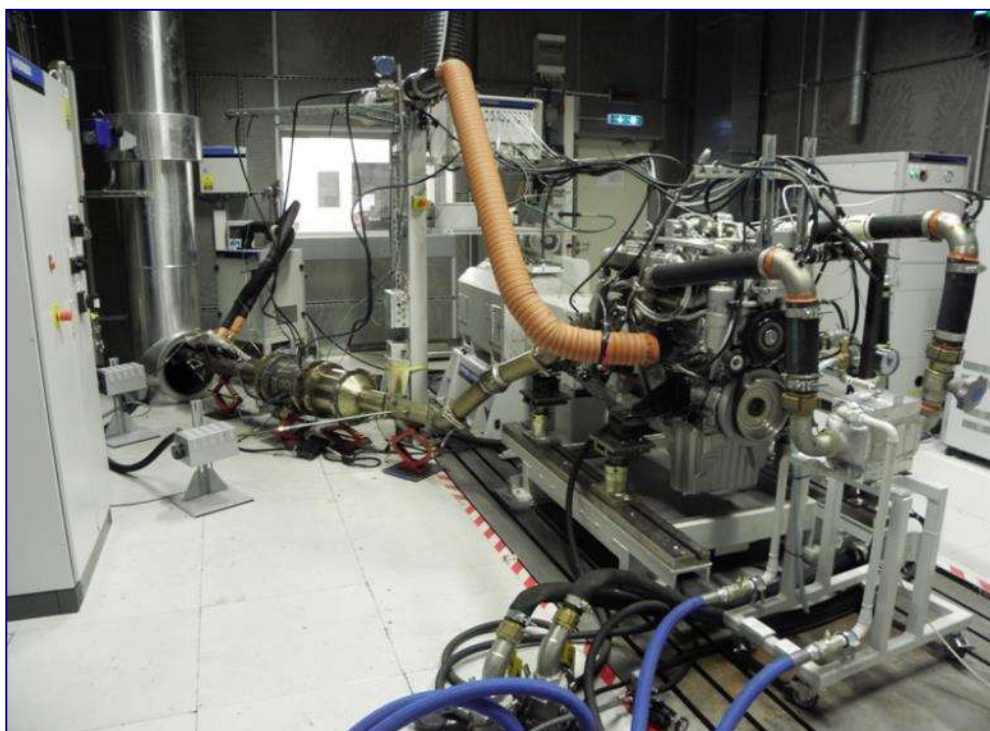
	HORIBA TITAN T250	AVL Load System 220 kW	HORIBA TITAN T460	AVL Load System 500 kW
Dinamométer	Dynas3 HT250	DynoRoad 204/8	Dynas3 HT460	DynoRoad 504/4.6
Max. sebesség [1/min]	10 000	8000	8000	5000
Max. nyomaték [Nm]	700	934	1500	3000
Max teljesítmény [kW]	250	220	460	500
Teszt vezérlő rendszer	STARS 1.6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



3.21. ábra: AVL PC 220kW motoros fékcella

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, hőmérséklet, motorfolyadékok hőmérséklete, nyomása stb.), valamint a gáznemű és szilárd szennyező anyagok mennyiségét. Ezenkívül lehetőség van a motor fedélzeti diagnosztikai (OBD) érzékelőinek adatait is rögzíteni és a motorvezérlő egység által alapvetően szabályozott aktuátorok módosítására is.

A motor teljesítménye és emissziója nem csak a motor belső működésétől, hanem a beszívott levegő környezeti paramétereitől is függ. A beszívott levegő (égéslevegő) kondicionáló berendezés képes szabályozni a hőmérsékletet, páratartalmat és nyomást, biztosítva a motor stabil tesztelési feltételeit függetlenül a környezeti viszonyoktól. A berendezés lehetővé teszi a motor teljesítményének és emissziójának változatos, akár szélsőséges körülmények közötti értékelését is, ami kritikus fontosságú a motor emissziós értékeinek pontos meghatározásához. Biztosítja a rögzített paraméteres emisszióméréshez szükséges feltételeket, ami elengedhetetlen a motor és az emissziókezelő rendszerek teljesítményének pontos értékeléséhez.



3.22. ábra: HORIBA MD Titan T460 motoros fékcella

Az olajkondicionáló rendszerek kiemelten fontos szerepet játszanak a belső égésű motorok vizsgálata során, mivel az olaj hőmérséklete jelentősen befolyásolja a motor termodinamikai és mechanikai viselkedését. E rendszerek biztosítják az olaj üzemi hőmérsékletének fenntartását mind üzemi körülmények között, mind a motor indítása előtt, ezzel hozzájárulva a motor optimális működéséhez, hatékonyságához és élettartamához. A fűtő- és hűtőelemekkel felszerelt rendszerek – például az általam használt beépített 9 kW-os fűtőegység – lehetővé teszik a pontos hőmérsékletszabályozást, függetlenül a környezeti viszonyoktól. Az olajkondicionálás révén csökkennek a próbapadi mérési eltérések, ezáltal nő a tesztek reprodukálhatósága és összehasonlíthatósága. Több tanulmány (Roberts, et al., 2014) is alátámasztja, hogy az olajhőmérséklet szabályozása kulcsfontosságú a pontos motorvizsgálatok szempontjából.

Szintén fontos és hatásaiban hasonló fontosságú a belső égésű motorok hűtővíz-kondicionáló rendszere, amely kulcsszerepet játszik a motor optimális hőmérsékleti viszonyainak biztosításában, különösen laboratóriumi körülmények között végzett vizsgálatok során. Az általam használt rendszer PID-szabályozással ellátott szelepe és ellenirányú hőcserélője lehetővé teszi a hűtőfolyadék hőmérsékletének nagy pontosságú szabályozását, akár állandó, akár változó terhelési körülmények között. Az elektromos előmelegítő funkció gyors hőmérséklet-állítást tesz lehetővé még a motor indítása előtt, ezzel is biztosítva a mérési feltételek reprodukálhatóságát. A szabályozott hűtővízhőmérséklet az olaj kondicionáláshoz hasonlóan segít csökkenteni a mérési szórást és javítja a különböző motorüzemi állapotok összehasonlíthatóságát.

A vizsgálataim során használt hajtóanyag-kondicionáló rendszer az egyik központi eleme a motoros tesztcellának, működése garantálja a precíz és stabil hajtóanyag-ellátást, amelyre szükség van a méréseim során. A rozsdamentes acél csővezetékekkel és nikkelleghesztett hőcserélőkkel kialakított rendszer alkalmas akár 20 %-os biodízel tartalmú hajtóanyag kezelésére is.

Az általam felhasznált hajtóanyag a kereskedelmi forgalomban is kapható B7 (7 % energiaarányos bioadalek tartalmú) megnevezésű dízel olaj, melyet a Mol Nyrt. Százhalombattai finomítójában állítottak elő.

Modern ultra alacsony kéntartalmú hajtóanyag melynek főbb jellemzői a 3.4 táblázatban láthatók.

3.4. táblázat: A mérések során felhasznált hajtóanyag főbb jellemzői

		MOL B7 dízel
Gázolaj frakció	(%)	93 - 97
Megújuló bio tartalom	(%)	0,5 – 7
Kezdőforrpont	(°C)	700
Lobbanáspont	(°C)	250
Gyulladás hőmérséklet	(°C)	STARS 1.6
Sűrűség	(kg/m ³)	CM 15-200
Kinematikus viszkozitás	(mm ² /s)	CM 15-200

A hajtóanyag 4000 literes földalatti tárolóból szivattyúval jut a napi tartályba, majd gravitációs úton a tesztcellába, ahol egy komplex hőmérséklet- és nyomásszabályozási folyamaton megy keresztül az AVL KMA4000 hajtóanyag kondicionáló berendezésbe (3.23. ábra).

A rendszerbe integrált hőcserélők, szűrők, sűrűségmérő és logikai vezérlő biztosítják a hőmérséklet, a nyomás és a tömegáram pontos szabályozását, így minimalizálva a mérési hibákat. Az előfűtés során a hajtóanyag hőmérsékletét körülbelül 10 °C-kal a kívánt érték fölé emelik, majd egy hűtőkör visszaállítja a célhőmérsékletet, ezzel stabilizálva az üzemi feltételeket.

A töltőlevegő hűtő révén csökkenthető az égéstérbe jutó levegő hőmérséklete, amely mérsékeli az NO_x-képződést (2.4.2 fejezet), valamint növeli a sűrűséget, így javítva a levegő-hajtóanyag arányt és a motor teljesítményét. Az vizsgálatokhoz használt rendszerben a motorok gyári töltőlevegő hűtő rendszere helyett a tesztcella víz/levegő hőcserélőjét használtam, amely sokkal pontosabb és rugalmasabb hőmérséklet-szabályozást tesz lehetővé. A levegő hűtésének precíz irányítása a tesztcella számítógépes vezérlésén keresztül történik, lehetővé téve reprodukálható és optimalizált motorvizsgálatokat.

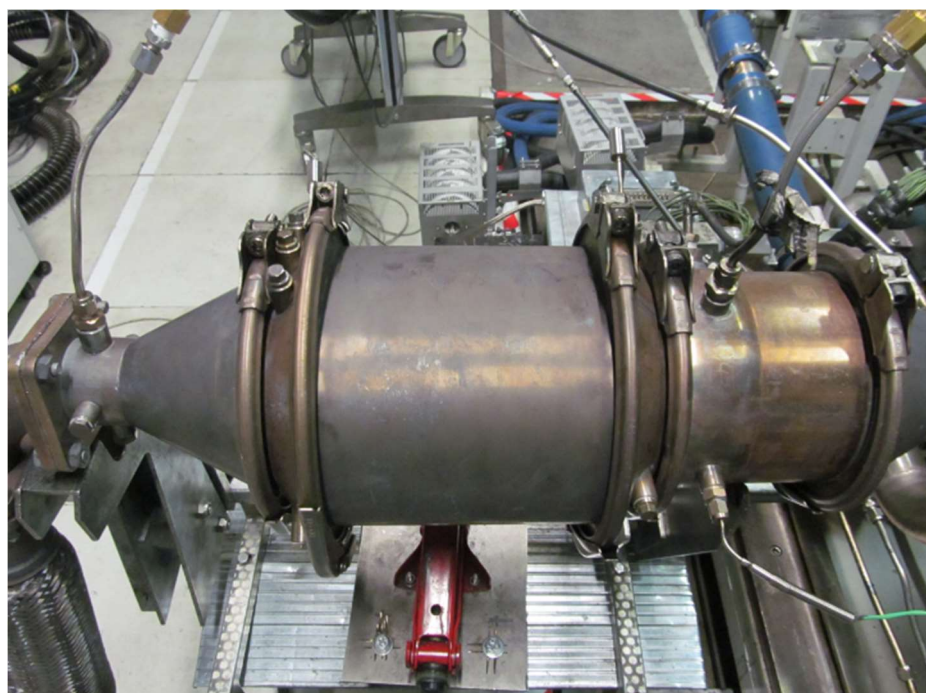


3.23. ábra: KMA 4000 hajtóanyag kondicionáló berendezés

3.6. A mérőrendszer kialakítása

Az adott teszthez használt elrendezést minden teszt előtt bemutatom. A mérőrendszer részeként a vízbefecskendező rendszer és a motorok már bemutatásra kerültek. 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).



3.24. 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 (3.24. ábra).

Ez által, a tömegmérések, kiégetések és az egyes speciális tesztek kívánalmainak megfelelően könnyen mozgathatóvá váltak.

3.7. Főbb számítások, felhasznált egyenletek

A mérések során elvégzett kalkulációim a kiértékelő formátumaimban megtalálhatóak a mellékletekbe. Ebből a kiértékeléshez szükséges főbb egyenletek bemutatásra kerülnek a következő bekezdésekben.

3.7.1. Páratartalom számítások

A motor beszívott levegőjében mért relatív páratartalom, hőmérséklet és nyomás értékeit a méréseim során rögzítettem, ezek alapján számították ki az abszolút páratartalmat. Az abszolút páratartalom meghatározásához először a telítési gőznyomás értékét kell kiszámítani, amint az a 3.2 egyenletben látható (Wagner and Pruss, 2002).

$$\ln(P_{ws} / P_c) = T_c / T \cdot (a_1 \cdot \vartheta + a_2 \cdot \vartheta^{1.5} + a_3 \cdot \vartheta^3 + a_4 \cdot \vartheta^{3.5} + a_5 \cdot \vartheta^4 + a_6 \cdot \vartheta^{7.5}) \quad (3.2)$$

P_{ws} : telítési gőznyomás (Pa),
 P_c : kritikus nyomás - 22.1 MPa,
 T_c : kritikus hőmérséklet - 647.1 K,
 T : környezeti hőmérséklet (K),
 ϑ : $1 - (T/T_c)$,
 $a_1, a_2, \dots, a_6$: empirikus állandók.

A telítési gőznyomásból kiszámítható a vízgőz nyomása a következő összefüggéssel (3.3 egyenlet) (Lawrence, 2005).

$$P_w = RH \cdot P_{ws} / 100 \quad (3.3)$$

RH: relatív páratartalom (%),
 P_w : vízgőz nyomása (Pa).

Az ideális gáz törvényét alkalmazva a vízgőzre, meghatározható az abszolút páratartalom is (3.4 egyenlet) (Wagner and Pruss, 2002).

$$AH = (P_w / (R_w \cdot T)) \cdot 1000 \quad (3.4)$$

AH: abszolút páratartalom (g/m^3),
 R_w : a vízgőz fajlagos gázállandója 461.5 (J/kgK).

A vízbefecskendezéssel kapcsolatos szakirodalomban a beinjektált vízmennyiséget általában a víz–hajtóanyag arány (Water–Fuel Ratio, WFR) formájában adják meg (Pamminger, et al., 2020; Wei, et al., 2022). A vizsgálati eredmények ilyen formában történő összehasonlításához további számítások szükségesek. Első lépésként a száraz levegő nyomását kell meghatározni:

$$P_d = P - P_w \quad (3.5)$$

P_d : száraz levegő nyomása (Pa),

P : környezeti nyomás (Pa).

A száraz levegő nyomásának ismeretében következő lépésként a levegő sűrűségét kell kiszámítani, az ideális gáz egyenlet egyszerűsített és átrendezett formáját alkalmazva:

$$\rho = P_d / (R_d \cdot T) + P_w / (R_w \cdot T) \quad (3.6)$$

ρ : levegő sűrűsége (kg/m³),

R_d : száraz levegő fajlagos gázállandója 287.1 (J/kgK).

Ezen értékek birtokában kiszámolható a WFR:

$$WFR = \left(\frac{MAF \cdot (AH / \rho)}{m_f} \right) \cdot 100 \quad (3.7)$$

WFR: víz-hajtóanyag arány (%),

MAF: beszívott levegő tömegárama (g/s),

m_f : hajtóanyag áram (g/s).

3.7.2. Szilárd részecske számítás

A nemzetközi mértékegységrendszer szerinti 10 és 23 nanométeres részecskeszám megadásához (#/kWh), az elvégzett munka arányában kibocsátott részecskeszámokat kell megadnom. A vizsgálataim során kapott adatok felhasználásával számolható az ehhez szükséges kipufogógáz térfogatáram (kg/s), az emissziós ciklus alatt elvégzett munka (kWh), illetve a részecskeszámlálóból kapott részecskeszám adata (#/cm³), van még szükségem. Ezen értékek birtokában kiszámolható a 10 nanométeres (SPN₁₀) és a 23 nanométeres (SPN₂₃) részecskeszám:

$$SPN_{10} = \frac{EVF_{Sum} \cdot PN_{10}}{W_{ciklus}} \quad (3.8)$$

$$SPN_{23} = \frac{EVF_{Sum} \cdot PN_{23}}{W_{ciklus}} \quad (3.9)$$

EVF_{sum} : kipufogógáz térfogatáram (Exhasut Volume Flow) adott ciklus alatt (cm³),

PN_{10} : átlagos részecskeszám a 10 nm-es tartománytól, adott emissziós ciklus alatt (#/cm³),

PN_{23} : átlagos részecskeszám a 23 nm-es tartománytól, adott emissziós ciklus alatt (#/cm³),

W_{ciklus} : adott emissziós ciklus alatt végzett munka (kWh),

SPN_{10} : Szilárd részecskeszám 10 nm tartománytól (#/kWh),

SPN_{23} : Szilárd részecskeszám 23 nm tartománytól (#/kWh).

3.7.3. Gázkomponensek számítása

Az európai előírások szerinti gázkibocsátás (g/kWh) megadásához az egyes ideális gázok sűrűségére (g/dm³) van szükség standard nyomáson és hőmérsékleten, melyből először az adott gáz tömegáramát (g/s) számoltam ki. Szükség van még az adott gáz teljes ciklus alatt felvett és összegzett tömegadatára is. Ezek segítségével számolhatjuk az egyes gázkibocsátásokat az adott ciklus alatt elvégzett munka arányában.

Nitrogén-oxidokra (NO_x):

$$NO_{xP} = \frac{NO_{xm\ sum}}{W_{ciklus}} \quad (3.10)$$

Szén-monoxidokra (CO):

$$CO_P = \frac{CO_{m\ sum}}{W_{ciklus}} \quad (3.11)$$

Szén-dioxidokra (CO₂):

$$CO_{2P} = \frac{CO_{2m\ sum}}{W_{ciklus}} \quad (3.12)$$

Szén-hidrogének (THC):

$$THC_P = \frac{THC_{m\ sum}}{W_{ciklus}} \quad (3.13)$$

Oxigénre (O₂):

$$O_{2P} = \frac{O_{2m\ sum}}{W_{ciklus}} \quad (3.14)$$

(gáz komponens)_P : számított (gáz komponens) koncentráció (g/kWh),

(gáz komponens)_{m sum} : adott emissziós gáz komponens tömegadat összegezve (g),

W_{ciklus} : adott emissziós ciklus alatt végzett munka (kWh).

3.8. Az adatfeldolgozás folyamata, kiértékelési módszerek

A mérési eredmények rögzítésére és kiértékelésére kiértékelő algoritmusokat hoztam létre Microsoft Excel programban, melyben minden egyéb nem részletezett esetben az EU 595/2009-es szabályozásának és a 2017/1151/EU rendeletnek megfelelő kalkulációkat végeztem.

A mérésből, mérőberendezések hibájából adódó szélsőséges vagy értelmezhetetlen értékeket, az algoritmusok feltöltésekor és vizsgálatakor szűrtem. Az adatok további szűrésére az interkvartilis terjedelem analízist használtam. A megtisztított adathalmazt lineáris regresszióval elemeztem, és a standard maradékok segítségével határoztam meg, hogy mely további adatpontok számítnak kiugró értéknek (outlier). A modell relevanciájáról varianciaanalízissel, F-próbával győződtem meg (melyhez a normál eloszlás és a szórás vizsgálatát grafikus ellenőrzéssel végeztem). Hogy megbizonyosodjak arról, hogy az adott független változó szerepet játszik a vizsgált adattömbök, célváltozók leírásában, korrelációkeresést végeztem. Az adott közelítő függvénnyel leírható kapcsolat erősségét, az illeszkedés jóságát, az ún. determinációs együttható (R²), a korrelációs együttható négyzete jellemzi, melyet mindig feltüntettem az értekezésben.

Mindezzel feltártam a legjelentősebb magyarázó változókat, hatásaik elemzését a későbbiekben láthatjuk.

Az elemzések vizuális megjelenítésére leggyakrabban oszlopdiagramot vagy pontdiagramot használtam. Az oszlopdiagramokban a mért eredményeket átlagoltam, majd a szórási értékekkel együtt ábrázoltam, amely megmutatja, hogy a mérési eredmények mennyire szórnak az átlag (várható érték) körül.

Szükséges esetekben az eredmények megbeszélésénél további, az adott mérésekre vonatkozó kiegészítő magyarázatokat teszek

4. EREDMÉNYEK

A méréseimet a 3. pontban bemutatott felszerelésekkel, anyagokkal és módszerekkel végeztem. A méréseimet az alapján terveztem meg, hogy az eredeti célkitűzéseimnek a szakirodalmi összefoglaló által származtatott megállapításaira választ kaphassak. 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. Az általam létrehozott eredményeket és tartalmakat a tézisekben és a következtetésekben foglalom össze. A nagy terjedelmű, az eredmények közvetlen megértéséhez nem szükséges adatokat szűrő, feldolgozó és kiértékelő fájljaimat, méréseim azonosítóit, táblázataimat, a mellékletekbe foglalom.

4.1. A dízel emisszió utókezelő rendszer jellemző hőmérsékletein végbemenő reakciók vizsgálata

Az emisszió utókezelő rendszerben, - a gépjármű kipufogó rendszerében – végbemenő folyamatok a kipufogógáz hőmérsékletével szoros kapcsolatban állnak. Egyes kívánatos kémiai reakciók csak egy szűk hőmérséklettartományban mennek végbe, azonban léteznek olyan reakciók is, amelyek pedig csak egy bizonyos hőmérséklet fölött vagy hőmérsékletig játszódhatnak le számottevően. Katalizátorok jelenlétében egyes reakciók könnyebben, alacsonyabb hőmérsékleten is végbe mennek. A kipufogógáz utókezelő rendszer tekintetében, erre példának állíthatjuk a mesterséges módon kipufogógázzal érintkeztetett nemesfémeket (3 utas katalizátor, DOC), vagy pedig akár más kipufogógáz összetevők is katalizálhatják a kívánatos reakciókat (NO_2).

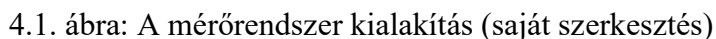
Nagyon fontos a kipufogógáz hőmérsékletének ismerete az egyes mérési pontokon, mert ezáltal megbecsülhetővé, leírhatóvá válnak a végbemenő reakciók, az eredményeket is könnyebben megérthetjük. Ennek megfelelően ebben az irányban is méréseket végeztem a jellemző hőmérsékletek megállapítására a tervezett emisszió utókezelő rendszer elemein. Összesítettem az itt végbemenő jelentős reakciókat a dízel oxidációs katalizátoron (DOC), a dízel részecskeszűrőn (DPF), melyeket táblázatosan összefoglaltam.

A kipufogó hőmérséklete változhat a terheléstől, a motortól, az aktuális kialakításban használt kipufogó alkatrészekről, a kipufogó elrendezéstől, a hosszúságoktól és az utókezelő rendszerek térfogatától függően. Azonban egy gépjárműtípuson (pl. személygépjármű) azonos hajtóanyag esetén és a kipufogógáz utókezelő rendszer, hajtómű generációjának nagyjából megegyezése esetén is, mint egy határolt rendszeren belül, nagyságrendileg nem tud eltérni.

Fontos viszont, hogy a hőmérsékleti tartományokat az egész kipufogórendszeren a legszélsőségesebb motorkondíciókat is figyelembe véve kell ellenőrizni. Ennek megfelelően a hőmérsékleteket egy normál alacsony terhelésű emissziós ciklus, mint például az NEDC során (3.2.1. fejezet), és egy felsőbb hőmérsékleti tartományban a korom regenerálása közben is vizsgáltam (3.2.2. és 3.2.3. fejezet). Ezen túl a hőmérsékleteket a részecskeszűrőben összegyűlt kritikus mennyiségű korom kontrollálatlan égése (Drop to Idle test - DTI) vagy más néven a szabályozatlan regeneráció során is ellenőriztem. Ez a vizsgálat az utókezelő rendszer és a részecskeszűrő üzemére a legkedvezőtlenebb kondíciókat modellezi, és a normál (nem hibás üzem) körülmények közt a legmagasabb hőterhelést okozza az utókezelő rendszernek (3.2.4. fejezet).

A vizsgálatokhoz egy 2000 cm^3 -es, soros, 4 hengeres, turbófeltöltős DW10 motort használtam, amely megfelel az EURO 5 emissziós előírásoknak. A motor közvetlen befecskendezésű hajtóanyag-rendszerrel, DOHC 16 szelepes alumínium ötvözetű hengerfejjel rendelkezik, 103 kW csúcsteljesítménnyel és 340 Nm nyomatékkal (3.4.2. fejezet).

Az emissziós utókezelő rendszer egy dízel oxidációs katalizátorból, egy katalitikus részecskeszűrőből áll. A hőmérséklet méréséhez 3,5 mm-es K-típusú hőelemeket használtam a kipufogórendszerben, valamint egy nyomásmérő eszközt analóg-digitális jelátalakítóval (4.1. ábra) (3.1.4. fejezet).



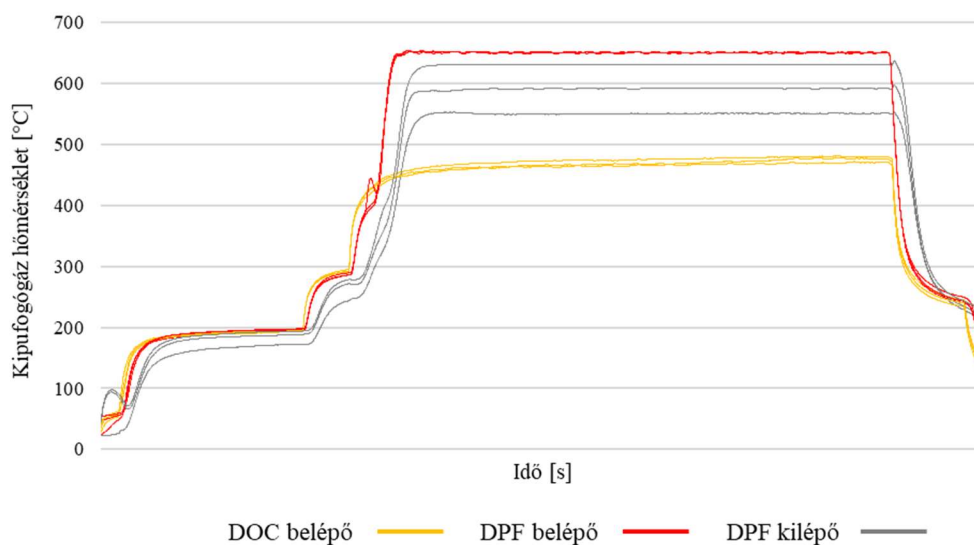
The graph displays the temperature of the exhaust gas over time for three different engine configurations. The y-axis represents the temperature in degrees Celsius, ranging from 0 to 350. The x-axis represents time in seconds, ranging from 0 to 1000. The three configurations are: DOC belépő (yellow line), DPF belépő (red line), and DPF kilépő (grey line). The DPF kilépő configuration shows the highest temperature, peaking at approximately 290°C around 850 seconds. The DPF belépő configuration peaks at approximately 250°C around 850 seconds. The DOC belépő configuration shows the lowest temperature, peaking at approximately 150°C around 850 seconds.

Idő [s]	DOC belépő [°C]	DPF belépő [°C]	DPF kilépő [°C]
0	20	20	20
200	100	100	100
400	150	150	150
600	120	120	120
800	150	150	150
850	150	250	290
1000	150	150	150

78

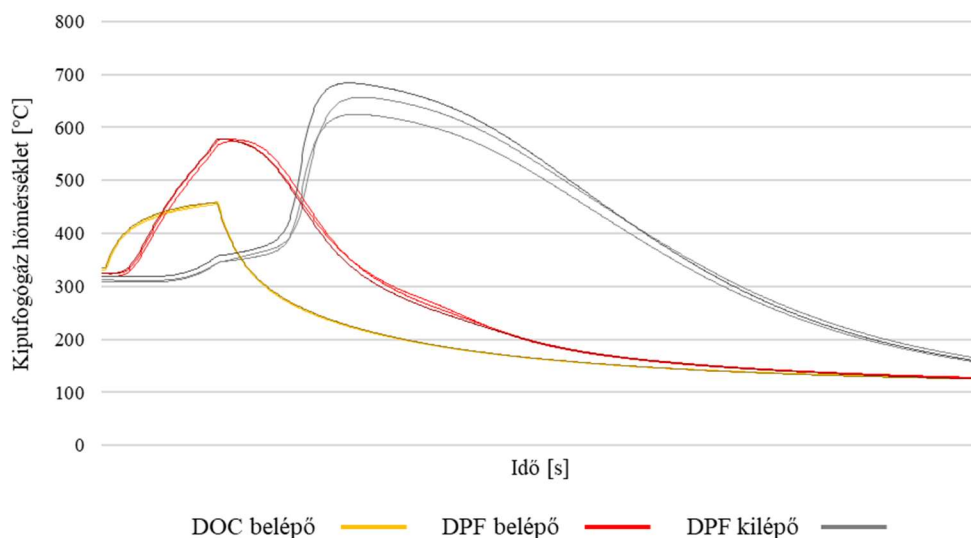
A nagy sebességű rész során viszont már ugyanazt a maximális DPF hőmérsékletet (291 °C) tapasztaltam a DPF előtt is, ami a DOC gyújtási hőmérsékletének elérésére utal és az optimális működés megkezdése miatt következnek be. Az DPF után csökken a hőmérséklet különbség a DOC belépő hőmérsékletéhez viszonyítva, a ciklus végén a hőmérséklet 259 °C-ot ért el.

A koromregenerálás során utóbefecskendezéssel megnőveltem a motor kipufogógáz hőmérsékletét (a DOC előtti hőmérséklet maximálisan 481 °C-ra emelkedett), és a DOC-on az el nem égett szénhidrogének tovább növelték a hőmérsékletet a DPF bemeneténél, ami így 600 °C fölé (maximálisan 653 °C) emelkedett. Ezzel a hőmérséklettel a szűrőt tökéletesen ki tudjuk égetni. A részecskeszűrőből kilépő hőmérséklet is jóval 500 °C fölé emelkedik (maximálisan 637 °C) (4.3. ábra).



4.3. ábra: Kipufogógáz hőmérsékletek a dízel részecskeszűrő regenerációja során

A szabályozatlan regeneráció során a DOC bemeneti hőmérséklete maximálisan 459 °C-ra emelkedett, amikor alapjáratra kapcsoltam. A DOC tovább növelte a hőmérsékletet, maximálisan 579 °C-ra, mielőtt alapjáratra esett volna. Ezután friss hideg levegő érkezett a kipufogóba, ami csökkentette a hőmérsékletet mind a DOC, mind a DPF előtt.



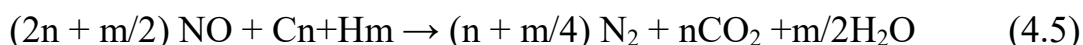
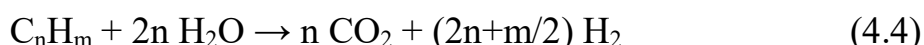
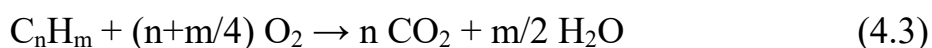
4.4. ábra: Kipufogógáz hőmérsékletek a dízel részecskeszűrő szabályozatlan regenerációja során

De az oxigénben gazdag levegő miatt kontrollálatlan rövid lefolyású égés következik be a DPF-ben így gyors hőmérséklet-emelkedés tapasztalható a nem szabályozott égés miatt. A DOC után 684 °C maximális hőmérsékletet mértem (4.4. ábra). Kivéve, a rendellenes motorüzem módot (ami lehetséges motorhibák miatt következhet be), a motor kipufogógáz hőmérséklete körülbelül 150 °C és 700 °C között mozog. Ha a vizsgált kipufogórészre bontjuk le, a következőket láthatjuk:

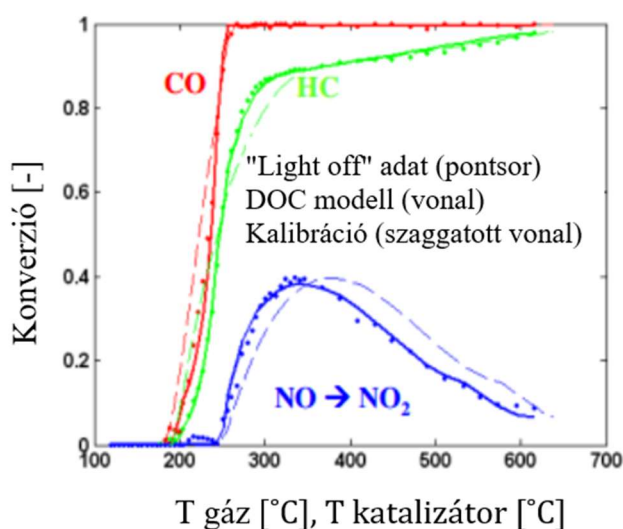
- A DOC bemeneténél ~ 150 °C és 481 °C között
- A DPF bemeneténél ~ 150 °C és 653 °C között

Annak ellenére, hogy távolodunk a motortól, a maximális hőmérsékleti értékek emelkednek a katalizátor hatása miatt.

A 150-700 °C közötti hőmérsékleti tartomány elősegíti a kipufogógáz több alkotójának oxidációját oxigénnel, amely a dízel kipufogógázban bőségesen jelen van. A katalizátoron a következő fő reakciók játszódnak le (Kalló 2000):



A katalizátor gyújtási hőmérséklete (catalyst light off) az a hőmérséklet, ahol az adott reakció 50- %-os átalakulást ér el. A DOC-ban a fenti reakciók esetében ez körülbelül 250 °C (4.5. ábra).



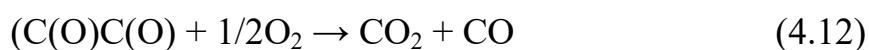
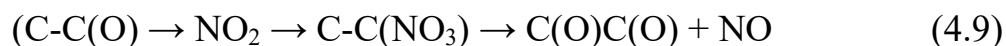
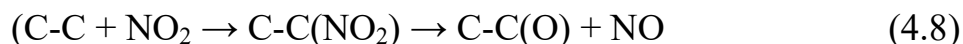
4.5. ábra: Átalakulási görbék a DOC-ban (Katare, 2014)

Az NO –ból keletkező NO₂ minél nagyobb mennyisége elengedhetetlen a modern dízel emissziócsökkentő rendszerek működéséhez. A nitrogén-dioxidra szükség van a dízel részecskeszűrők (DPF) passzív regenerálásának elősegítéséhez és egyéb, itt nem tárgyalt emisszió utókezelő rendszerek (pl. SCR) teljesítményének növeléséhez és. Ezeket az alkalmazásokat általában a magas NO₂ termelésre optimalizálják. Ahogy korábban tárgyaltam,

a DPF regenerációja 550 °C felett megy végbe jelentősen, melyet a következő reakcióegyenlettel tudjuk leírni:



Katalizátoranyaggal bevont szűrő esetén ez a folyamat már 250–300 °C-on végbemegy. NO₂ jelenlétében az oxidáció hőmérséklete pedig még tovább csökkenhet (200–500 °C) (Strzelec 2016). Ennek a folyamatnak a fő lépései a köztes termékekkel az alábbiakban láthatók (Mataresse 2017):



Az reakciók hőmérséklet függvényében való összefoglaló táblázata az M3. mellékletben található. Az emissziós utókezelés szempontjából a kipufogórendszerben lejátszódó legtöbb kívánatos reakció exoterm, és a katalizátorok elősegítik ezeket a reakciókat. A vizsgálataimból látható, hogy ezek a rendszerek milyen hatékonyan működnek, és hogyan emelik a hőmérsékletet a DOC-ban és a DPF-ben. Annak ellenére, hogy távolodunk a motortól a kipufogóban, a maximális hőmérsékleti értékek emelkednek a rendszer elemeinek, a DOC-nak, és az DPF-nek a katalitikus hatása miatt, több üzemmód során is.

Tekintettel az emissziós ciklus során tapasztalt viszonylag alacsony hőmérsékleti tartományra (~130–250 °C), a platina - palládium típusú DPF kedvezőbb a további vizsgálataimhoz alacsony hőmérsékleti üzemi tartománya miatt (Kim, et al., 2011).

Az irodalmi kutatás során számos publikációban (2.4. fejezet) láthatjuk a víz, erős katalitikus hatását, ezért a további vizsgálataim során, amikor a vízbefecskendezést hozzáadtam a rendszerhez, figyelembe kellett vennem az új reakcióutakat is. Ilyen a már említett, szorosan ide tartozó palládium tartalom, ami - ahogy azt kifejtettem a 2.4.9. fejezetben - szintén fontos a NO₂ arányának növekedésében.

Ebben a fejezetben a célkitűzéseimnek megfelelően megvizsgáltam a kipufogórendszerben végbemenő reakciókat és hőmérsékleteket, mellyel a vízbefecskendezés nélküli alapállapotú rendszer körülményeit mértem fel.

4.2. A páratartalommal kapcsolatos vizsgálatok eredményei

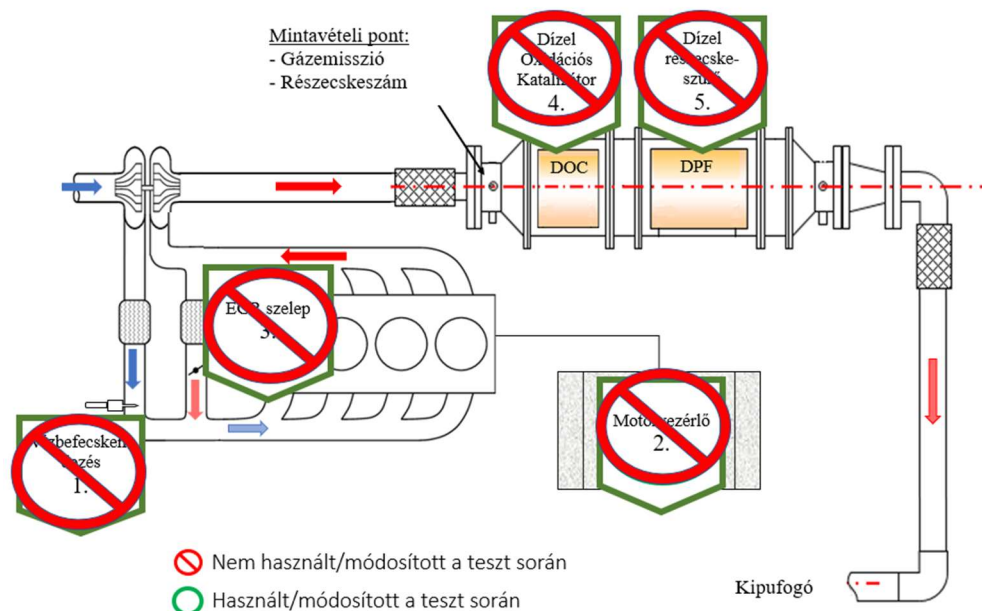
A belsőégésű motorok működése során az égési folyamat fő alkotórészei az hajtóanyag és a levegő. A hajtóanyag összetevő lehetőségeit és hatásait széles körben vizsgálták, de a másik összetevőre, a levegőre jelentősen kevesebb figyelmet fordítanak. Ezt fix paraméternek tekintik, de legalább az egyik összetevője,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

Elengedhetetlen, hogy megfelelő áttekintést kapjunk erről a területről, mely alapot jelent az ezen a területen végzett további vizsgálatokhoz. A levegő nedvességtartalma különösen fontos dízel motorok esetében, ami levegőfelesleggel üzemel.

Könnyű teherautó motort (EURO V/EEV kompatibilis, soros 6 hengeres OM926 típusú) választottam ki a páratartalom adatok vizsgálatára (3.4.3. fejezet). A választott motor modellen

nincs kipufogógáz visszavezetés (EGR), ami lehetővé teszi számomra, hogy elkerüljem az EGR és a páratartalom közötti esetleges átfedéseket (Ishida és Chen, 1994; Wei, et al., 2022), és zavaró körülmények nélkül vizsgálhassam a páratartalom által kifejtett hatásokat.

A méréseket Horiba tesztcellán végeztem (3.5. fejezet). A gázkomponens adatok gyűjtésére, mint a nitrogén-oxidok (NO/NO_x), szén mono- és dioxidok (CO/CO₂), oxigén és szénhidrogén (THC - teljes szénhidrogén), Horiba MEXA 7500 készüléket használtam (3.1.3. fejezet).

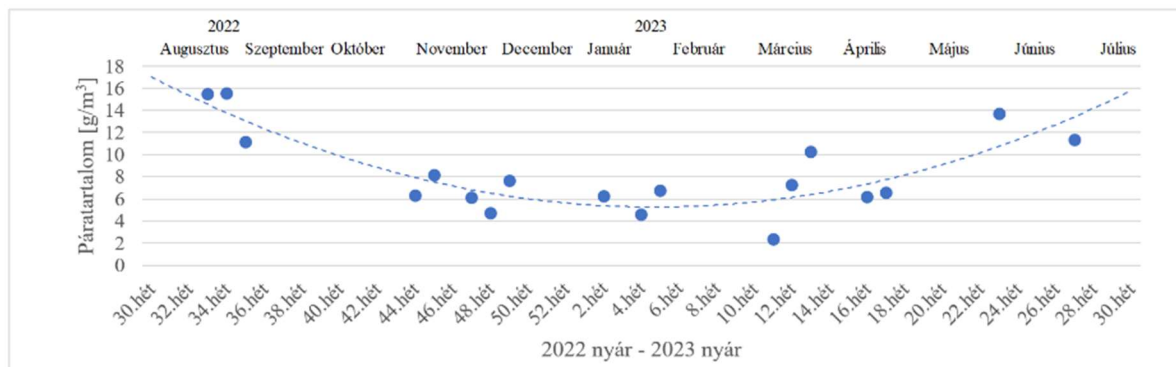


4.6. ábra: A mérőrendszer kialakítás

A részecskeszám meghatározására, a 10 nm részecskeméret tartományban az AVL APC489 készüléket használtam, míg a CPC488 készüléket a 23 nm-es és nagyobb részecskeméretekhez alkalmaztam (3.1.1. fejezet) (4.6 ábra). A mérés során nyers kipufogógázokat mértem, és magas (20000-es) hígítási tényezőt alkalmaztam a részecskeszámláló eltömődésének elkerülésére.

A kísérletekhez a korábban a 3.2.1. fejezetben bemutatott statikus WHSC ciklust választottam, amely biztosítja az eredmények jobb összehasonlíthatóságát. A mérés 3 fő lépésből áll, előkezelésként WHSC mód 9. ciklust futtattam, majd egy 5 perces pihentetés után maga a WHSC ciklus következik, melynek az adatai láthatók az eredményeimben. Az abszolút páratartalom kiszámításához (3.7.1. fejezet) 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 (4.7. ábra) (M4. melléklet).



4.7. ábra: Páratartalom mérések egy év intervallumban

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.

A mérési adatsorok közül a kiugró adatsorokat a 3.3. fejezetben leírtak szerint szűrtem ki, majd részletes statisztikai analízist végeztem ezeken (CD melléklet). Varianciaanalízist használtam a modell relevanciájának ellenőrzésére (4.1. táblázat). A szignifikanciaszint a CO esetében nem teljesíti a $p < 0,05$ értéket, így a továbbiakban ezzel nem foglalkoztam. A többi esetben viszont a modellek alkalmazhatóak.

A korreláció keresés során a vártaknak megfelelően a páratartalom és a PN_{10} , PN_{23} , NO_x között megfelelően erős a korreláció (4.2 táblázat).

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

	PN_{10}	PN_{23}	NO_x	CO	THC	CO ₂	O ₂
p szignifikancia szint	0,0085	0,0090	0,0000	0,0679	0,0245	0,0001	0,0200

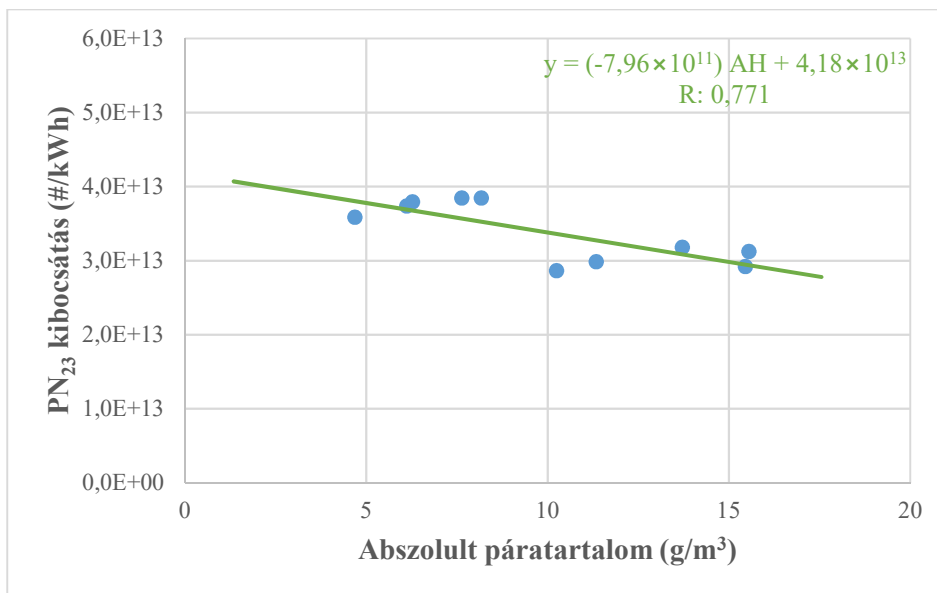
4.2. táblázat: Korreláció vizsgálat a páratartalom és a részecske és gázemissziók között

	Páratartalom	PN_{10}	PN_{23}	NO_x	CO	THC	CO ₂	O ₂
R érték	1,000	-0,718	-0,771	-0,897	0,440	-0,576	0,870	-0,658

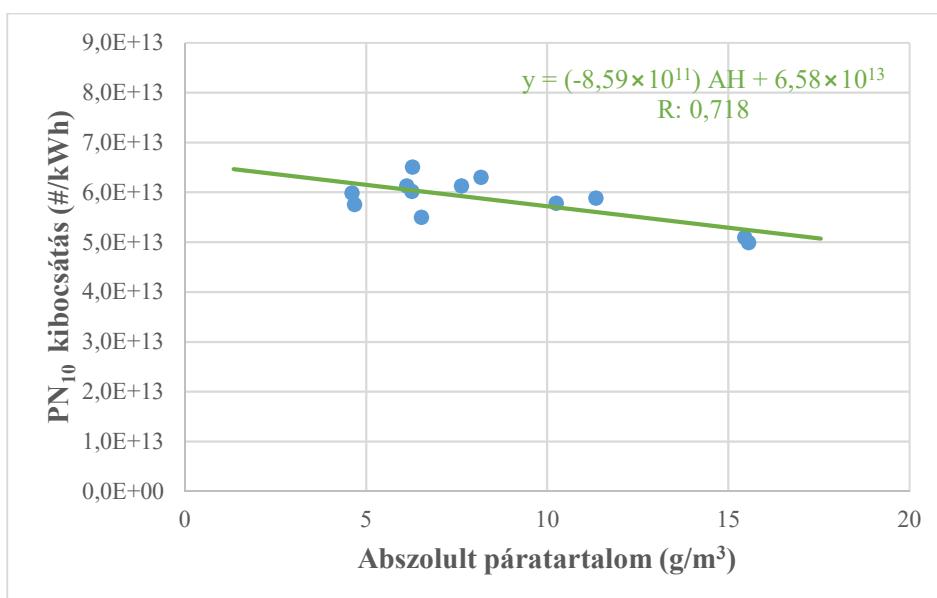
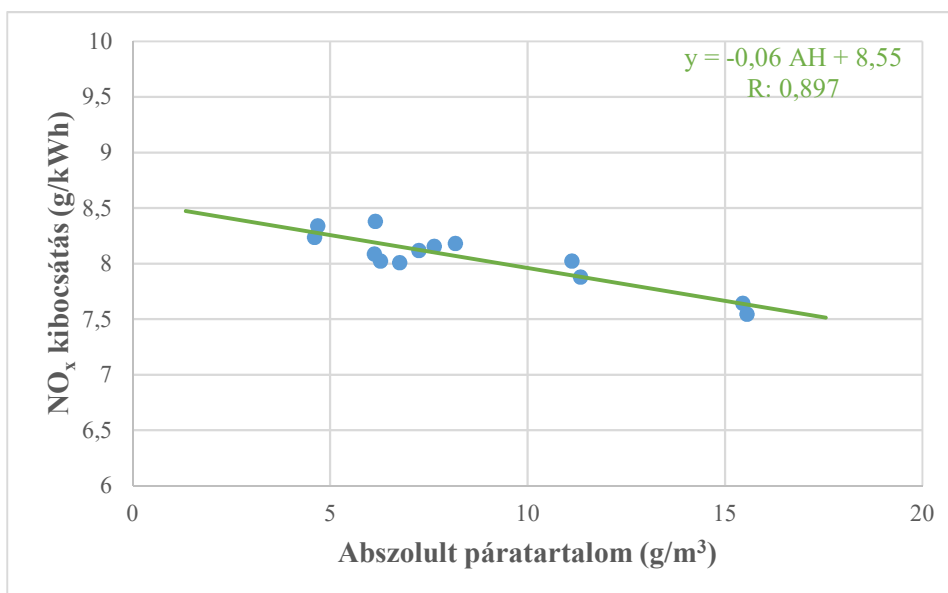
A regressziós vizsgálatok alapján lineáris függvénykapcsolat áll fenn a változók között. Az eredmények 4.8., 4.9., és a 4.10.-es ábrákon láthatók.

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 $NO_x = -0,06 AH + 8,55$.



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

4.9. ábra: PN₁₀ kibocsátás a páratartalom függvényében4.10. 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 4.3 táblázatban láthatjuk.

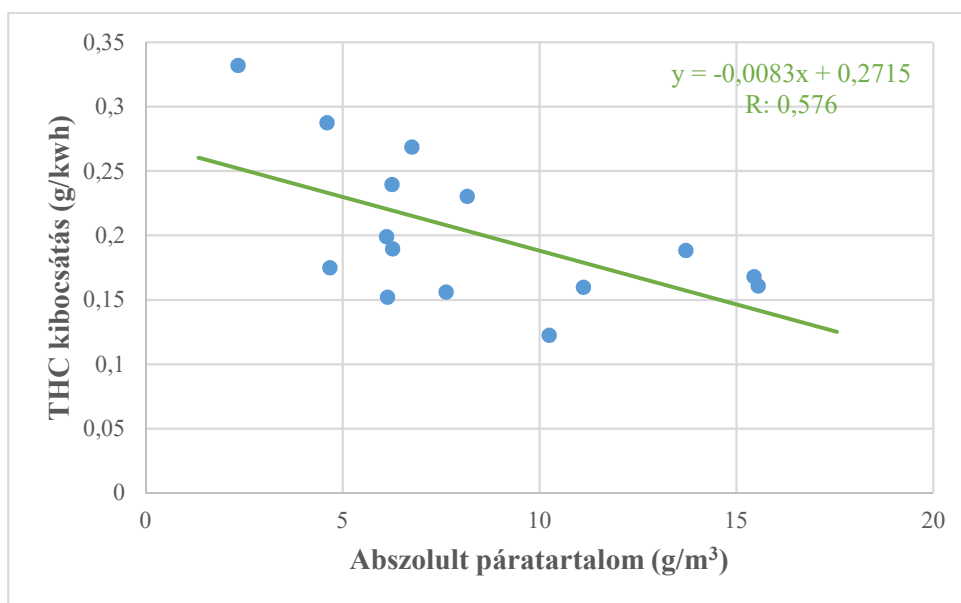
4.3. táblázat: Kibocsátások csökkenése a modellek alapján az évi páratartalom ingadozásokkal

	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 %

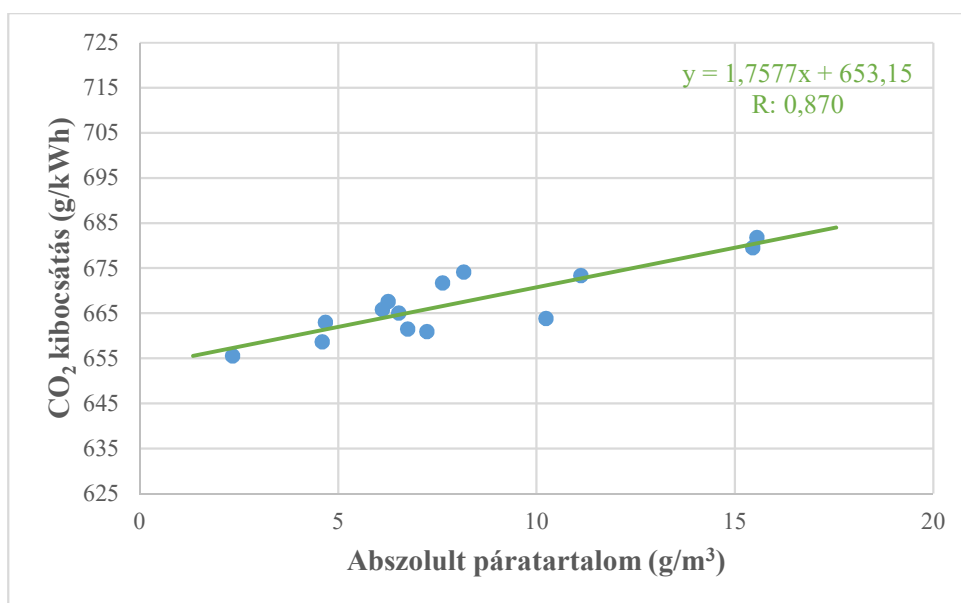
A legjelentősebb kibocsátásokban mért különbséget a 23 nm fölötti részecskék esetén láthatjuk, ami 26,35 %. Ezt követi az ultrafinom részecskék eredménye 17,80 %-kal, illetve a nitrogén-oxidok 9,29 %-os eltérése. Ezen eredmények további értelmezését segítik a kiegészítő gázemissziós mérés eredményei is (4.11. - 4.13. ábra).

A gázemissziók eredményeit elemezve megállapítottam, hogy a páratartalom növekedésével:

- A CO₂ kibocsátás egyértelmű növekedést mutat (4.12. ábra). Figyelembe véve a 2.1.1 fejezetben részletezett 2.1-2.2. egyenleteket, és azt, hogy az hajtóanyag befecskendezésében nem történt változás, arra a következtetésre jutottam, hogy az oxidáció és az égés teljesebbé vált.
- Bár a lineáris regresszió illeszkedése a THC kibocsátás esetében alacsonyabb értéket adott (4.11. ábra), csökkenő tendenciája összhangban van és alátámasztja a teljesebb oxidációval kapcsolatos megállapítást, amelyet a CO₂ adataim elemzése során is feltételeztem.

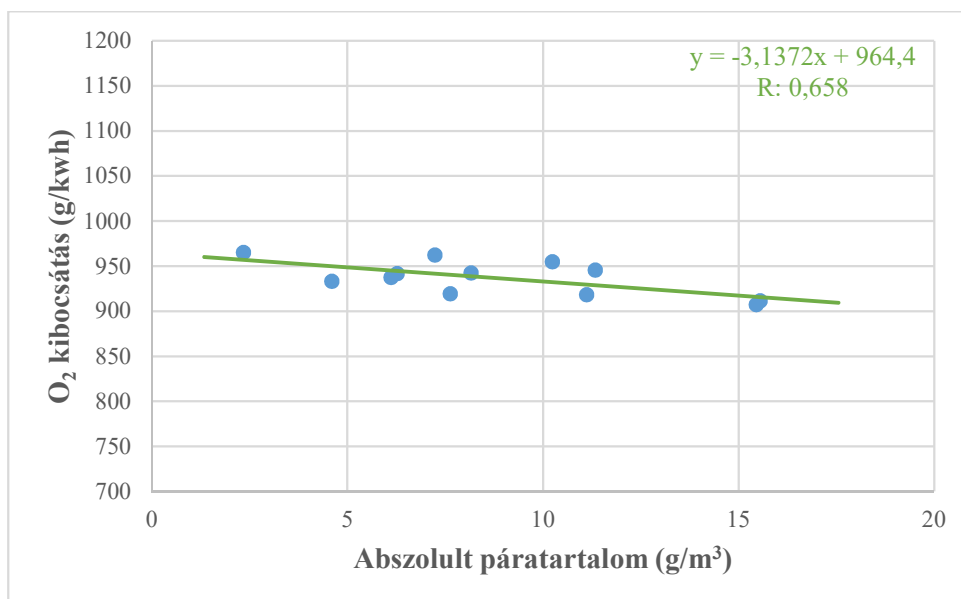


4.11. ábra: THC kibocsátás a páratartalom függvényében



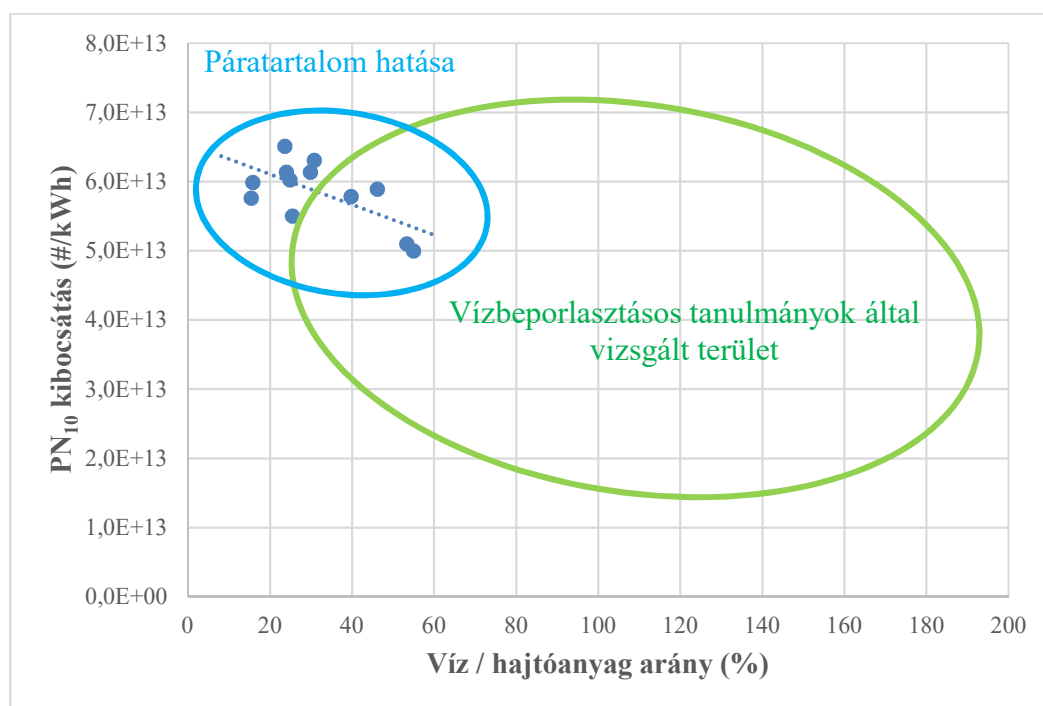
4.12. ábra: CO₂ kibocsátás a páratartalom függvényében

- Az elégetlen szénhidrogének csökkenése direkt összefüggésben van (2.4.3. fejezet) a részecskekibocsátással is, melynek csökkenését korábban a fejezetben megállapítottam.
- Tovább magyarázza ezt az oxigénszint lassú csökkenése is (4.13. ábra), amely a CO₂ kibocsátás növekvő értékeivel összefüggésben látható.



4.13. ábra: CO₂ kibocsátás a páratartalom függvényében

Az eredményeket átszámoltam a víz/hajtóanyag arányra (3.7 egyenlet) melyet a vízbefecskendezéssel kapcsolatos tanulmányok használnak mértékegységként a hengerterbe bejuttatott vízmennyiség meghatározására. A jellemzően vizsgált befecskendezési mennyiségek mellett (Hadidi, et al., 2023; Pamminger, et al., 2020; Wei, et al., 2022), a 4.14. ábrán feltüntettem a páratartalomból adódó eredményeket, amellyel jelentős átfedés mutatkozik.



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

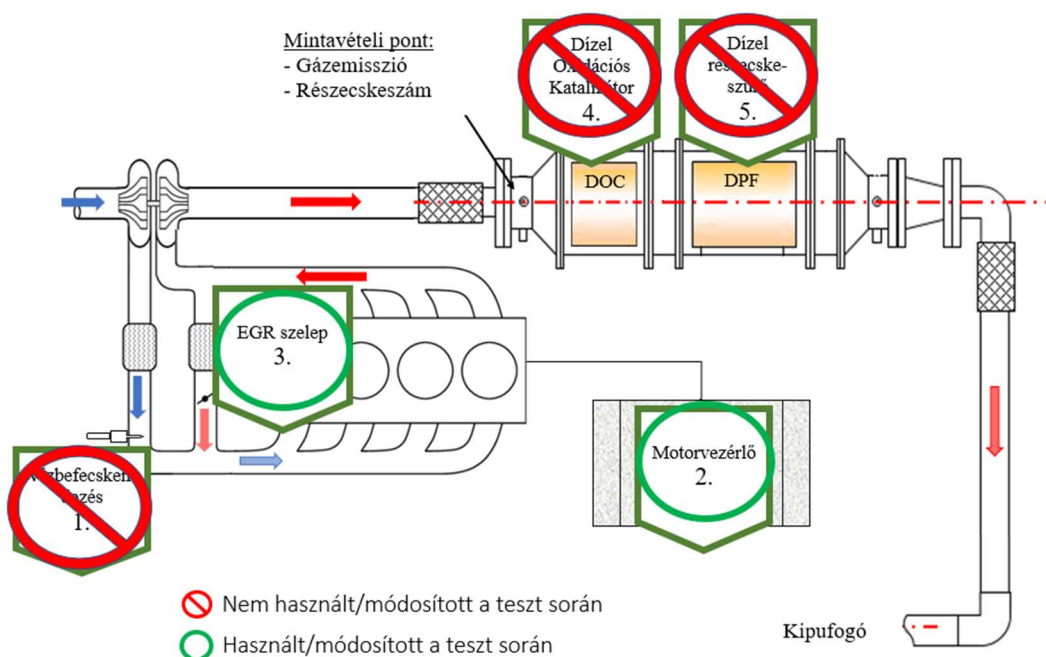
A páratartalommal nem kalkulálva az eredményekben így jelentős torzulásokat okozhat a levegőben jelen lévő változó mennyiségű páratartalom. Ez jelentősebb problémát okozhat olyan környezetben, ahol Magyarország meglehetősen száraz klímájához képest magasabb a páratartalom. A levegő, mint az égési folyamat egyik fő tényezője, páratartalmával is jelentős hatással van a belsőégésű dízelmotor égési folyamataira. Kibocsátásokra gyakorolt hatását ebben a fejezetben feltártam és bizonyítottam. Az új EURO 7 jogszabályhoz kapcsolódóan új még nem publikált eredmény, a páratartalom hatása a 10 nm-es mérettartomány emissziójára. Ebben a fejezetben a célkitűzéseim 4. pontjának megfelelően megvizsgáltam a páratartalom hatásait a károsanyag emissziókra, melyekből a vízbefecskendezéses tesztek előtt már fontos következtetéseket tudtam levonni.

4.3. Kipufogógáz visszavezetés vizsgálatai

Nehézgépjármű motor (EURO VI-d kompatibilis, soros 6 hengeres Volvo D13-TC típusú) került kiválasztásra az EGR változás NO_x -ra és részecskékre gyakorolt hatásainak vizsgálatára (3.4.4. fejezet).

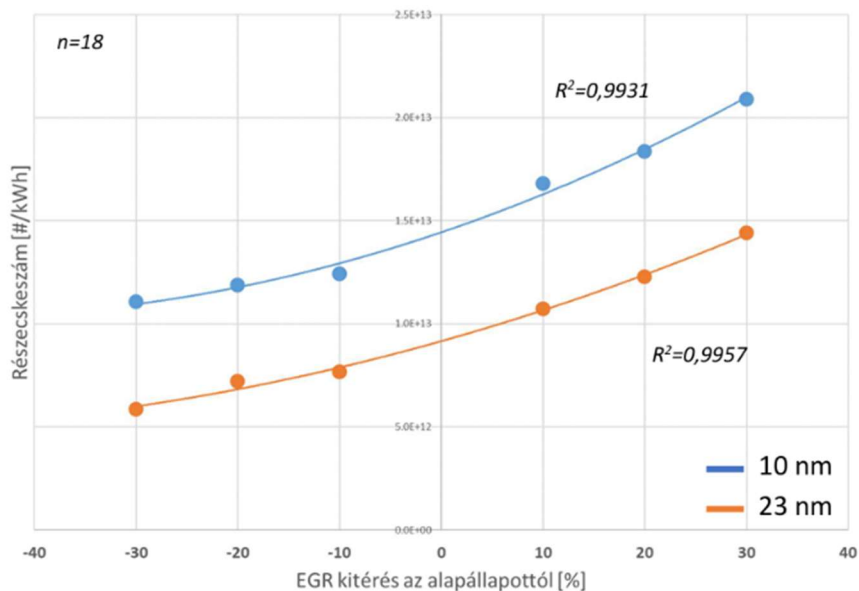
A méréseket AVL tesztcellán végeztem (3.5. fejezet). A gázkomponens adatok gyűjtésére, mint a nitrogén-oxidok (NO/NO_x), AVL AMA i60 készüléket használtam (3.1.3. fejezet). A részecske szám meghatározására a 10 nm részecskeméret tartományban az AVL APC489 készüléket használtam, míg a CPC488 készüléket a 23 nm-es és nagyobb részecskeméretekre alkalmaztam (3.1.1. fejezet). A mérés során nyers kipufogógázokat mértem, és magas (10000-es) hígítási tényezőt alkalmaztam a részecskeszámláló eltömődésének elkerülésére (4.15 ábra). A kísérletekhez a korábban a 3.2.1. fejezetben bemutatott statikus WHSC ciklust választottam, amely biztosítja az eredmények jobb összehasonlíthatóságát. A mérés 3 fő lépésből áll, előkezelésként WHSC mód 9. ciklust futtatom, majd egy 5 perces pihentetés után maga a WHSC ciklus következik.

A kutatás első részében a dízelmotor kipufogógázában található szilárd részecskék számát vizsgáltam az EGR szelep százalékos állításának függvényében. Két részecskeméretet vizsgáltam: 10 nanométeres és nagyobb, valamint 23 nanométeres és nagyobb részecskéket



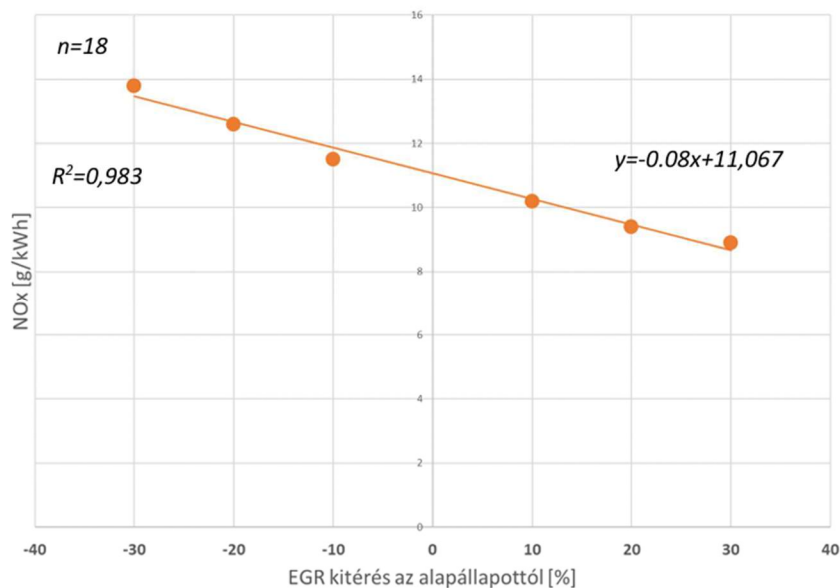
4.15. ábra: A mérőrendszer kialakítás

. A 3.8. fejezetben részletezett adatelemzési folyamatokhoz képest itt első lépésként hierarchikus felosztó klaszteranalízist alkalmaztam, mellyel képessé váltam az adatok hierarchikus csoportokba rendezésére az adatok közötti szerves kapcsolatok és hasonlóságuk alapján.



4.16. ábra: Részecskék számának változása az EGR-rel

A kapott adatokat polinomiális regressziós modellel elemeztem. A 10 nm-es részecskeszámokra az R^2 érték 0,9931, míg a 23 nm-es részecskeszámokra 0,9957. Ez azt jelenti, hogy a modell nagyon pontosan képes leírni a részecskeszámok változását az EGR szelep állításának függvényében. A modell eredményei alapján megállapítható, hogy az EGR szelep nyitási értékének növelése jelentősen növeli a szilárd részecskék számát a kipufogógázban (4.16. ábra).



4.17. ábra: NO_x kibocsátás változása az EGR-rel

A kutatásom második részében az EGR szelep nyitási értékének változása és a dízelmotor NO_x kibocsátása közötti összefüggést vizsgáltam. A vizsgálat során a motor EGR szelepét -30 %-

tól +30 %-ig, 10 %-os lépésekben állítottam be, és rögzítettem a NO_x kibocsátás mértékét g/kWh-ban.

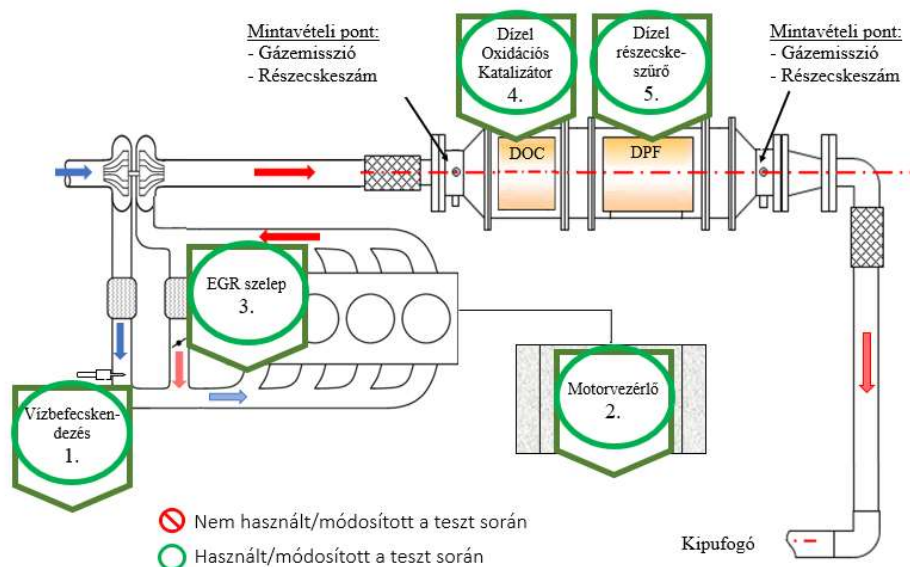
A kapott adatokat lineáris regressziós analízissel modelleztem, amelynek R² értéke 0,983. Ez azt jelenti, hogy a modell 98,3 %-ban képes magyarázni a NO_x kibocsátás változását az EGR szelep nyitási értékének függvényében. A modell eredményei alapján egyértelműen megállapítható, hogy az EGR szelep nyitási értékének növelése jelentősen csökkenti a NO_x kibocsátást (4.17. ábra).

A kutatás eredményei alapján megállapítható, hogy az EGR szelep nyitási értékének beállítása jelentős hatással van a dízelmotor NO_x kibocsátására és a szilárd részecskék számának változására. Ha az NO_x egyenes arányosságnak megfelelően csökken, a részecske kibocsátás az EGR nyitását növelve egyre nagyobb arányban romlik. Impakt faktoros (scopus Q1) publikáció készült az eredmények felhasználásával.

Ezeket az eredményeket az EGR és vízbefecskendezés összehangolásánál terveztem felhasználni. A későbbiekben kifejtettek alapján ez a lépés elhagyhatóvá vált.

4.4. A vízbefecskendezés teljes emissiókezelő rendszerre kifejtett hatása

A mérések kivitelezésére egy PSA HDI (high-pressure direct injection) közvetlen befecskendezéses DV6 1.6 L (1560 cm³) motort használtam (3.4.1. fejezet.). A mérés során használt szívócsonk befecskendező rendszert a 2.4.6 és a 3.3. fejezetben mutattam be. A teljes emissió kezelő rendszert használtam a DOC –val és DPF –el együtt. A vizsgálatokat egy Horiba HT460 tesztcellán végeztem (3.5. fejezet), amely teljes kondicionáló rendszert tartalmaz a folyadékok (hűtő, hűtött víz, hajtóanyag) és a levegő kontrollálására. A Horiba MEXA 7500 készüléket a nitrogén-oxidok (NO/NO_x), szén-oxidok (CO/CO₂), oxigén és szénhidrogén (THC - összes szénhidrogén) gázkomponensek adatgyűjtésére használtam (3.1.3. fejezet). A 10-23 nm közötti részecskék mérésére az AVL APC489 berendezést, a 23 nm-es és annál nagyobb méréseknél pedig a CPC488 készüléket használtam (3.1.1. fejezet) (4.18. ábra). A vizsgálat során nyers kipufogógázt 10000-es hígítási tényezővel a teljes rendszer után pedig 100-as hígítást használtam a részecskeszámláló eltömődésének elkerülése érdekében. A méréseket valós ECE 15, EUDC, NEDC és WLTC emissziós ciklusokkal (3.2.1. fejezet) futtattam (M5. melléklet).

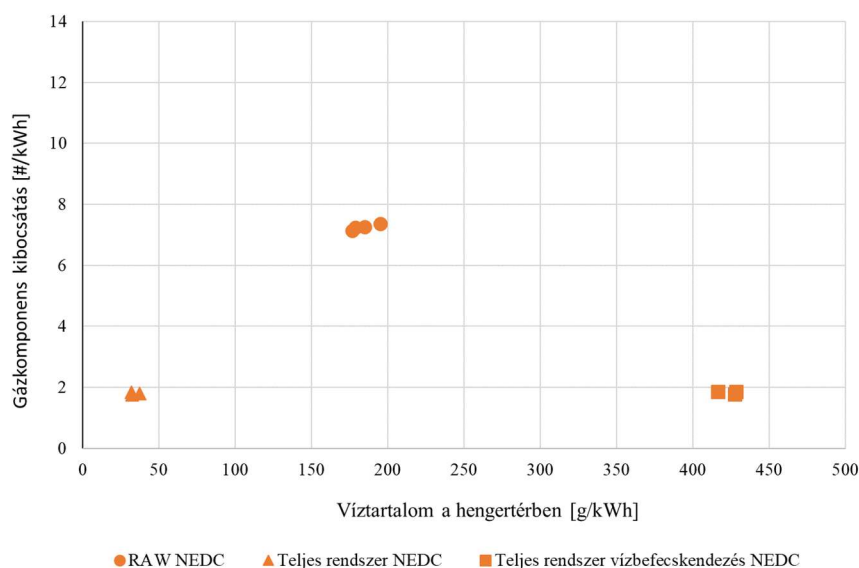


4.18. ábra: A mérőrendszer kialakítás

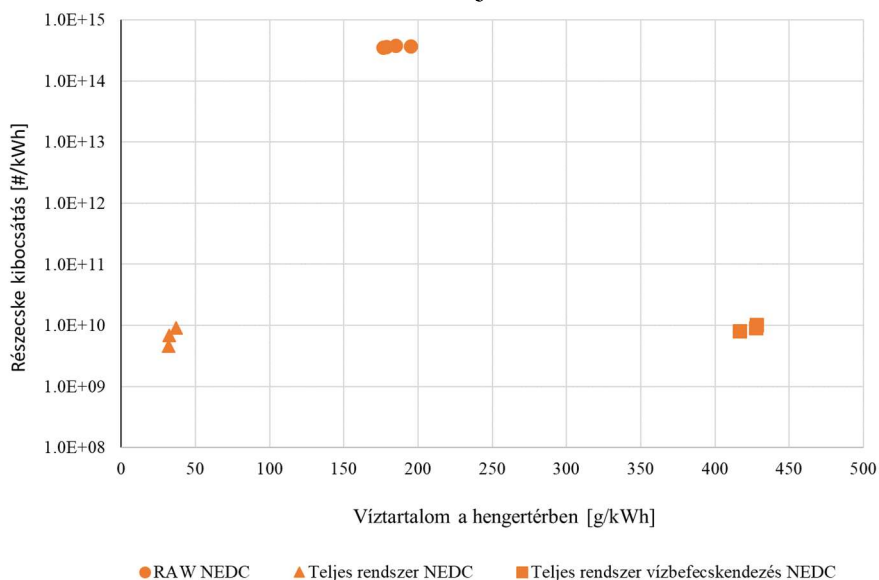
4.4.1. Eredmények NEDC ciklussal

A 4.19.-4.20. ábrán láthatjuk a nyers emisszió mellett a teljes emissziókezelő rendszerben a vízbefecskendezés hatását. A vízbefecskendezés hozzáadásával itt látszólag nincs jelentős változás sem a NO_x sem pedig a 23 nanométeres részecske emissziókban.

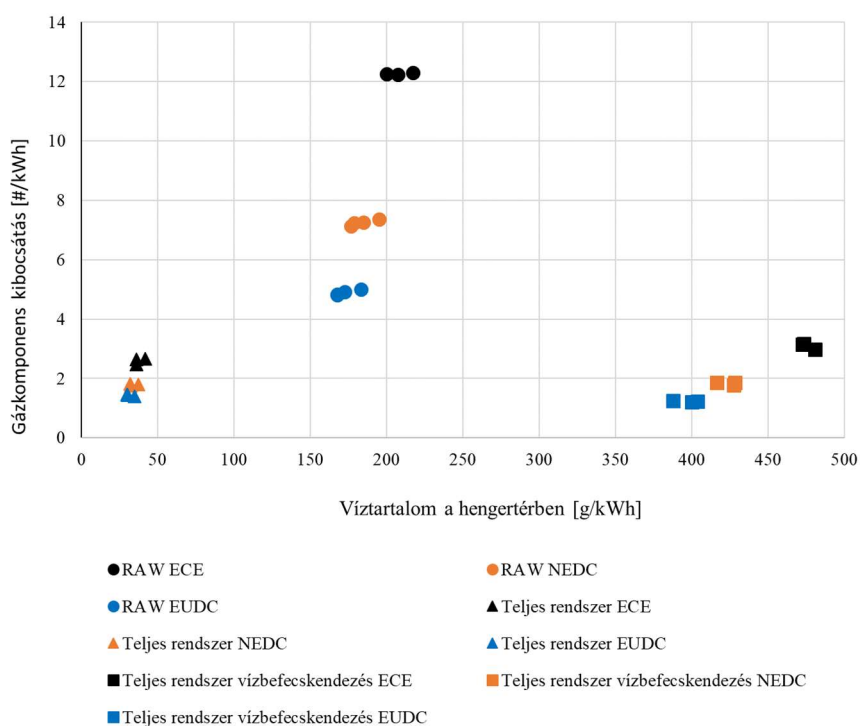
Hogy az eredményeket jobban megértem az ECE 15 és az EUDC (4.21., 4.22. ábra) ciklust külön-külön is megvizsgáltam. A nitrogén-oxidok esetében az látható, hogy az alacsony sebességű ECE 15 ciklus alatt, jelentősen magasabb a nyers emissziója a motornak, több mint duplája az EUDC ciklus alatt mértnek. A 4.23. ábrán jól látszik, hogy az alapjátról való hirtelen terhelésváltásoknál ugrik meg a nitrogén-oxidok emissziója, az hajtóanyagellátásban fellépő hirtelen változás és a levegő töltet változása közti eltérés hatásaként (Hagena, et al., 2006).



4.19. ábra: NO_x részecskekibocsátás a teljes mérőrendszerrel NEDC ciklus alatt

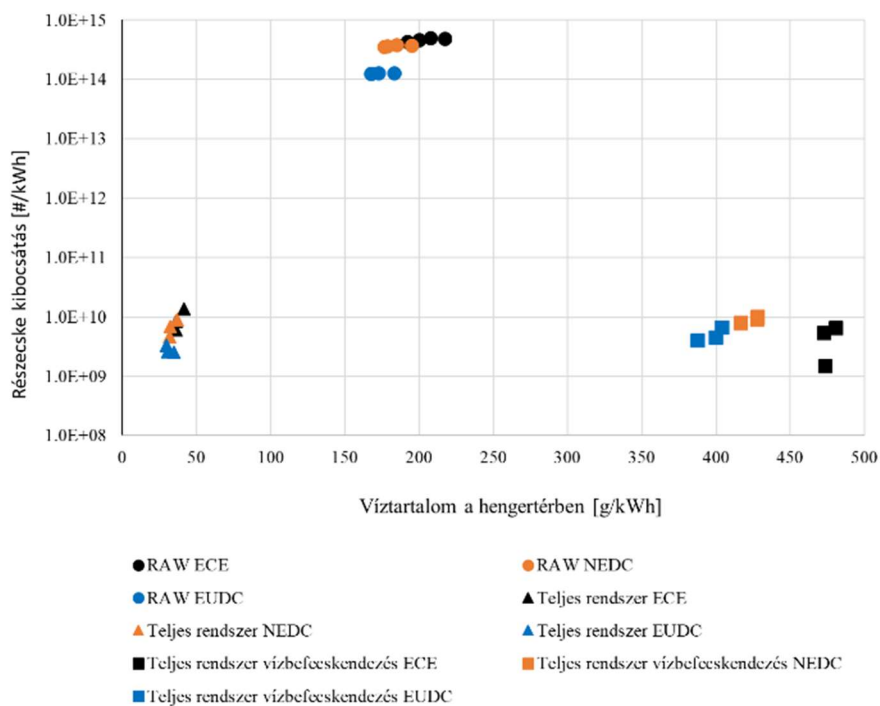


4.20. ábra: PN_{23} részecskekibocsátás a teljes mérőrendszerrel NEDC ciklus alatt



4.21. ábra: NO_x részecskekibocsátás a teljes mérőrendszerrel ECE 15, EUDC, és NEDC ciklus alatt

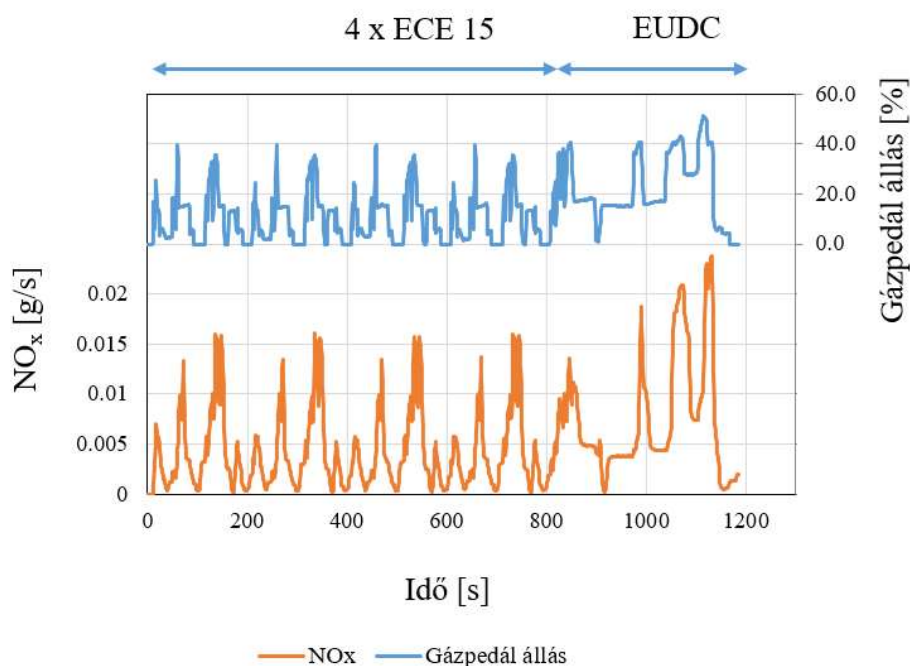
A 4.21. és 4.22. ábrát összehasonlítva a vízbefecskendezéssel a nitrogén-oxidoknál az látszik, hogy az alacsony terhelésű ECE 15 ciklusnál a víznek nincs hatása az eleve alacsony hőmérsékletek miatt (> 200 °C) ahogy az a 4.24. ábrán is látszik (turbina kilépő hőmérséklet – utókezelő rendszer nélkül).



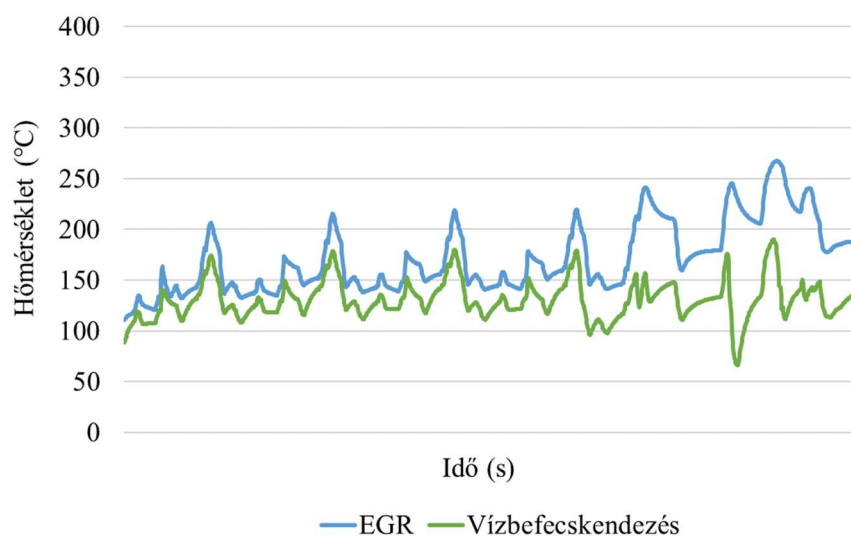
4.22. ábra: PN₂₃ részecskekibocsátás a teljes mérőrendszerrel ECE 15, EUDC, és NEDC ciklus alatt

Illetve az miatt is hogy a legalacsonyabb terhelésű ciklus lévén, az alacsony töltőnyomások miatt a vízbefecskendezés mennyisége is alacsony (csak a 20 kPa töltőnyomás elérésétől kezdve fecskendez). Az EUDC ciklus alatt a befecskendezett víz mennyisége növekedik a növekvő töltőnyomással (4.25. ábra). A DOC bemenő hőmérsékleteket megvizsgálva láthatjuk, hogy a vízbefecskendezés ~50 fok csökkenést okoz a kilépő kipufogógázoknak az EUDC alatt. Ez a NO_x kismértékű csökkenését okozza (4.21. ábra).

Az ECE 15 ciklus alatti alacsony hőmérsékletek miatt a DOC nem üzemel sem vízbefecskendezéssel sem pedig az nélkül, így az el nem égett szénhidrogénekből származó részecske kibocsátást láthatjuk. Az ECE 15 ciklus alatt a nyers emisszió jelentősen jelentősen magasabb az EUDC ciklushoz képest a terhelésváltások, turbó késlekedése miatti levegőhiány és nem megfelelő keveredés, illetve a hengerfalat elérő hajtóanyag miatt (Hagena, et al., 2006).



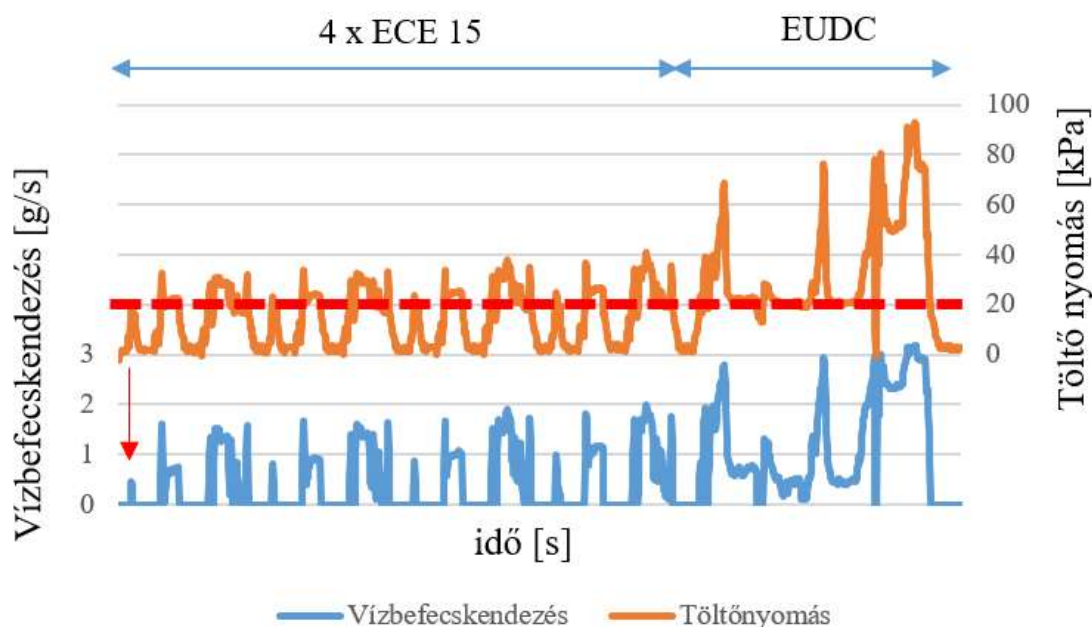
4.23. ábra: Nitrogén-oxid kibocsátás a teljes NEDC ciklus alatt



4.24. ábra: Motorból kilépő kipufogógáz hőmérséklet különbségek utókezelő rendszer nélkül vízbefecskendezéssel és EGR-rel a teljes NEDC ciklus alatt

Alacsony terheléseken, alajáráthoz közel, a motorolajból is emelkedett mennyiségű részecskékibocsátás származtatható (Stumpf, et al. 2007). A kipufogógázban lévő alacsony hőmérsékletek miatt a DOC nem üzemel sem vízbefecskendezéssel sem pedig az nélkül így az el nem égett szénhidrogénekből származó részecske kibocsátást láthatjuk.

A legjelentősebb változást az ECE 15 vízbefecskendezés esetén láthatjuk (4.22. ábra), a részecskékibocsátás csökkenésével, ami mutatja a vízbefecskendezés előnyét a többi emissziócsökkentő technikával szemben.



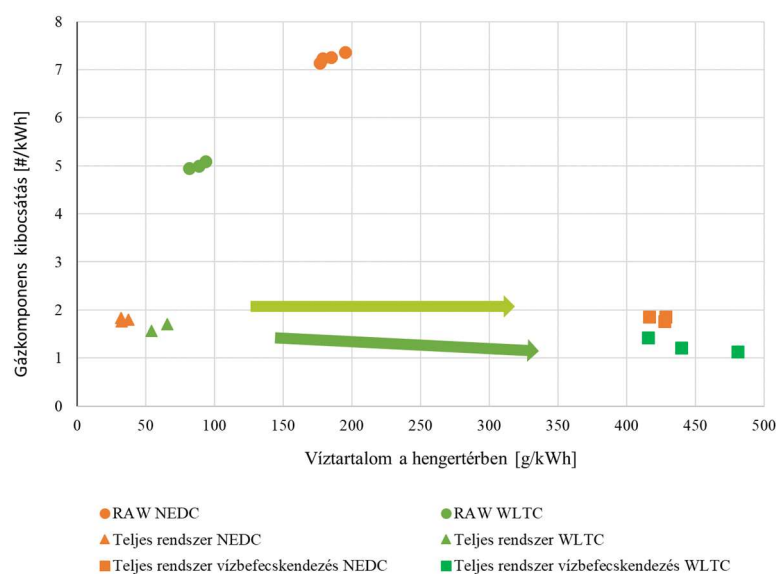
4.25. ábra: Vízbefecskendezés szabályozása az NEDC ciklus alatt

Ebben a fejezetben a célkitűzéseim 5. pontjának megfelelően megvizsgáltam a vízbefecskendezés hatását a teljes emissziókezelő rendszerre és a károsanyag kibocsátásokra a régi alacsony terhelésű NEDC ciklussal.

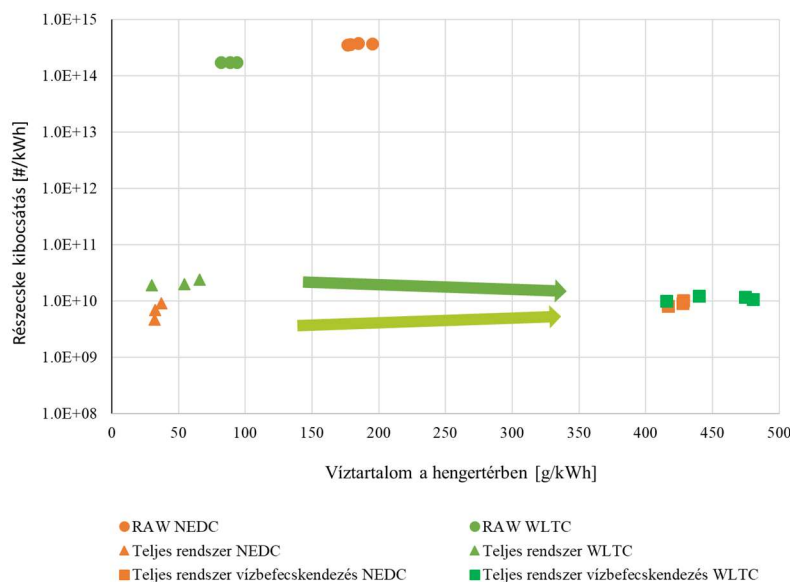
4.4.2. Eredmények WLTC ciklussal

Az alacsony terhelésű ciklusokkal kapott eredmények alapján, az látszott, hogy az EGR-hez képest jelentősen kisebb arányban tudott működni a vízbefecskendezés így nem látszott a vízbefecskendezés teljes potenciálja. Feltételezésem alapján a felgyorsult közlekedési körülmények között a kipufogógáz visszavezetéssel szemben a vízbefecskendezés a hűtési mechanizmusa által jelentősen jobban tud teljesíteni. Ennek érdekében a jelenleg is hatályos WLTC ciklusokkal is elvégeztem a méréseket melyben a nagyobb átlagsebességgel és az agresszívabb kigyorsításokkal a motorterhelések is jelentősen megnövekedtek.

A 4.26. és 4.27. ábrán láthatjuk a nyers emisszió mellett a teljes emissziókezelő rendszerben a vízbefecskendezés hatását az NEDC ciklus mellett a WLTC ciklus eredményeivel kiegészítve. Az eredményeket összefoglalva az látszik, hogy a NO_x csökkenése mellett a kibocsátott részecskék száma is csökken a PN_{23} mérettartományban, ami összhangban van a várt eredményekkel.

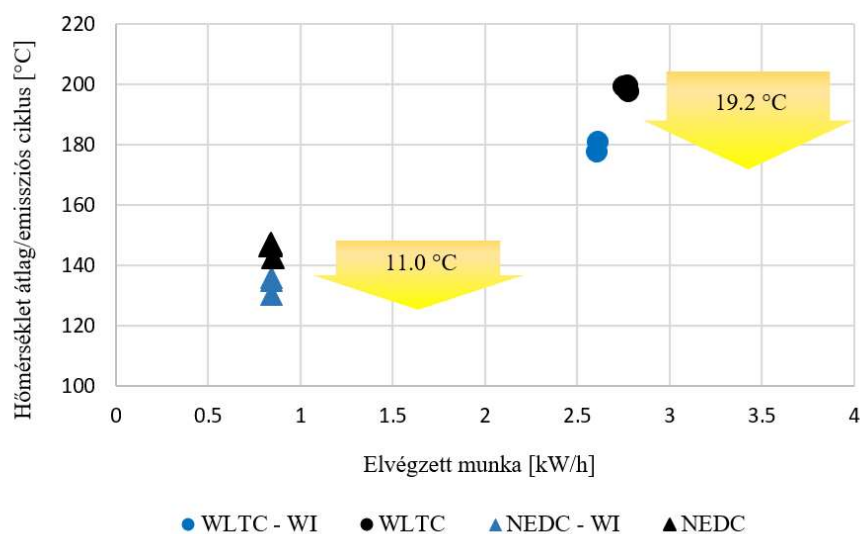


4.26. ábra: NO_x gázkibocsátás a teljes mérőrendszerrel NEDC és WLTC ciklus alatt



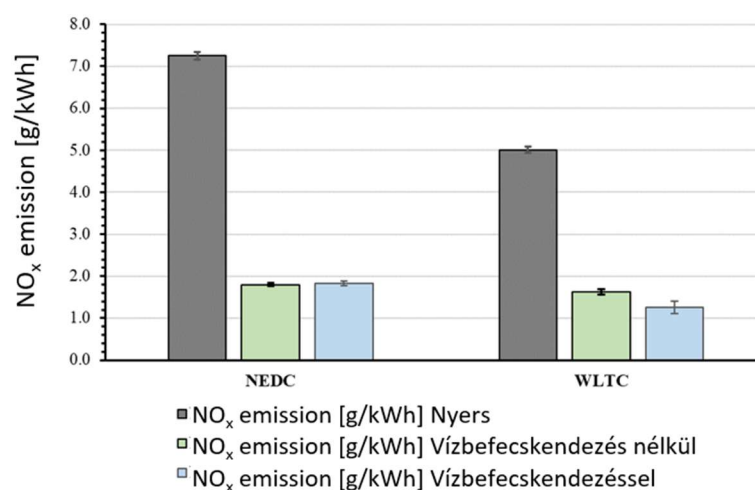
4.27. ábra: PN₂₃ gázkibocsátás a teljes mérőrendszerrel NEDC és WLTC ciklus alatt

Hogy meggyőződjek arról, hogy ez nem csak a nagyobb mennyiségű víz hatása ezért külön vizsgálatokat futtattam az NEDC és a WLTC ciklussal, ahol az összes emissziócsökkentő elem közül csak külön a vízbefecskendezést használtam, hogy minden más zavaró hatást ki tudjak zárni. Az eredmények összehasonlíthatósága végett az emissziós ciklus alatt elvégzett munkát az emissziós ciklus átlag hőmérsékletével vettem össze. A 4.28. 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.



4.28. 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 (4.29., 4.30. ábra).

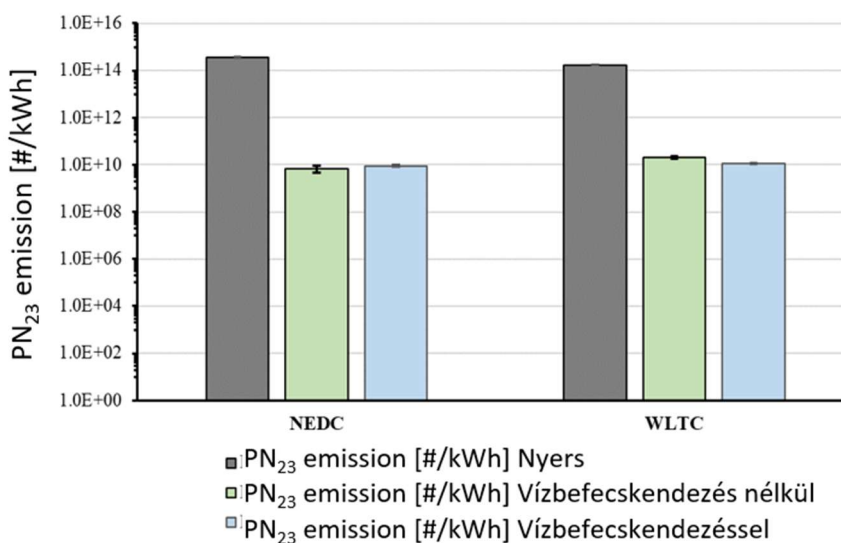
4.29. ábra: NO_x kibocsátás változása balról jobbra növekvő terhelésű ciklusok esetén

4.4. 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 4.4. 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.



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

Ahogy a 4.5. táblázatban és a 4.30. ábrán is láthatjuk, a teljes rendszerben vízbefecskendezés nélkül az emissziócsökkenés, a részecskeszűrő jelenléte miatt gyakorlatilag 100 %. 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

4.5. 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 %

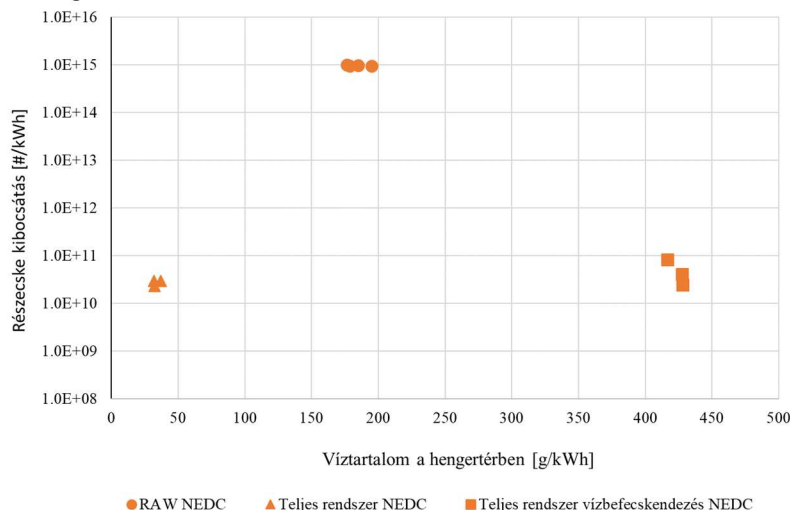
Ahogy bizonyítottam, a szívócsonk vízbefecskendezés károsanyag csökkentő hatékonysága növekedik a terhelés növekedésével és ez egybe esik a valós felhasználásokban található jellemzően teljesítménynövelésre használt befecskendezőrendszerek működési tartományával is.

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.

4.4.3. A vízbefecskendezés hatása az ultrafinom (PN₁₀) részecskékre

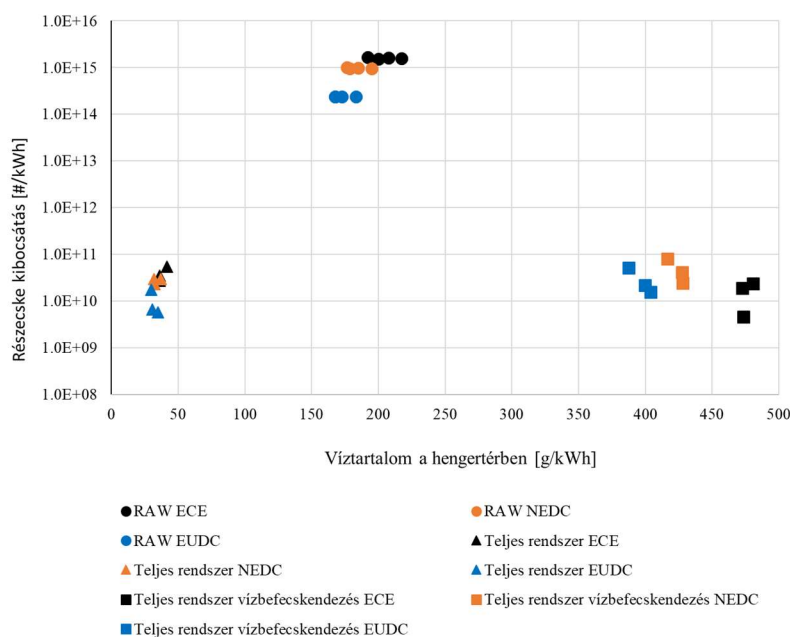
A 23nm alatti ultrafinom részecskék kibocsátásának vizsgálatával a vízbefecskendezés kapcsán még nem állnak rendelkezésre eredmények a szakirodalomban. Ennek oka az, hogy a mérés szükségessége és lehetősége is nagyon új. A dízelbotrány után kapott nagyobb nyilvánosságot az ultrafinom részecskék kérdésköre, először 2016-ban az ENSZ ülésén vették napirendre a témát, majd pedig ezután 2017-ben az (EU) 2017/1154 Rendelet kapcsán került a köztudatba. Ezen körülményekre tekintettel kezdtek el a gyártók dolgozni az ultrafinom részecskéket mérésére alkalmas berendezéseken. Az általam használt részecskeszámológó az első hivatalosan használható szilárd részecskeszámológó berendezés az ultrafinom részecskék

mérésére. Az alábbi méréseket DV6-os motoron a 4.4. fejezetben leírt infrastruktúra felhasználásával végeztem.



4.31. ábra: PN₁₀ részecskekibocsátás a teljes mérőrendszerrel NEDC ciklus alatt

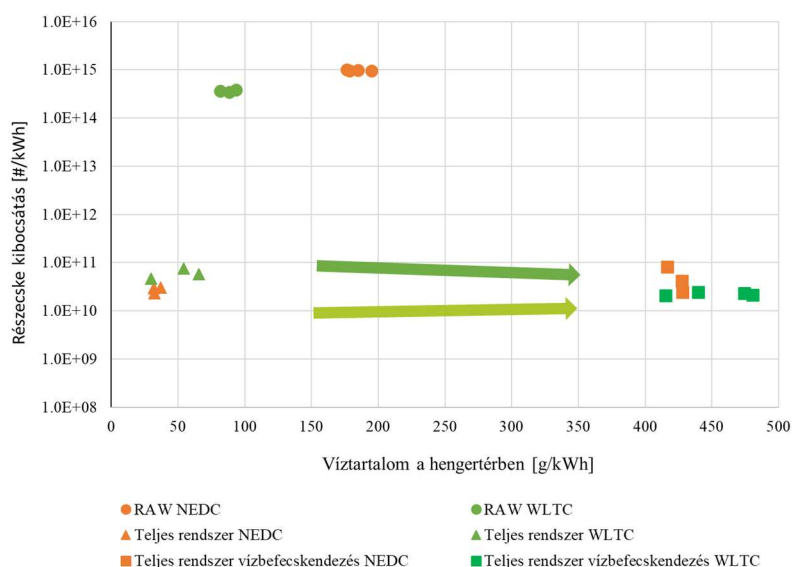
A 4.31. ábrán láthatjuk a nyers emisszió mellett a teljes emissziókezelő rendszerben a vízbefecskendezés hatását. A vízbefecskendezés hozzáadásával a növekedés látható a PN₁₀ részecske emissziókban. Ennek oka lehet a vízbefecskendezés által okozott hőmérsékletcsökkenés a DOC-n, az előálló alacsony hőmérsékleten a kisebb méretű elégetlen szénhidrogén molekulák sem oxidálódnak el.



4.32. ábra: PN₁₀ részecskekibocsátás a teljes mérőrendszerrel ECE 15, EUDC, és NEDC ciklus alatt

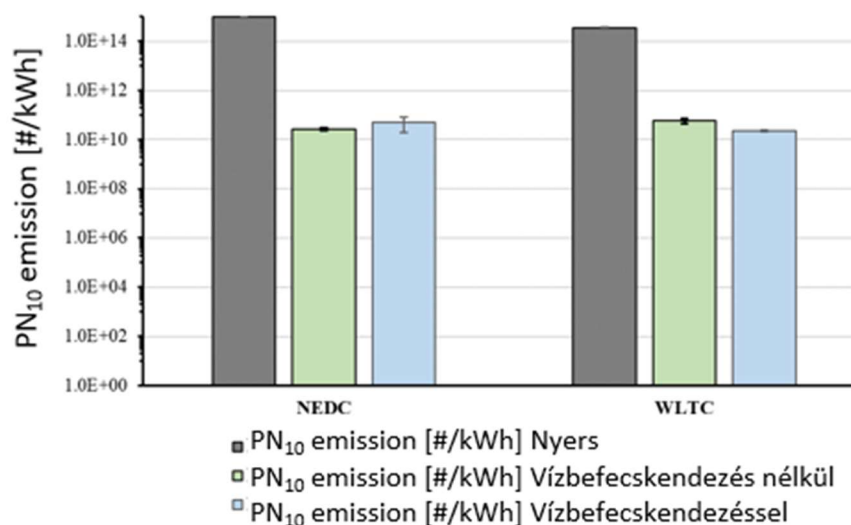
A 4.4.1. fejezetben tárgyaltaknak megfelelően az ECE 15 és EUDC ciklusokat megvizsgálva, a PN₂₃ hoz hasonló eredményeket láthatunk a 4.32. ábrán.

A vízbefecskendezés az optimális üzemét az ultrafinom részecskék esetében is a nagyobb terhelésű WLTC ciklus alatt éri el (4.33. ábra).



4.33. ábra: PN_{10} gázkibocsátás a teljes mérőrendszerrel NEDC és WLTC ciklus alatt

Ahogy a 4.6. táblázatban és a 4.34. ábrán is láthatjuk, a teljes rendszerben vízbefecskendezés nélkül az emissziócsökkenés, a részecszeszűrő jelenléte miatt gyakorlatilag 100 %. Ehhez képest is további jelentős 62 %-os csökkenés látható a legújabb jelenleg is érvényben lévő nagy terhelésű WLTC ciklussal.



4.34. ábra: PN_{10} kibocsátás változása balról jobbra növekvő terhelésű ciklusok esetén

4.6. táblázat: PN_{10} 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 %

Korábbi páratartalommal kapcsolatos vizsgálataim eredményei alapján azt láthattuk, hogy a levegő páratartalmának növekedésével a könnyű teherautó belsőégésű dízelmotor (EURO V)

utókezelő rendszer nélküli nyers részecske emissziói javultak. A részecskeméret szempontjából itt a csökkenés a 23 nm alatti (PN₁₀) részecske tartományban mutatkozik jelentősebben.

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.

Ennek az eredménynek egy lehetséges magyarázata a részecskék agglomerációja a nagyobb mértékű víz jelenlétében. Azonban az agglomeráció vagy az egyéb emissziócsökkentő mechanizmus, reakciók helye nem tisztázott, bekövetkezhet rögtön az égés után vagy pedig a kipufogógáz visszavezetés során, illetve esetleg a kipufogórendszerben való áthaladás közben. A nagyobb méretű részecskék pedig nagyobb eséllyel kiszűrésre kerülhetnek a részecskeszűrőben vagy oxidálódhatnak az oxidációs katalizátoron.

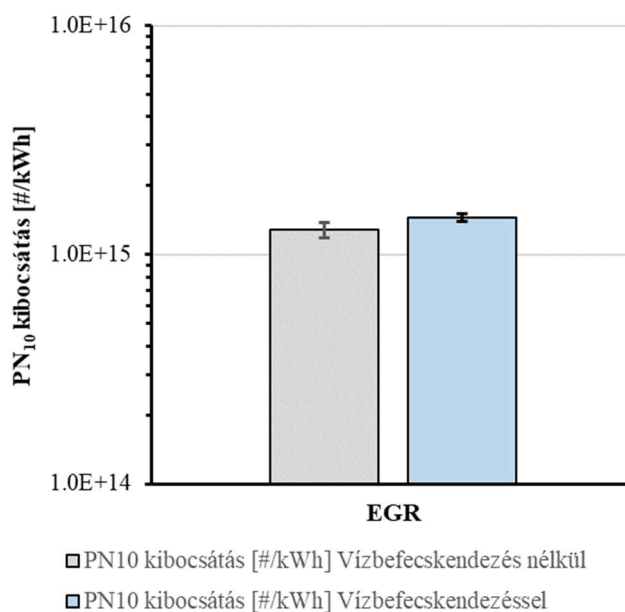
Mindezek tisztázására, illetve az agglomeráció bizonyítására a részecske tömeg (PM) mérés adódik, mint lehetőség, ugyanis az agglomeráció esetében a tömegeknek azonosnak kell lenniük adott helyen a részecskeszám csökkenés ellenére is. Itt azonban egy újabb probléma is felvetődik. A motorba juttatott víz hatására nem kerülhetjük el a nyers kipufogógázban lévő folyadék mennyiségének növekedését. Ez jelentős különbséget okozhat a PM mérés és a PN mérés során. PN mérésnél a mintát jellemzően 350 °C-on kezelik, így az összes oldható szerves anyagot (SOF) valamint minden folyékony összetevőt szándékosan eltávolítanak. Így csak a szilárd részecskéket számolják az eszközön. PM mérésnél azonban a folyadék részecskéket is számba vesszük a mérés során. Ennek eredményeképpen a vízbefecskendezés alkalmazásakor a PM mérések kiértékelésébe ez sok bizonytalanságot hozhat, aminek eredményeképpen ezt el kellett vetnem.

Azonban, 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. Eredmények csak NEDC ciklussal állnak rendelkezésre, így a korábbiak alapján a vízbefecskendezés hatása korlátozottan látható, illetve nem optimális (M8. melléklet).

4.7. táblázat: PN₁₀ kibocsátások csökkenése az emisszió utókezelő rendszer egyes elemei után NEDC ciklussal

	Vízbefecskendezés nélkül	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 %

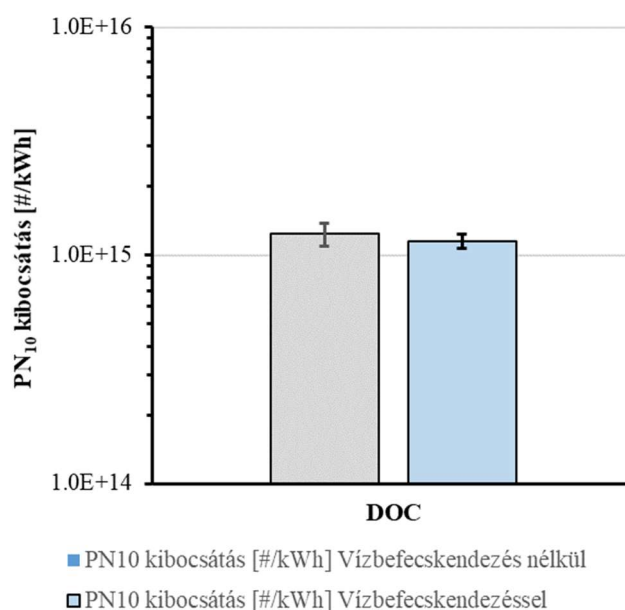
Az eredmények alapján az látható, hogy az EGR után a PN₁₀ részecskékibocsátás növekedik hasonlóan a PN₂₃ –hoz a szakirodalom alapján (4.7 táblázat, 4.35.-4.37. ábra).



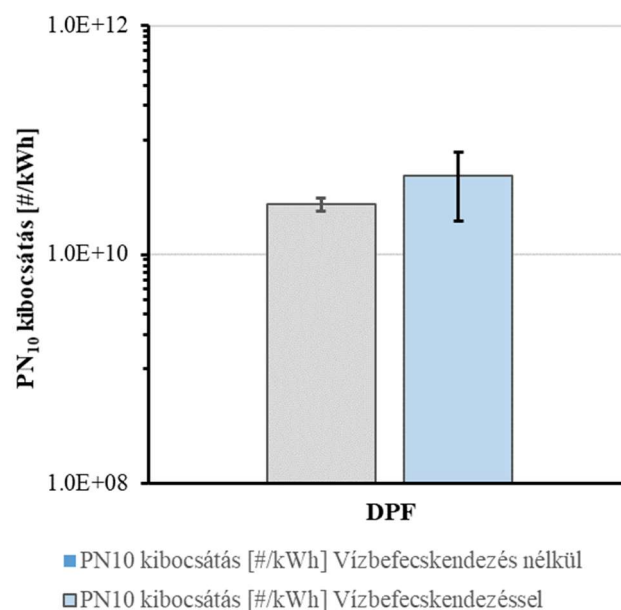
4.35. ábra: PN₁₀ kibocsátások változása az EGR után NEDC ciklussal

Annak ellenére, hogy az 4.24. ábra alapján az NEDC ciklus alatt a DOC nem éri el a „light off” hőmérsékletét, így is jelentős a csökkenés (4.7 táblázat) látható a PN₁₀ kibocsátásokban. A DPF-en a vízbefecskendezéses mérés nagy szórása miatt nem jelenthető ki meghatározó változás (4.37. ábra). Ezek alapján bármilyen emissziócsökkentő mechanizmus, agglomeráció, vagy egyéb folyamat a DOC-n bizonyosan végbe megy a vízbefecskendezés eredményeképpen. Ezt a jövőben a mérőszorozat WLTC-vel való elvégzésével tudom megerősíteni.

Azonban az eredmény, hogy a vízbefecskendezés a teljes modern emissziókezelő rendszerrel és modern, jelenleg is érvényes WLTC ciklussal a PN₁₀ kibocsátásra is pozitív hatással van az mindenképpen új eredmény a vízbefecskendezéses szakirodalomban, illetve az EURO 7 kapcsán pedig kiemelt jelentőségű új eredmény.



4.36. ábra: PN₁₀ kibocsátások változása az DOC után NEDC ciklussal

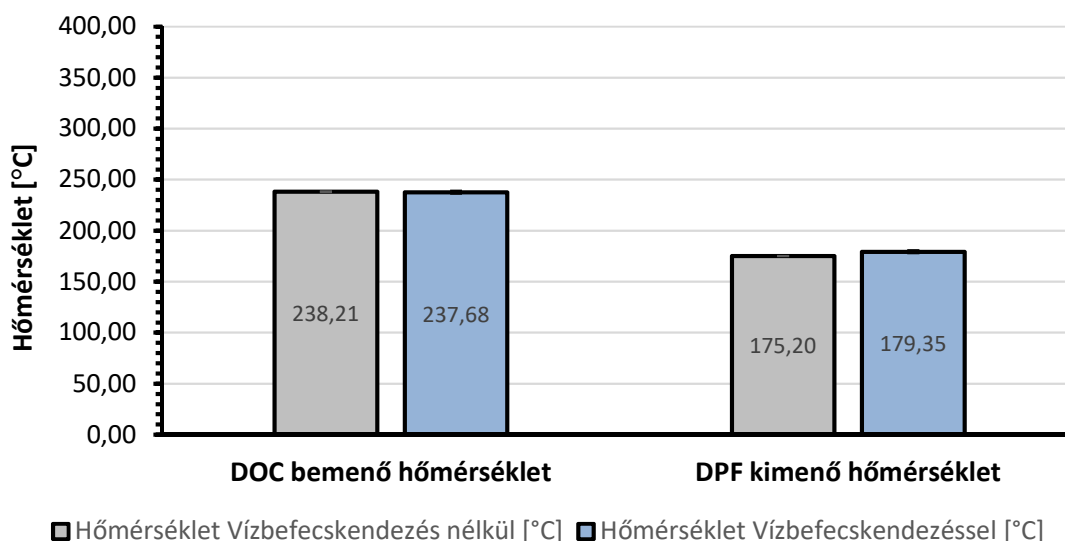


4.37. ábra: PN₁₀ kibocsátások változása az DPF után NEDC ciklussal

Ebben a fejezetben a célkitűzéseim 5. pontjának megfelelően megállapítottam a vízbefecskendezés emissziócsökkentő hatását az ultrafinom PN₁₀ károsanyag kibocsátásokra és további vizsgálatokkal meghatároztam az emissziócsökkenés helyét is.

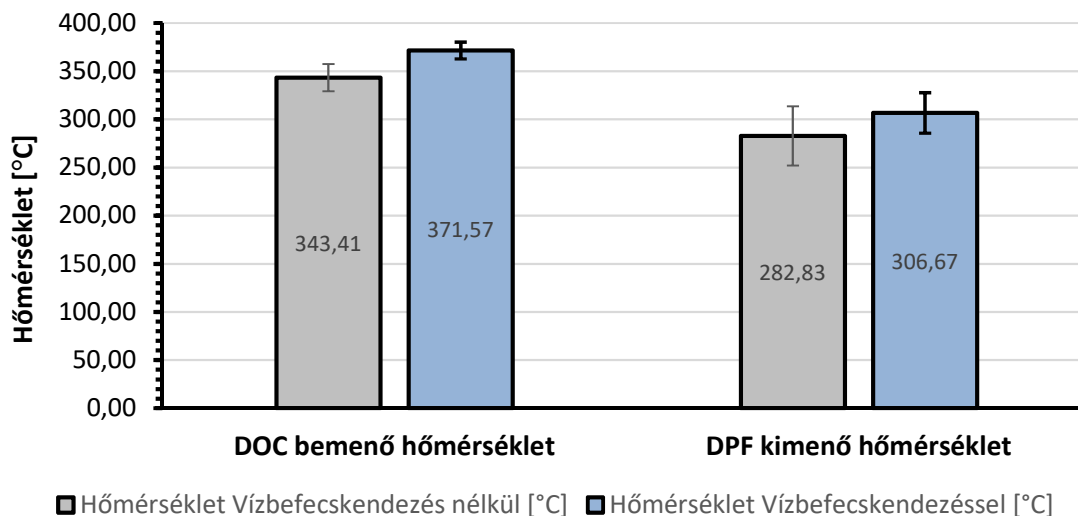
4.4.4. A vízbefecskendezés hatása az emisszió utókezelő rendszer hőmérsékleteire

A 4.1. fejezetben vizsgáltakhoz hasonlóan, a vízbefecskendezéses tesztrendszeremmel (DV6-os motoron a 4.4. fejezetben leírt infrastruktúra felhasználásával) és WLTC ciklussal is megvizsgáltam a kipufogógáz hőmérsékleteket EURO 5 emissziós rendszerben (M9. melléklet). Ezen a módon a vízbefecskendezés használatával is meggyőződtem az egyes utókezelő rendszer elemek hőmérsékleteiről. A különböző motor ellenére (DW10 és DV6), a mindkét esetben használt EURO 5 emisszió utókezelő rendszer miatt a hőmérsékletek hasonlóan alakultak. NEDC ciklus használatával a 4.38. ábrán láthatjuk az eredményeket, miszerint vízbefecskendezéssel és vízbefecskendezés nélkül sincs meghatározó különbség a kipufogógáz hőmérsékletekben a DOC előtt és a DPF után sem.



4.38. ábra: Hőmérséklet maximumok EURO 5 emissziókezelő rendszer elemein NEDC tesztciklussal

A WLTC ciklus használatával az egész utókezelő rendszer hőmérséklete jelentősen körülbelül 100 fokkal megemelkedik, jóval a DOC „ligh off” hőmérséklete fölé, ami biztosítja, hogy mind normál mind pedig a vízbefecskendezés esetében optimálisan tud üzemelni az emisszió utókezelő rendszer (4.39 ábra).



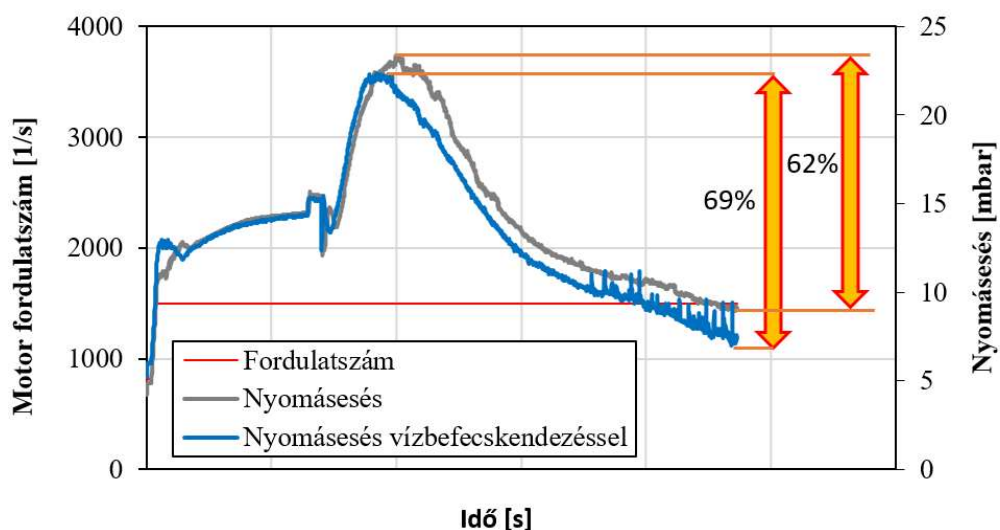
4.39. ábra: Hőmérséklet maximumok EURO 5 emissziókezelő rendszer elemein WLTC tesztciklussal

Ebben a fejezetben a célkitűzéseim 9. pontjának megfelelően megállapítottam, hogy az emissziókezelő rendszer hőmérsékletei a vízbefecskendezés által nem degradálódnak, ami a szükséges reakciók végbemeneteléhez elengedhetetlen.

4.5. A vízbefecskendezés hatása a részecskeszűrő regenerációjára

A motor működése során a korom folyamatosan felhalmozódik a részecskeszűrőben. Ennek során a nyomásvesztés növekszik, mivel a kipufogógázok áthaladása során ellenállás keletkezik a felhalmozódott koromrétegen. Ez negatívan hat vissza a motorra, teljesítménycsökkenést és hajtóanyagfogyasztás növekedést okoz. Ez a nyomásvesztés nagyon fontos jellemzője a részecskeszűrőnek az általa okozott teljesítménycsökkenés és hajtóanyagfogyasztás növekedés által, melyek a részecskeszűrő direkt veszteségei. Ezért ennek, illetve hatásainak a csökkentése kiemelt fontosságú a részecskeszűrő gyártók számára. A felhalmozott korommennyiséget időről időre el kell távolítani a korom oxidálásával (3.2.3. fejezet). Ezt a folyamatot regenerálásnak nevezik, amely folyamat további veszteségekkel jár, hiszen a filter teljes regenerálásához legalább 550 °C feletti hőmérséklet szükséges, ami nem áll rendelkezésre a dízel kipufogógázokban. Az aktív regeneráció esetén a korom regenerálásához szükséges energiát plusz hajtóanyag befecskendezéssel érjük el. Miután a jármű működtetéséhez szükséges nyomást elértem a fő befecskendezéssel, milliszekundumok alatt extra hajtóanyag kerül utóbefecskendezéssel a hengertérbe, melynek az égése csak a kipufogórendszerben végződik megemelve az ottani hőmérsékletet. E technika alkalmazásával elérhető a szükséges oxidációs hőmérséklet.

Az alábbi méréseket DV6-os motoron a 4.4. fejezetben leírt infrastruktúra felhasználásával végeztem. Mérésem során 5 g/dm³ kormot töltöttem a részecskeszűrőbe meghatározott motorkondíción, ahol a dm³ a filter térfogatát jelenti. Ezt követően fél órán keresztül regeneráltam utóbefecskendezéssel 580 °C hőmérsékleten. A méréseket normál módon és vízbefecskendezéssel is elvégeztem. A mérés során a nyomáscsökkenést folyamatosan felügyeltem melyből a kiegészítő ütemére lehet következtetni (4.40. ábra).



4.40. ábra: Nyomásesés változása a regeneráció során vízbefecskendezéssel és nélkül

A regeneráció után tömegmérést végeztem és a kezdeti tömeg ismeretében meghatároztam a regeneráció százalékos értékét is (4.8 táblázat). A nyomásesés és a tömegmérés alapján 3-7 %-os hatékonyság növekmény látható a víz jelenlétében végzett regeneráció során. A teljesebb kiégést a részecskeszűrő homlokfelületén is nyomon tudjuk követni, melyen jóval kevesebb kiégetlen korom látható (4.41. ábra).

4.8. táblázat: Regeneráció hatékonysága vízbefecskendezéssel és nélkül

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

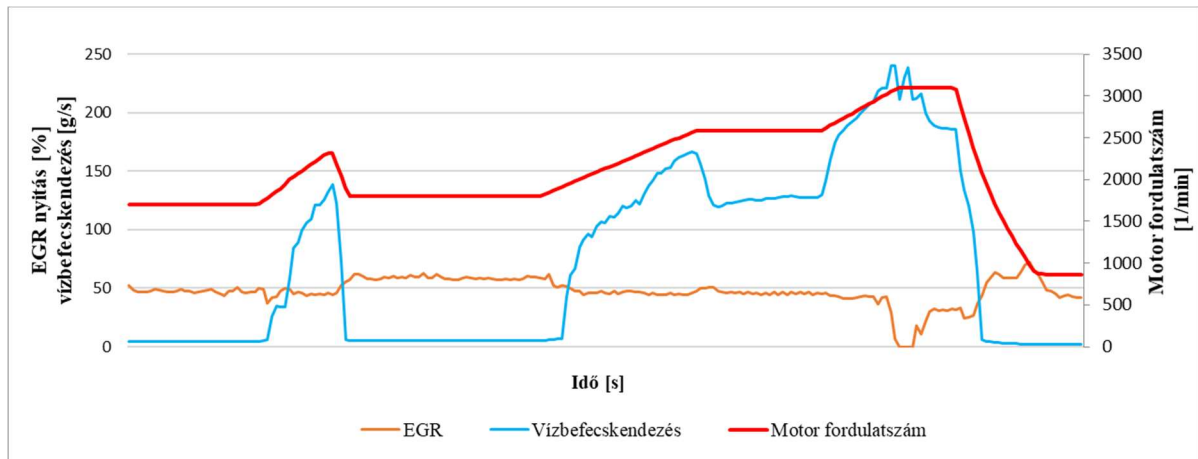
Ebben a fejezetben a célkitűzéseim 7. pontjának megfelelően a vízbefecskendezés hatékonyságának kiterjesztésére irányuló vizsgálatokat végeztem. A részecskeszűrő regenerációjára kapott eredmények bizonyítják a víz jelenlétében zajló regeneráció megnövekedett hatékonyságát, mellyel a gépjármű élettartama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



4.41. ábra: Részecskeszűrő bemeneti felülete a regeneráció után, jobb oldalon vízbefecskendezéssel, bal oldalon pedig nélkül

4.6. 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. Erre láthatunk példát a 4.42. ábrán, ahol egy EUDC ciklus utolsó ~200 másodperce látszik.

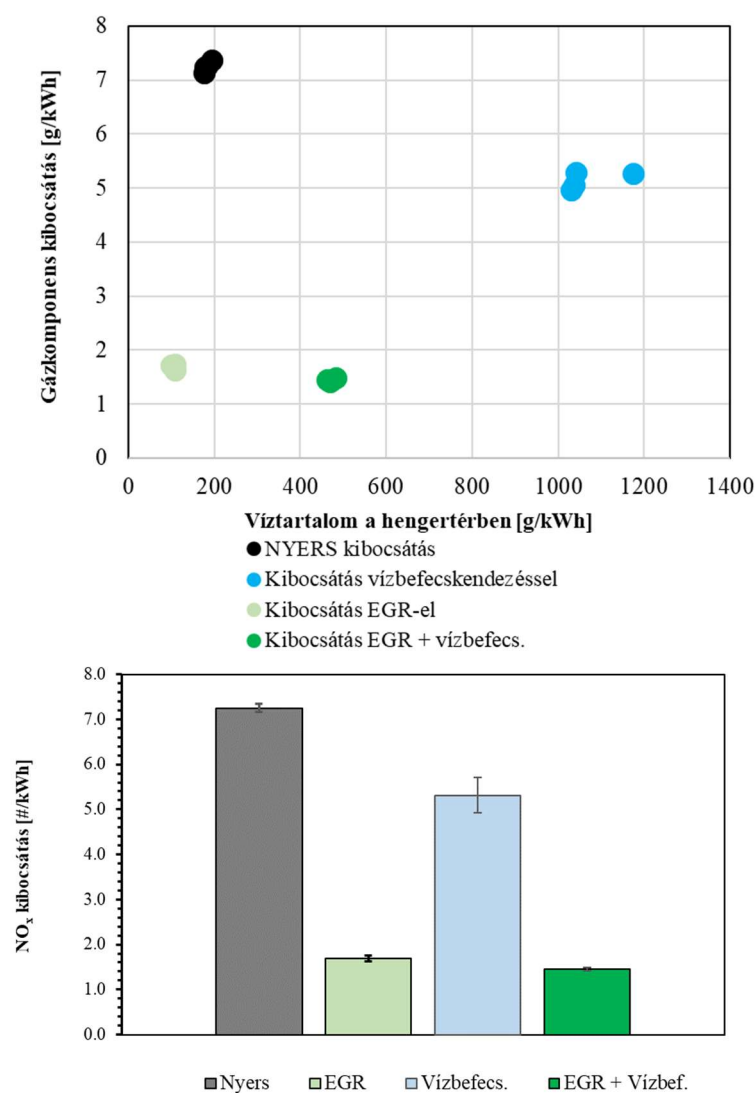


4.42. ábra: EGR és vízbefecskendezés szabályozása EUDC emissziós ciklus autópálya szakaszán

Az alábbi méréseket DV6-os motoron a 4.4. fejezetben leírt infrastruktúra felhasználásával végeztem (M6. melléklet). Ahogy a gépjármű gyorsít, a vízbefecskendezés bekapcsol, az EGR pedig zárni kezd. További gyorsításra a vízbefecskendezés itt eléri a maximumát, a gépjármű itt 120 km/h sebességgel halad. Jellemzően 3000 1/min-nél az EGR kikapcsol, itt is tapasztalható. 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. Az NEDC eredményeiből látható, hogy a vízbefecskendezés jelentős hőmérsékletcsökkenést képes okozni az EGR -en felül is (4.24., 4.48. ábra), melyből azt a következtetést vontam le, hogy optimalizálás szükséges a vízbefecskendezés hangolásával, hogy a DOC „light-off” hőmérséklete alá ne hűtse a motorból kilépő kipufogógáz hőmérsékletét.

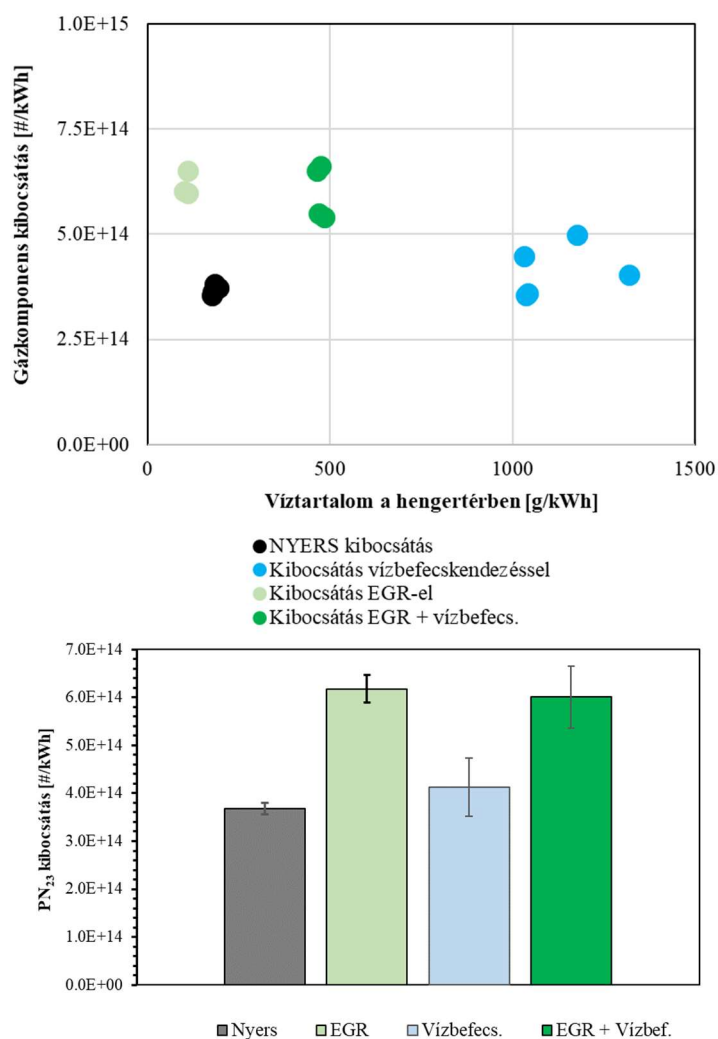
Az eredeti tervek alapján az EGR és a vízbefecskendezés összehangolását tartottam szükségesnek. Ennek érdekében megvizsgáltam NEDC ciklus alatt kipufogógáz visszavezetéssel, vízbefecskendezéssel és a két technika kombinációjával is a fő emissziókat. A vízbefecskendezés használatával az NO_x tartalom több mint 25 %-kal csökkent. A valós vízbefecskendező rendszer nem folyamatosan üzemel, mint ahogy az EGR, hanem csak a 20 kPa töltőnyomás elérésétől kezdve fecskendez, a 4.25. ábrának megfelelően. Ezért látható alacsonyabb kibocsátás csökkenés az EGR-hez hasonlítva (4.43. ábra).



4.43. ábra: NO_x tartalom kipufogógáz visszavezetéssel és vízbefecskendezéssel

A mérések során az EGR elzárása esetén a motor nagynyomású EGR rendszere miatt a töltőnyomás növekedik, minek következtében a töltőnyomás alapján szabályozó vízbefecskendező rendszer nagyobb mennyiségeket fecskendezett be. Ezért látszik a diagramokon az, hogy amikor csak vízbefecskendezést használunk, nagyobb a víztartalom a hengertérben.

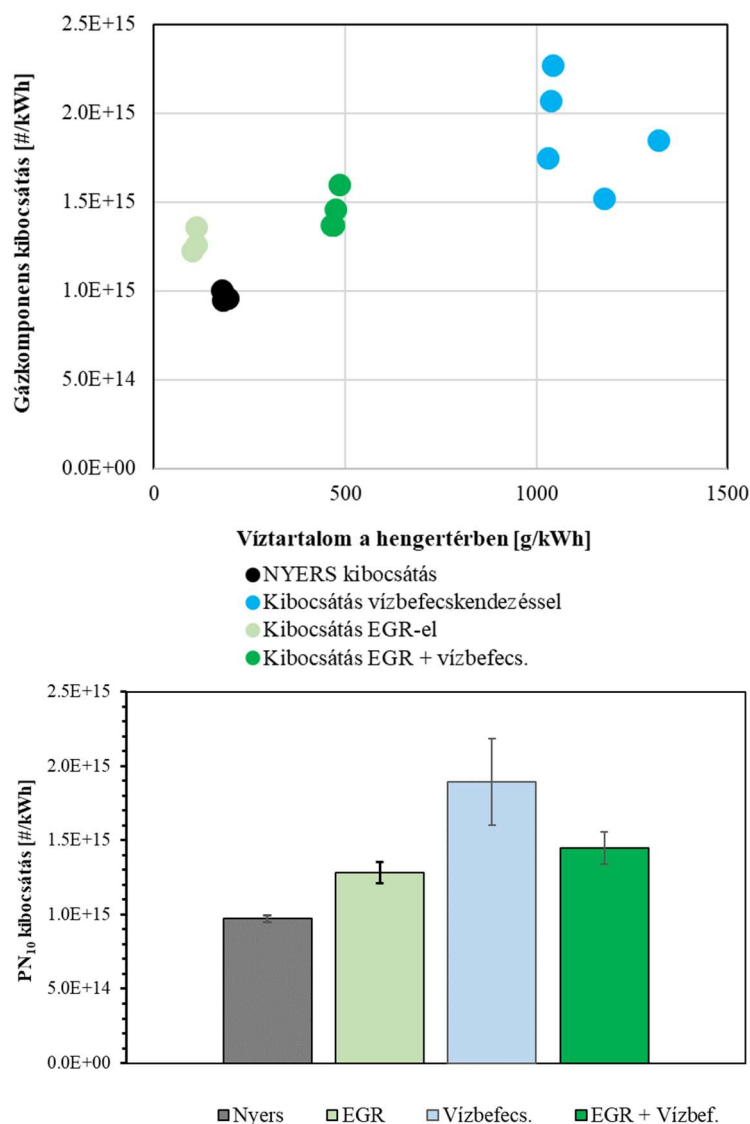
A két technika párhuzamos használatával 2,5 % nitrogén-oxid csökkenés tapasztalható a csak EGR-rel elért eredményhez képest. A végső nitrogén-oxid emissziócsökkenés így közel 80 %.



4.44. ábra: PN₂₃ tartalom kipufogógáz visszavezetéssel és vízbefecskendezéssel

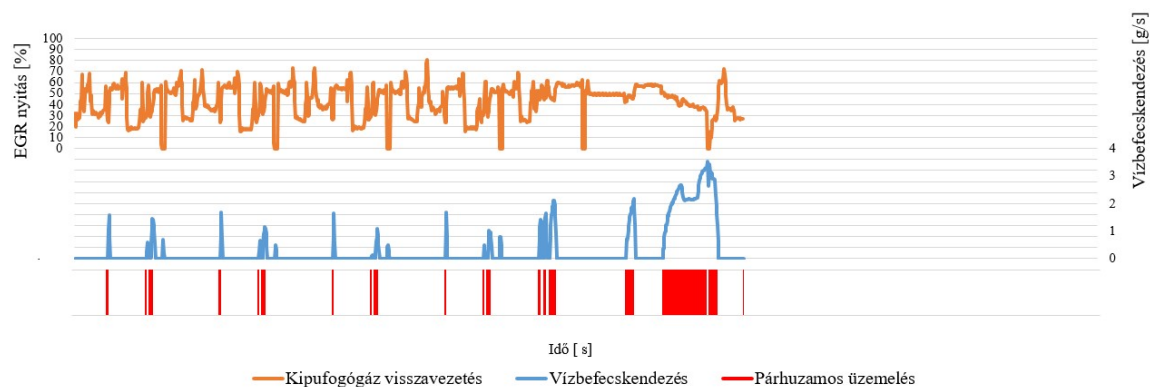
A kipufogógáz visszavezetés esetén, az égés rontása miatt az elégetlen szénhidrogének mennyisége növekedik ennek eredményeképpen a 23 nm fölötti részecskék (PN₂₃) kibocsátása ~68 %-kal növekedik (4.44. ábra). A vízbefecskendezés esetén a részecskék kibocsátása sokkal alacsonyabb ~12 %. A két technika együttes alkalmazásával a részecskekibocsátás ~63 %, ami körülbelül 5 %-os javulást ad az EGR külön alkalmazásához képest, azonban a szórások nagysága miatt itt jelentős a bizonytalanság.

A PN₁₀ eredményeket a 4.45. ábrán láthatjuk. A motor nyers emissziójához képest a vízbefecskendezéssel a részecskék mennyisége növekedik. A vízbefecskendezéssel hozzávetőlegesen 17 %-kal növekszik az ultrafinom részecske emisszió az EGR-hez képest.

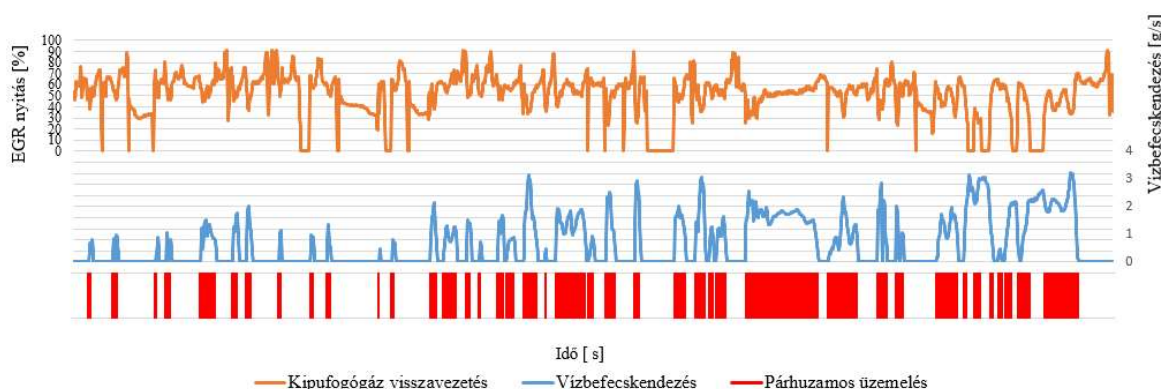


4.45. ábra: PN₁₀ tartalom kipufogógáz visszavezetéssel és vízbefecskendezéssel

Az 4.5 pontban bemutatott teljes rendszer mérések esetén az NEDC eredményekkel ellentétben a WLTC méréseknél mind a NO_x mind pedig a részecskék esetében csökkenést értem el. 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. Ebből kiindulva az eredmények alapján az várható, hogy a WLTC alatt már kevesebb a két technika működése közötti átfedés. A 4.46. és 4.47. ábrán láthatjuk, hogy mennyivel többet üzemel a vízbefecskendezés a WLTC alatt az NEDC ciklushoz képest. Ez is volt a cél, hogy jobban lássam a vízbefecskendezés pozitív hatását, amit a 4.24. és 4.48. ábra alapján vissza is igazoltam. Az volt a feltételezés, hogy a WLTC alatt majd szükség lesz optimalizálni a kettő működését, hogy a túlhűtést elkerüljem, amit az NEDC ciklus alatt láttam.

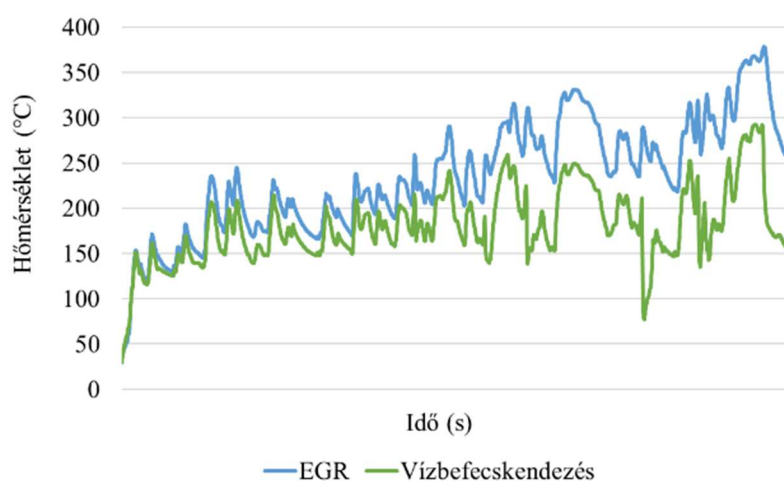


4.46. ábra: EGR és vízbefecskendezés üzeme közti átfedések NEDC ciklus alatt

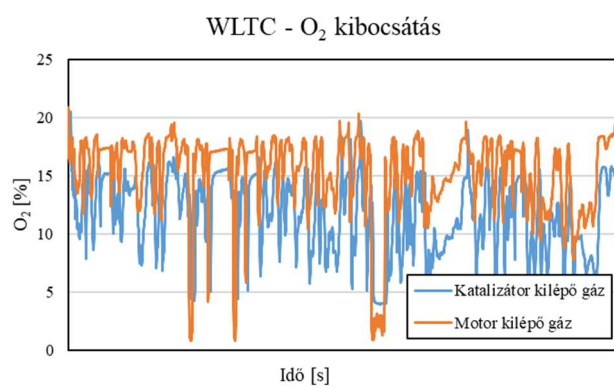


4.47. ábra: EGR és vízbefecskendezés üzeme közti átfedések WLTC ciklus alatt

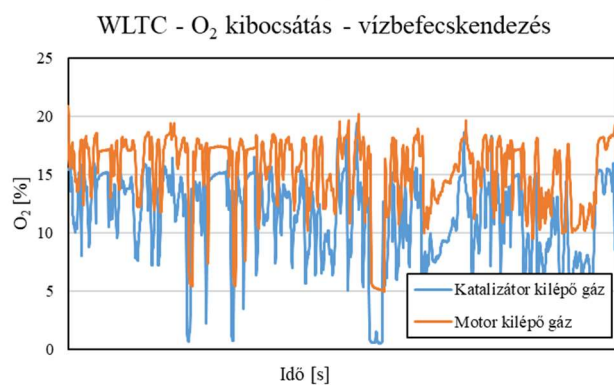
A 4.46. és 4.47. ábra alapján jóval nagyobb átfedéseket láthatunk a WLTC ciklusok alatt, mégis a káros anyag emissziók csökkenése látható. Megvizsgálva a kipufogógáz hőmérsékleteket, a 4.24. és 4.48. ábra szerinti eredmények láthatók. Ez jól mutatja, hogy a jelenlegi közlekedéshez jóval közelebb álló WLTC ciklus alatt a nagyobb terhelések miatt a hőmérsékletek is jóval magasabbak így nem biztos, hogy a túlhűtés ténylegesen fennáll.



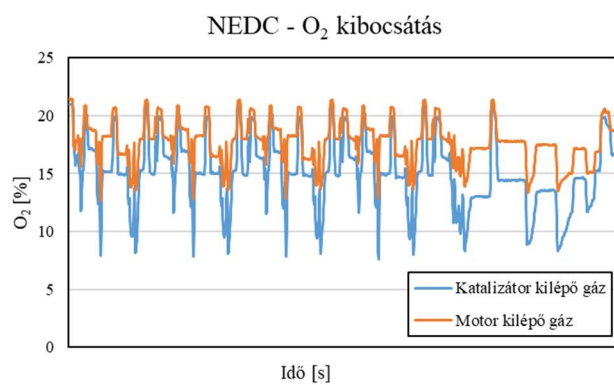
4.48. ábra: Motorból kilépő kipufogógáz hőmérséklet különbségek utókezelő rendszer nélkül vízbefecskendezéssel és EGR-rel a teljes WLTC ciklus alatt



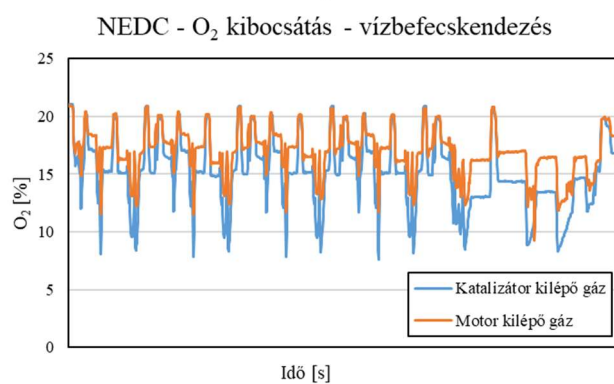
a.)



b.)



c.)



d.)

4.49. ábra: Oxigén kibocsátás a.) WLTC b.) WLTC + vízbefecskendezés c.) NEDC d.) NEDC + vízbefecskendezés közben

Hogy erről megbizonyosodjak megvizsgáltam az oxigénfelhasználást az oxidációs katalizátoron (4.1., 4.3., 4.6. reakcióegyenletek). Ezzel indirekt módon, az oxidációs katalizátoron végbemenő alábbi reakciók végbemeneteléről kaptam képet.

A motorból kilépő és a katalizátor utáni oxigéntartalom alapján, NEDC ciklussal az oxigén tartalom 52 %-a használdik fel a katalizátoron. Ez az érték vízbefecskendezéssel 46 %-ra esik vissza. WLTC ciklus esetén az oxigén felhasználás 56 %, míg vízbefecskendezéssel szintén 56 % adódik. A mérések közben az oxigéntartalom változásokat a 4.49. ábrán láthatjuk. Ez azt mutatja, hogy az oxidációs katalizátor konverziója megfelelő a WLTC ciklus alatt. Ennek eredményeképpen nincs szükség az optimalizálásra, az oxidációs katalizátor teljesítménye nem degradálódik, így a szénhidrogének konverziója, ami a részecskekibocsátásért 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.

5. 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 (4.4.4. fejezet),
- az oxidációs katalizátor konverziós hatékonysága nem változik, a károsanyagok átalakítási hatásfoka vízbefecskendezéssel és nélkül is 56 % (4.6. 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 (4.4.2., 4.4.3. 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 (4.2. 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 (4.4.2. 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 (4.4.3. 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 (4.4.3. 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 (4.5 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.

6. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A valós alkalmazásokban, miután a vizet a motor égésterébe juttatják, az a kipufogógázzal együtt távozik, és áthalad a teljes emisszió utókezelő rendszeren, miközben a rendszer minden egyes részét érinti. Ez fontos, de csak ritkán számba vett megállapítás, ha valaki utólagos emissziócsökkentő átalakításokban gondolkodik. Az Európai Bizottság egyre inkább ösztönzi e tevékenységeket utólagos beépítéses projekteken keresztül, és a bevezetés alatt álló EURO 7 is foglalkozik vele. Eddig azonban a szabályozási ösztönzők bevezetése nélkül, az érdeklődés hiánya miatt, a jármű utólagos felszerelésével kapcsolatos szakirodalom ilyen megközelítéssel nagyon korlátozott volt. Fontos célom volt ezért, hogy valós kereskedelmi forgalomban lévő motorokat, vízbefecskendezést használjak, és ezzel a gyakorlatba könnyen átültethető eredményeket kapjak. Jelenleg ez egy feltáratlan kutatási terület, ahol az alap információk hiánya és rendszerek komplexitása miatt szimulációk alkalmazása sem lehetséges. Ezen a területen tett megállapításaimat a következőkben mutatom be.

Kutatásomat a Kooperatív Doktori Program Doktori Hallgatói Ösztöndíj támogatta, melynek célja, hogy megfeleljen a felsőoktatás és az ipar által közösen támasztott igényeknek, a kutatás-fejlesztés területén tovább bővítse azon munkavállalók létszámát, akik például, műszaki szakmai ismereteiket a legfrissebb tudományos kutatási eredményekkel kívánják gyarapítani, és elkötelezettek tudásuk társadalmi, gazdasági hasznosításában is. Munkahelyemen is az emissziócsökkentésekkel foglalkozom több mint 13 éve, így mindezeknek megfelelően méréseim során a gyakorlatias szemléletre is nagy hangsúlyt fektettem és ennek megfelelően kiemelt figyelmet fordítok erre a fejezetre is.

6.1. A vízbefecskendezés előnyei a 2020-as években

A szakirodalomban a vízbefecskendezéssel és a kipufogógáz visszavezetéssel a konklúziókat jellemzően fix kondíciókon vizsgálják, illetve párhuzamosan működtetik a két rendszert. Ennek eredményeképpen a rendszer túlszabályozottá, esetenként túlhűtötté válik, a hatékonysága csökken. Jellemzően kísérleti motorokkal és befecskendező rendszerekkel végzik a méréseiket. Ezzel szemben azonban, ha az utólagos átalakítás és emissziócsökkentés a cél akkor valós kereskedelmi forgalomban lévő motorokat, vízbefecskendezést fogunk használni és lehetőség szerint, hogy a költségeket csökkentsük, ezek gyári vezérlését minél kevésbé és minél egyszerűbben fogjuk változtatni. A szakirodalmi összefoglalóból tudjuk, hogy 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. A kereskedelmi forgalomban kapható vízbefecskendező rendszerek jellemzően szívócsonk befecskendezést alkalmaznak és bár teljesítménynövelésre optimalizáltak, emissziócsökkentő hatásaik is a magasabb terhelésű régióban válnak hatékonnyá. 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. Méréseimmel igazoltam, hogy ezeket a körülményeket leképző WLTC ciklus alatt a káros anyag emissziók jelentős csökkenése látható vízbefecskendezéssel a közel 45 éve megjelent NEDC ciklushoz képest. Látható, hogy nagyobb terhelések esetén, magasabb fajlagos teljesítményű ciklusnál a hőmérsékletcsökkentő hatása a motor égésterében jelentősen nagyobb a vízbefecskendezésnek.

Mindezek alapján az eredeti célkitűzéseimnek megfelelően 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 kedvezővé válik.

6.2. A vízbefecskendezéssel fellépő direkt és indirekt költségek, nyereségek

A vízbefecskendezés direkt költségeit például a beépítés a desztillált víz és a felmerülő karbantartási költségek adják. Az indirekt költségek pedig lehetnek a hajtóanyag felhasználásban felmerülő változások.

6.2.1. A vízbefecskendezés utólagos beépítése

A meglévő publikációk többnyire nem veszik figyelembe a víz hatását a különböző, már meglévő utókezelő rendszerekre és rendszerelemekre, főként csak a nyers kibocsátásra koncentrálnak.

Ez különösen fontos most, ugyanis az Európai Bizottság 2022/0365 (COD) eredeti EURO 7 javaslata már a bevezető bekezdéseiben is tartalmazza, hogy: „Megfelelő ösztönzőket lenne szükséges bevezetni a régebbi autók utólagos felszerelésére, hogy azok megfeleljenek a kipufogógáz-kibocsátásra, de a gumiabroncs- és fékkibocsátásra vonatkozó Euro 7-es követelményeknek is.”. Ennek fényében az utólagos felszerelés szempontjából vizsgáltam a vízbefecskendezést és értékeltem újra a technika által elérhető előnyöket és a hátrányait. Ez az utóbbi évtizedekben felhalmozott irodalomhoz képest merőben más megközelítést igényelt. A közelgő szabályozásban megjelenő ösztönzés nélkül, ilyen eltérő megközelítésű utólagos átalakítással kapcsolatos szakirodalom eddig nagyon korlátozott volt az érdeklődés hiánya miatt.

A retrofitting szükségességét szemléletesen mutatja, hogy míg az új autók eladása 2023-ban 72.5 millió volt világszerte és melyekre szigorú emissziós szabvány vonatkozik, addig az alacsonyabb emissziós szabványú használt autók mennyisége jelenleg 1.5 milliárd. Ehhez jönnek még hozzá a nem közúti járművek, melyek száma nehezen megbecsülhető, azonban tanulmányok a károsanyag kibocsátásukat 2-6 szorosra teszik a közúti járművekhez képest. Ráadásul ezekre a járművekre a hajtóanyag specifikáció sokkal megengedőbb a világ sok táján, ami például jellemzően magasabb kéntartalmat jelent. Katalizátorokkal való utólagos emissziócsökkentés így ezen a területen a katalizátor elmergezése (CeO₂ deaktiválás) miatt nehezen kivitelezhető. A nem közúti gépek közé tartoznak az ipari, építőipari gépek, a hajózás, a hajók és más nagy értékű alkalmazások, ahol az utólagos felszerelés beruházásának sokkal kisebb a hatása a berendezés normál üzemeltetési költségei mellett. E gépek némelyike sokkal hosszabb élettartamú, mint egy személyautó, ahol az értékcsökkenés sokkal kisebb, és az utólagos felszerelés költséghatékony megoldás lehet. Stabil motorok, lassú járművek vagy városi, lépésben való közlekedésnél, ahol a légáramlás által biztosított hűtőhatás nem megfelelő például az EGR hűtő számára, szintén jó alternatíva lehet a vízbefecskendezés ami ilyen tényezőkre érzéketlen.

Az általam használt szívócsonk befecskendezés – mint utólagosan is könnyen beépíthető technika - lehetőséget nyújthat a jelenlegi gépjárműpark utólagos átalakításával az emissziók további csökkentésére. A 4.6. fejezetben megállapítottak alapján a szívócsonk vízbefecskendezés a korra jellemző terhelésű WLTC ciklus alatt:

- az EGR és a vízbefecskendezés megfelelően működik egymás mellett és egymást kiegészítve,
- oxidációs katalizátor konverziója megfelelő,
- a hőmérsékletek nem degradálódnak az utókezelő rendszerben.

Az 4.4. fejezetben is megállapított részecskék és nitrogén-oxidok párhuzamos csökkenése mellett, ebben a környezetben a vízbefecskendezés képes megfelelően teljesíteni mindenféle bonyolult és költséges motorvezérlő (EGR) módosítás nélkül a 4.6. fejezet megállapításai

alapján. Így a vízbefecskendezés beépítése tovább egyszerűsödik, az átalakítás költsége csökken, ami a vártakon felül további pozitív eredmény.

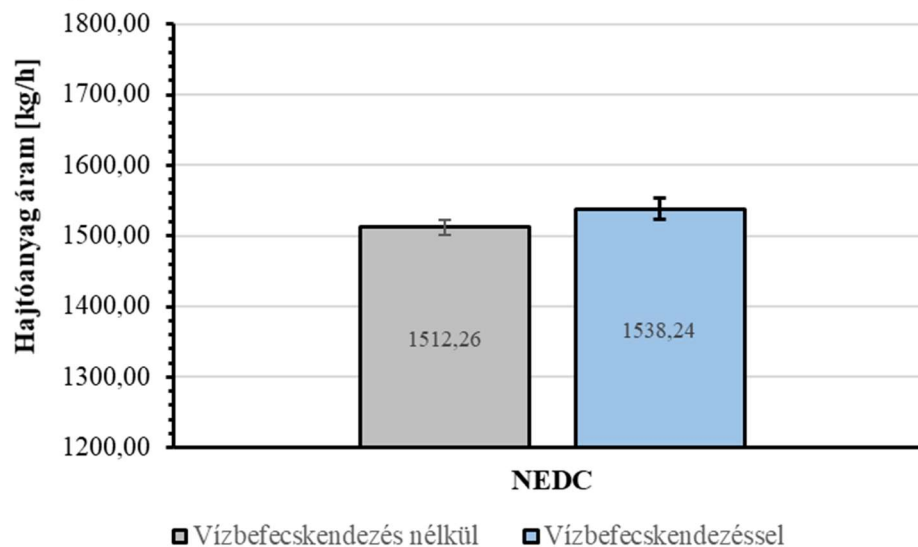
6.2.2. A vízbefecskendezés hatása a hajtóanyagfogyasztásra üzem közben

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 6.1 táblázatban láthatók.

6.1. táblázat: Hajtóanyag felhasználás változása a vízbefecskendezéssel

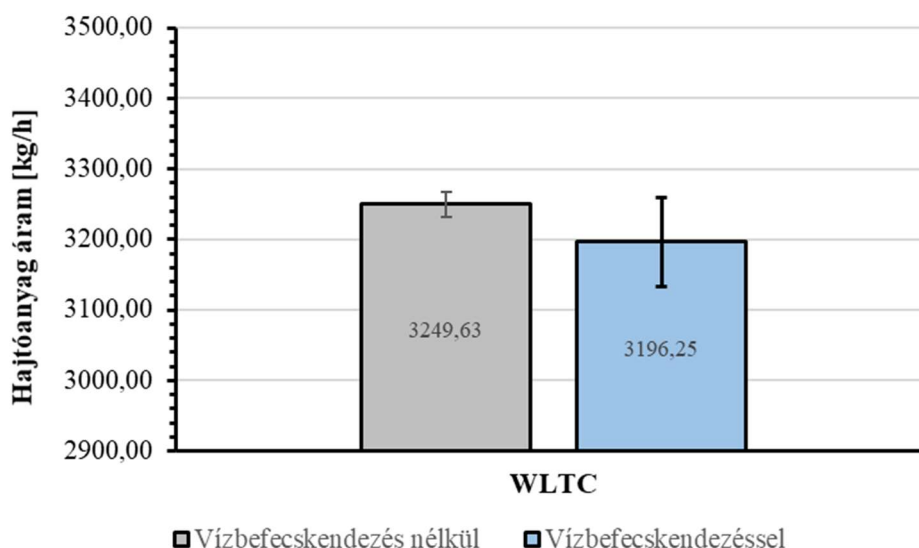
	Vízbefecskendezés nélkül [kg/h]	Vízbefecskendezéssel [kg/h]	Változás [%]
NEDC	1512,26	1538,24	1,72
WLTC	3249,63	3196,25	-1,64
Hajtóanyag felhasználás változása	-	-	-3,36

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.



6.1. ábra: Hajtóanyag felhasználás NEDC ciklus alatt vízbefecskendezéssel és nélkül

Azonban az 6.1 és 6.2 ábrán látható szórások nagysága miatt, ezeknek az eredményeknek a bizonytalansága magas, a várható tendencia előrejelzésére alkalmasak.



6.2. ábra: Hajtóanyag felhasználás WLTC ciklus alatt vízbefecskendezéssel és nélkül

6.2.3. A vízbefecskendezés hatása a részecskeszűrő regenerációjára

Ahogy a 4.5. fejezetben láthattuk, a kipufogógázban lévő víztartalom pozitívan befolyásolja a részecskeszűrő regenerációját. A víz jelenléte katalizálja a korom oxidációját, ezáltal a regenerációs idők csökkennek, illetve a passzív regeneráció aránya növekszik. Az eredményeim alapján 3-7 %-os regenerációs hatékonyság növekedést látszik egy fél órás aktív regeneráció során. Az eredményekből szintén látszik az is hogy ez ~ 4 perccel, ~ 13 %-kal rövidíti a regeneráció hosszát. A gépjármű élettartama alatt ilyen mértékű hajtóanyag fogyasztáscsökkenés érhető el a regenerációk során, ami jelentős mennyiség. Ez indirekt módon hozzájárul ahhoz, hogy mind a részecskeszűrő mind pedig a vízbefecskendezés vonzóbbá válhat az autógyártók számára, a gépjármű üzemeltetési költségeinek csökkentésével.

6.3. Vízbefecskendezés hatékonyságának kiterjesztése

A 4.4.4. fejezet eredményei alapján további SCR emisszió utókezelő rendszer elem hozzáadására is lehetőség lenne (EURO 6). Mivel a DOC nem képes csökkenteni a NO_x -at, az oxigén jelenléte miatt, ez csak szelektív katalizissal megvalósítható redukáló környezetben SCR használatával. Ez által a NO_x -ok tovább csökkenthetővé válnak. A vízbefecskendezéssel tapasztalható hőmérsékletek nem degradálódnak a DPF után sem, melyek így megfelelő környezetet teremtenének a SCR működéséhez. Ezt támogatná továbbá a Pd tartalmú katalizátor esetén, a vízbefecskendezés eredménye képpen a kipufogógázban megnövekedett NO_2 tartalom is (2.3.6 és 2.4.9. fejezet).

6.4. 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 fájhőből, 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.

6.5. Részecskemérő berendezés módosítása a többlet víz kiszűrésére

A méréseimhez elengedhetetlen részecskeszűrő berendezésen módosításokat eszközöltem. Erre azért volt szükség, hogy a kipufogóban esetlegesen megjelenő plusz vízmennyiséget el tudjam távolítani. A kialakítást és működését a vízbefecskendezési vizsgálatok során sikeresen teszteltem. Az átalakítás sikeresen alkalmazható a berendezés egyes üzemmódjaiban is és ezáltal jelentős üzembiztonság javulást érhető el, illetve javíthatja a kipufogógáz-kibocsátás mérését, megbízhatóbbá és alkalmasabbá téve azt különböző tudományos és ipari alkalmazásokhoz. Azáltal, hogy a javasolt egység pontos és megbízható méréseket biztosít, ígéretes a szélesebb körű tudományos alkalmazásokhoz, és megkönnyíti az autóiparban a kibocsátási szabályoknak való megfelelést.

A többlet víz eltávolítására létrehozott kipufogógáz kezelő egység egyben a karbantartási periódusok meghosszabbítására is tökéletesen alkalmas.

7. 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 értékelttem 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 autópári felhasználásokkal és mobilitási trendekkel, hogy bemutassa a lehetséges előnyöket és a leendő kutatási irányokat ebben az ágazatban.

Annak érdekében, hogy ezekre a hiányosságokra megfelelően válasz 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 jellemző 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 PN_{10} 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 bebizonyítottam, hogy a jelenkor technikai környezetében a „downsizinggal” és a jelenlegi közlekedést leképező 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 PN_{23} -at csökkenteni képes. A bevezetés előtt álló EURO 7 kapcsán fontos új eredmény, hogy PN_{10} 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.

8. SUMMARY

My PhD topic, on future mobility, concentrates on reducing the environmental impacts of land transport, in particular on mitigating the emissions of diesel internal combustion engines. As such, water injection, as an after-treatment emission reduction technique, proved to be a less promising solution in the 2000s, based on a consideration of the potential risks and achievable results at the time's technological level. With the current technical and technological background, I have re-evaluated water injection and its applicability in my research. In the literature review, I discussed harmful substance emissions, air quality protection, emission standards, and the efforts made so far to reduce emissions. I identified key issues in after-treatment emission reduction research and its absence, as well as the placement of water injection within internal combustion engine emission control systems, which is also lacking in current studies. My thesis examines the literature on water injection into the combustion of diesel engines in chronological order, focusing on the changes that have occurred over the past three decades. It then analyzes and reevaluates water injection in the context of current technology and the upcoming Euro 7 regulations, comparing the findings with current automotive applications and mobility trends to highlight potential benefits and future research directions in this field.

In order to properly address these gaps, I needed to conduct extensive preliminary investigations, which allowed me to confidently present and support my novel findings. The processes occurring in the emission after-treatment system – specifically within the vehicle's exhaust system – are closely related to the exhaust gas temperature. Accordingly, I conducted measurements to determine the typical temperatures of the planned emission after-treatment system components. I compiled the significant reactions taking place here, including those on the Diesel Oxidation Catalyst (DOC) and Diesel Particulate Filter (DPF), and summarized these in tables. This greatly aided in the understanding of our later results.

Before starting the water injection tests, I assessed the effect of the water already entering the combustion chamber through humidity and concluded that the reactions occurring in the combustion chamber shift towards more complete combustion when the air has a higher water content due to humidity. As a result, during the emission reduction process, we observed a new outcome: a decrease in PN_{10} particle size, which is one of the new elements of the emerging EURO 7 emission regulations.

I conducted measurements to determine the effect of water injection on temperature, both after the engine and along the emission after-treatment system. I found that the oxidation catalyst conversion was adequate and that the temperatures did not degrade across the various emission treatment components.

In my research, I demonstrated that, within the current technological environment, "downsizing" and the high-load cycles that reflect modern transportation (WLTC) allow intake manifold injection to perform well. Under real-world conditions, exhaust gas recirculation is capable of reducing typical diesel pollutant emissions, such as NO_x and PN_{23} . A key new finding regarding the upcoming EURO 7 regulations is that it also has a positive impact on PN_{10} particle size emissions, and I have determined the location of this reduction too.

As a result of using practical and real-world applications in materials and methods, my findings can be easily transferred and applied to after-treatment retrofitting modifications involving water injection. The results of my investigations show that, without costly modifications to the engine control system, intake manifold water injection can still demonstrate positive emission effects. In addition, we did not observe any increased fuel consumption when using water injection alongside the complete emission treatment system. However, due to the positive catalytic effect on the regeneration of the diesel particulate filter — specifically the combustion of soot — the post-injection duration is reduced, which in turn lowers fuel consumption.

9. KÖSZÖNET

Köszönetet szeretnék mondani mindenkinek, aki velem volt ez alatt az időszak alatt és a körülményeim ismeretében, vagy csak általános pozitív emberi gesztusként türelmet tanúsított felém ez alatt az igen hosszú, emberi akaratot emésztő és a jellemet próbára tevő időszak alatt. Az alázat újabb mélységeit tanultam meg ez alatt a négy év alatt, melyre ezek az emberek tanítottak, akik folyamatosan és önzetlenül segítettek. Reménykedem, hogy ebben megerősödve, lehetőségem adatik, hogy ezt a sok törődést segítséget és türelmet megsokszorozva tudjam mindenkinek törleszteni.

Külön ki kell emelnem Dr. Kiss Péter tanár urat, aki folyamatosan támogatott szakmailag, rengeteg segítséget kaptam tőle, nélküle az értekezés nem valósul meg.

Szeretnék köszönetet mondani a KDP-2021 C1767774 pályázatnak a finanszírozásért, amely lehetővé tette kutatásom elvégzését. Az IBIDEN Hungary Kft.-nek és kollégáimnak, akik nélkül kutatásom szintén nem valósulhatott volna meg.

Hálás vagyok családomnak, nagyszülőknek, feleségemnek a kitartásért és segítségért a mindennapokban és három kislányomnak, akik mindvégig óriási türelmet tanúsítottak amikor nem lehettem velük. Köszönöm Édesanyámnak és Édesapámnak is aki már nem lehet velünk, hogy felnevelt, támogatott és felnyitotta a szemem a világra.

10. MELLÉKLET

M1. Irodalomjegyzék

1. ACEA. (2023) Economic and Market Report Global and EU Auto Industry: Full Year 2023., 2024., lekérdezés időpontja: 2024 május 1., Online elérhető: https://www.acea.auto/files/Economic_and_Market_Report-Full_year_2023.pdf
2. Agarwal, A.K. (2007) Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Prog Energy Combust Sci* 33, pp 233–271, <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.08.003>
3. Al-Aqtash, O., Farkas, F., Sági, A., Szent, I., Boldizsár, T. (2023) Ábrahámné, K.B.; Kukovecz, Á.; Kónya, Z. Differently shaped Al₂O₃-based Pd catalysts loaded catalytic converter for novel non-road mobile machinery exhaust systems. *React. Kinet. Mech. Catal.* 2023, 136, pp. 149–161., <https://doi.org/10.1007/s11144-022-02291-x>.
4. Aminjan, K.K., Sedaghat, M., Heidari, M., Khashehchi, M., Mohammadzadeh, K., Salahinezhad, M., Bina, R. (2024) Numerical investigation of the impact of fuel temperature on spray characteristics in a pressure-swirl atomizer with spiral path. *Exp. Comput. Multiph. Flow* 2024. <https://doi.org/10.1007/s42757-024-0198-x>.
5. Andrews, G.E., Bartle, K., Pang, S., Nurein, A., Williams, P. (1988) The Reduction in Diesel Particulate Emissions Using Emulsified Fuels; *SAE Technical Paper*, 880348; SAE International: Warrendale, PA, USA, 1988., <https://doi.org/10.4271/880348>.
6. Antonov, D.V., Fedorenko, R.M., Strizhak, P.A., Nissar, Z., Sazhin, S.S (2021) Puffing/micro-explosion in composite fuel/water droplets heated in flames. *Combust. Flame* 2021, 233, 111599. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111599>.
7. Ashwin, J., Ashok, B., Vignesh, R., Saravanan, B., Avinash, A. (2022) Chapter 3—NO_x and PM trade-off in IC engines. In *NO_x Emission Control Technologies in Stationary and Automotive Internal Combustion Engines*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2022; pp. 69–93. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823955-1.00003-6>.
8. Ayetor, G.K., Mbonigaba, I., Sackey, M.N., Andoh, P. (2021) Vehicle regulations in Africa: Impact on used vehicle import and new vehicle sales. *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.* 2021, 10, 100384. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100384>.
9. Baladincz, J., Hancsók, J., Magyar, Sz., Pölczmann, Gy. (2006) „Környezetbarát motorolajok I. Kőolajeredetű alapolajok előállítása: hidrokrakkolás”, *Magy. Kém. Lapja*, 61(12), pp. 391–398, ISSN 1588-1199, DOI: [10.24364/MKL.2024.09](https://doi.org/10.24364/MKL.2024.09)
10. Baladincz, J., Nemesnyik, Á., Bartha, L., Sági, R., Hancsók, J. (2007) Környezetbarát motorolajok V. Motorolajok korszerű adalékai, *Magy. Kém. Lapja*, 62(4), pp. 124–130. ISSN 1588-1199, DOI: [10.24364/MKL.2024.09](https://doi.org/10.24364/MKL.2024.09)
11. Bedford, F., Rutland, C., Dittrich, P., Raab, A., Wirbeleit, F., Effects of Direct Water Injection on DI Diesel Engine Combustion; *SAE Technical Paper*, 2000-01-2938; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2000., <https://doi.org/10.4271/2000-01-2938>.
12. Behndig, A.F., Mudway, I.S., Brown, J.L., Stenfors, N., Helleday, R., Duggan, S.T., Wilson, S.J., Boman, C., Cassee, F.R., Frew, A.J. (2006) Airway antioxidant and inflammatory responses to diesel exhaust exposure in healthy humans. *Eur. Respir. J.* 27, pp. 359–365. <https://doi.org/10.1183/09031936.06.00136904>.
13. Berni, F., Breda, S., Lugli, M., Cantore, G. (2015) A Numerical Investigation on the Potentials of Water Injection to Increase Knock Resistance and Reduce Fuel Consumption in Highly Downsized GDI Engines. *Energy Procedia* 2015, 81, pp. 826–835. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.091>.

14. Bielaczyc, P., Klimkiewicz, D., Woodburn, J., Szczotka, A. (2019) Exhaust emission testing methods—BOSMAL's legislative and development emission testing laboratories. *Combust. Engines* 2019, 178, pp. 88–98. <https://doi.org/10.19206/CE-2019-316>
15. Biró, N., Pillinger, Gy., Kiss, P., **Szóllósi, D.**, Ohira A. (2021) Reducing nitrogen oxides in ICE R&D laboratory environment, *Mechanical Engineering Letters: R & D: Research and Development* 20 pp. 50-58. 9 p. ISSN 2060-3789
16. Biró, N., **Szóllósi, D.**, Kiss, P. (2023) Particle Counter Design Upgrade for Euro 7. *Atmosphere*, 14 (9), Paper: 1411, <https://doi.org/10.3390/atmos14091411>
17. Biró, N., Pillinger, Gy., (2020) Adblue-adagoló fejlesztése kipufogógáz-kezelő rendszer optimalizálásához, *Mezőgazdasági Technika* 61, pp. 2-5., 4 p. Matarka ISSN 0026-1890
18. Bissett, E.J, Shadman F. (1985) Thermal regeneration of diesel-particulate monolithic filters, *AIChE Journal* 31, pp. 753-758, <https://doi.org/10.1002/aic.690310508>
19. Blocquet, M., Schoemaeker, C., Amedro, D., Herbinet, O., Battin-Leclerc, F., Fittschen, C. (2013) Quantification of OH and HO₂ radicals during the low-temperature oxidation of hydrocarbons by Fluorescence Assay by Gas Expansion technique. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2013, 110, pp. 20014–20017. <https://doi.org/10.1073/pnas.1314968110>.
20. BMW Group, Pressclub Global, Article, 14 April 2016. Online elérhető: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0236962EN/the-new-bmw-m4-gts>, lekérdezés időpontja: 2024 március 28
21. Bosch Media Service, Press Release, Mobility Solutions, 31 August 2016. Online elérhető: https://www.boschmediaservice.hu/en/press_release/water-injection-107.html, lekérdezés időpontja: 2024 augusztus 11
22. Bowman, C.T. (1992) Control of combustion-generated nitrogen oxide emissions: Technology driven by regulation. *Symp. (Int.) Combust.* 1992, 24, pp. 859–878. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(06\)80104-9](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(06)80104-9).
23. Canfield, C.A. Effects of Diesel—Water Emulsion Combustion on Diesel Engine NO_x Emissions. Master's Thesis, University of Florida, Gainesville, FL, USA, 1999. Online elérhető: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA366907.pdf>, lekérdezés időpontja: 2024 július 29.
24. Caporali, R., Chansai, S., Burch, R., Delgado, J.J., Goguet, A., Hardacre, C., Mantarosie, L., Thompsett, D. (2014) Critical role of water in the direct oxidation of CO and hydrocarbons in diesel exhaust after treatment catalysis. *Appl. Catal. B Environ.* 2014, 147, pp. 764–769. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.10.004>.
25. Charlton, S.J. (2005) Developing Diesel Engines to Meet Ultra-Low Emission Standards; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2005; *SAE Technical Paper*. <https://doi.org/10.4271/2005-01-3628>.
26. Chen, Z., Cai, Y., Xu, G., Duan, H., Jia, M. (2022) Exploring the potential of water injection (WI) in a high-load diesel engine under different fuel injection strategies. *Energy* 2022, 243, 123074. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.123074>.
27. Christensen, J.M., Grunwaldt, J.D., Jensen, A.D. (2017) Effect of NO₂ and water on the catalytic oxidation of soot. *Appl. Catal. B Environ.* 2017, 205, pp. 182–188., <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.12.024>.
28. Chybowski, L., Laskowski, R., Gawdzińska, K. (2015) An overview of systems supplying water into the combustion chamber of diesel engines to decrease the amount of nitrogen oxides in exhaust gas. *J. Mar. Sci. Technol.* 2015, 20, pp. 393–405 <https://doi.org/10.1007/s00773-015-0303-8>.
29. Cook, D.H., Law, C.K. (1978) A preliminary study on the utilization of water-in-oil emulsions in Diesel engines. *Combust. Sci. Technol.* 1978, 18, pp. 217–221. <https://doi.org/10.1080/00102207808946854>.

30. Council of the European Union. (2023) Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on Type-Approval of Motor Vehicles and Engines and of Systems, Components and Separate Technical Units Intended for Such Vehicles, with Respect to Their Emissions and Battery Durability (Euro 7) and Repealing Regulations (EC) No 715/2007 and (EC) No 595/2009. 2023. Online elérhető: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-16960-2023-REV-1/en/pdf> lekérdezés időpontja: 2024 április 6.
31. Czerwinski, J., et al. (2013) NO₂ Formation in Diesel Particle Filter Systems, *SAE international*, 2013-01-0526, 11 p., <https://doi.org/10.4271/2013-01-0526>.
32. Deloitte, (2016) Deloitte Africa Automotive Insights: Navigating the African Automotive Sector: Ethiopia, Kenya and Nigeria. 2016. Online elérhető: https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/za/Documents/deloitteafrica/ZA_Deloitte-Africa-automotive-insights-Ethiopia-Kenya-Nigeria-Apr16-2017.pdf, lekérdezés időpontja: 2024 április 30.
33. Demers D., Walters G., (1999) Guide to exhaust emission control options. BAeSAME, Bristol, MS3026, Tech. report, September 1999.
34. Dempsey, A.B., Zeman, J., Wall, M. (2021) A System to Enable Mixing Controlled Combustion with High Octane Fuels Using a Prechamber and High-Pressure Direct Injector. *Front. Mech. Eng.* 2021, 7, 637665. <https://doi.org/10.3389/fmech.2021.637665>.
35. De Serio, D., De Oliveira, A., Sodré, J.R. (2017) Effects of EGR rate on performance and emissions of a diesel power generator fueled by B7. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 39, pp. 1919–1927, <https://doi.org/10.1007/s40430-017-0777-x>
36. Dieselnets (2013) Standards, Cycles, ECE 15 + EUDC / NEDC Online elérhető: https://dieselnets.com/standards/cycles/ece_eudc.php lekérdezés időpontja: 2024. május 2.
37. Dryer, F.L. (1977) Water addition to practical combustion systems—Concepts and applications. In Symposium (International) on Combustion; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1977; Volume 16, pp. 279–295. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(77\)80332-9](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80332-9).
38. EUR-Lex. (2007) Online elérhető: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32007R0715> lekérdezés időpontja: 2024 április 24
39. EUR-Lex. (2015) Online elérhető: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02008L0050-20150918> lekérdezés időpontja: 2023 augusztus 21.
40. European Commission. (2022) Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on Type-Approval of Motor Vehicles and Engines and of Systems, Components and Separate Technical Units Intended for Such Vehicles, with Respect to Their Emissions and Battery Durability (Euro 7) and Repealing Regulations (EC) No 715/2007 and (EC) No 595/2009. 2022. Online elérhető: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/docs_autres_institutions/commission_europeenne/com/2022/0586/COM_COM\(2022\)0586_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/docs_autres_institutions/commission_europeenne/com/2022/0586/COM_COM(2022)0586_EN.pdf), lekérdezés időpontja: 2024 április 30.
41. European Environment Agency. (2012) Particulate Matter from Natural Sources and Related Reporting under the EU Air Quality Directive in 2008 and 2009; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2012. <https://doi.org/10.2800/55574>.
42. European Environment Agency (2021) Emissions of the main air pollutants in Europe, <https://www.eea.europa.eu/ims/emissions-of-the-main-air>, lekérdezés időpontja: 2025 március 30.

43. Falcon-Rodriguez, C.I., Osornio-Vargas, A.R., Sada-Ovalle, I., Segura-Medina, P. (2016) Aeroparticles, Composition, and Lung Diseases. *Front. Immunol.* 2016, 7, 3. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2016.00003>.
44. Falfari, S., Bianchi, G.M., Cazzoli, G., Forte, C., Negro, S. (2018) Basics on Water Injection Process for Gasoline Engines. *Energy Procedia* 2018, 148, pp. 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.018>.
45. Fenimore, C.P. (1971) Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. In *Symposium (International) on Combustion*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1971; Volume 13, pp. 373–380. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(71\)80040-1](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(71)80040-1).
46. Fiebig, M., Wiartalla, A., Holderbaum, B., Kiesow, S. (2014) Particulate emissions from diesel engines: Correlation between engine technology and emissions. *J. Occup. Med. Toxicol.* 2014, 9, 6. <https://doi.org/10.1186/1745-6673-9-6>.
47. Fromager, M., Schmelzle, P., Schulz, P. (2000) Practical Experience Using a Diesel/Water Emulsion, In *Proceedings of the 2nd International Symposium on Fuels and Lubricants, Symposium Papers*, New Delhi, India, 10–12 March 2000; Volume 2, p. 435.
48. Ghaly, A., Eldrainy, Y., El-Maghlany, W., Yousef, A. (2017) Novel thermal throttling model in spark ignition engines: A way to replace a mechanical one. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 2017, 4, pp. 223–230., <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.10.012>.
49. Giechaskiel, B., Mamakos, A., Woodburn, J., Szczotka, A., Bielaczyc, P. (2019) Evaluation of a 10 nm Particle Number Portable Emissions Measurement System (PEMS). *Sensors* **2019**, 19, 5531, <https://doi.org/10.3390/s19245531>
50. Giechaskiel, B., Melas, A. (2022) Comparison of Particle Sizers and Counters with Soot-like, Salt, and Silver Particles. *Atmosphere* **2022**, 13, 1675, <https://doi.org/10.3390/atmos13101675>
51. Glarborg, P. (2019) Detailed Kinetic Mechanisms of Pollutant Formation in Combustion Processes. *Computer Aided Chemical Engineering*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019; Chapter 11, Volume 45, pp. 603–645, ISBN 9780128195796. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64087-1.00011-5>.
52. Gui, R., Yan, Q., Xue, T., Gao, Y., Li, Y., Zhu, T., Wang, Q. (2022) The promoting/inhibiting effect of water vapor on the selective catalytic reduction of NO_x. *J. Hazard. Mater.* 2022, 439, 129665. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129665>.
53. Gumus, E.; Otkur, M. (2023) Design of an Optimum Compact EGR Cooler in a Heavy-Duty Diesel Engine towards Meeting Euro 7 Emission Regulations. *Sustainability* 2023, 15, 12361. <https://doi.org/10.3390/su151612361>
54. Gunston, B. (1989) *Jane's Fighting Aircraft of WW II*; Military Press: Sussex, UK, 1989; p. 318, ISBN 10: 1851704930.
55. Hadidi, H., Hassan, A. (2023) Improving the Performance of Internal Combustion Engines and Reducing Emissions by Injecting Water with the Air Entering the Engines. *SAE Int. J. Fuels Lubr.* 16(1), pp. 49–56, 7 p., <https://doi.org/10.4271/04-16-01-0005>
56. Hagan, R., Markey, E., Clancy, J., Keating, M., Donnelly, A., O'Connor, D.J., Morrison, L., McGillicuddy, E.J. (2023) Non-Road Mobile Machinery Emissions and Regulations: A Review. *Air* 2023, 1, 14–36. <https://doi.org/10.3390/air1010002>.
57. Hagen, J., Filipi, Z., Assanis, D. (2006). Transient Diesel Emissions: Analysis of Engine Operation During a Tip-In. *SAE Technical Papers*. 2006-01-1151, 13 p., <https://doi.org/10.4271/2006-01-1151>.
58. Hancsók, J., (1999) „Korszerű motor- és sugárhajtómű üzemanyagok II. Dízelgázolajok”, Veszprémi Egyetemi Kiadó, Veszprém, 1999
59. Hashimoto, R., Mori, G., Yasir, M., Tröger, U., (2013) Wieser, H. Impact of Condensates Containing Chloride and Sulphate on the Corrosion in Automotive

- Exhaust Systems. *Berg Hüttenmännische Monatshefte* 2013, 158, pp. 377–383. <https://doi.org/10.1007/s00501-013-0180-6>.
60. Hänninen, O.O., Palonen, J., Tuomisto, J.T., Yli-Tuomi, T., Seppänen, O., Jantunen, M.J., (2005) Reduction potential of urban PM_{2.5} mortality risk using modern ventilation systems in buildings. *Indoor Air*. 2005 Aug, 15(4), pp. 246–56. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00365.x>
 61. Holtbecker, R., Geist, M. (1998) Exhaust Emissions Reduction Technology for Sulzer Marine Diesel Engines: General Aspects; Wärtsilä NSD Switzerland Ltd.: Winterthur, Switzerland, 1998.
 62. Hountalas, D.T., Mavropoulos, G.C., Zannis, T. (2007) Comparative Evaluation of EGR, Intake Water Injection and Fuel/Water Emulsion as NO_x Reduction Techniques for Heavy Duty Diesel Engines; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2007; *SAE Technical Papers.*, 20 p., <https://doi.org/10.4271/2007-01-0120>.
 63. Hountalas, D., Mavropoulos, G., Zannis, T., Mamalis, S. (2006) Use of Water Emulsion and Intake Water Injection as NO_x Reduction Techniques for Heavy Duty Diesel Engines; *SAE Technical Paper*, 2006-01-1414; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2006. <https://doi.org/10.4271/2006-01-1414>.
 64. Imahashi, T., Hashimoto, K., Hayashi, J.I., Yamada, T. (1995) Research on NO_x Reduction for Large Marine Diesel Engines; *ISME*: Yokohama, Japan, 1995.
 65. Ishida, M., Chen, Z. (1994): An Analysis of the Added Water Effect on NO Formation in D.I. Diesel Engines. *SAE Technical Paper* 941691, 12 p., <https://doi.org/10.4271/941691>
 66. Jacobs, T., Assanis, D., Filipi, Z. (2003) The Impact of Exhaust Gas Recirculation on Performance and Emissions of a Heavy-Duty Diesel Engine, *SAE Technical Paper* 2003-01-1068, <https://doi.org/10.4271/2003-01-1068>.
 67. Jasper, A.W. (2022) Predicting third-body collision efficiencies for water and other polyatomic baths. *Faraday Discuss.* 2022, 238, pp. 68–86. <https://doi.org/10.1039/D2FD00038E>.
 68. Jánosi, L., Kiss, P., (1988) Belsőégésű motorok nitrogénoxid kibocsátásának követése más motorjellemzőkből In: Hajdú, József (szerk.) MTA-MÉM Agrár-Műszaki Bizottság kutatási és fejlesztési tanácskozás Gödöllő, Magyarország: MÉM Műszaki Intézet
 69. Kalghatgi, G. (2019) Development of Fuel/Engine Systems—The Way Forward to Sustainable Transport. *Engineering* 5, pp. 510–518. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.009>.
 70. Kalló, D. (2000) Katalitikus eljárások a környezetvédelemben, University of Veszprém
 71. Kangasluoma, J., Attoui, M. (2019) Review of sub-3 nm condensation particle counters, calibrations, and cluster generation methods. *Aerosol Sci. Technol.* 2019, 53, pp. 1277–1310., <https://doi.org/10.1080/02786826.2019.1654084>
 72. Karagulian F., Van Dingenen R., Belis C.A., Janssens-Maenhout G., Crippa M., Guizzardi D., Dentener F. (2017) Attribution of anthropogenic PM_{2.5} to emission sources, European Commission, Joint Research Centre report, 49 p., ISBN 978-92-79-66599-8, ISSN 1831-9424, doi:10.2760/344371
 73. Karre, A.V., Garlapalli, R.K., Jena, A., Tripathi, N. (2023) State of the art developments in oxidation performance and deactivation of diesel oxidation catalyst (DOC). *Catal. Commun.* 2023, 179, 106682. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2023.106682>.
 74. Karvounis, N., Pang, K.M., Mayer, S., Walther, J.H. (2018) Numerical simulation of condensation of sulfuric acid and water in a large two-stroke marine diesel engine.

- Appl. Energy* 2018, 211, pp. 1009–1020.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.085>.
75. Katare, S. (2006) Robust Parameter Estimation Algorithms for Nonlinear Aftertreatment Models. *SAE Technical Paper 2006-01-0690*, SAE 2006 World Congress & Exhibition, 17 p., <https://doi.org/10.4271/2006-01-0690>
 76. Khan, M.Y., Sharma, S., Liew, C.M., Joshi, A., Barnes, D., Scott, N., Mensen, B., Cao, T., Li, Y., Shimpi, S.A. (2018) Comparison of Full Flow Dilution, Partial Flow Dilution, and Raw Exhaust Particle Number Measurements. *Emiss. Control Sci. Technol.* **2018**, 4, pp. 103–112. <https://doi.org/10.1007/s40825-018-0086-6>
 77. Kim, C., Schmid, M., Schmieg, S., Tan, J. et al., (2011) The Effect of Pt-Pd Ratio on Oxidation Catalysts Under Simulated Diesel Exhaust. *SAE Technical Paper*, 2011-01-1134, 10 p., <https://doi.org/10.4271/2011-01-1134>.
 78. Kim, J., Park, H., Bae, C., Choi, M., Kwak, Y. (2016) Effects of water direct injection on the torque enhancement and fuel consumption reduction of a gasoline engine under high-load conditions. *Int. J. Engine Res.* 2016, 17, pp. 795–808., 14 p., <https://doi.org/10.1177/1468087415613221>.
 79. Kim, M.-S., Akpudo, U.E., Hur, J.-W. (2021) A Study on Water-Induced Damage Severity on Diesel Engine Injection System Using Emulsified Diesel Fuels. *Electronics* 2021, 10, 2285. <https://doi.org/10.3390/electronics10182285>.
 80. Kittelson, D., Watts W.F., Johnson, J. (2002) Diesel Aerosol Sampling Methodology – CRC E-43 Final Report. University of Minnesota Report for the Coordination Research Council, 19 August 2002.
 81. Koltsakis G.C., Stamatelos A.M. (1996) Modeling thermal regeneration of diesel particulate traps, *AIChE Journal*, 42, pp. 1662-1672, <https://doi.org/10.1002/aic.690420618>
 82. Konstandopoulos, A.G., Kostoglou, M. (2000) Reciprocating flow regeneration of soot filters. *Combust. Flame* 2000, 121, pp. 488–500 [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(99\)00156-X](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(99)00156-X).
 83. Konstandopoulos, A.G., Lorentzou, S., Pagkoura, S., Ohno, K., Ogyu, K., Oya, T. (2007) Sustained Soot Oxidation in Catalytically Coated Filters, *SAE Transactions* Vol. 116, Section 4, pp. 508-515, 8 p., <https://doi.org/10.4271/2007-01-1950>
 84. Kreyling, W.G., Hirn, S., Schleh, C. (2010) Nanoparticles in the lung. *Nat. Biotechnol.* 28, pp. 1275–1276. <https://doi.org/10.1038/nbt.1735>.
 85. Ladommatos, N., Abdelhalim, S.M., Zhao, H. (2000) The Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Combustion and Emissions, *International Journal of Engine Research*, volume 1, pp. 107-126, <https://doi.org/10.1243/1468087001545290>
 86. Ladommatos, N., Abdelhalim, S.M., Zhao, H., Hu, Z. (1998a) The effects of diesel combustion and emissions of reducing the inlet charge mass due to thermal throttling with hot EGR. *SAE paper* 980185, 11 p., <https://doi.org/10.4271/980185>.
 87. Ladommatos, N., Abdelhalim, S.M., Zhao, H., Hu, Z. (1998b) The effects of carbon dioxide in exhaust gas recirculation on diesel engine emissions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: *Journal of Automobile Engineering*. 1998, Volume 212, issue 1, pp. 25-42., <https://doi.org/10.1243/0954407981525777>
 88. Lan, C., Cui, Z., Su, T. (2018) Numerical analysis of catalytic efficiency of diesel exhaust purification based on multimedia aided regression model. *Multimed Tools Appl* 78, pp. 4437–4461., <https://doi.org/10.1007/s11042-018-5898-4>
 89. Lapuerta, M., Ramos, Á, Fernández-Rodríguez, D, González-García, I. (2019) High-pressure versus low-pressure exhaust gas recirculation in a Euro 6 diesel engine with lean-NO_x trap: Effectiveness to reduce NO_x emissions. *International Journal of Engine Research*. 2019, volume 20, issue 1, pp. 155-163. <https://doi.org/10.1177/1468087418817447>

90. Lawrence M.G., (2005) The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air: A Simple Conversion and Applications, *Bulletin of the American Meteorological Society* Volume 82 Issue 2, pp. 225-234, <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-225>
91. Lee, T., Park, J., Kwon, S., Lee, J., Kim, J. (2013) Variability in operation-based NO_x emission factors with different test routes, and its effects on the real-driving emissions of light diesel vehicles. *Sci. Total Environ.* pp. 377–385. 9p., <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.015>.
92. Leman, A.M., Feriyanto, D., Farhana, N., Rahmat, R., Bakar B.A., Baba, I. (2016) Oxidation Resistance Analysis Of Metallic (FeCrAl Foil) Catalytic Converter Developed By Ultrasonic Approach, MATEC Web of Conferences 78, 2nd International Conference on Green Design and Manufacture, 01009, 10 p., <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167801009>
93. Li, D.D., Wang, C., Chan, Q.N., Yeoh, G.H. (2023) Soot: A review of computational models at different length scales. *Exp. Comput. Multiph. Flow* 2023, 5, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s42757-021-0124-4>.
94. Li, N., Xia, T., Nel, A.E. (2008) The role of oxidative stress in ambient particulate matter-induced lung diseases and its implications in the toxicity of engineered nanoparticles. *Free Radic. Biol. Med.* 2008, 44, pp. 1689–1699. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2008.01.028>.
95. Liati, A., Schreiber, D., Dasilva, Y.A.R., Eggenschwiler, P.D. (2018) Ultrafine particle emissions from modern Gasoline and Diesel vehicles: An electron microscopic perspective. *Environ. Pollut.* 2018, 239, pp. 661–669. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.081>.
96. Lif, A., Holmberg, K. (2006) Water-in-diesel emulsions and related systems. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2006, 123–126, pp. 231–239. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2006.05.004>.
97. Lin, S.-L., Lee, W.-J., Lee, C.-F.F., Wu, Y.-P. (2012) Reduction in emissions of nitrogen oxides, particulate matter, and polycyclic aromatic hydrocarbon by adding water-containing butanol into a diesel-fueled engine generator. *Fuel* 2012, 93, pp. 364–372. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.11.042>.
98. Lončarević, Š., Ilinčić, P., Šagi, G., Lulić, Z. (2022) Problems and Directions in Creating a National Non-Road Mobile Machinery Emission Inventory: A Critical Review. *Sustainability* 2022, 14, 3471. <https://doi.org/10.3390/su14063471>.
99. Luo, T., Gorte, R.J. (2004) Characterization of SO₂-poisoned ceria-zirconia mixed oxides. *Appl. Catal. B Environ.* 2004, 53, 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2004.04.020>.
100. Lynch, L.J., Coleman, A.R., Cutro, C. and Cutro, C. (2016), "The Volkswagen Emissions Scandal", University of Virginia Darden School Foundation, <https://doi.org/10.1108/case.darden.2021.000009>
101. Manufacturers of Emission Controls Association (MECA), Reports, December 2007. Online elérhető: <https://www.meca.org/wp-content/uploads/galleries/default-file/MECA%20Diesel%20White%20Paper%202012-07-07%20final.pdf>, lekérdezés időpontja: 2024 augusztus 16.
102. Marval, J., Tronville, P. (2022) Ultrafine particles: A review about their health effects, presence, generation, and measurement in indoor environments. *Build. Environ.* 2022, 216, 108992. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108992>.
103. Matarrese, R., Castoldi, L., Lietti, L. (2017) Oxidation of model soot by NO₂ and O₂ in the presence of water vapour. Dipartimento di Energia, Laboratory of Catalysis and Catalytic Processes and NEMAS, Centre of Excellence, Politecnico di Milano, Elsevier, *Chemical Engineering Science*, vol. 173, pp. 560-569, 10 p., <https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.08.017>

104. May, J., Bosteels, D., Favre, C. (2014) A comparison of light-duty vehicle emissions over different test cycles, and in real driving conditions. In Proceedings of the FISITA 2014 World Automotive Congress, Maastricht, The Netherlands, 2–6 June 2014; Association for Emissions Control by Catalysts (AECC): Brussels, Belgium, 2014.
105. Meng, S., Sun, S., Xu, H., Guo, Y., Feng, D., Zhao, Y., Wang, P., Qin, Y. (2016) The effects of water addition on the laminar flame speeds of CO/H₂/O₂/H₂O mixtures, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 41, Issue 25, pp. 10976-10985, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.251>.
106. Merrion D., (2003) Heavy Duty Diesel Emission Regulations - Past, Present, and Future, Diesel Exhaust Aftertreatment 2000-2007 SAE books, April 2008, pp. 3-18. ISBN-978-0-7680-1709-0 (online) <https://doi.org/10.4271/2003-01-0040>
107. Mészáros, E., (2021) Légkör-bioszféra kölcsönhatások, Budapest, Magyarország : Akadémiai Kiadó , 224 p. ISBN:9789634546450
108. Mills, N.L., Törnqvist, H., Newby, D.E., Robinson, S.D., Gonzalez, M., Darnley, K., MacNee, W., Boon, N.A., Donaldson, K., Blomberg, A., (2005) Diesel exhaust inhalation causes vascular dysfunction and impaired endogenous fibrinolysis. *Circulation* 112, pp. 3930–3936. <https://doi.org/10.1161/circulationaha.105.588962>.
109. Milojević, S., Glišović, J., Savić, S., Bošković, G., Bukvić, M., Stojanović, B. (2024) Particulate Matter Emission and Air Pollution Reduction by Applying Variable Systems in Tribologically Optimized Diesel Engines for Vehicles in Road Traffic. *Atmosphere*, 15, 184. <https://doi.org/10.3390/atmos15020184>.
110. Miyamoto, N., Ogawa, H., Wang, J., Ohashi, H. (1995) Significant NO_x Reductions with Direct Water Injection into the Sub-Chamber of an IDI Diesel Engine; *SAE Technical Paper*, 950609; SAE International: Warrendale, PA, USA, 1995. <https://doi.org/10.4271/950609>.
111. Mobility Engineering, Society of Automotive Engineering (SAE), 1 August 2015. Online elérhető : <https://www.mobilityengineeringtech.com/component/content/article/42141-sae-ma-01342>, lekérdezés időpontja: 2024 augusztus 14
112. Moser, F. X., Sams, T., Dreisbach, R. (2004) Lowest Engine-Out Emissions as the Key to the Future of the Heavy Duty Diesel Engine - New Development Results, 10th Diesel Engine Emission Reduction Conference Aug. 30 – Sept. 2, 2004, San Diego, pp. 49 https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f9/2004_deer_moser.pdf - lekérdezés időpontja: 2025 április 18.
113. Mulholland, E., Joshua, M., Yoann, B., Kaylin, L., Felipe, R. (2022) The role of NO_x emission reductions in Euro 7/VII vehicle emission standards to reduce adverse health impacts in the EU27 through 2050. *Transp. Eng.* 2022, 9, 100133. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100133>.
114. Nagy, G., Hancsók, J., Varga, Z., Pölczmann, Gy., (2006) Környezetbarát dízelgázolajok előállítás, II. Gázolajpárlatok aromástartalmának csökkentése, *Magy. Kém. Lapja*, 61(1), pp. 16-22., 7 p., ISSN 1588-1199, DOI: [10.24364/MKL.2024.09](https://doi.org/10.24364/MKL.2024.09)
115. Naik, G.G., Dharmadhikari, H.M. (2023) Methods for reducing NO_x and PM emissions in compression ignition engine: A review. *Mater. Today Proc.* 2023, 72 Pt 3, pp. 1406–1412. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.339>.
116. Neshat, E., Bajestani, A.V., Honnery, D. (2019) Advanced numerical analyses on thermal, chemical and dilution effects of water addition on diesel engine performance and emissions utilizing artificial inert species. *Fuel* 2019, 242, pp. 596–606. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.080>.
117. Ning, L., Duan, Q., Chen, Z., Kou, H., Liu, B., Yang, B., Zeng, K. (2020) A comparative study on the combustion and emissions of a non-road common rail diesel engine fueled with primary alcohol fuels (methanol, ethanol, and n-butanol)/diesel dual fuel. *Fuel*, 266, 117034. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117034>.

118. Nockert, J., Nyborg, L., Norell, M. (2012) Corrosion of stainless steels in simulated diesel exhaust environment with urea. *Mater. Corros.* 2012, 63, pp. 388–395. <https://doi.org/10.1002/maco.201005783>.
119. Odaka, M., Koike, N., Tsukamoto, Y., Narusawa, K., Yoshida, K. (1991) Effects of EGR with a Supplemental Water Injection to Control Exhaust Emissions from Heavy-Duty Diesel Powered Vehicles; SAE International: Warrendale, PA, USA, 1991; *SAE Technical Paper* 910739. <https://doi.org/10.4271/910739>.
120. Ohno, K., (2006) A Study on Performance of Particulate Filters Using R-SiC Porous Materials for Diesel Vehicles, pp. 2-1 – 3-45.
121. Ohno K. (2008) New Technology with Porous Materials: Progress in the Development of the Diesel Vehicle Business, Ceramic Engineering and Science Proceedings, Advances in Bioceramics and Porous Ceramics: *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, Volume 29, Issue 7, pp. 313-325., <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.484.15>
122. OICA (2021). Proposal for amendments to Regulation No. 49 (Emissions of compression ignition and positive ignition (LPG and CNG) engines), Online elérhető: <https://unece.org/sites/default/files/2021-12/GRPE-85-28e.pdf> lekérdezés időpontja 2023 augusztus 6.
123. Paltrinieri, S., Mortellaro, F., Silvestri, N., Rolando, L., Medda, M., Corrigan, D. (2019) Water Injection Contribution to Enabling Stoichiometric Air-to-Fuel Ratio Operation at Rated Power Conditions of a High-Performance DISI Single Cylinder Engine; *SAE Technical Paper*, 2019-24-0173; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2019. <https://doi.org/10.4271/2019-24-0173>.
124. Pamminger, M., Wang, B., Hall, C.M., Vojtech, R., Wallner, T. (2020) The impact of water injection and exhaust gas recirculation on combustion and emissions in a heavyduty compression ignition engine operated on diesel and gasoline. *International Journal of Engine Research*, vol. 21(8), pp. 1555-1573, 18 pl, <https://doi.org/10.1177/1468087418815290>
125. Park, J., Lee, K.-H., Park, S. (2020) Comprehensive Spray Characteristics of Water in Port Fuel Injection Injector. *Energies* 2020, 13, 396. <https://doi.org/10.3390/en13020396>.
126. Park, J.W., Huh, K.Y., Lee, J.H. (2001) Reduction of NO_x, smoke and brake specific fuel consumption with optimal injection timing and emulsion ratio of water-emulsified diesel. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.* 2001, 215, pp. 83–93. <https://doi.org/10.1243/0954407011525476>.
127. Pierre, P., Périllhon, C., Danlos, A., Punov, P., Nouri, H., Wagner, M., Massouh, F., Mansilla, R. (2016). Effect of Water Injection at Inlet of Turbocharger on Compressor Performances. In: Andreescu, C., Clenci, A. (eds) *Proceedings of the European Automotive Congress EAEC-ESFA 2015*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27276-4_72
128. Pischinger, S., Körfer, T., Wiartalla, Schnitzler, J., Tomazic, D., Tatur, M. (2007) Combined Particulate Matter and NO_x Aftertreatment Systems for Stringent Emission Standards, Diesel Exhaust Aftertreatment 2000-2007 *SAE books*, April 2008, pp. 105-118, ISBN-978-0-7680-1709-0 (online) <https://doi.org/10.4271/2007-01-1128>
129. Pölczmann, Gy., Baladincz, J., Nemesnyik, Á., Hancsók, J. (2007) Környezetbarát motorolajok IV. Újgenerációs szintetikus alapolajok és a növényolajok, *Magy. Kém. Lapja*, 62(3), pp. 81-86., ISSN 1588-1199, DOI: [10.24364/MKL.2024.09](https://doi.org/10.24364/MKL.2024.09)
130. Prasad, H.S., Gonsalvis, J., Vijay, V.S. (2015) Effect of Introduction of Water into Combustion Chamber of Diesel Engines—A Review. *Energy Power* 2015, 5, 28–33. <https://doi.org/10.5923/c.ep.201501.06>.

131. Prasad, H.S., Vijay, V.S., Gonsalvis, J. (2018) Effect of direct water injection at different crank angles on diesel engine emission and performance. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2018, 376, 012039. [10.1088/1757-899X/376/1/012039](https://doi.org/10.1088/1757-899X/376/1/012039).
132. Quader, A.A. (1971) Why Intake Charge Dilution Decreases Nitric Oxide Emission from Spark Ignition Engines. *SAE Trans.* 1971, 80, 20–30. Online elérhető: <https://www.jstor.org/stable/44731349> lekérdezés időpontja: 2024 május 3.
133. Radnainé, Zs. (2011) Levegőtisztaság-védelem, Pannon Egyetem – Környezetmérnöki Intézet, ISBN: 978-615-5044-36-6
134. Rao, X., Sheng, C., Guo, Z., Xu, C., Dai, L., Yuan, C. (2022) Corrosion behaviors of cylinder liner in marine diesel engine burning low sulfur fuel oil: An experimental and molecular dynamics simulation study. *Tribol. Int.* 2022, 171, 107575. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107575>.
135. Raut, A.A.; Mallikarjuna, J.M. Effect of in-cylinder air-water interaction on water evaporation and performance characteristics of a direct water injected GDI engine. *Eng. Sci. Technol. Int. J.* 2021, 24, 480–492. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.09.003>.
136. Reifarth, S., Ångström, H.E. (2009) Transient EGR in a Long-Route and Short-Route EGR-System. ASME 2009 Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference, May 3–6, 2009, Milwaukee, Wisconsin, USA, pp.761-770., 10 p., <https://doi.org/10.1115/ICES2009-76107>
137. Rente, T. (2004) Injection Strategies for Heavy Duty DI Diesel Engines. PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2004; ISBN 91-7291-545-5. Online elérhető: <https://research.chalmers.se/publication/4323> lekérdezés időpontja: 2024 május 4.
138. Reşitoğlu, İ.A. (2020) NO_x Pollutants from Diesel Vehicles and Trends in the Control Technologies. In *Diesel and Gasoline Engines*; IntechOpen: London, UK, p. 16. <https://doi.org/10.5772/intechopen.81112>.
139. Roberts, A., Brooks, R., Shipway, P. (2014) Internal combustion engine cold-start efficiency: A review of the problem, causes and potential solutions, *Energy Conversion and Management*, Volume 82, pp. 327-350, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.002>.
140. Rossomando, B., Meloni, E., De Falco, G., Sirignano, M., Arsie, I., Palma, V. (2021) Experimental characterization of ultrafine particle emissions from a light-duty diesel engine equipped with a standard DPF. *Proc. Combust. Inst.* 2021, 38, pp. 5695–5702. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.09.011>.
141. Rostampour, A., Shojaeefard, M.H., Molaeimanesh, G.R. (2023) Role of water micro-explosion on fuel droplet size distribution, engine performance, and emissions in a water-diesel emulsified engine: A comprehensive numerical investigation. *Int. J. Engine Res.* 2023, 24, pp. 1110–1120. <https://doi.org/10.1177/14680874221076445>.
142. Rounce, P., Tsolakis, A., York, A.P.E (2012) Speciation of particulate matter and hydrocarbon emissions from biodiesel combustion and its reduction by aftertreatment. *Fuel* 2012, 96, pp. 90–99., <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.12.071>.
143. Russell, A., Epling, W.S. (2011) Diesel Oxidation Catalysts, *Cat. Rev. - Sci. Eng.*, volume 53, issue 4, pp. 337-423, <https://doi.org/10.1080/01614940.2011.596429>
144. Sahin, Z.; Tuti, M.; Durgun, O. Experimental investigation of the effects of water adding to the intake air on the engine performance and exhaust emissions in a DI automotive diesel engine. *Fuel* 2014, 115, 884–895. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.080>.
145. Sahin, Z., Tuti, M., Durgun, O. (2014) Experimental investigation of the effects of water adding to the intake air on the engine performance and exhaust emissions in a DI automotive diesel engine. *Fuel* 2014, 115, pp. 884–895. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.080>.

146. Šarkan, B., Jaśkiewicz, M., Kubiak, P., Tarnapowicz, D., Loman, M. (2022) Exhaust Emissions Measurement of a Vehicle with Retrofitted LPG System. *Energies* 2022, 15, 1184. <https://doi.org/10.3390/en15031184>
147. Sawa, N., Kajitani, S. (1992) Physical Properties of Emulsion Fuel (Water/Oil-Type) and Its Effect on Engine Performance under Transient Operation; *SAE Technical Paper*, 920198; *SAE International*: Warrendale, PA, USA, 1992. <https://doi.org/10.4271/920198>.
148. Schihl, P., Tasdemir, J., Bryzik, W. (2006) Determination of Laminar Flame Speed of Diesel Fuel for Use in a Turbulent Flame Spread Premixed Combustion Model. In *Transformational Science and Technology for the Current and Future Force*; World Scientific: Singapore, 2006; pp. 291–298. https://doi.org/10.1142/9789812772572_0037.
149. Senčić, T., Mrzljak, V., Blecich, P., Bonefačić, I. (2019) 2D CFD Simulation of Water Injection Strategies in a Large Marine Engine. *J. Mar. Sci. Eng.*, 2019, 7, 296. <https://doi.org/10.3390/jmse7090296>.
150. Schweizer, C., Edwards, R.D., Bayer-Oglesby, L., Gauderman, W.J., Ilacqua, V., Jantunen, M.J., Lai, H.K., Nieuwenhuijsen, M., Künzli, N. (2007) Indoor time-microenvironment-activity patterns in seven regions of Europe. *J Expo Sci Environ Epidemiol.* 2007 Mar, 17(2), pp. 170–81. <https://doi.org/10.1038/sj.jes.7500490>
151. Selleri, T., Melas, A. D., Joshi, A., Manara, D., Perujo, A., & Suarez-Bertoa, R. (2021) An Overview of Lean Exhaust deNO_x Aftertreatment Technologies and NO_x Emission Regulations in the European Union, European Commission, Joint Research Centre (JRC), Catalysts 2021, <https://doi.org/10.3390/catal11030404>
152. Serrano, J., Jiménez-Espadafor, F.I., Lora, A., Modesto-López, L., Gañán-Calvo, A., López-Serrano, J. (2019) Experimental analysis of NO_x reduction through water addition and comparison with exhaust gas recycling. *Energy* 2019, 168, pp. 737–752. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.136>.
153. Srinivasan, N.K., Michael, J.V. (2006) The thermal decomposition of water. *Int. J. Chem. Kinet.* 2006, 38, pp. 211–219. <https://doi.org/10.1002/kin.20172>.
154. Strzelec, A., Vander Wal, R.L., Thompson, T.N., Toops, T.J., Daw, C.S. (2016) NO₂ oxidation reactivity and burning mode of diesel particulates, *Topics in Catalysis*, vol. 59, pp. 686–694, 9 p., <https://doi.org/10.1007/s11244-016-0544-8>
155. Steiber, J., Trader, A., Treichel, B., Tsujimoto, D., Reese, R., Bedard, M., Musial, M. (2006). Development of an Engine Test Cell for Rapid Evaluation of Advanced Powertrain Technologies using Model-Controlled Dynamometers. *SAE Technical Paper* 2006-01-1409. <https://doi.org/10.4271/2006-01-1409>
156. Stumpf, M., Merkel, S., Eckert, P., Wagner, U., Velji, A., Spicher, U., Möhler, O. (2007) Investigation of Soot Concentration and Particle Size Distribution on a Single Cylinder Diesel Engine. *Proceedings of the ASME 2007 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference. ASME 2007 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference. Charleston, South Carolina, USA. October 14–17, ICEF2007-1709*, pp. 685–696; 12 p., <https://doi.org/10.1115/ICEF2007-1709>
157. Subramanian, K.A. (2011) A comparison of water–diesel emulsion and timed injection of water into the intake manifold of a diesel engine for simultaneous control of NO and smoke emissions. *Energy Convers. Manag.* 2011, 52, pp. 849–857. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.08.010>.
158. Sui, L., Yu, L., Zhang, Y. (2007) „Catalytic combustion of diesel soot on Co-Sr-K Catalysts”, *Energy & Fuel*, 21, pp. 1420–1424., 5 p., <https://doi.org/10.1021/ef070010m>
159. Sun, X., Ning, J., Liang, X., Jing, G., Chen, Y., Chen, G. (2022) Effect of direct water injection on combustion and emissions characteristics of marine diesel engines. *Fuel* 2022, 309, 122213. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122213>.

160. Sun, Z., Wang, X., Wang, X., Zhou, J. (2017) Combustion and emission analysis of heavy-duty vehicle diesel engine. *AIP Conf. Proc.* 2017, 1820, 050003. <https://doi.org/10.1063/1.4977307>.
161. Sutton, O.G. (1947) The problem of diffusion in the lower atmosphere. *Quat. J. R. Meteorol. Soc.* 73 (317–318), pp 257–281., <https://doi.org/10.1002/qj.49707331704>
162. Szöllösi, 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
163. Szöllösi, D., Kiss, P. (2023a) Effects of humidity on the emissions of the diesel engines. In Proceedings of the 16th European-African Regional Conference of the ISTVS, Lublin, Poland, 11–13 October 2023; International Society for Terrain-Vehicle Systems (ISTVS): Durham, NC, USA, 2023. <https://doi.org/10.56884/THMG6024>.
164. Szöllösi, D., Kiss, P. (2023b) Reactions on the typical temperatures of the diesel aftertreatment system. *Mech. Eng. Lett. R D Res. Dev.* 2023, 23, pp. 179–198. HU ISSN 2060-3789
165. Tauzia, X., Maiboom, A., Shah, S.R. (2010) Experimental study of inlet manifold water injection on combustion and emissions of an automotive direct injection Diesel engine. *Energy* 2010, 35, pp. 3628–3639. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.05.007>.
166. Takács, R., Zsoldos, I., and Szentendrei, D., (2024) "Water Droplet Collision and Erosion on High-Speed Spinning Wheels," *SAE Int. J. Engines* 17, 5, pp. 653–667, <https://doi.org/10.4271/03-17-05-0037>.
167. Tsao, K.C., Wang, C.L. (1986) Puffing and Micro-Explosion Phenomena of Water Emulsion Fuels. *SAE Trans.* 1986, 95, pp. 308–320. Online elérhető: <https://www.jstor.org/stable/44722629>, lekérdezés időpontja: 2024 július 29.
168. Tsukahara, M., Yoshimoto, Y., Murayama, T. (1989) W/O Emulsion Realizes Low Smoke and Efficient Operation of DI Engines without High Pressure Injection; SAE International: Warrendale, PA, USA, 1989; *SAE Technical Paper* 890449. <https://doi.org/10.4271/890449>.
169. Turns, S.R. (2000) An Introduction to Combustion. Concepts and Applications, 2nd ed.; Holman, J.P., Lloyd, J., Eds.; *McGraw Hill*: New York, NY, USA, 2000; pp. 168–171. ISBN 0-07-230096-5
170. Ushakov, S., Volland, H., Nielsen, B.J., Hennie, E. (2013) Particle size distributions from heavy-duty diesel engine operated on low-sulfur marine fuel. *Fuel Process. Technol.* 2013, 106, pp. 350–358., <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.08.022>.
171. Vallabani, N.V.S., Gruziova, O., Elihn, K., Juárez-Facio, A.T., Steimer, S.S., Kuhn, J., Silvergren, S., Portugal, J., Piña, B., Olofsson, U., (2023) Toxicity and health effects of ultrafine particles: Towards an understanding of the relative impacts of different transport modes. *Environ. Res.* 2023, 231 Pt 2, 116186. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116186>.
172. Varella, R. A., Giechaskiel, B., Sousa, L., Duarte, G. (2018). Comparison of Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) with Laboratory Grade Equipment. *Applied Sciences*, 8, 9, 1633. <https://doi.org/10.3390/app8091633>
173. Viana, M., Pey, J., de Leeuw, F., Querol, X., Alastuey, A., dall'Osto, M., Moreno, T. (2011) Reporting on natural events in the EU Member States under Directive 2008/50/EC: Years 2008–2009, ETC/ACM Technical Paper 2011/17, 2011, p. 76. Online elérhető: https://acm.eionet.europa.eu/reports/docs/ETCACM_TP_2011_17_natural_events2008-2009.pdf lekérdezés időpontja: 2024 március 16.
174. Vojtisek-Lom, M., Fenkl, M., Dufek, M., Mareš, J. (2009) Off-Cycle, Real-World Emissions of Modern Light Duty Diesel Vehicles; *SAE Technical Paper* 2009-24-

- 0148; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2009., <https://doi.org/10.4271/2009-24-0148>.
175. Vollenweider, J., Geist, M., Schaub, M. (1995) Residual fuels in emission-controlled diesel engines-Background, developments and operational results. In Proceedings of the 21st CIMAC Congress, Interlaken, Switzerland, 15–18 May 1995.
 176. Wagner W., Pruss A., (2002) The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use, *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 31, pp.387–535, <https://doi.org/10.1063/1.1461829>
 177. Wan, J., Zhuang, Y., Huang, Y., Qian, Y., Qian, L. (2021) A review of water injection application on spark-ignition engines. *Fuel Process. Technol.* 2021, 221, 106956. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106956>.
 178. Wang, L., Liu, Z., Chen, S., Zheng, C., Li, J. (2013) Physical and chemical effects of CO₂ and H₂O additives on counterflow diffusion flame burning methane. *Energy and Fuels*, 27(12), pp. 7602-7611. 10 p., <https://doi.org/10.1021/ef401559r>
 179. Wang, Q., Huang, R., Ni, J., Chen, Q. (2021) Potential Improvement in PM-NO_x Trade-Off in a Compression Ignition Engine by n-Octanol Addition and Injection Pressure. *Processes* 2021, 9, 310. <https://doi.org/10.3390/pr9020310>.
 180. Wei, X., Qian, Y., Meng, S., Hua, Y., Qiu, L., Sun, Y., Wan, J., Zhang, X. (2022) Effects of coupling port water injection and EGR on the spray water evolution, combustion and emission of a premixed stoichiometric natural gas engine: A numerical study. *The Science and Technology of Fuel and Energy*, volume 324, part A, 124315, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124315>
 181. WHO European Centre for Environment and Health, (2013) Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project Technical Report ([Review of evidence on health aspects of air pollution: REVIHAAP project: technical report](#), lekérdezés időpontja: 2025 március 17.
 182. WHO Regional Office for Europe (2007) Health risks of heavy metals from long-range transboundary air pollution. Copenhagen, WHO Regional Office for Europe, ISBN 978 92 890 7179 6 ([Health risks of heavy metals from long-range transboundary air pollution](#), lekérdezés időpontja: 2025 március 17.
 183. Worm, J. The Impact of Water Injection on Spark Ignition Engine Performance under High Load Operation. Ph.D. Dissertation, Michigan Technological University, Houghton, MI, USA, 2017. Online elérhető : <https://digitalcommons.mtu.edu/etdr/552> lekérdezés időpontja: 2024 május 6.
 184. Wróblewski, A., Langer, A., Szczyglak, P., Rekúč, A. (2018) The influence of added water on fuel injector wear in a diesel engine. *Tribologia* 2018, 279, pp. 153–158. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.7025>.
 185. Wu, X., Liu, D., Li, K., Li, J., Weng, D. (2007) „Role of CeO₂ -ZrO₂ in diesel soot oxidation and thermal stability of potassium catalyst”, *Catalysis Communication*, 8, 1274–1278. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2006.11.022>
 186. Yu, C., Zhang, W., Xue, X., Lou, J., Lao, G. (2021) Analysis of Water-Cooled Intercooler Thermal Characteristics. *Energies* 2021, 14, 8332. <https://doi.org/10.3390/en14248332>
 187. Yutaka, T., Takada, N., Iida, N. (2005) Transient NO_x Characteristics of Freight Vehicles with EGR System in Real Traffic Conditions. *SAE Trans* 2005, 114, pp. 1129–1138. Online elérhető: <http://www.jstor.org/stable/44722067>, lekérdezés ideje: 2024 augusztus 15.
 188. Zhang, Q., Yang, L., Ma, C., Zhang, Y., Wu, L., Mao, H. (2020) Emission characteristics and chemical composition of particulate matter emitted by typical non-road construction machinery. *Atmos. Pollut. Res.* 2020, 11, pp. 679–685. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.12.018>.

189. Zhu, S., Hu, B., Akehurst, S., Copeland, C., Lewis, A., Yuan, H., Kennedy, I., Bernards, J., Branney, C. (2019) A review of water injection applied on the internal combustion engine. *Energy Convers. Manag.* 2019, 184, pp. 139–158. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.042>.

M2. 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., **Szöllősi, 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.

M3. Reakciók a kipufogórendszer jellemző hőmérsékletein

Reakciók és a jellemző hőmérsékleteik dízel kipufogógázban			
Temperature (°C)	Diesel Oxidation Catalyst	Diesel Particulate Filter	Selective Catalytic Reduction
100-150	nincs szignifikáns reakció	nincs szignifikáns reakció	Urea bomlása; $\text{H}_2\text{N}-\text{CO}-\text{NH}_2$ (m) urea + heat $\rightarrow$ NH_3 + 4 NCO - (m) ammonium cyanate $\rightarrow$ NH_3 (g) ammonia + HNCO (g) (4) exploszív NH_3 , NO_x keletkezik; $2\text{NH}_3 + 2\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{NH}_4\text{NO}_2$
150-200	nincs szignifikáns reakció	nincs szignifikáns reakció	nincs szignifikáns reakció
200-250	nincs szignifikáns reakció	Regeneráció NO_x al (200-500 °C) (6) $(\text{C} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{C}(\text{NO}_2)) \rightarrow \text{C}(\text{O}) + \text{NO} >$ $(\text{C}(\text{O}) \rightarrow \text{NO}_2 \rightarrow \text{C}(\text{NO}_2)) \rightarrow \text{C}(\text{O}) + \text{NO} >$ $(\text{C}(\text{O}) + \text{NO}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{NO} >$ $(\text{C}(\text{O}) + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{C}(\text{O})\text{O} >$ $(\text{C}(\text{O})\text{O} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CO} >$ $\text{NO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{NO} + \text{CO}$ $2\text{NO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{NO} + \text{CO}_2$ (7)	Platina katalizátoron; $4 \text{ NO} + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ (standard) $2 \text{ NO} + 2\text{NO}_2 + 4\text{NH}_3 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ (fast) $6 \text{ NO}_2 + 8\text{NH}_3 \rightarrow 7\text{N}_2 + 12\text{H}_2\text{O}$ $6\text{NO} + 4\text{NH}_3 \rightarrow 5\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ $2\text{NO}_2 + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 3\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ $6 \text{ NO}_2 + 8\text{NH}_3 \rightarrow 7\text{N}_2 + 12\text{H}_2\text{O}$ (NO_2 meghaladja a NO koncentrációt.) $8 \text{ NO}_2 + 6 \text{ NH}_3 \rightarrow 7 \text{ N}_2\text{O} + 9 \text{ H}_2\text{O}$ $4 \text{ NO}_2 + 4 \text{ NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4 \text{ N}_2\text{O} + 6 \text{ H}_2\text{O}$ (mellékfolyamatok.) $2\text{NH}_3 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{O}$ $4\text{NH}_3 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ $4\text{NH}_3 + 5\text{O}_2 \rightarrow 4\text{NO} + 6\text{H}_2\text{O}$
250-300			$\text{V}_2\text{O}_5 / \text{TiO}_2$ katalizátoron; $6\text{NO} + 4\text{NH}_3 \rightarrow 5\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ $(\text{VO}^{2+} + \text{NH}_3 \rightarrow [\text{HO V NH}_3]^{2+} >$ $(\text{NO} + [\text{HO V NH}_3]^{2+} \rightarrow [\text{HO V NH}_3 \text{NO}]^{2+} >$ $([\text{HO V NH}_3 \text{NO}]^{2+} \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} + [\text{VOH}]^{2+} >$ $([\text{VOH}]^{2+} + 1/4 \text{O}_2 \rightarrow \text{VO}^{2+} + 1/2 \text{H}_2\text{O} >$ $(\text{NH}_3 + \text{NO} + 1/4 \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + 6/4 \text{H}_2\text{O} >$ $4 \text{ NO} + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ (standard) $(\text{V}^{5+} - \text{O} + \text{NH}_3 \rightarrow \text{HO V}^{5+} \text{N H}_2 >$ $(\text{HO}^{5+} \text{N H}_2 + \text{NO} \rightarrow \text{HO}^{5+} \text{N}(\text{NH}_2) \text{NO} >$ $(\text{HO}^{5+} \text{N}(\text{NH}_2) \text{NO} \rightarrow \text{HO}^{5+} + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} >$ $(2 \text{ HO}^{5+} + \text{NO}_2 \rightarrow 2 \text{ V}^{5+} - \text{O} + \text{NO} + \text{H}_2\text{O} >$ $2 \text{ NO} + 2\text{NO}_2 + 4\text{NH}_3 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ (fast) $(>> \text{NO/NO}_2 \text{ 1:1 300°C alatt a leggyorsabb (2))$ $2\text{NO}_2 + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 3\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ $6 \text{ NO}_2 + 8\text{NH}_3 \rightarrow 7\text{N}_2 + 12\text{H}_2\text{O}$ (NO_2 meghaladja a NO koncentrációt.) $8 \text{ NO}_2 + 6 \text{ NH}_3 \rightarrow 7 \text{ N}_2\text{O} + 9 \text{ H}_2\text{O}$ $4 \text{ NO}_2 + 4 \text{ NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4 \text{ N}_2\text{O} + 6 \text{ H}_2\text{O}$ (mellékfolyamatok.) $2\text{NH}_3 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{O}$ $4\text{NH}_3 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ $4\text{NH}_3 + 5\text{O}_2 \rightarrow 4\text{NO} + 6\text{H}_2\text{O}$
300-350	$\text{CO} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	Regeneráció platina bevonattal (~300 °C) $\text{Soot} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	
350-400	$\text{C}_m\text{H}_n + (n+m/4) \text{O}_2 \rightarrow n \text{CO}_2 + m/2 \text{H}_2\text{O}$ $\text{C}_m\text{H}_n + 2n \text{H}_2\text{O} \rightarrow n \text{CO}_2 + (2n+m/2) \text{H}_2$ $((2n + m/2) \text{NO} + \text{C}_m\text{H}_n \rightarrow (n + m/4) \text{N}_2 + n \text{CO} + m/2 \text{H}_2\text{O})$		
400-450		Regeneráció $\text{Soot} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	
450-500			nincs szignifikáns reakció
500-550			nincs szignifikáns reakció
550-600			nincs szignifikáns reakció
600-650	nincs szignifikáns reakció	nincs szignifikáns reakció	nincs szignifikáns reakció
650-700	nincs szignifikáns reakció	nincs szignifikáns reakció	nincs szignifikáns reakció

CD-n megtalálható magas felbontású verziójában.

M4. Páratartalom adatok, diagramok

Hét		Teszt azonosító	10nm #/kWh	23nm #/kWh	Humidity g/m ³	NOx g/kWh
2022	WW34	220826_03_WHSC1_OM926	5,099E+13	2,919E+13	15,449058	7,6415732
	WW34	220826_03_WHSC2_OM926	4,994E+13	3,122E+13	15,551	7,5427311
	WW35	220902_01_WHSC_OM926			11,117	8,0215816
	WW44	221104_01_WHSC_OM926	6,508E+13	3,794E+13	6,272	8,0204355
	WW45	221111_03_WHSC_OM926	6,304E+13	3,847E+13	8,164	8,1804492
	WW47	221126_02_WHSC_OM926	6,133E+13	3,739E+13	6,116	8,0841871
	WW48	221202_03_WHSC_OM926	5,757E+13	3,585E+13	4,678	8,3389853
	WW49	221210_01_WHSC_OM926	6,134E+13	3,845E+13	7,630	8,1543014
2023	WW2	230113_03_WHSC_OM926	6,024E+13		6,258	7,662564
	WW4	230127_01_WHSC_OM926	5,987E+13		4,603	8,2343593
	WW5	230203_02_WHSC_OM926	4,589E+13		6,756	8,0065435
	WW11	230317_01_WHSC_OM926			2,343	8,1617483
	WW12	230324_02_WHSC_OM926	4,851E+13	2,722E+13	7,239	8,1180533
	WW13	230331_01_WHSC_OM926	5,781E+13	2,864E+13	10,242	7,4046348
	WW16	230421_03_WHSC_OM926	5,16E+13	2,787E+13	6,144	8,3795276
	WW17	230428_01_WHSC_OM926	5,501E+13	3,027E+13	6,526	8,4137302
	WW23	230609_01_WHSC_OM926	6,394E+13	3,178E+13	13,715	7,1525007
	WW27	230707_01_WHSC_OM926	5,888E+13	2,985E+13	11,337	7,8791086

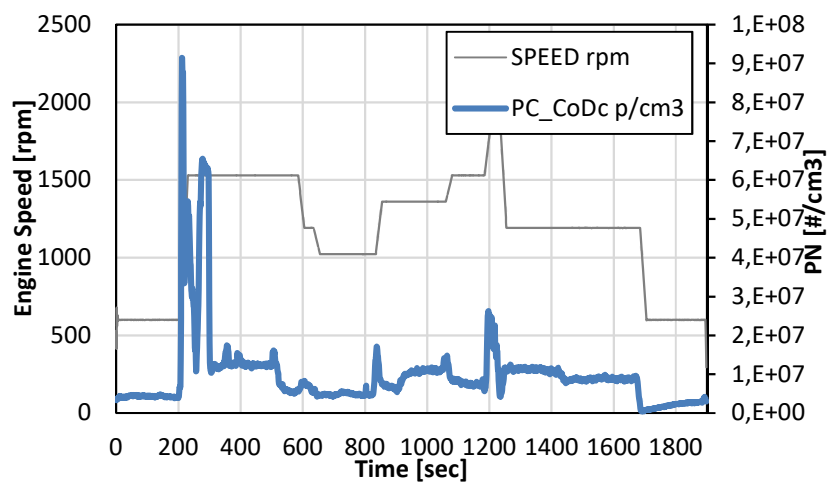
szűrt adatok

Hét		Teszt azonosító	CO g/kWh	THC g/kWh	CO2 g/kWh	O2 g/kWh
2022	WW34	220826_03_WHSC1_OM926	0,6858897	0,1680383	679,49829	907,28667
	WW34	220826_03_WHSC2_OM926	0,780	0,1608282	681,779	911,549
	WW35	220902_01_WHSC_OM926	0,711	0,159937	673,352	918,251
	WW44	221104_01_WHSC_OM926	0,707	0,1897033	674,085	941,848
	WW45	221111_03_WHSC_OM926	0,696	0,2305284	674,116	942,502
	WW47	221126_02_WHSC_OM926	0,630	0,199154	665,807	937,427
	WW48	221202_03_WHSC_OM926	0,707	0,1749599	662,977	
	WW49	221210_01_WHSC_OM926	0,701	0,1560295	671,700	919,308
2023	WW2	230113_03_WHSC_OM926	0,711	0,2397398	667,588	1001,842
	WW4	230127_01_WHSC_OM926	0,715	0,2875203	658,610	933,350
	WW5	230203_02_WHSC_OM926	0,583	0,268702	661,472	978,800
	WW11	230317_01_WHSC_OM926	0,592	0,3320898	655,527	965,173
	WW12	230324_02_WHSC_OM926	0,611	0,3082195	660,926	962,610
	WW13	230331_01_WHSC_OM926	0,633	0,1225738	663,813	954,831
	WW16	230421_03_WHSC_OM926	0,665	0,1520239	671,546	916,906
	WW17	230428_01_WHSC_OM926	0,707	0,0742424	665,044	906,330
	WW23	230609_01_WHSC_OM926	0,737	0,18836	666,213	969,392
	WW27	230707_01_WHSC_OM926	0,654	0,0416375	664,009	945,928

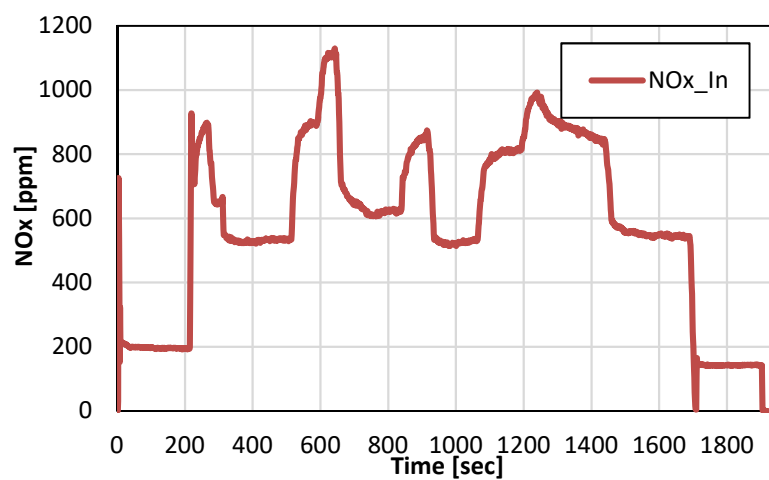
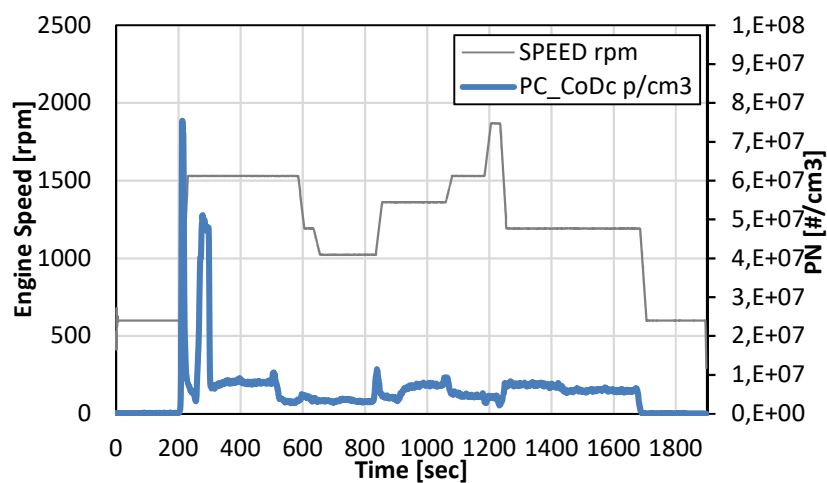
szűrt adatok

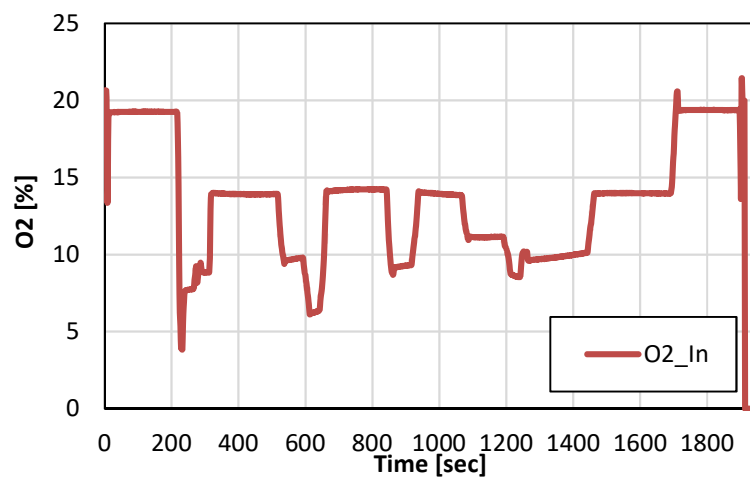
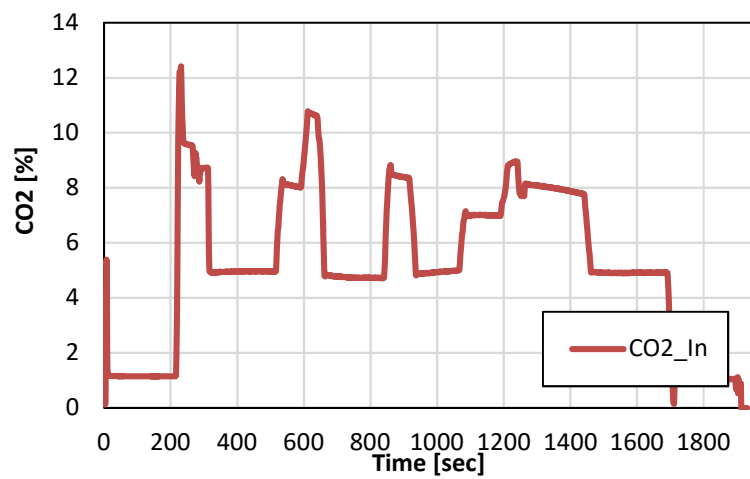
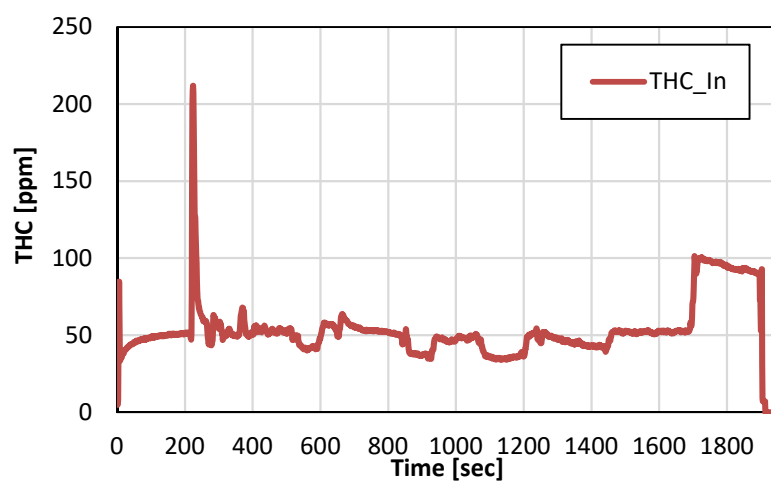
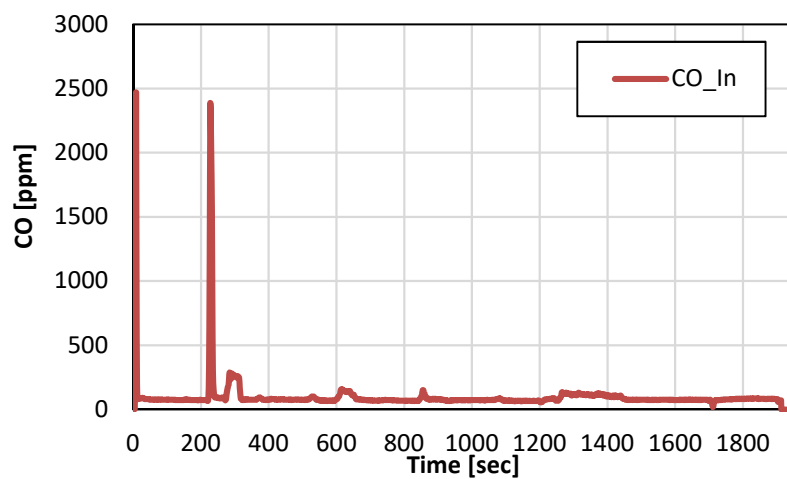
220826_03_WHSC1_OM926

10nm



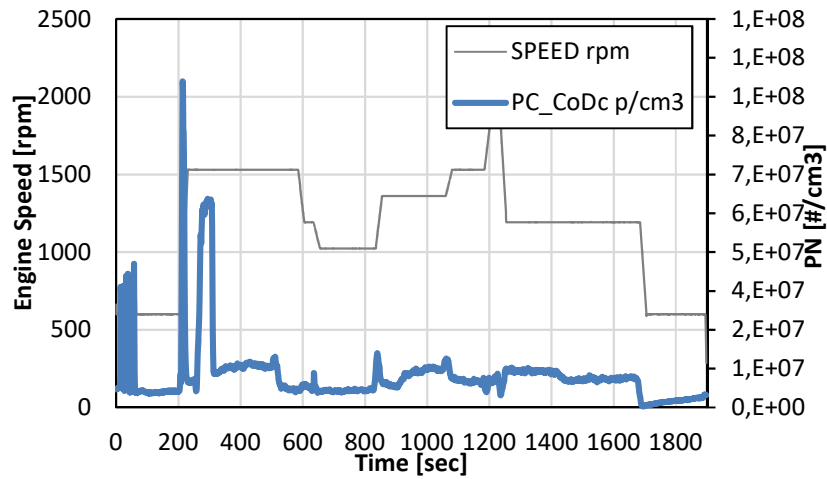
23nm



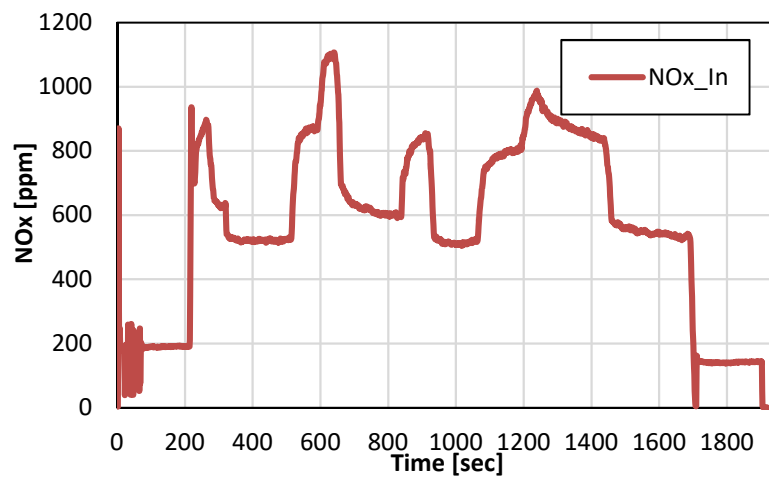
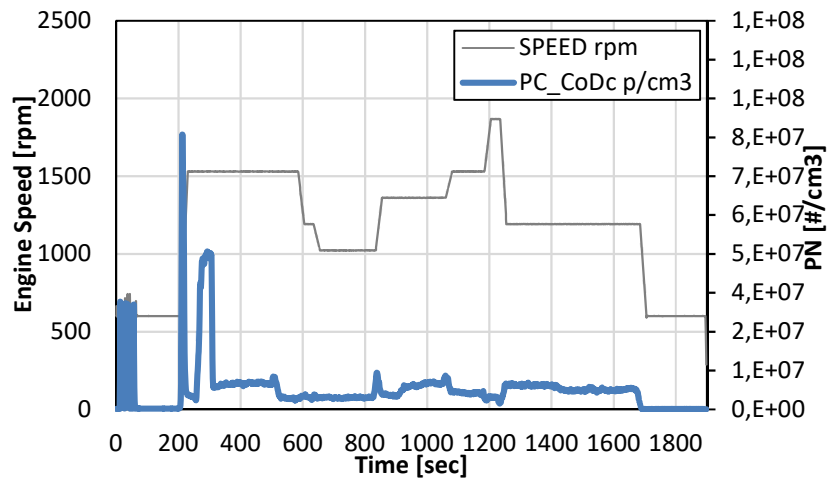


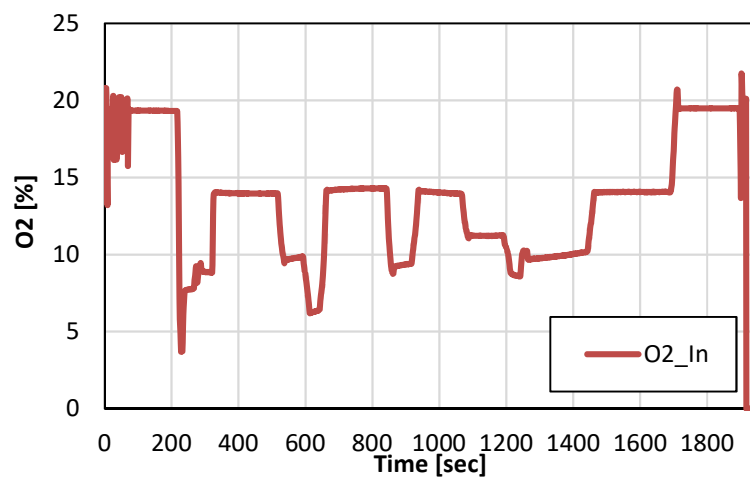
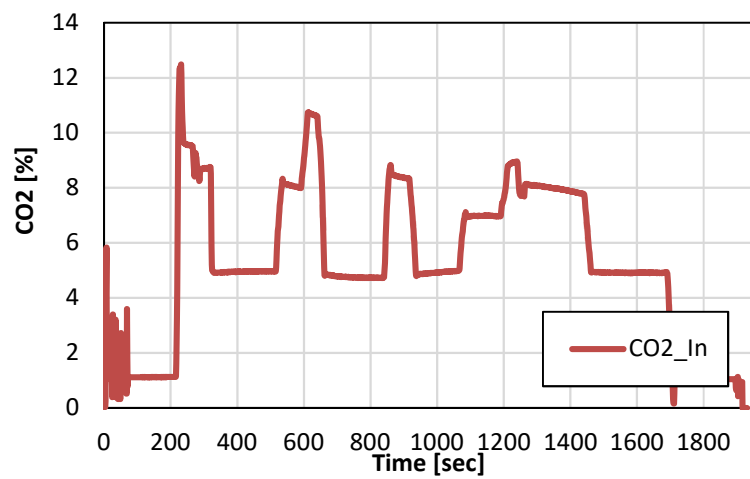
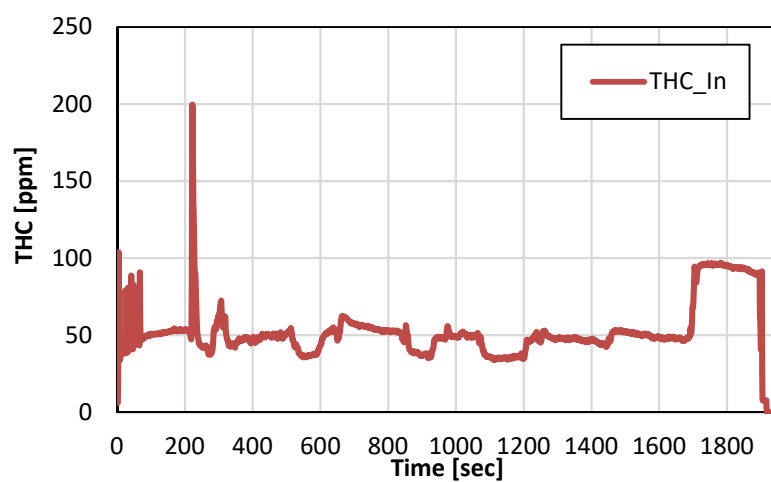
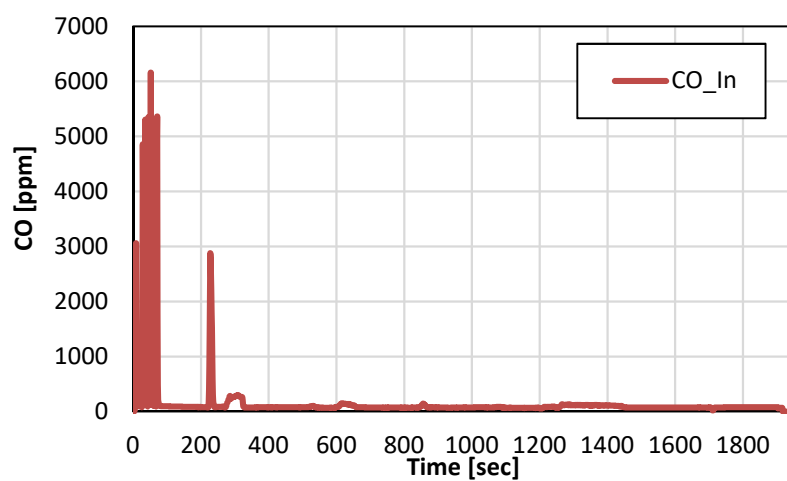
220826_03_WHSC2_OM926

10nm



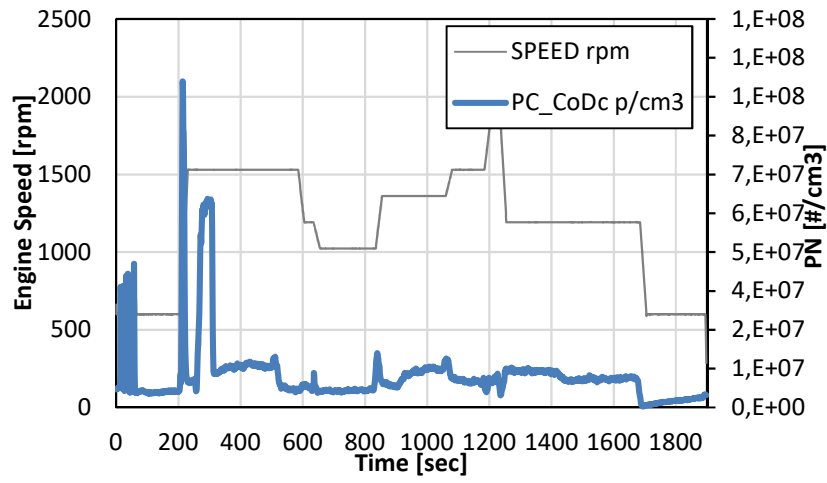
23nm



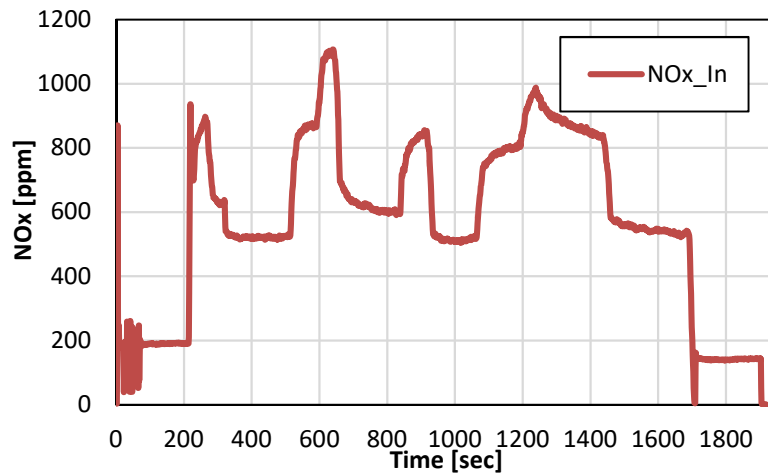
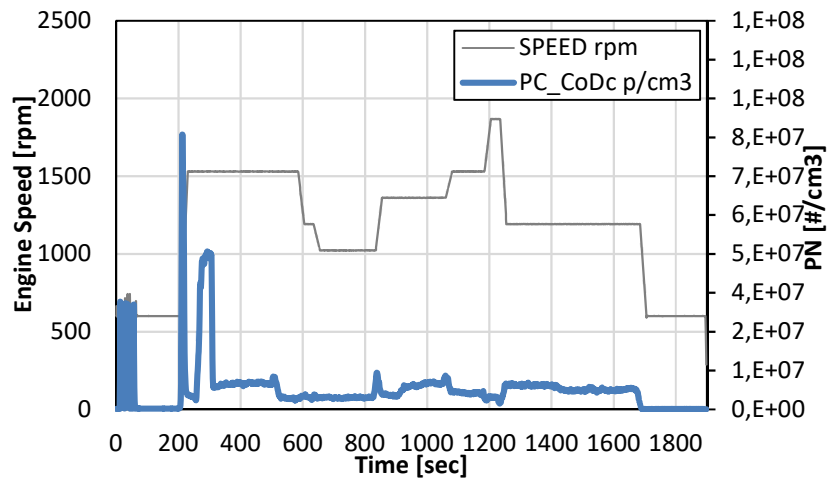


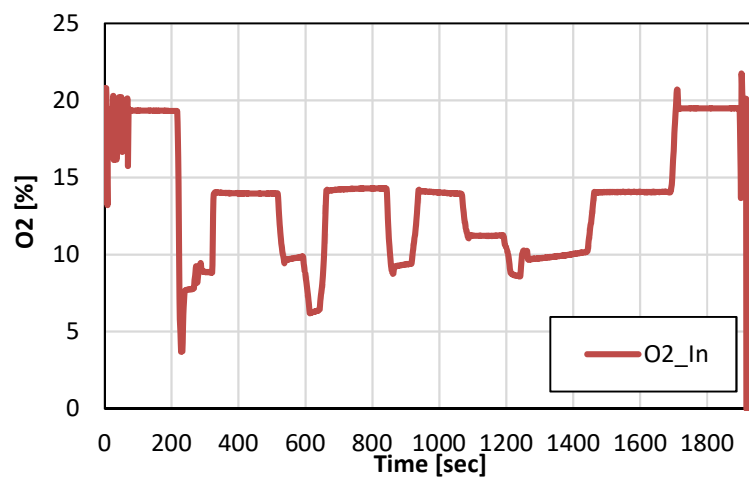
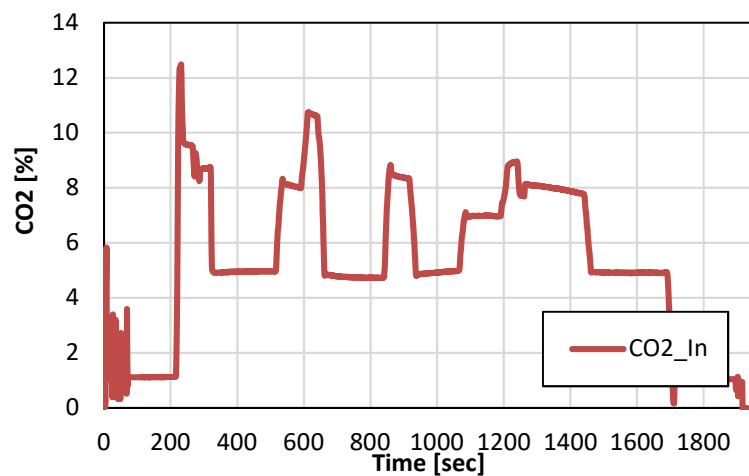
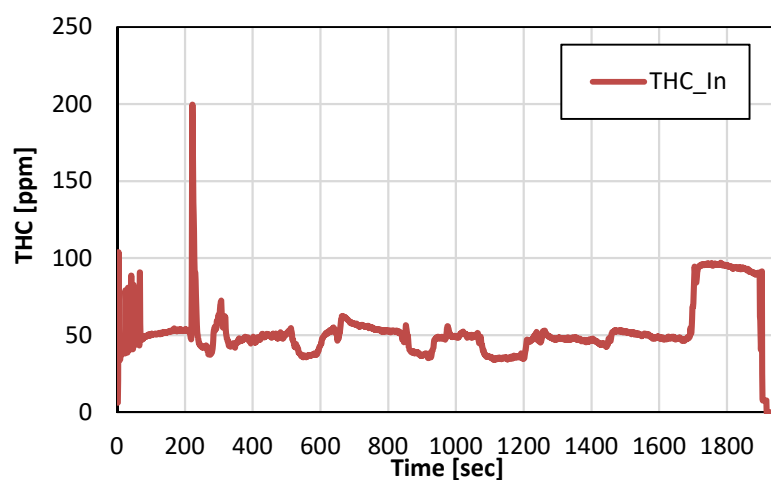
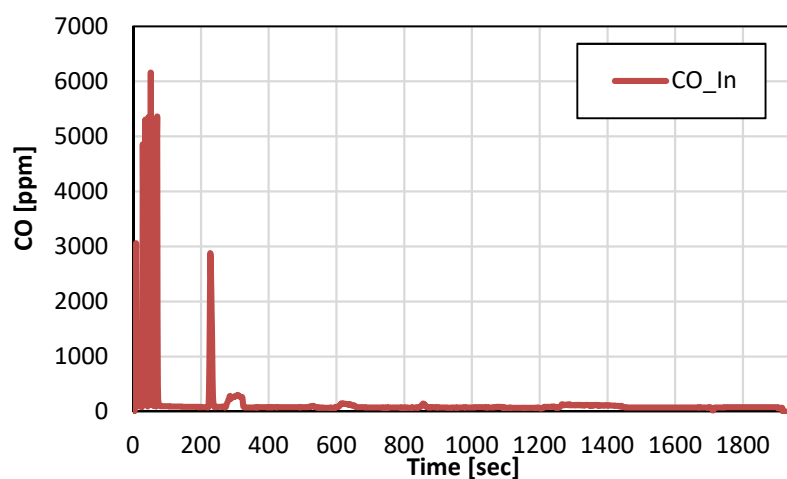
220826_03_WHSC1_OM926

10nm

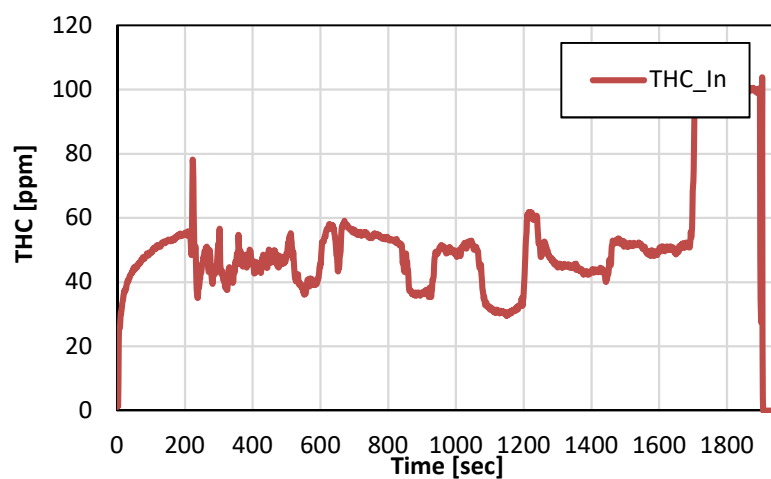
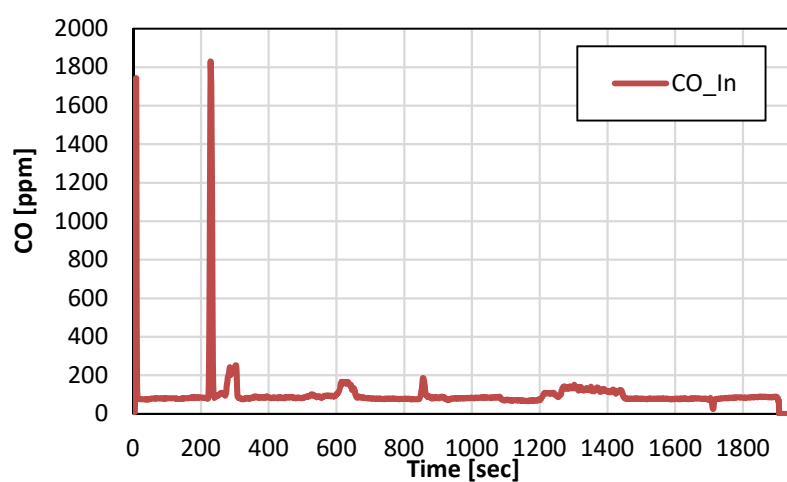
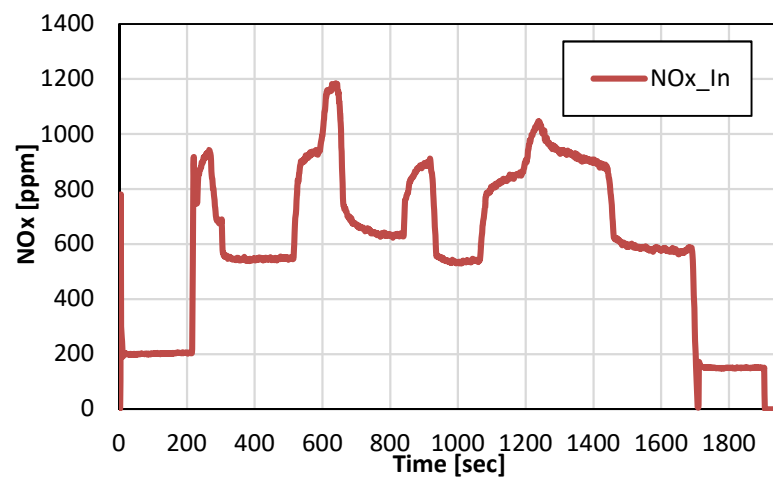


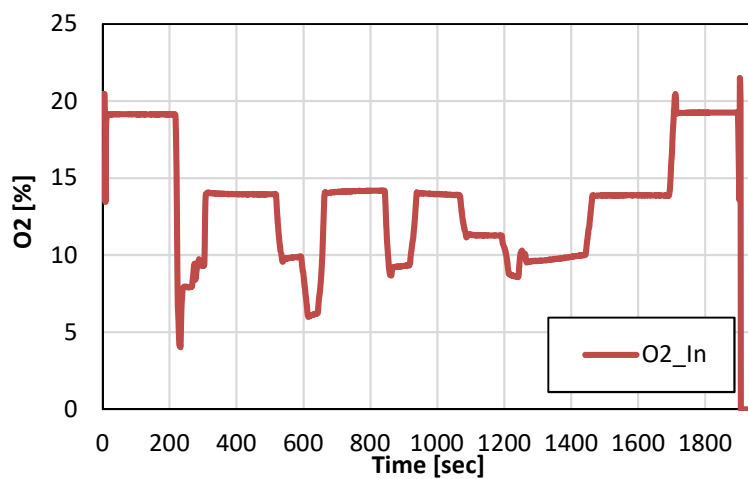
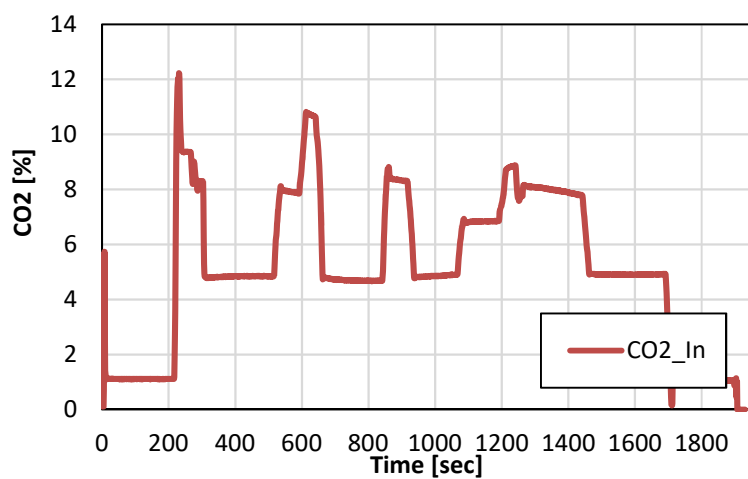
23nm





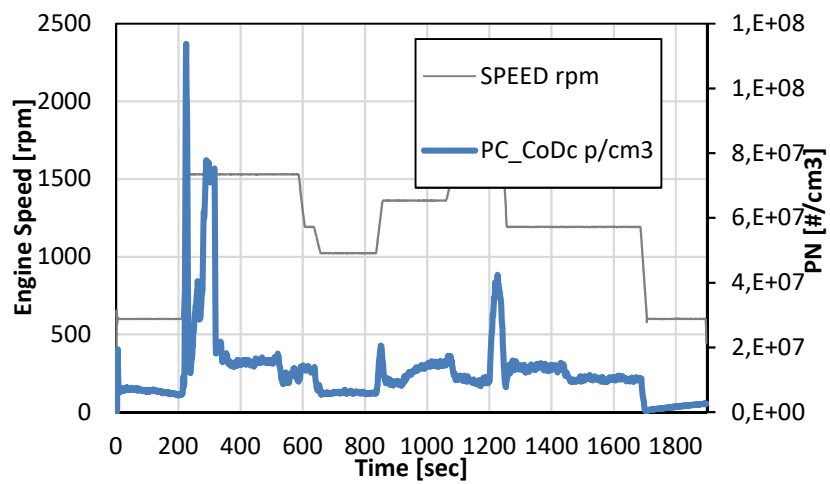
220902_01_WHSC1_OM926

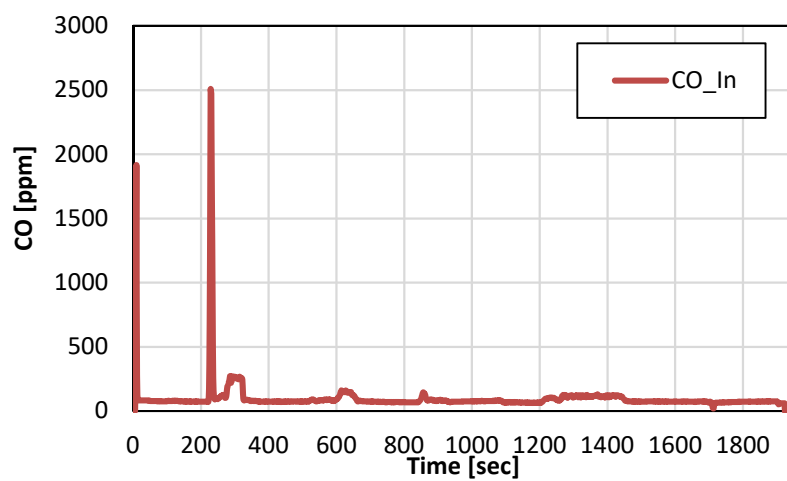
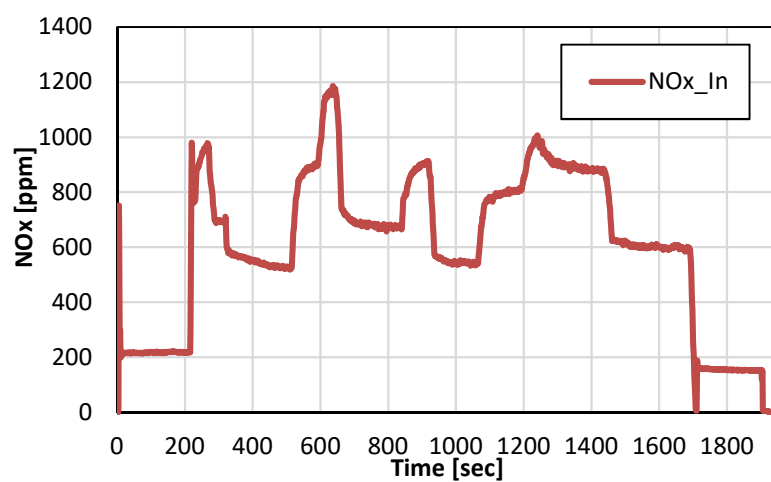
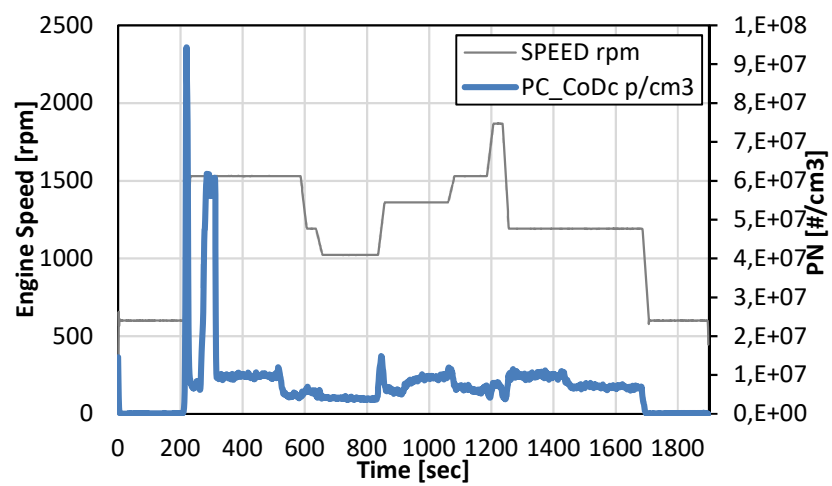


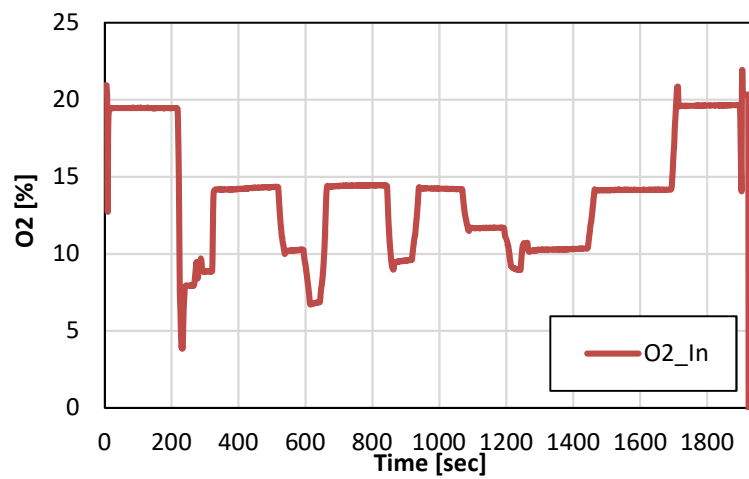
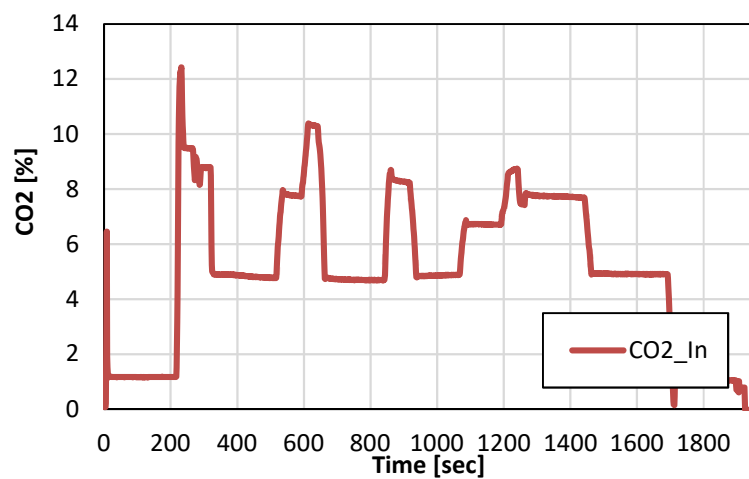
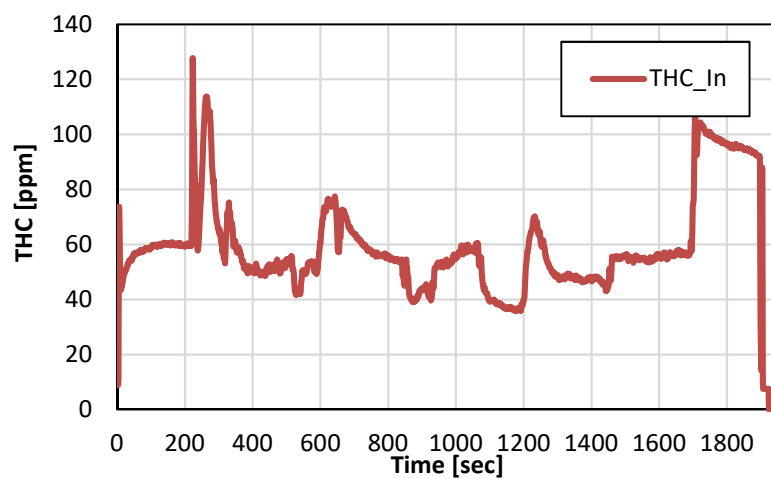


221104_01_WHSC1_OM926

10nm

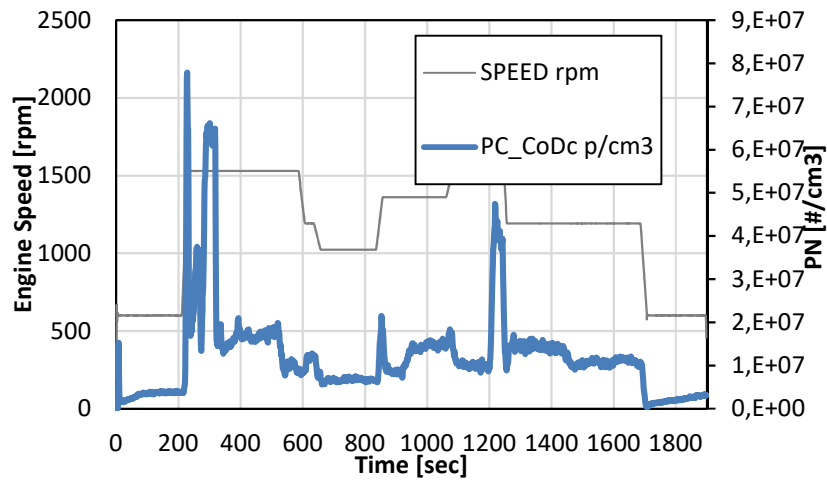


23nm

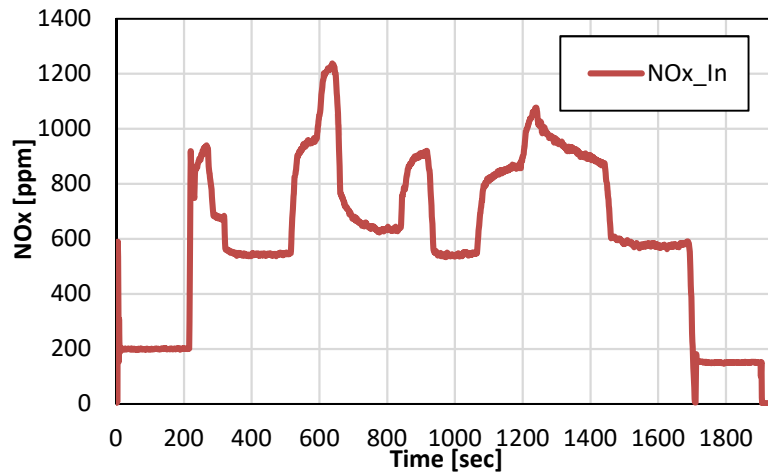
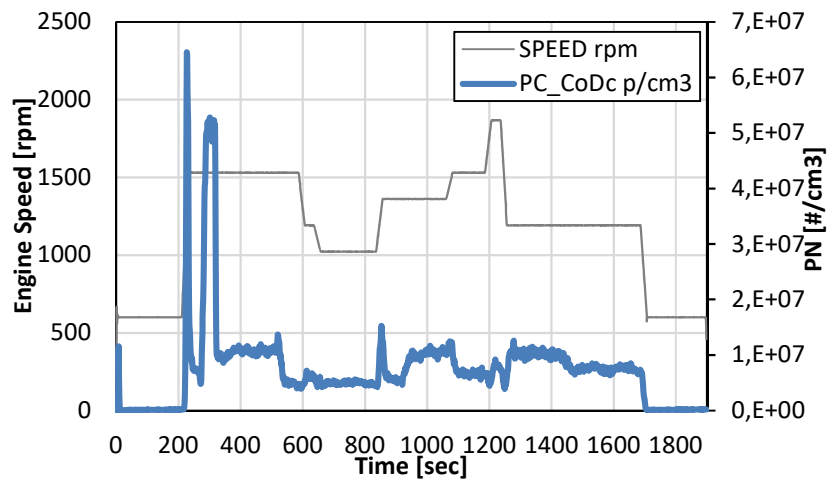


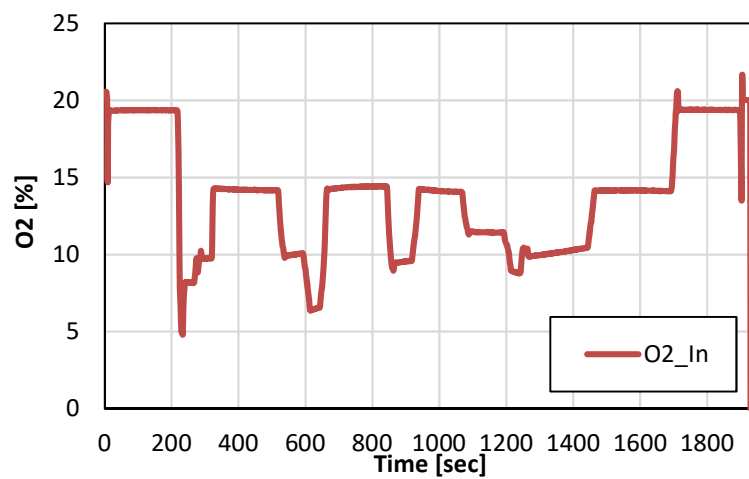
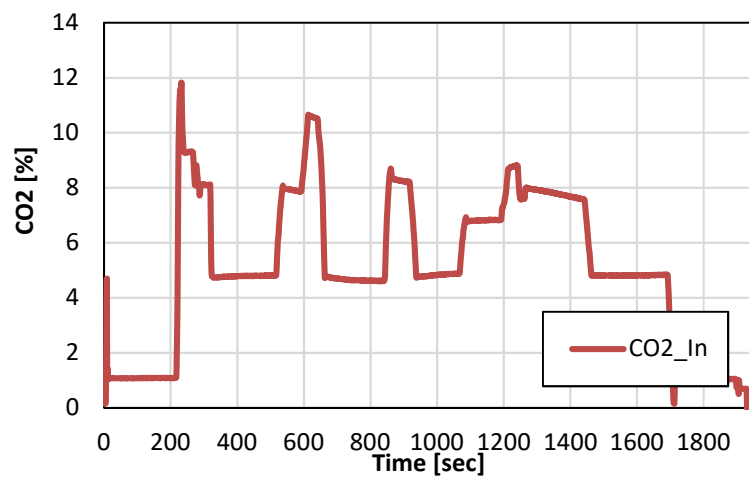
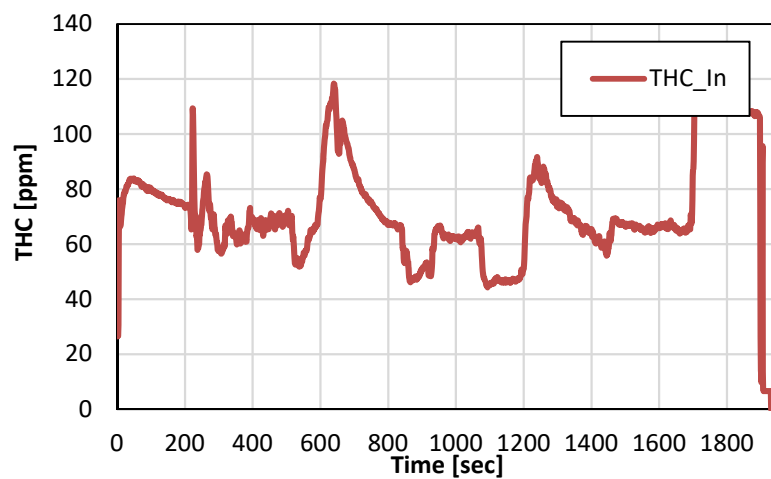
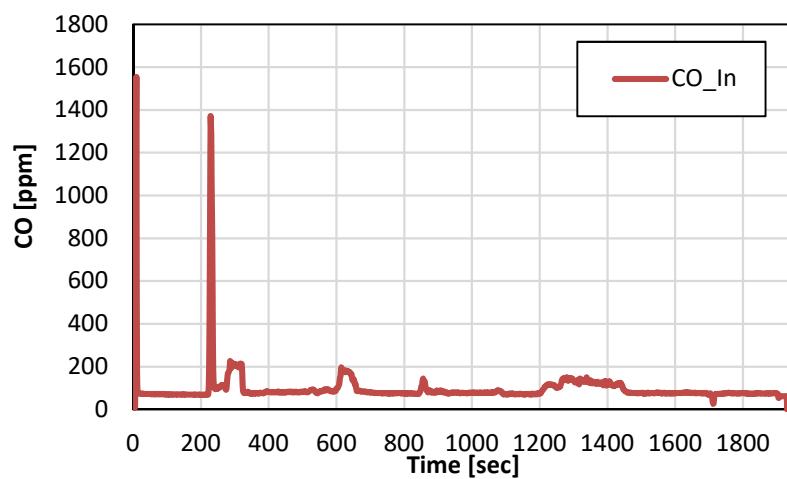
221111_03_WHSC1_OM926

10nm



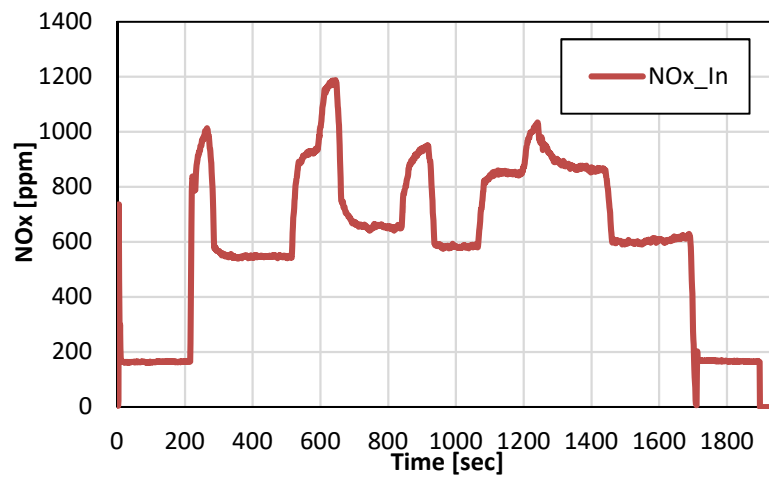
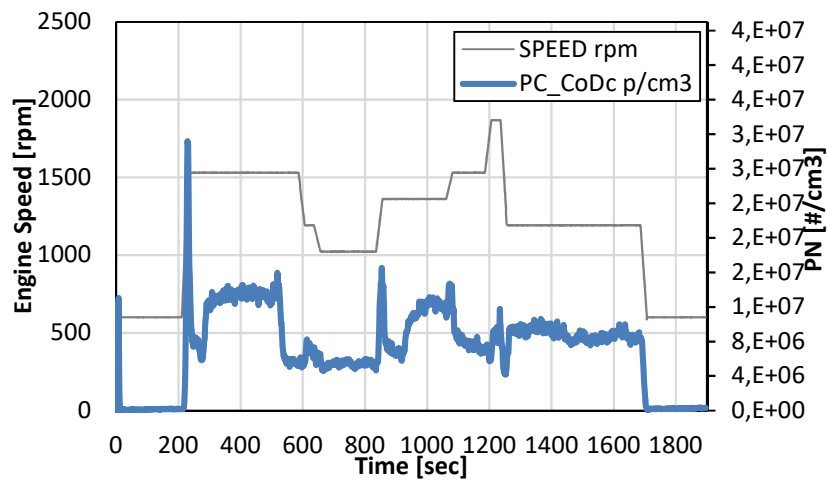
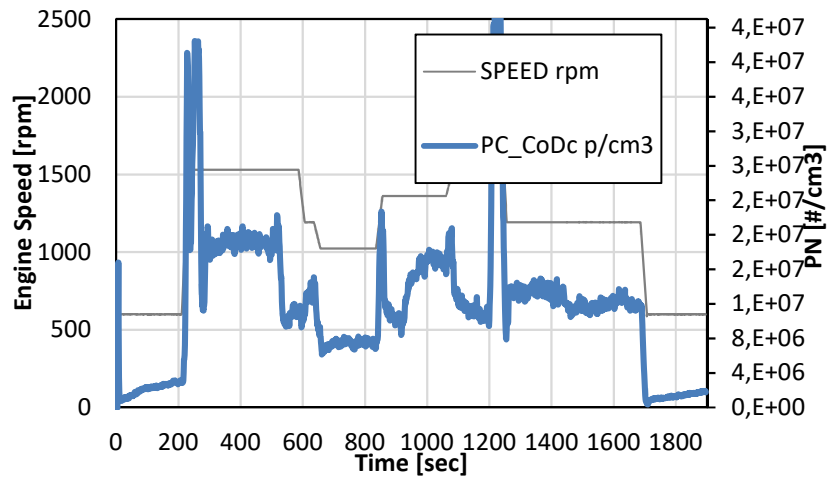
23nm

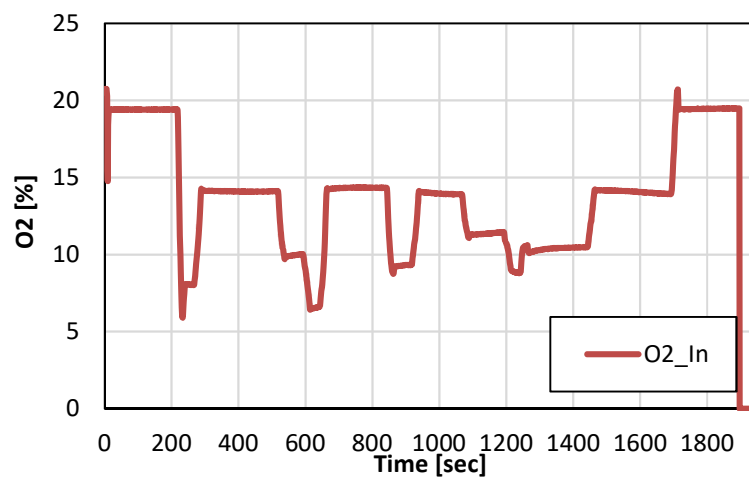
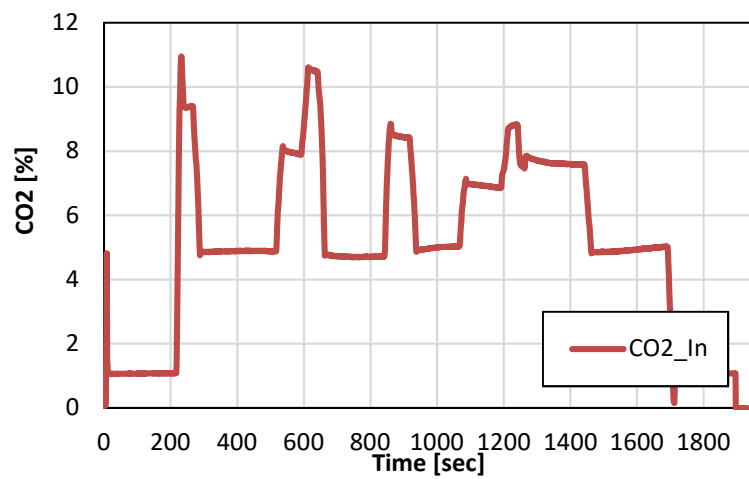
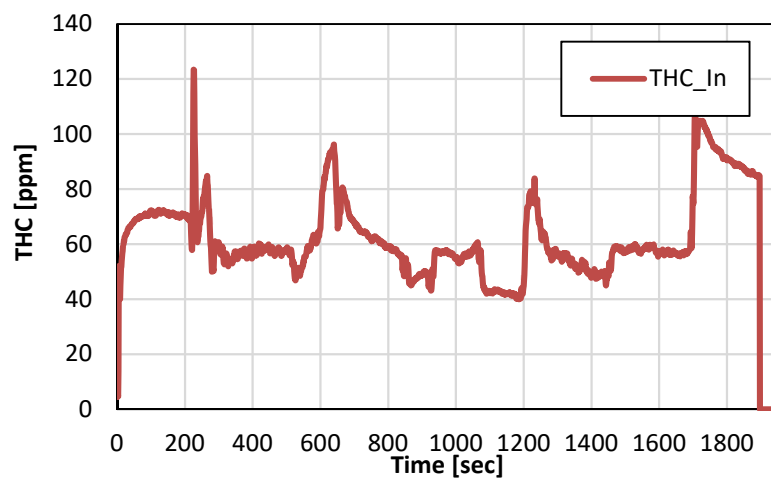
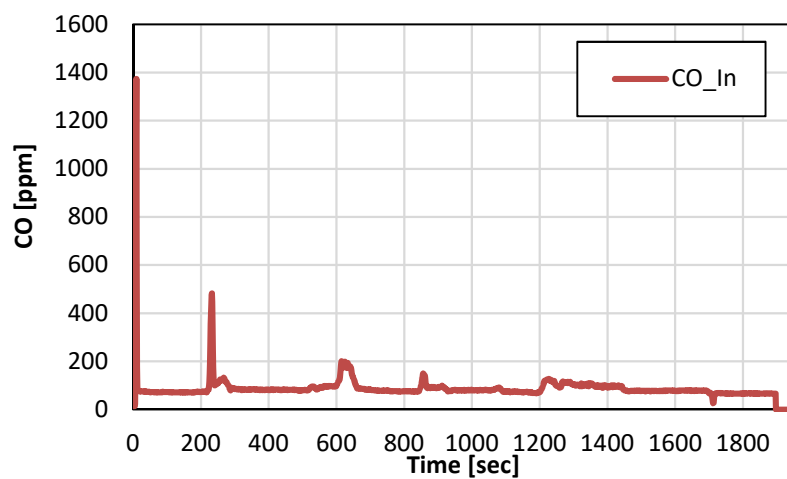




221126_02_WHSC1_OM926

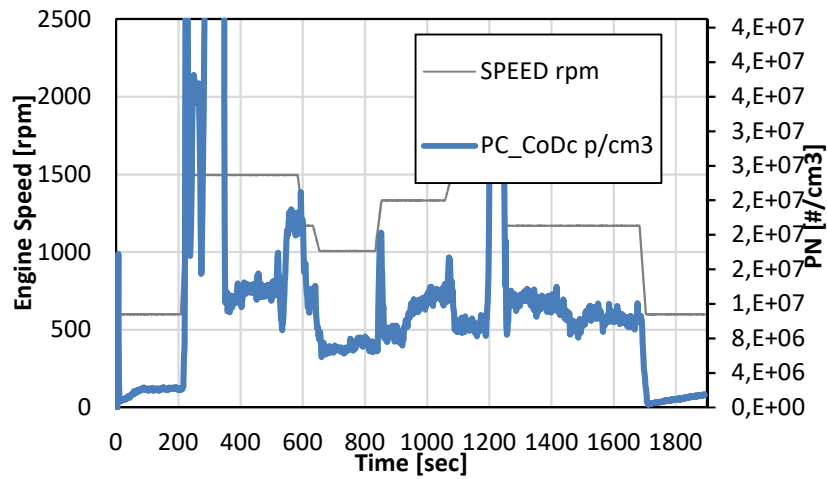
10nm



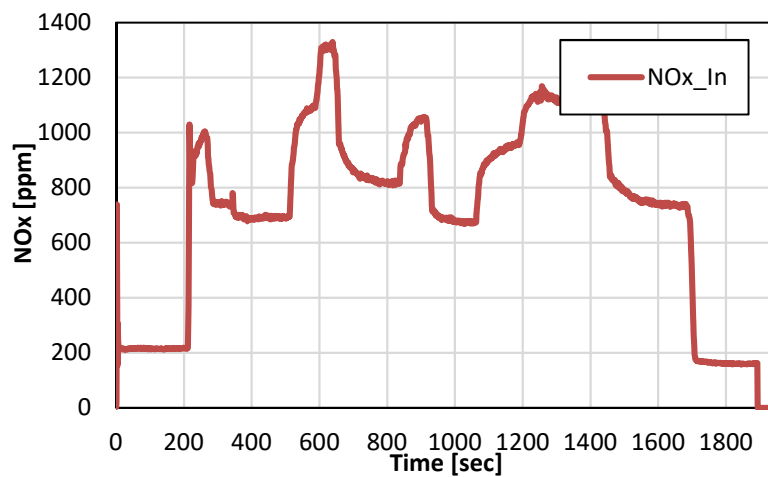
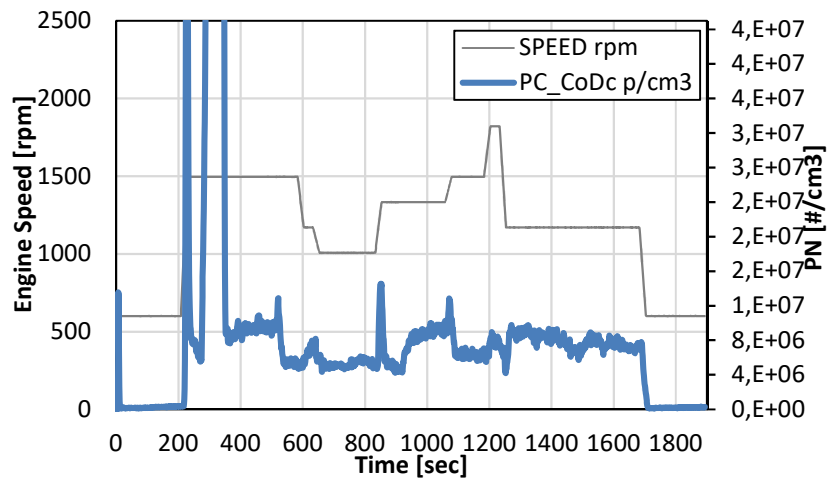


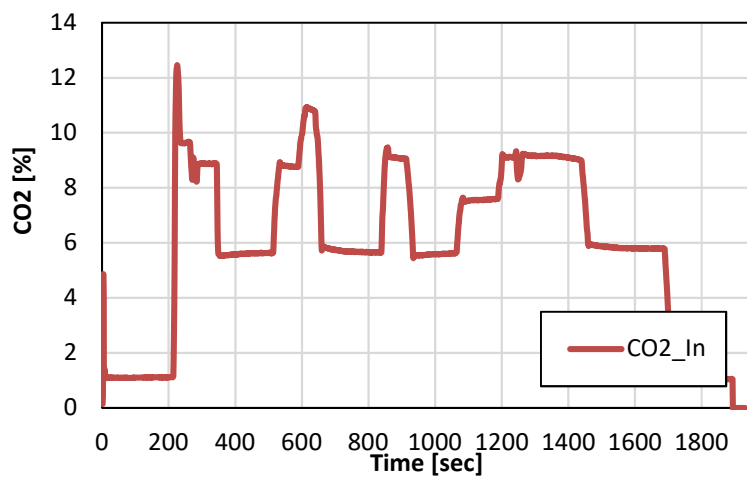
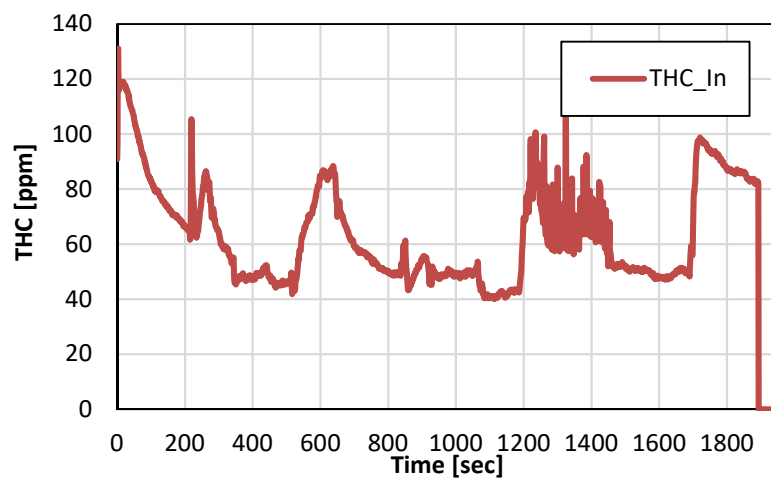
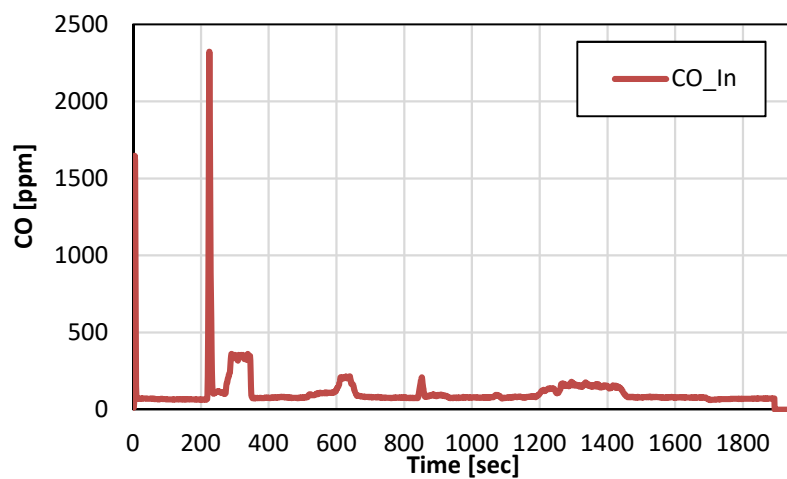
221202_03_WHSC1_OM926

10nm



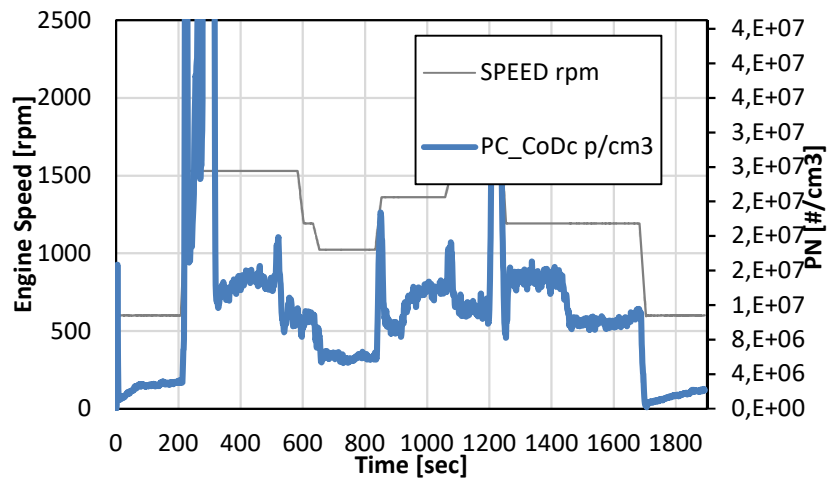
23nm



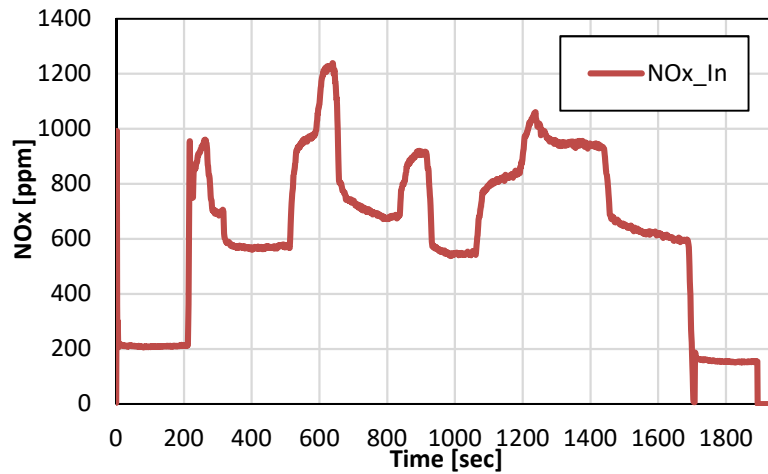
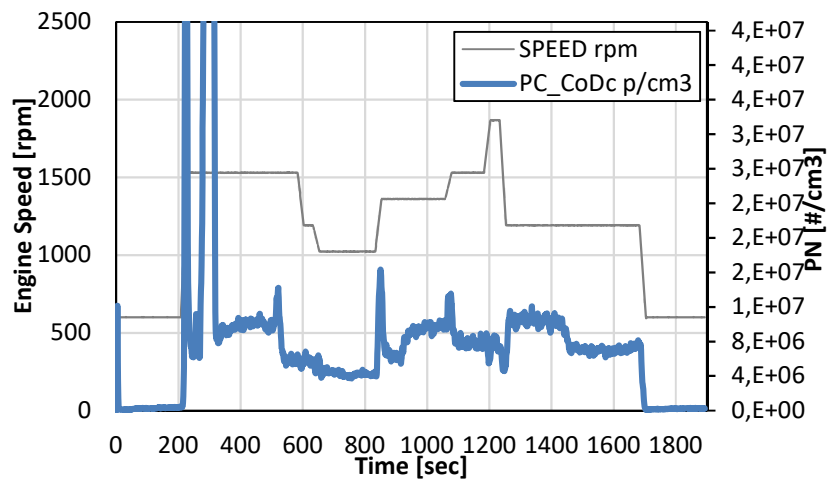


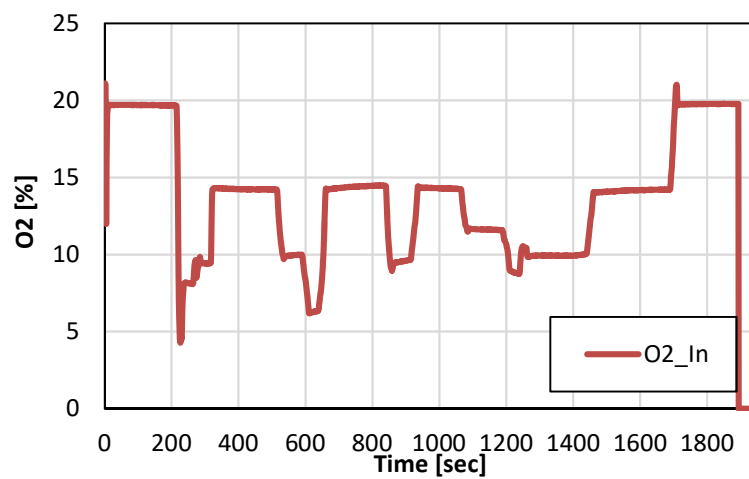
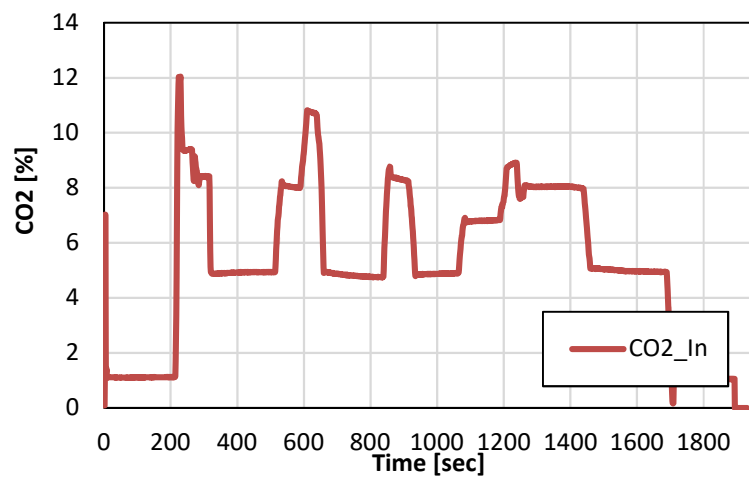
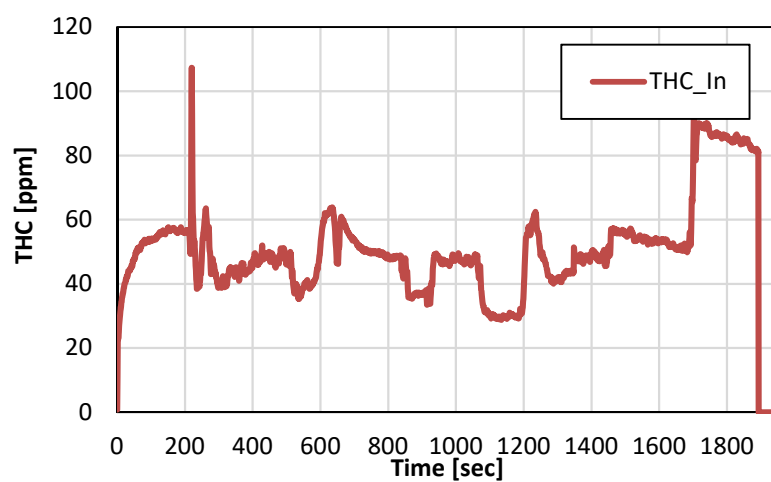
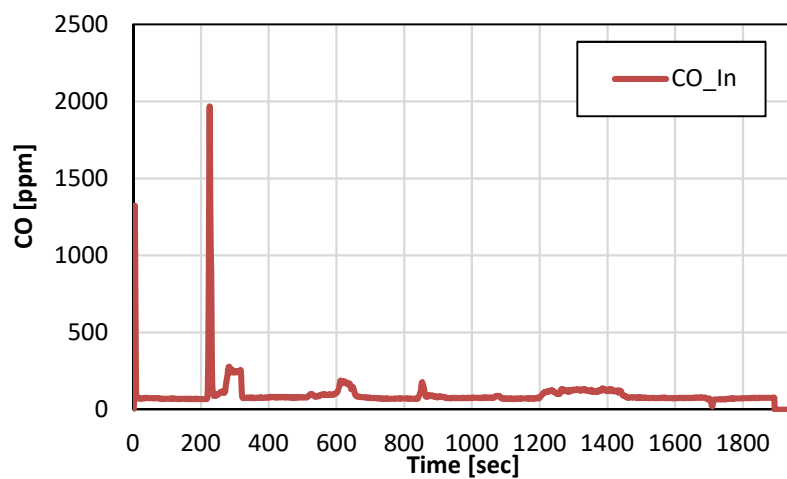
221210_01_WHSC1_OM926

10nm



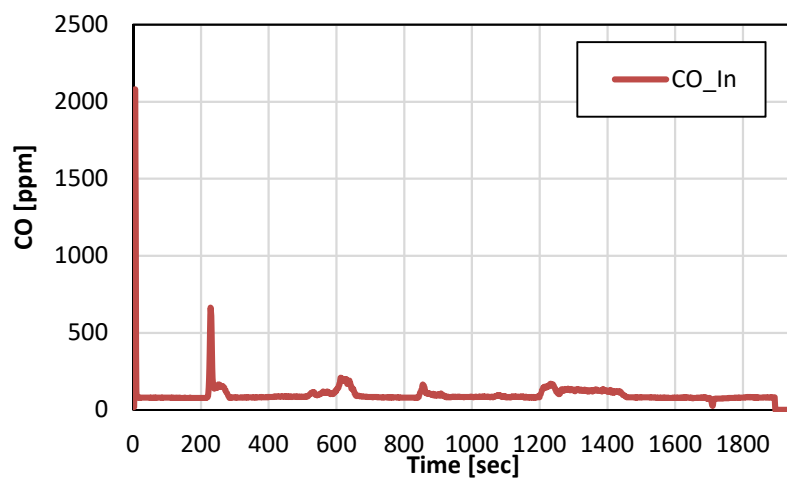
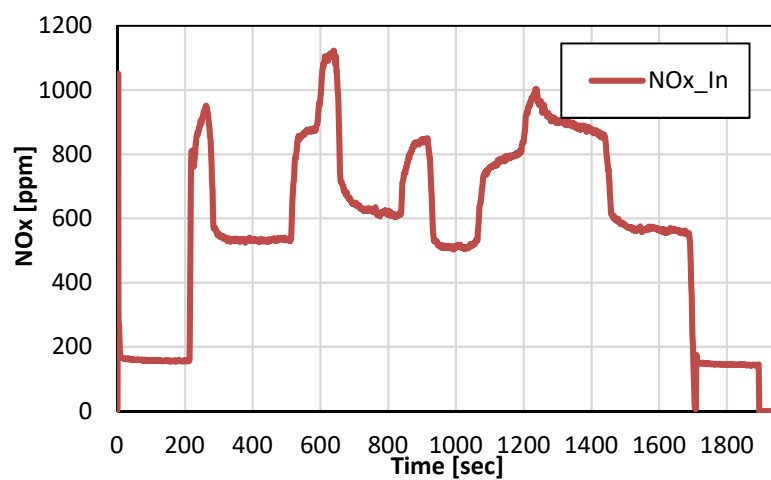
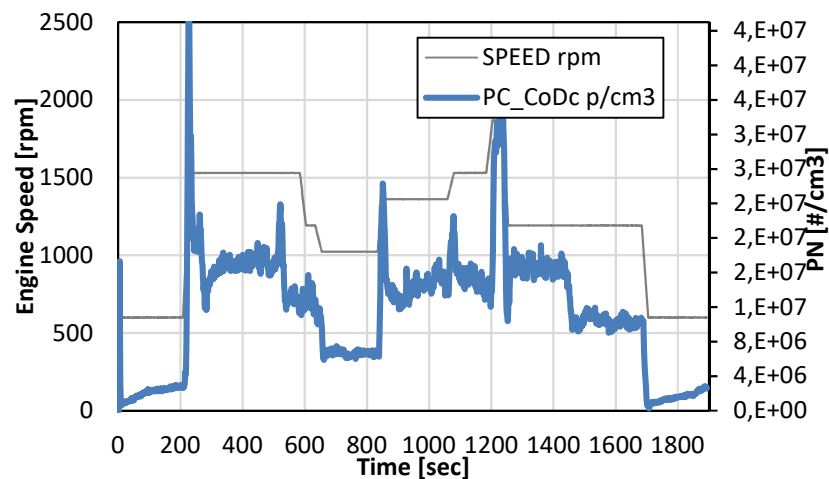
23nm

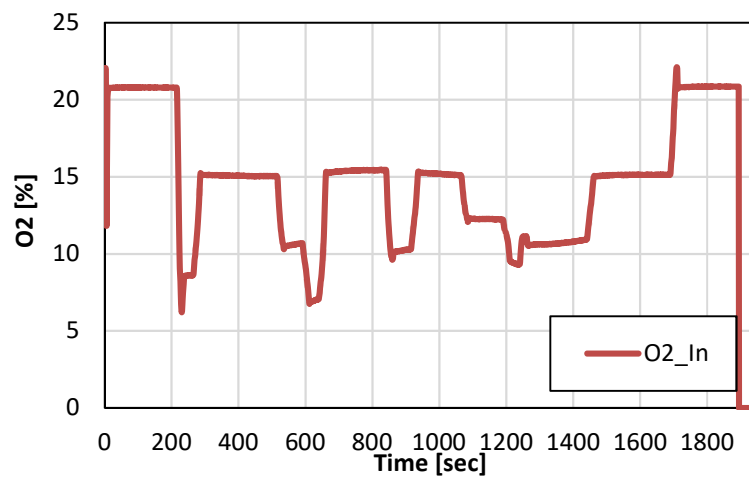
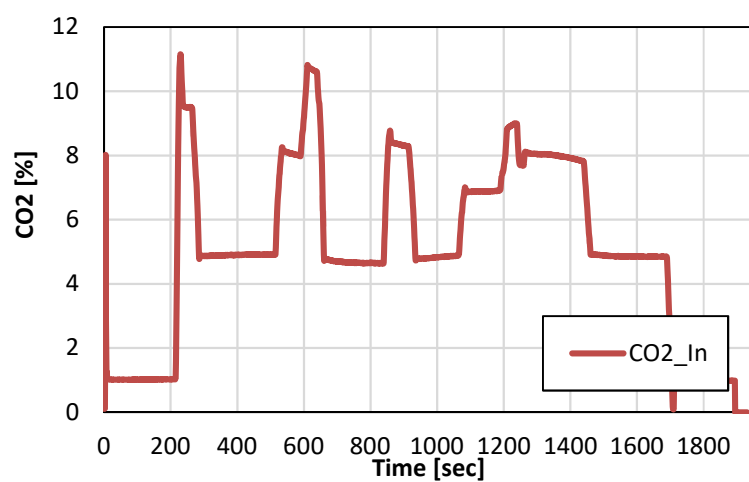
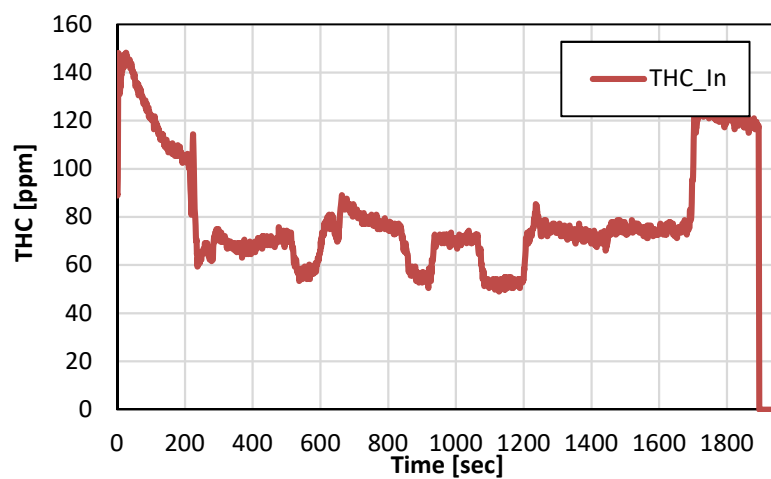




230113_03_WHSC1_OM926

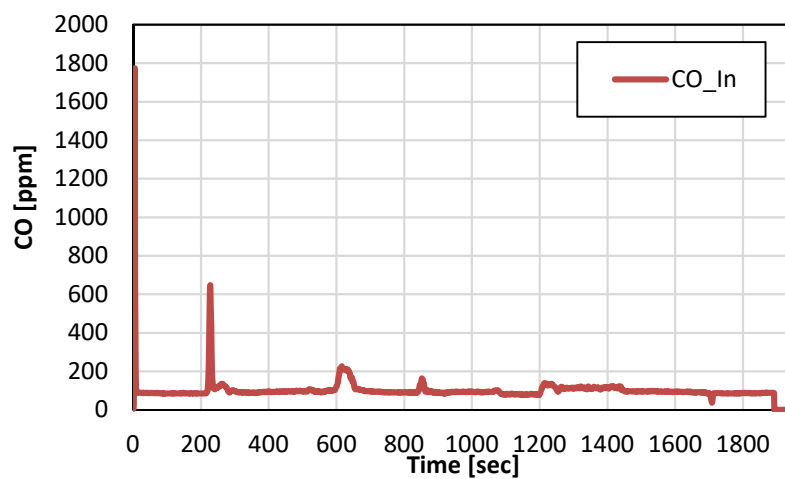
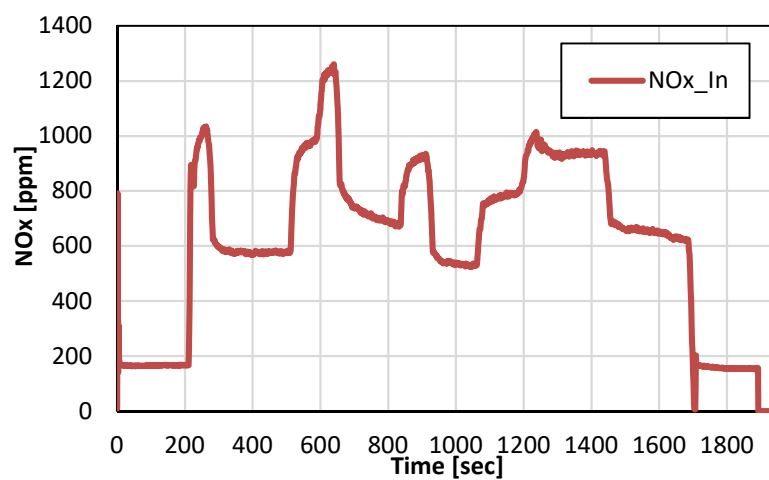
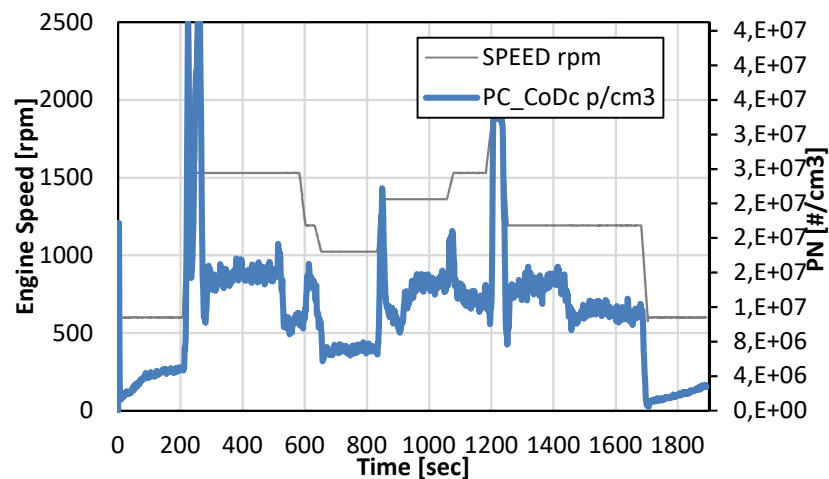
10nm

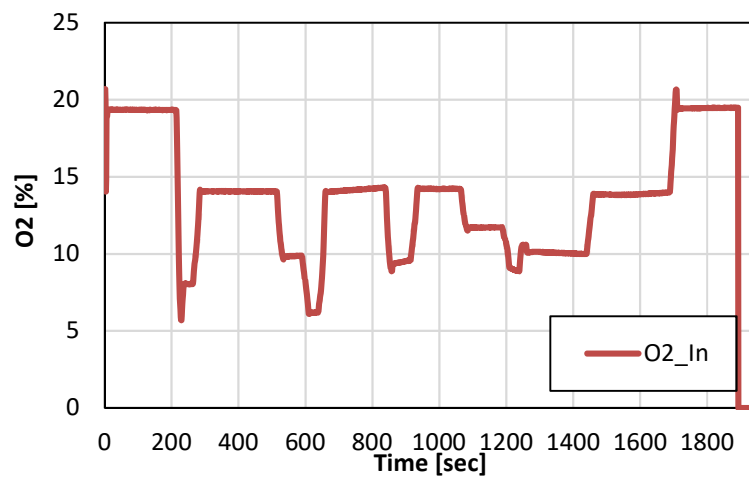
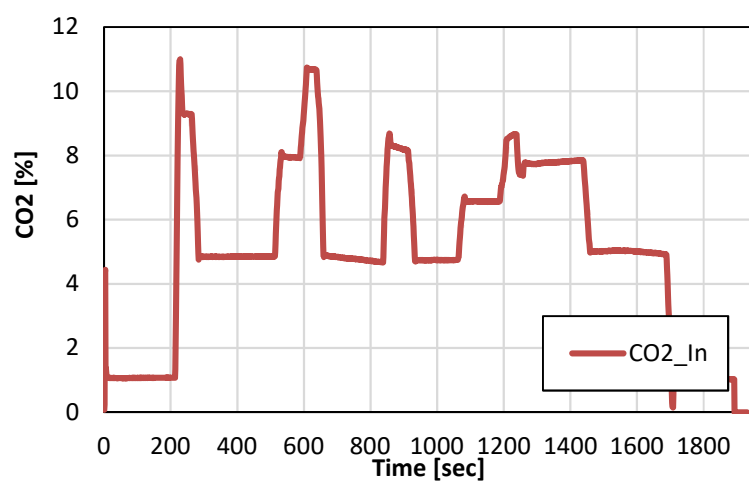
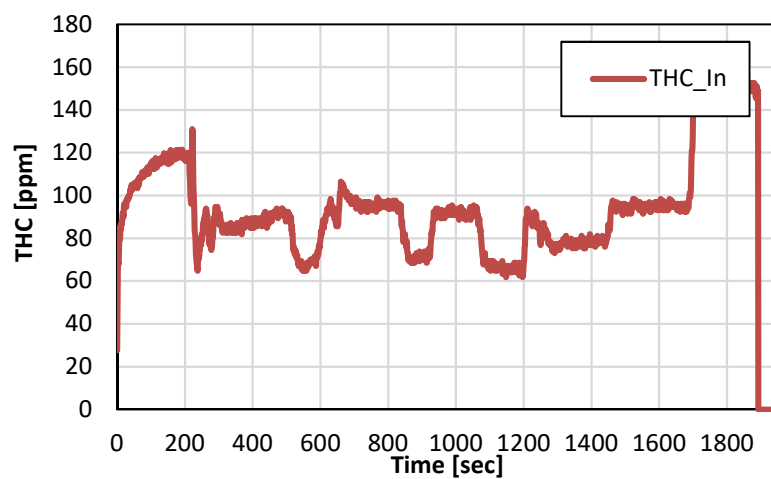




230127_01_WHSC1_OM926

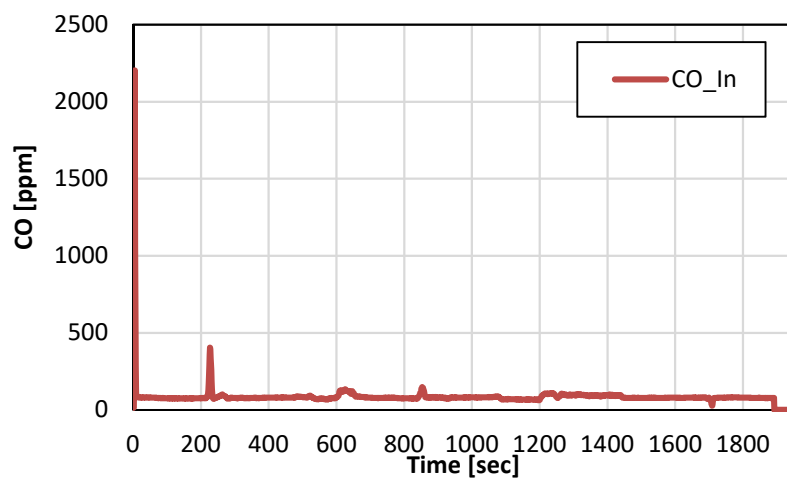
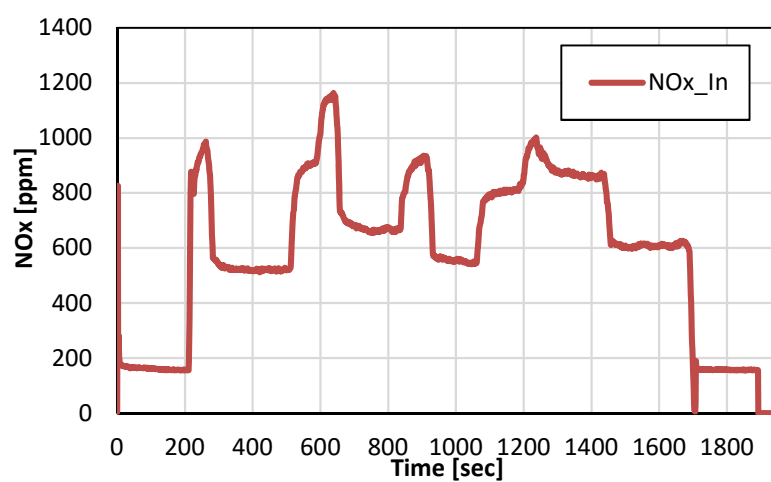
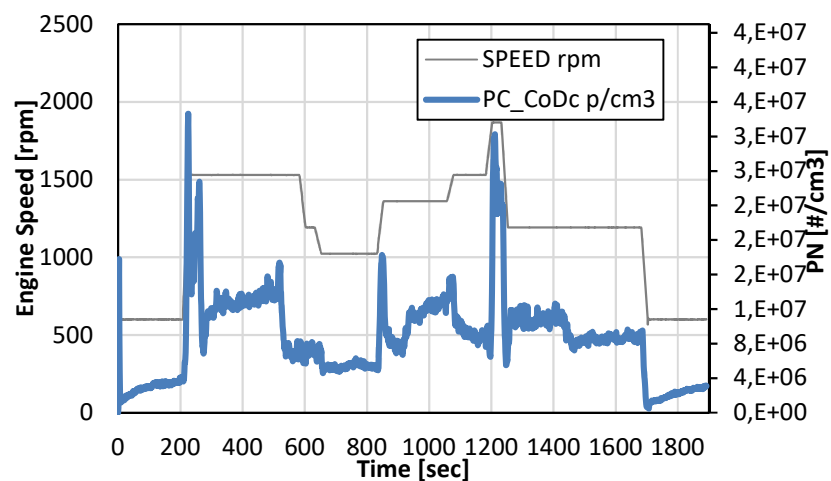
10nm

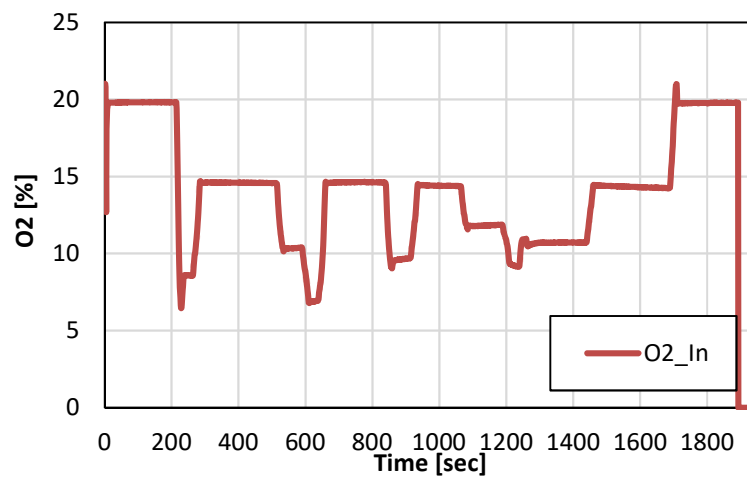
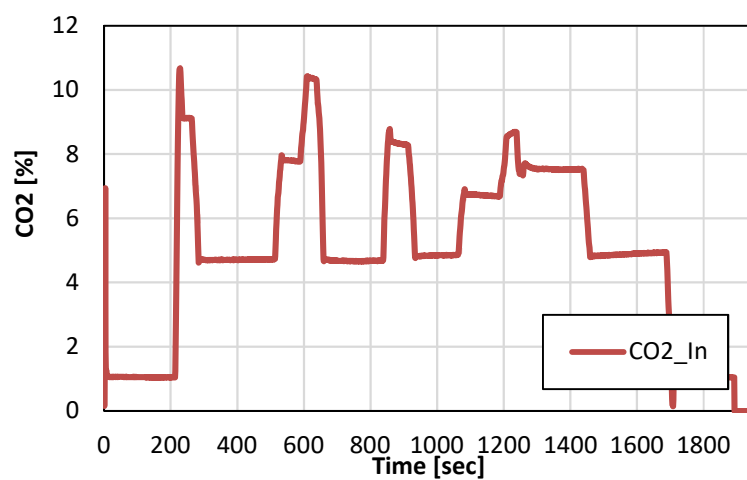
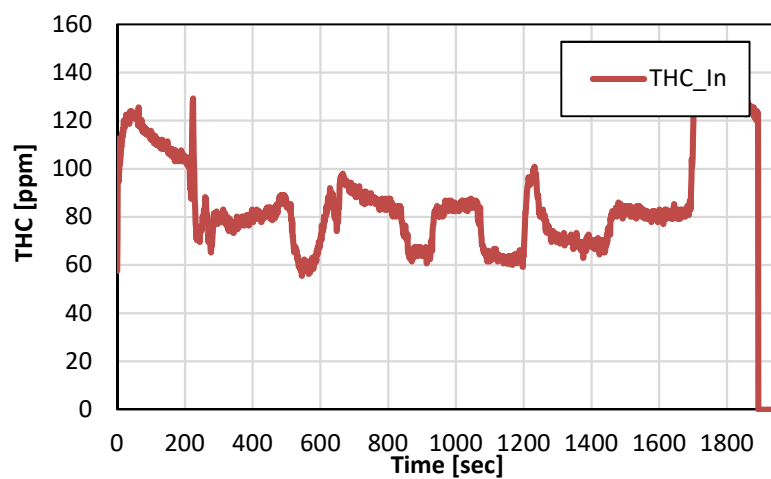




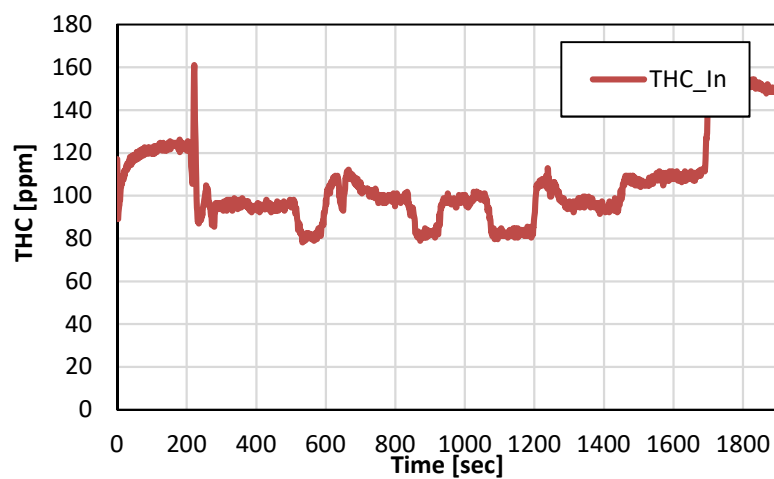
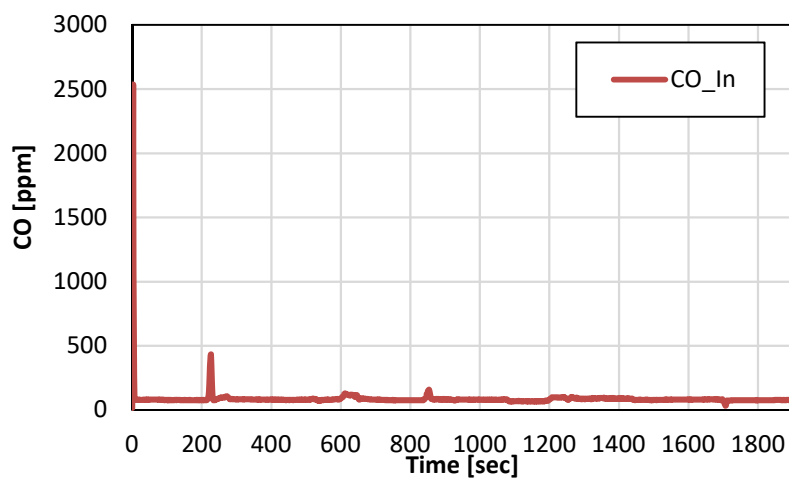
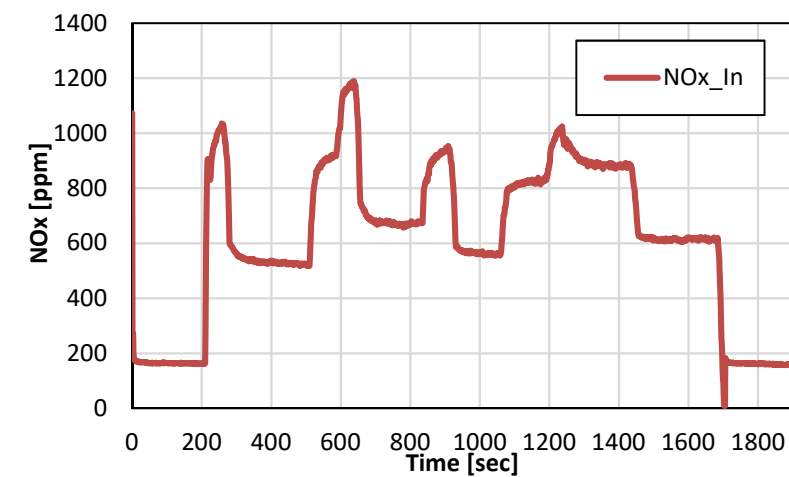
230203_01_WHSC1_OM926

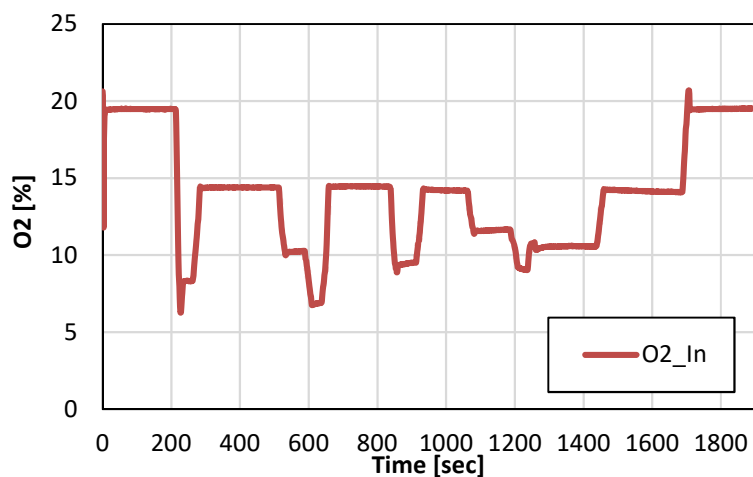
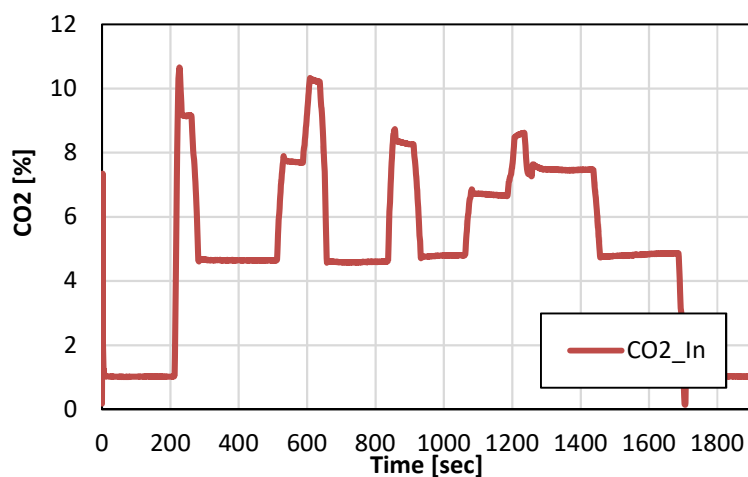
10nm





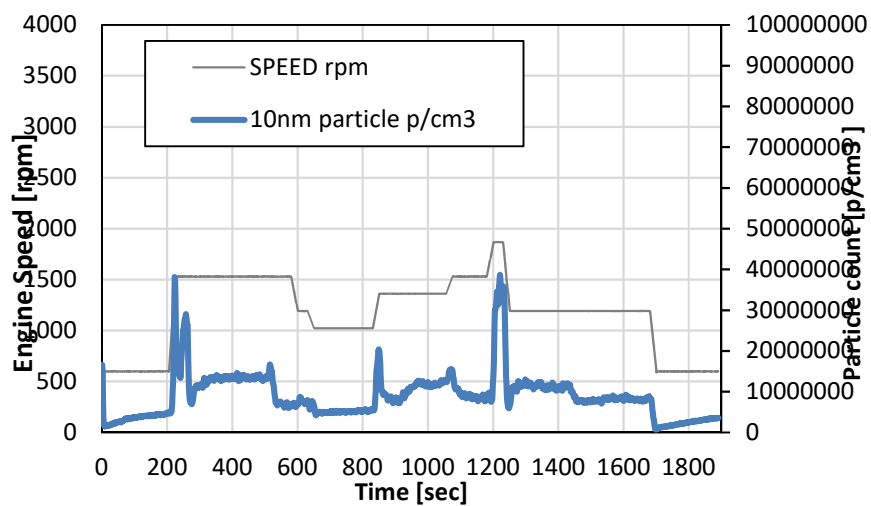
230317_01_WHSC1_OM926

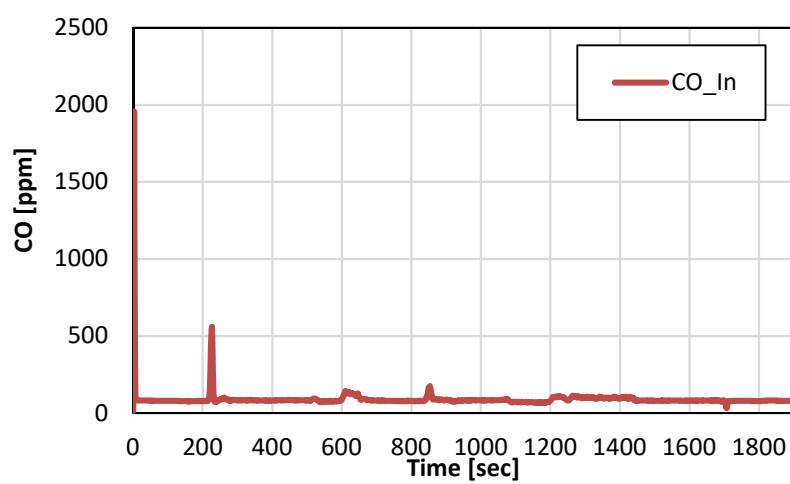
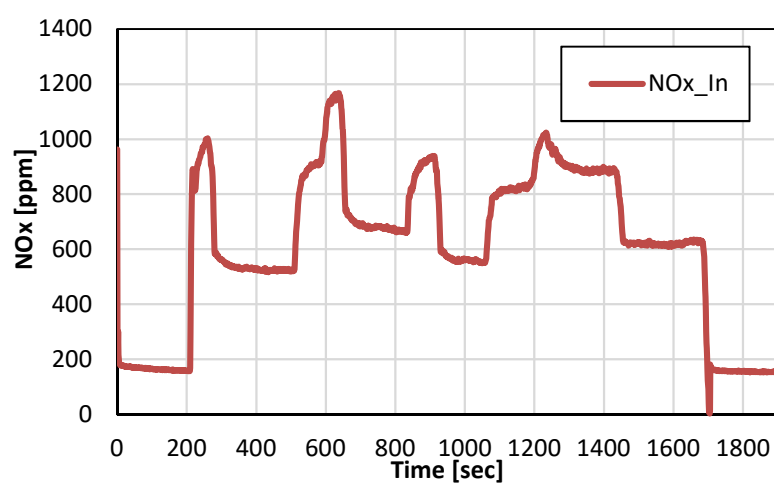
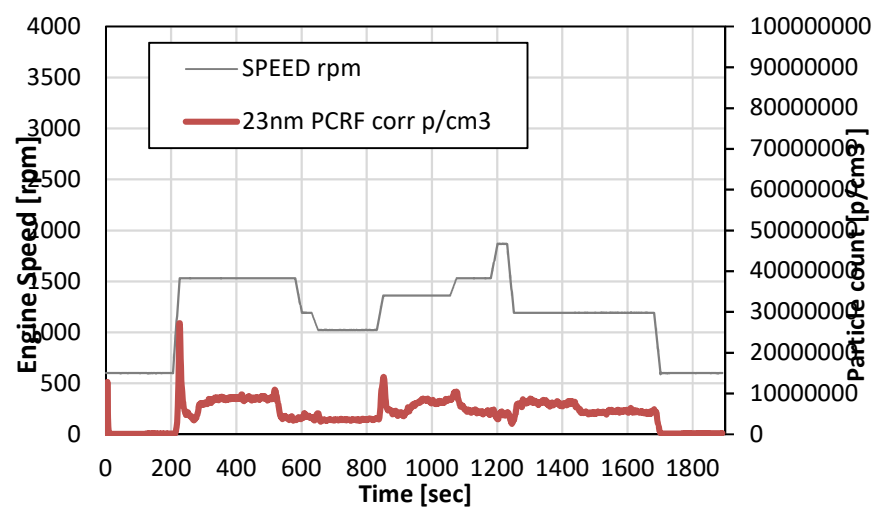


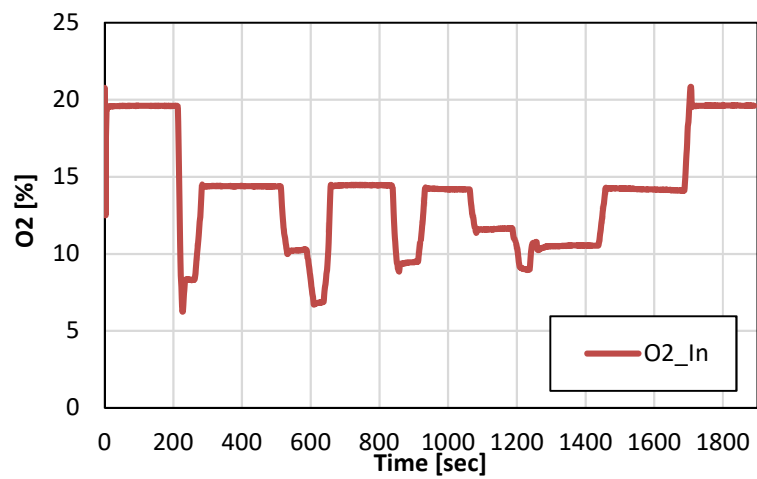
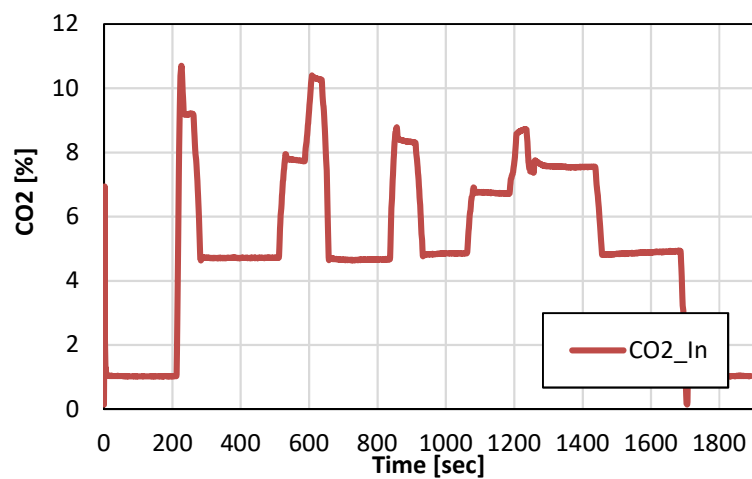
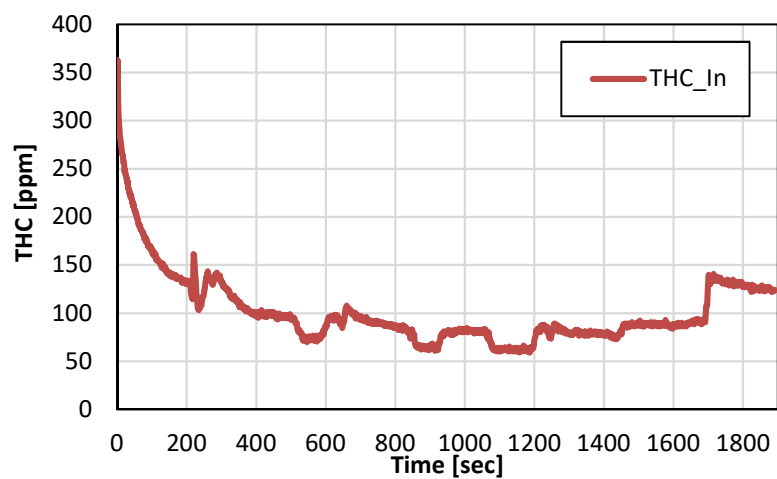


230324_02_WHSC1_OM926

10nm

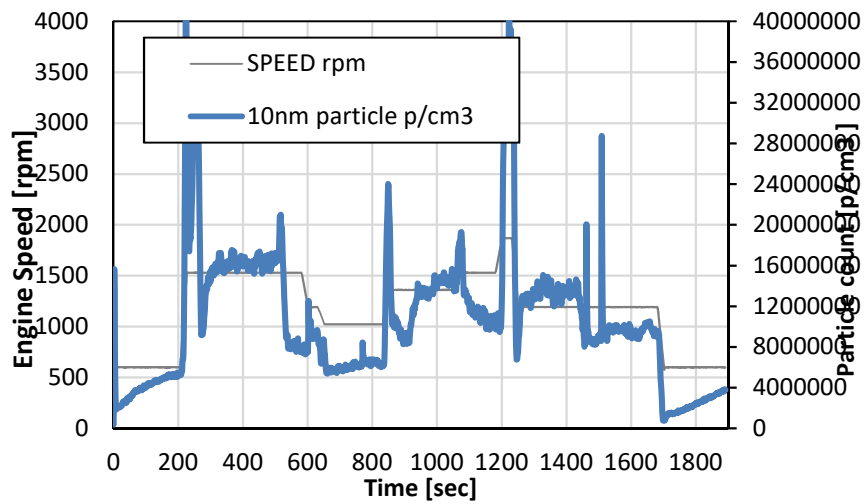


23nm

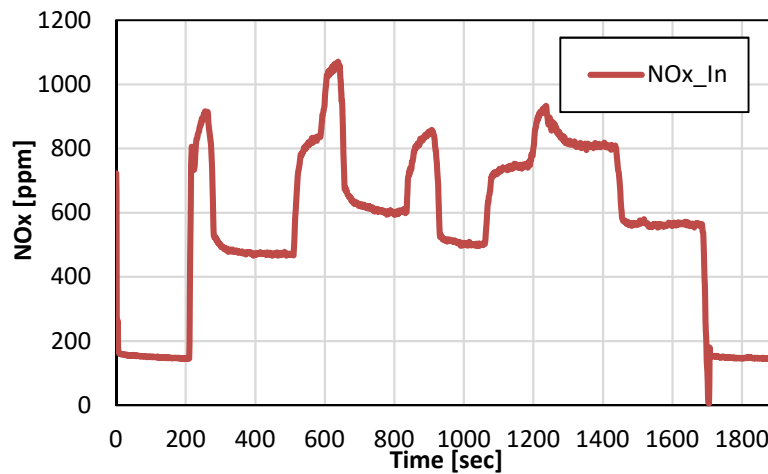
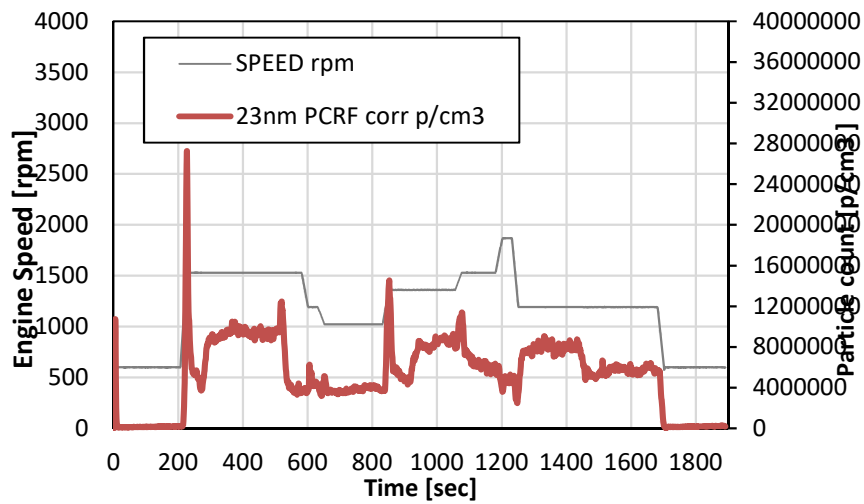


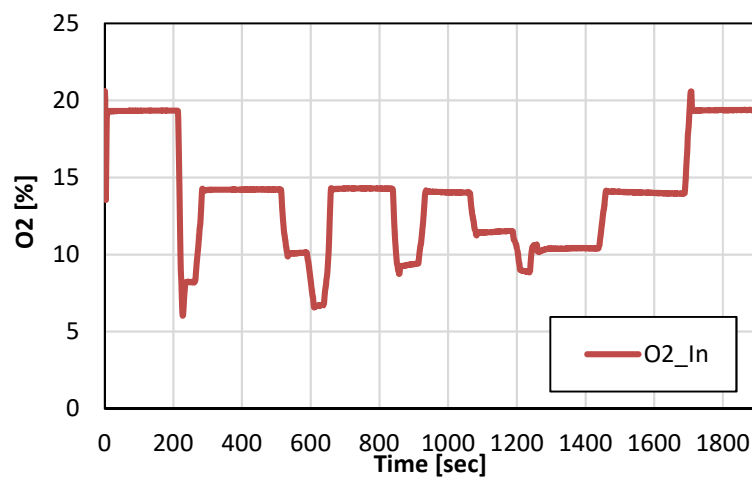
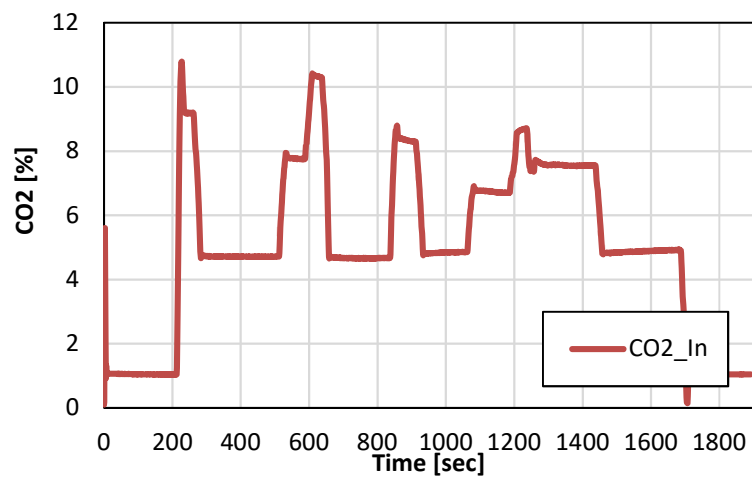
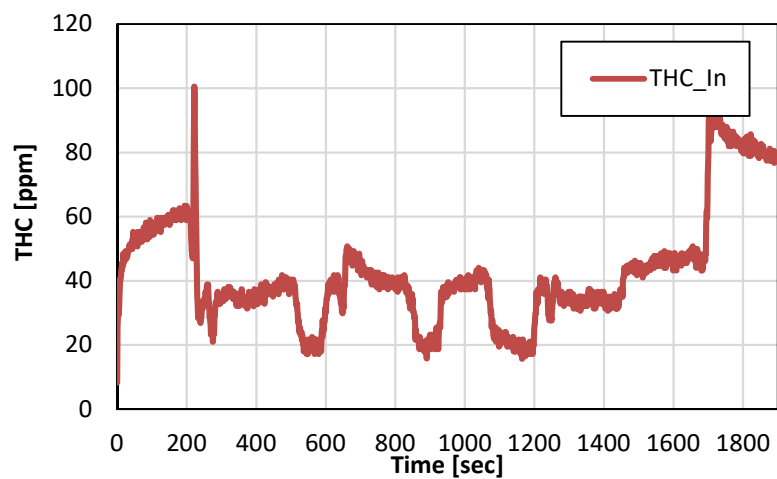
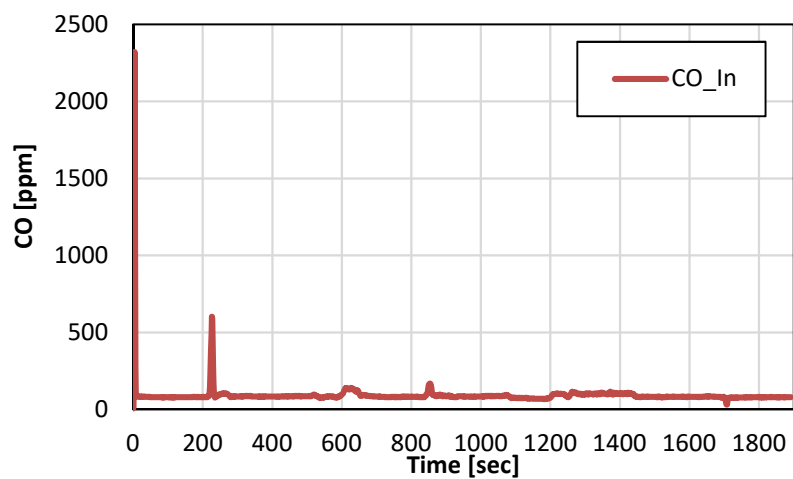
230331_01_WHSC1_OM926

10nm



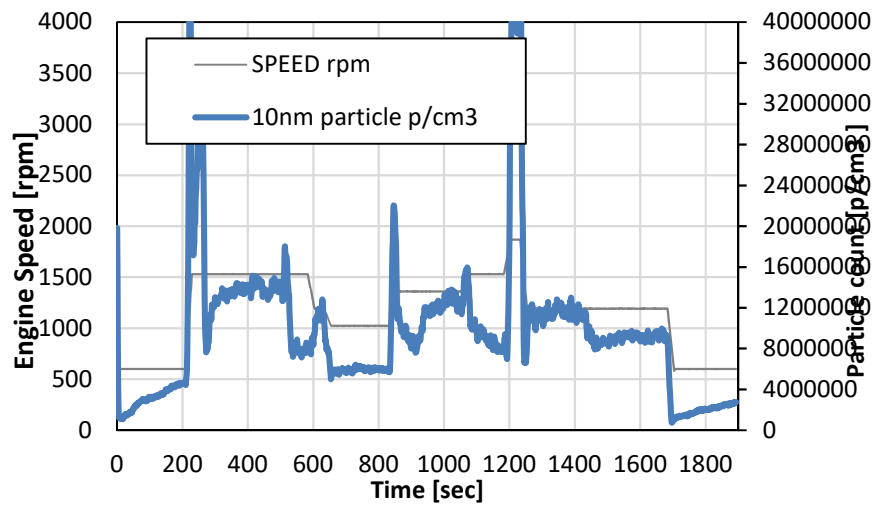
23nm



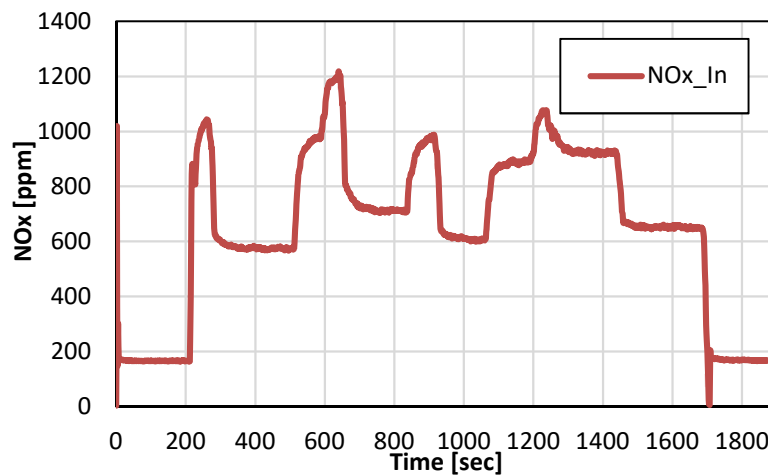
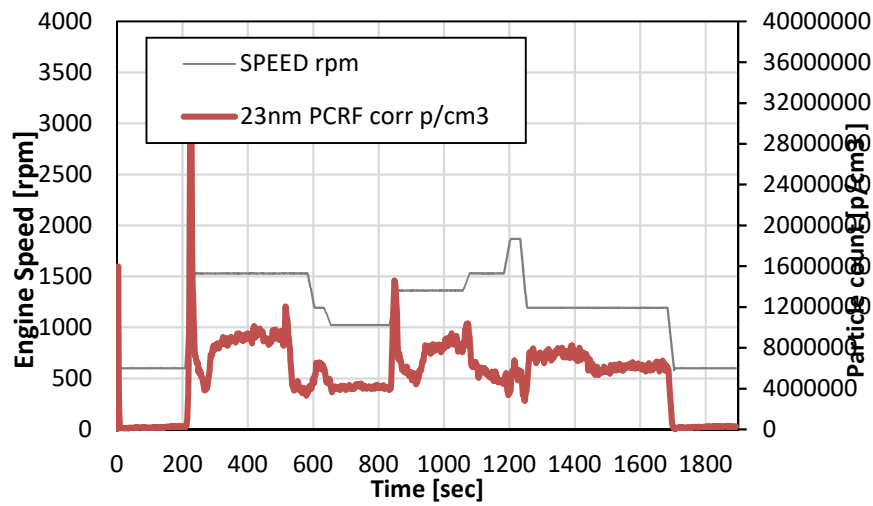


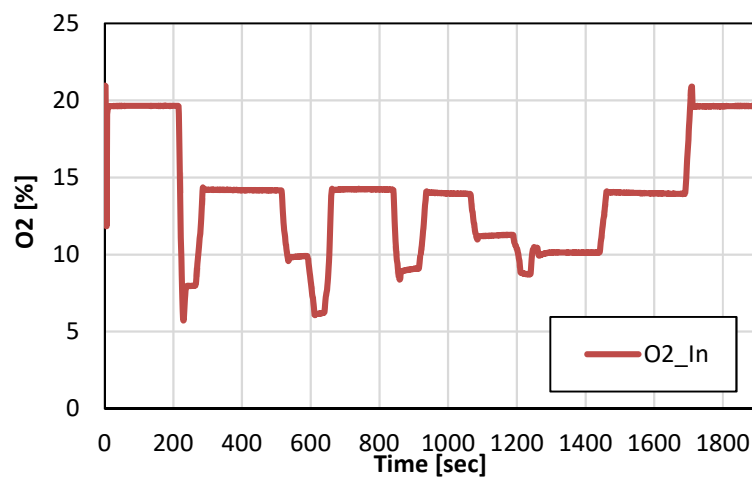
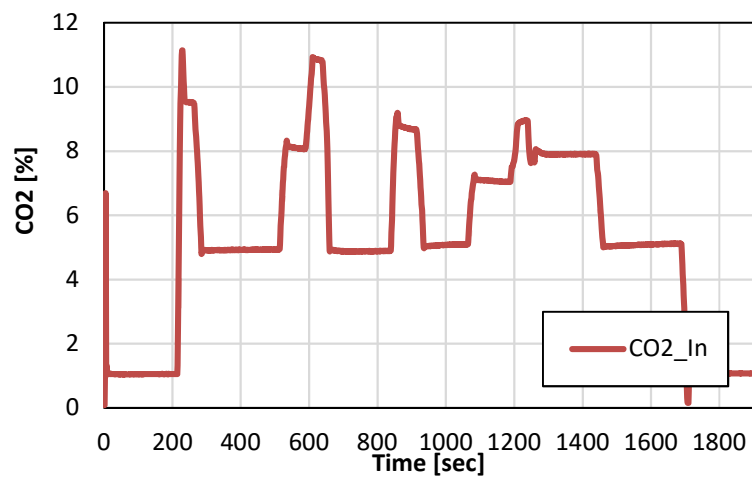
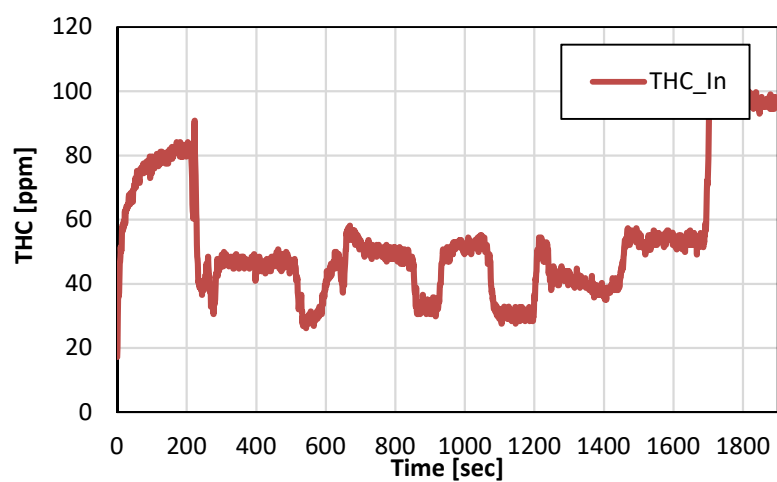
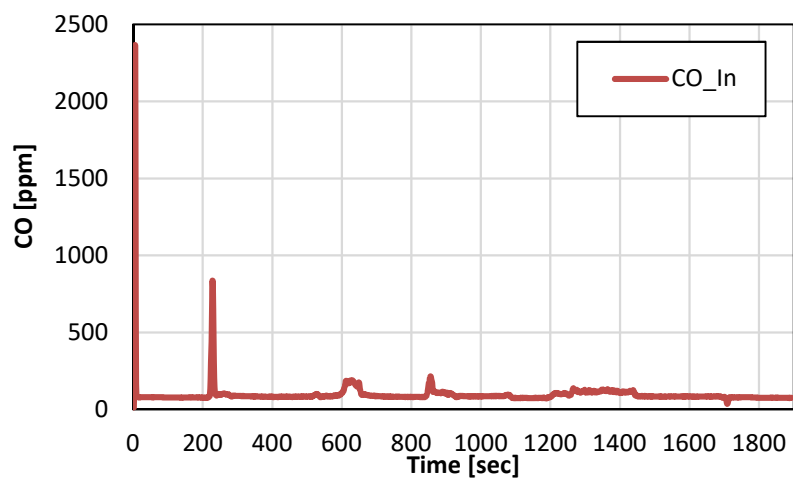
230421_03_WHSC1_OM926

10nm



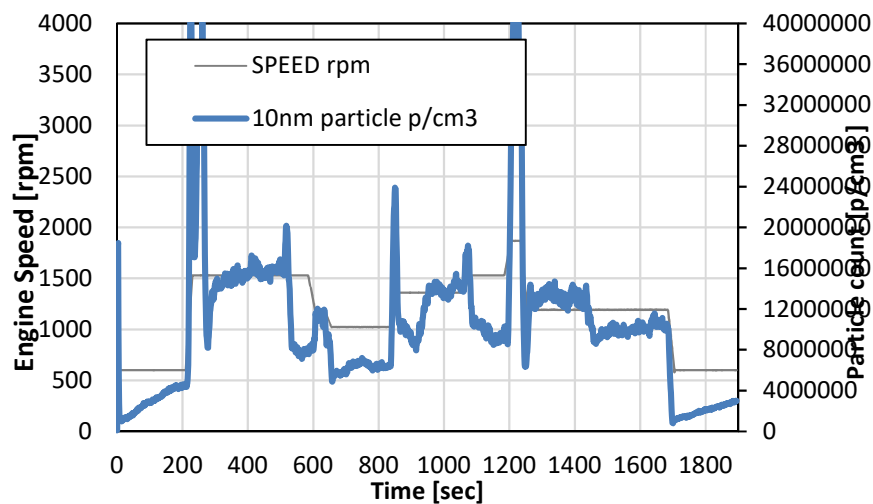
23nm



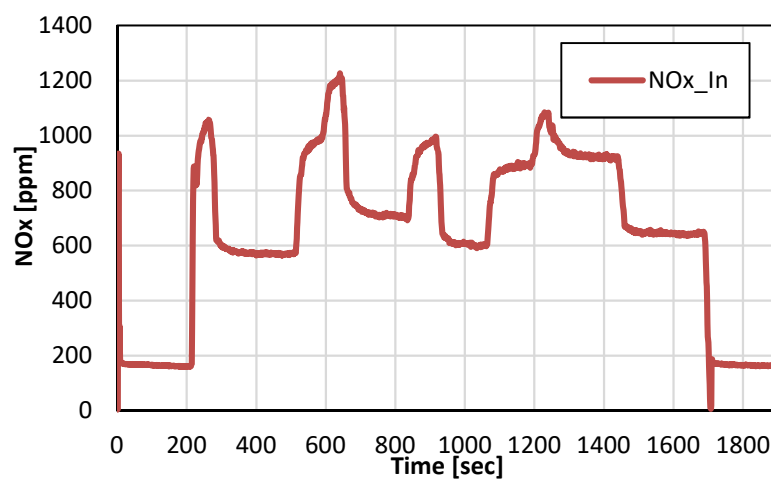
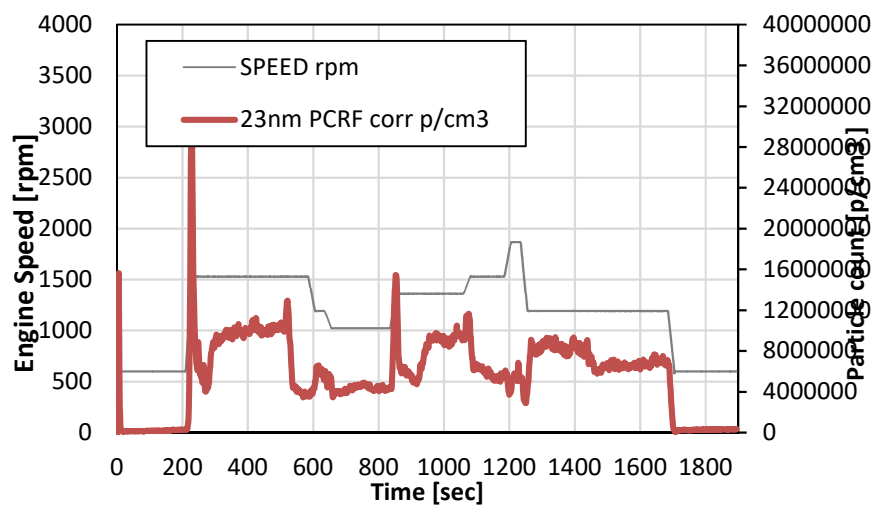


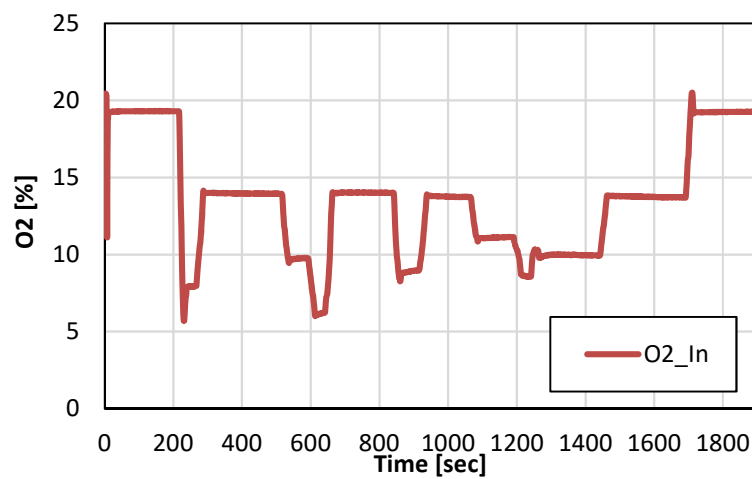
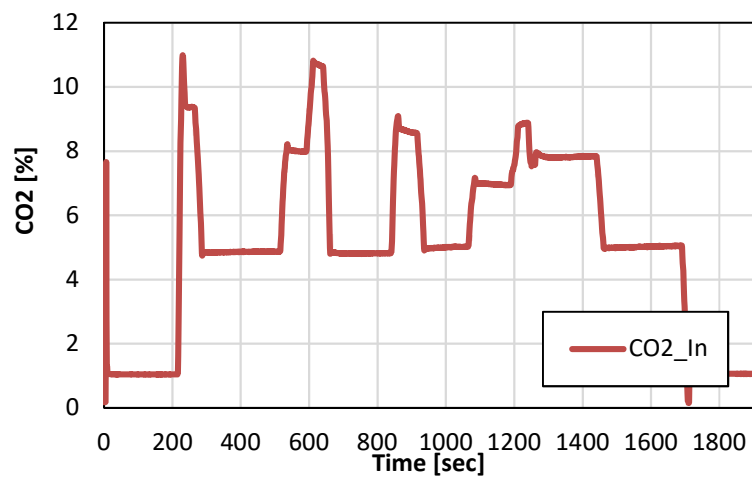
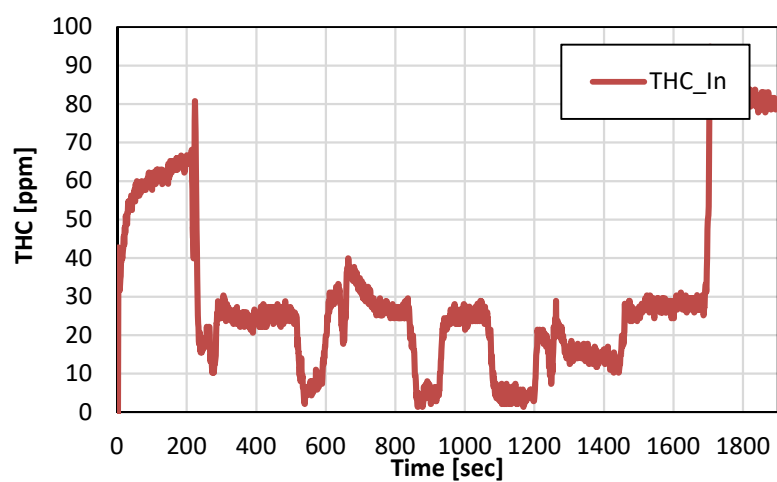
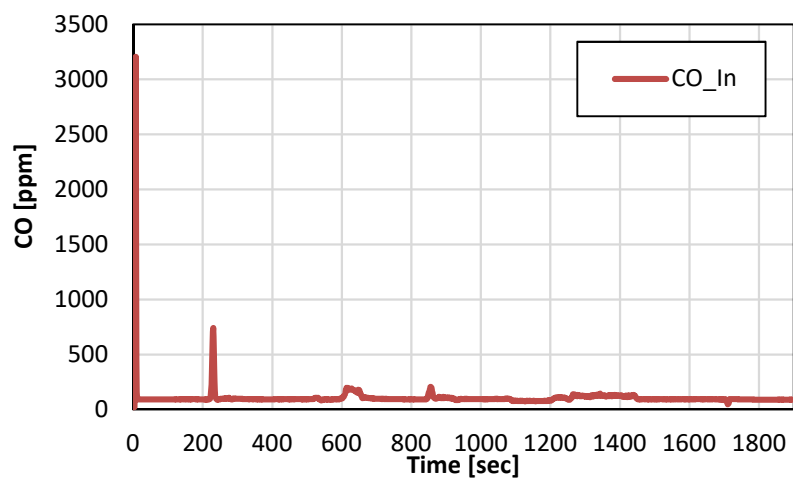
230428_01_WHSC1_OM926

10nm



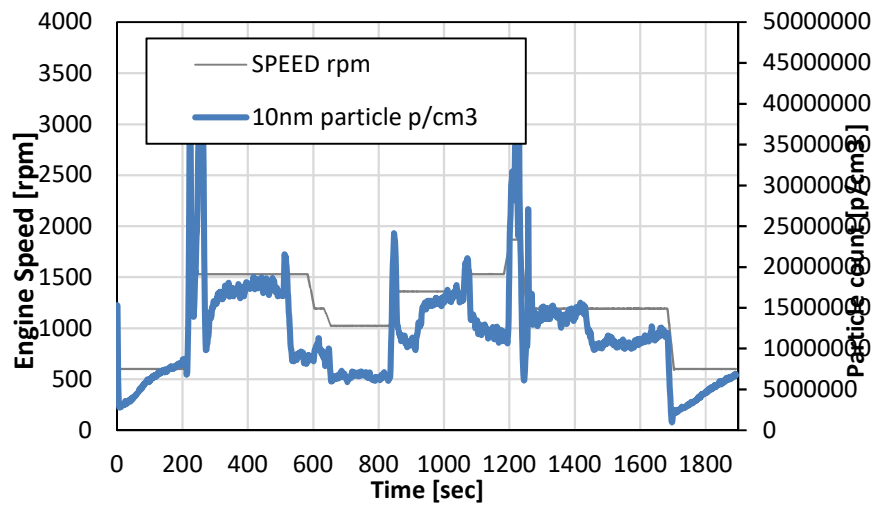
23nm



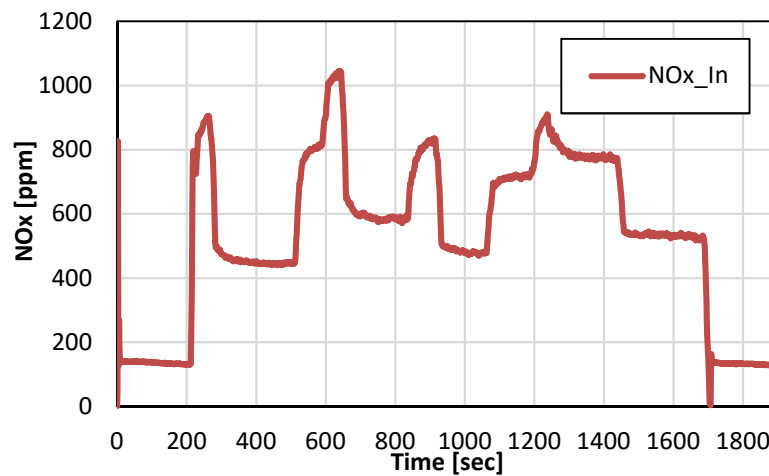
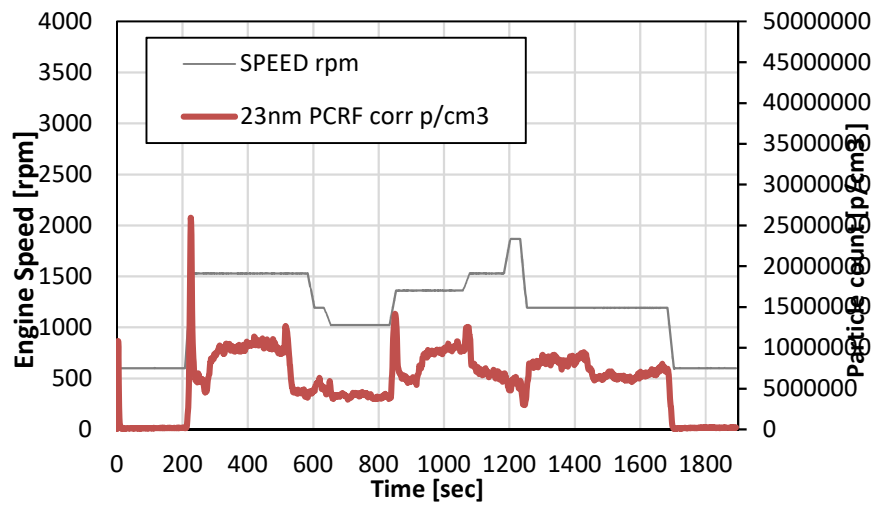


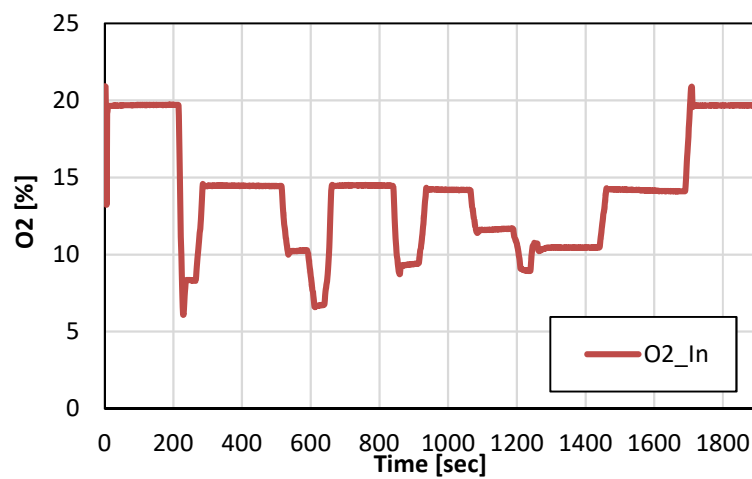
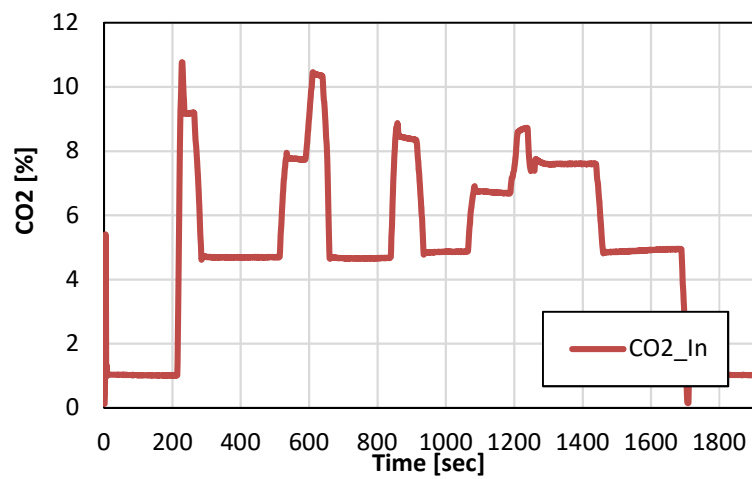
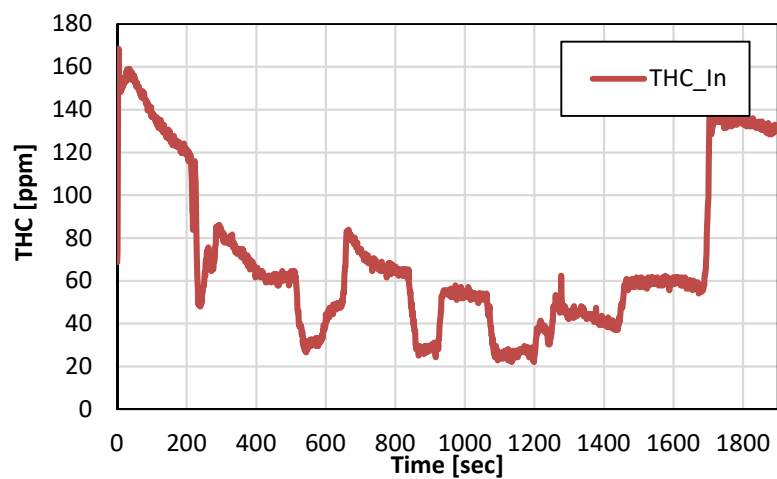
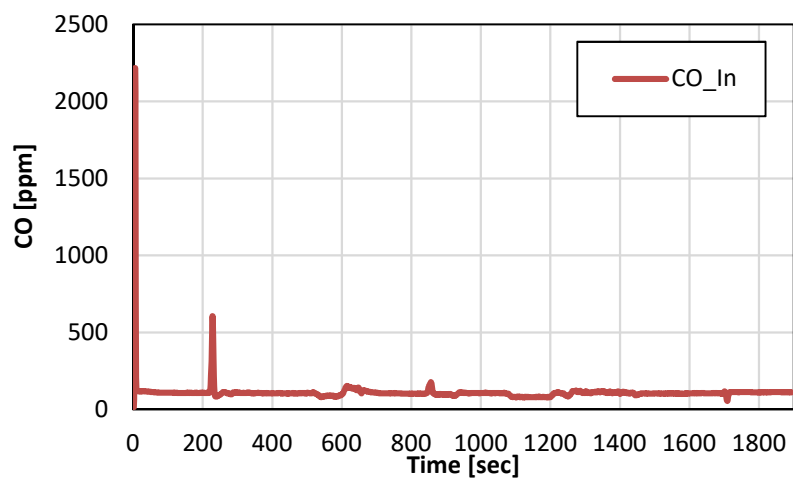
230609_01_WHSC1_OM926

10nm



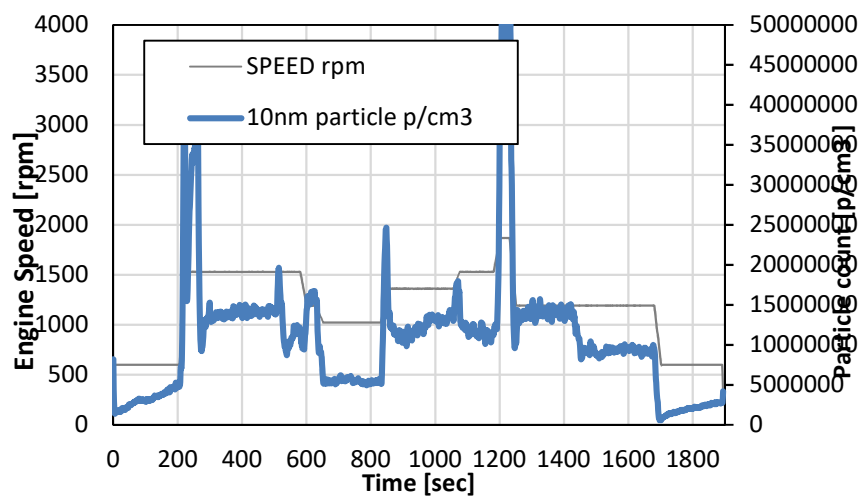
23nm



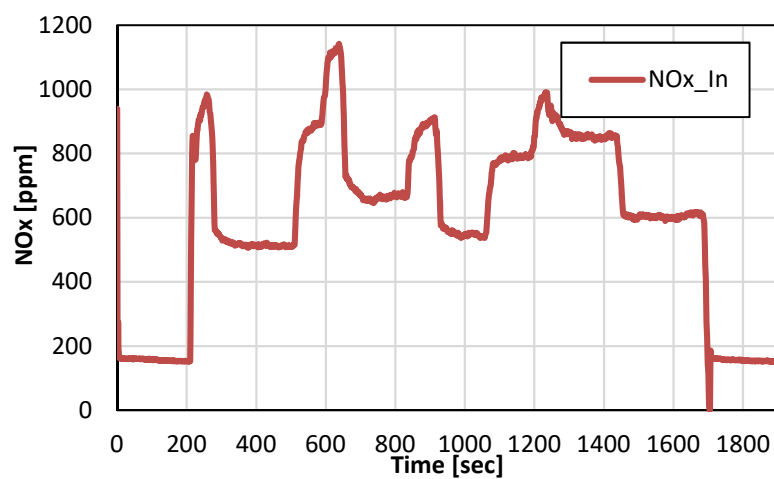
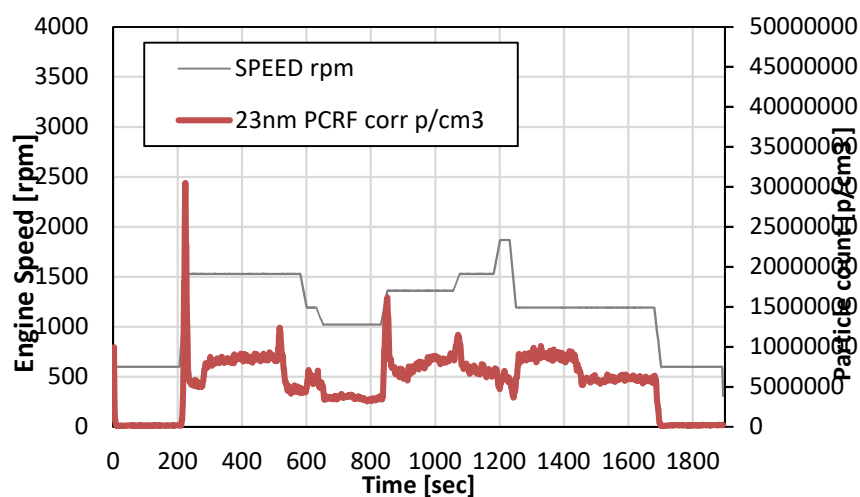


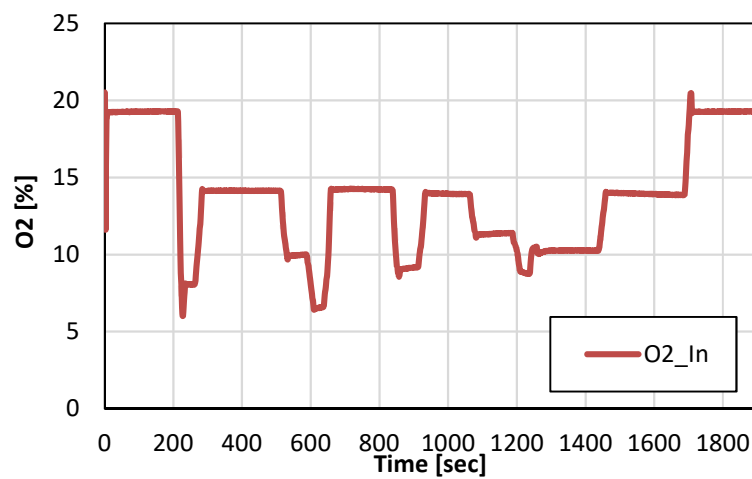
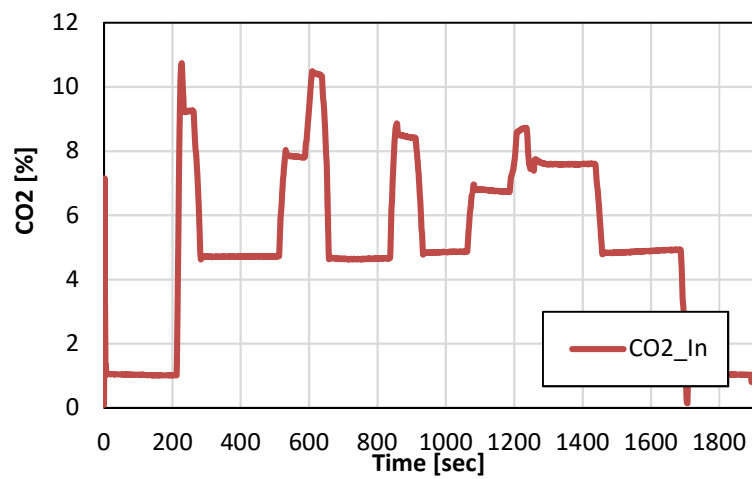
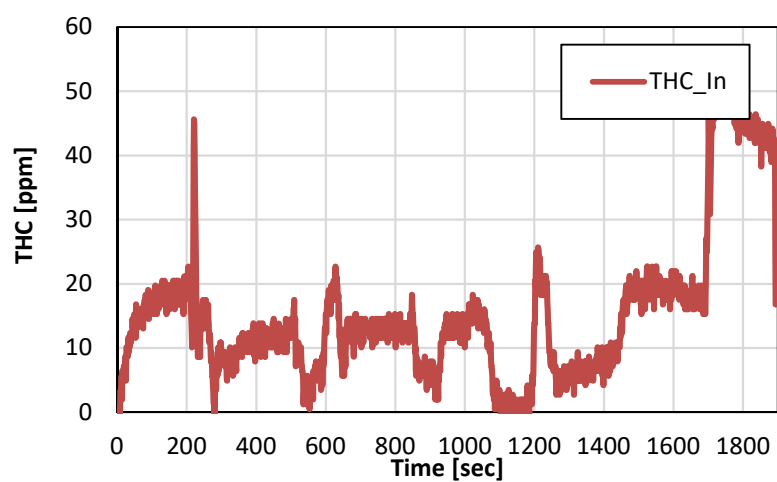
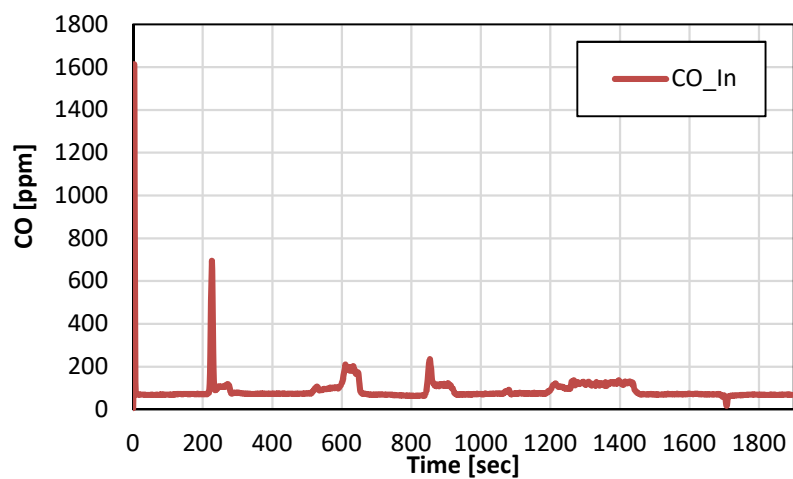
230707_01_WHSC1_OM926

10nm



23nm



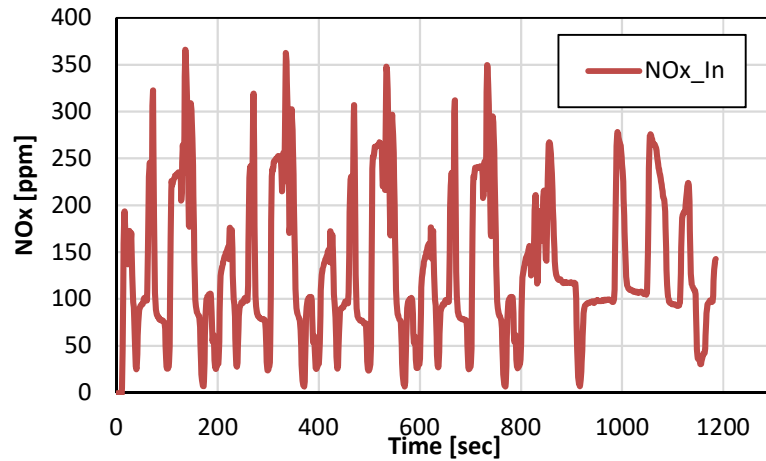
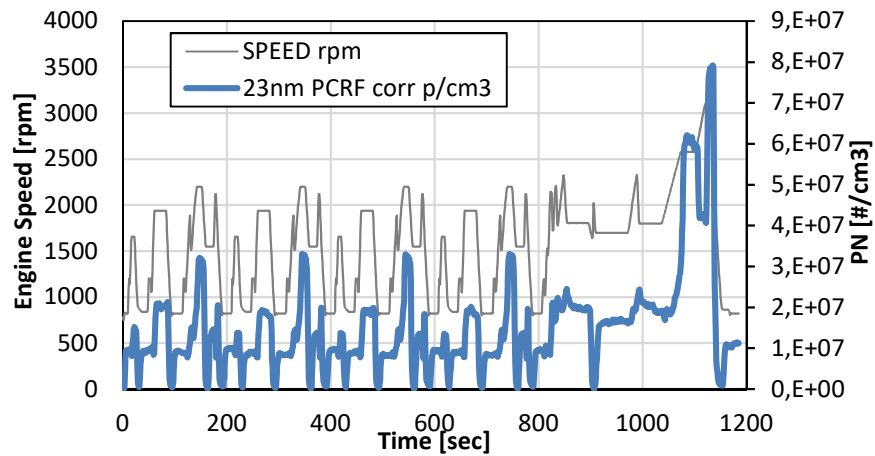
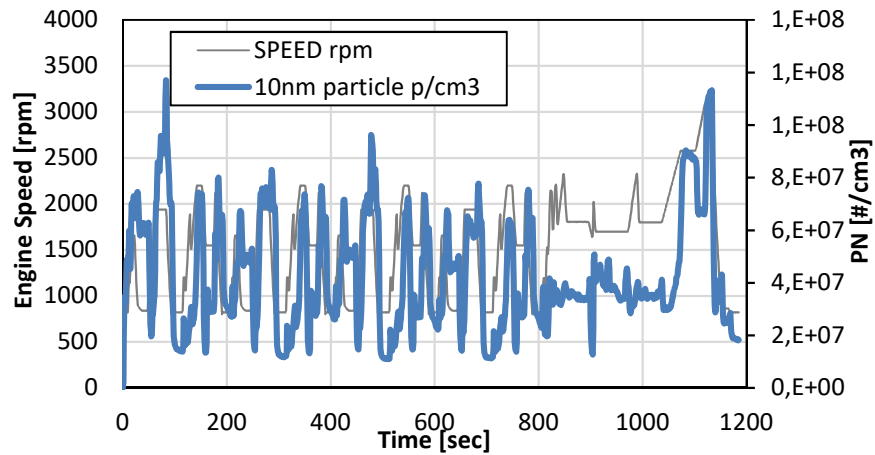


M5. Teljes rendszerrel végzett mérések adatai, diagramjai

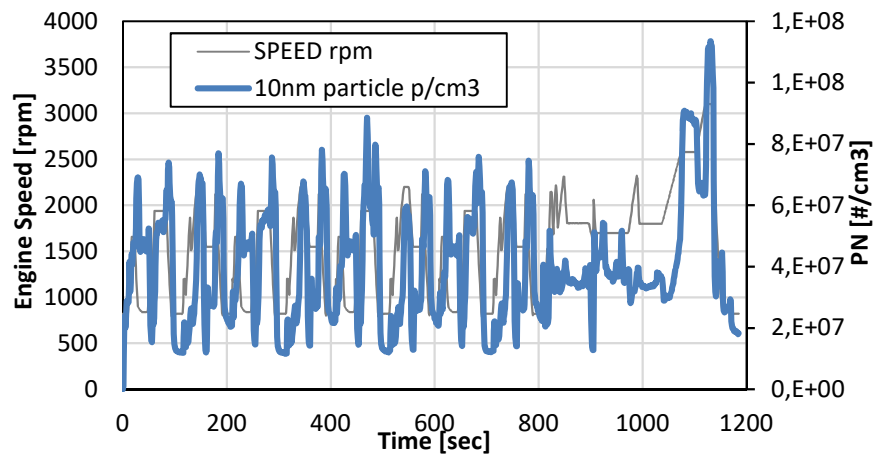
		Teszt azonosító	10nm #/kWh	23nm #/kWh	NOx g/kWh
ECE	Raw	1222_NEDC_4_DV6	1,65E+15	4,37E+14	
		1222_NEDC_3_DV6	1,54E+15	4,68E+14	12,259
		1222_NEDC_2_DV6	1,61E+15	4,98E+14	12,227
		1221_NEDC_3_DV6	1,58E+15	4,81E+14	12,291
	EGR+DOC+DPF	0116_NEDC_2_DV6	5,44E+10	1,37E+10	2,671
		0116_NEDC_4_DV6	3,56E+10	8,32E+09	2,472
		0116_NEDC_6_DV6	2,72E+10	6,08E+09	2,654
	EGR+DOC+DPF+WI	0116_NEDC_1_DV6	4,63E+09	1,48E+09	3,161
		0116_NEDC_3_DV6	2,4E+10	6,6E+09	2,982
		0116_NEDC_5_DV6	1,9E+10	5,4E+09	3,151
EUDC	Raw	1222_NEDC_4_DV6	2,37E+14	1,26E+14	4,815
		1222_NEDC_3_DV6	2,37E+14	1,25E+14	4,845
		1222_NEDC_2_DV6	2,4E+14	1,29E+14	4,916
		1221_NEDC_3_DV6	2,36E+14	1,28E+14	5,015
	EGR+DOC+DPF	0116_NEDC_2_DV6	5,75E+09	2,54E+09	1,407
		0116_NEDC_4_DV6	6,68E+09	2,64E+09	1,432
		0116_NEDC_6_DV6	1,77E+10	3,34E+09	1,456
	EGR+DOC+DPF+WI	0116_NEDC_1_DV6	1,6E+10	6,74E+09	1,239
		0116_NEDC_3_DV6	2,2E+10	4,57E+09	1,206
		0116_NEDC_5_DV6	5,13E+10	4,08E+09	1,258
NEDC	Raw	1222_NEDC_4_DV6	1E+15	3,54E+14	7,136
		1222_NEDC_3_DV6	9,48E+14	3,63E+14	7,238
		1222_NEDC_2_DV6	9,77E+14	3,81E+14	7,262
		1221_NEDC_3_DV6	9,58E+14	3,73E+14	7,369
	EGR+DOC+DPF	0116_NEDC_2_DV6	2,99E+10	9,08E+09	1,802
		0116_NEDC_4_DV6	2,33E+10	6,81E+09	1,758
		0116_NEDC_6_DV6	2,95E+10	4,62E+09	1,829
	EGR+DOC+DPF+WI	0116_NEDC_1_DV6	2,45E+10	1,02E+10	1,860
		0116_NEDC_3_DV6	4,1E+10	9,11E+09	1,770
		0116_NEDC_5_DV6	8,19E+10	8E+09	1,854
WLTC	Raw	0830_WLTC_1_DV6	3,81E+14	1,76E+14	5,090
		0830_WLTC_3_DV6	3,64E+14	1,73E+14	4,955
		0904_WLTC_2_DV6	3,45E+14	1,76E+14	4,994
		0916_WLTC_1_DV6			1,621
	EGR+DOC+DPF	0917_WLTC_2_DV6	5,67E+10	2,39E+10	1,705
		1206_WLTC_1_DV6	7,51E+10	2E+10	1,567
		1206_WLTC_3_DV6	4,6E+10	1,91E+10	
		1206_WLTC_2_DV6	2,3E+10	1,16E+10	
	EGR+DOC+DPF+WI	0916_WLTC_2_DV6	2,43E+10	1,24E+10	1,217
		0918_WLTC_1_DV6	2,12E+10	1,06E+10	1,128
		0918_WLTC_3_DV6	2,07E+10	1,01E+10	1,425

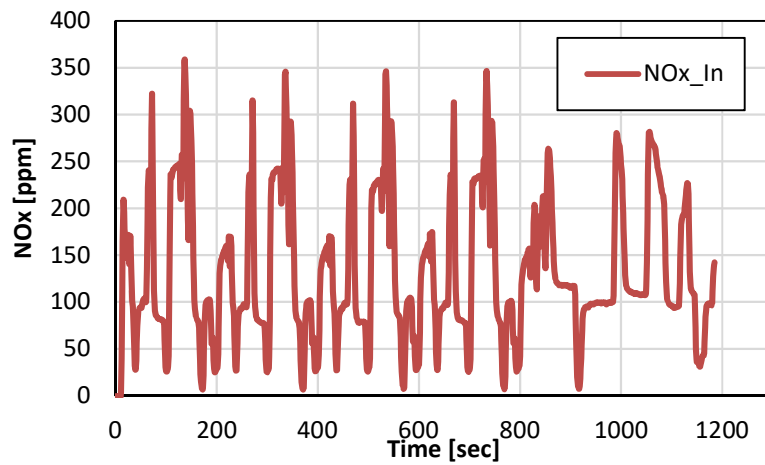
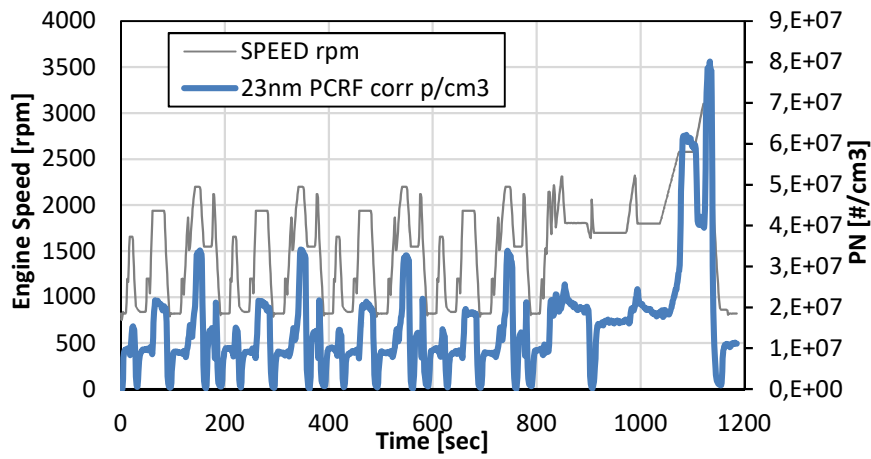
szűrt adatok

1222_NEDC_4_DV6

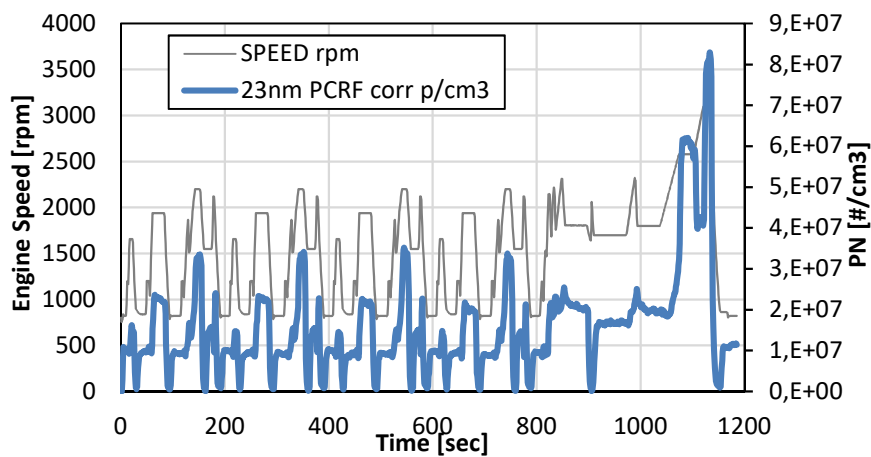
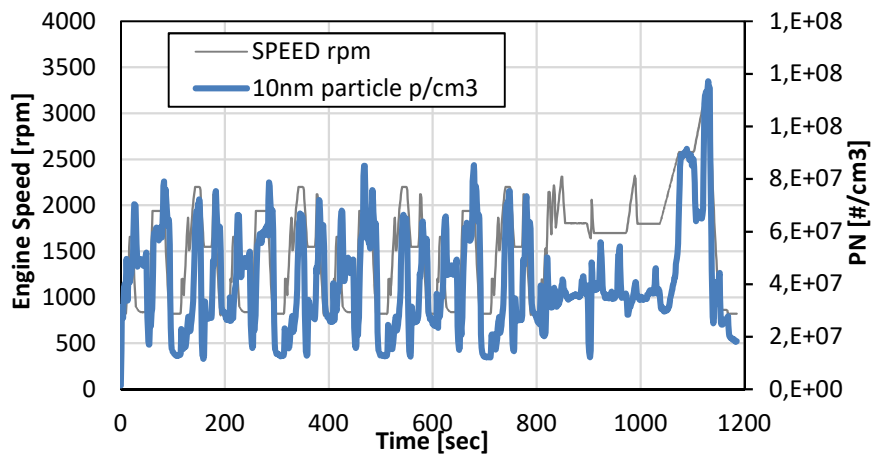


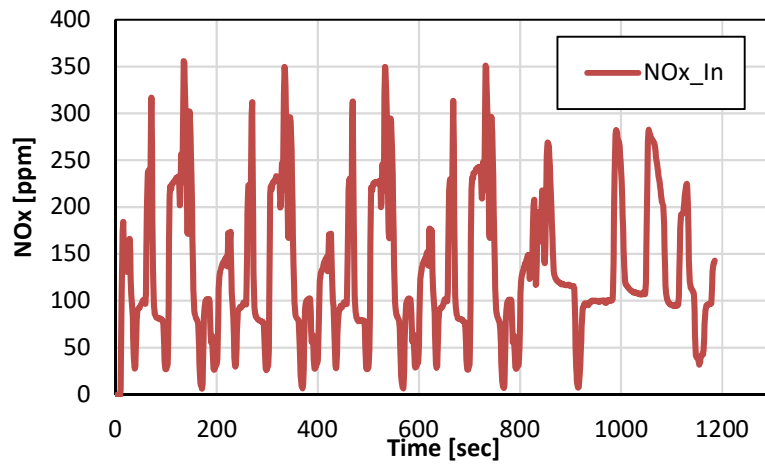
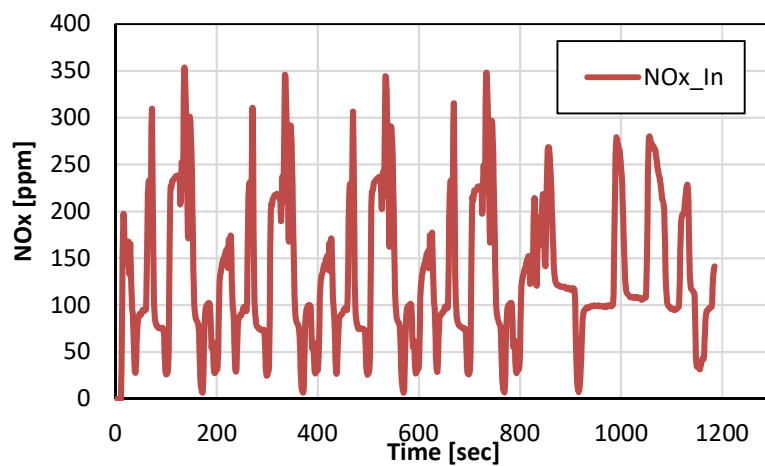
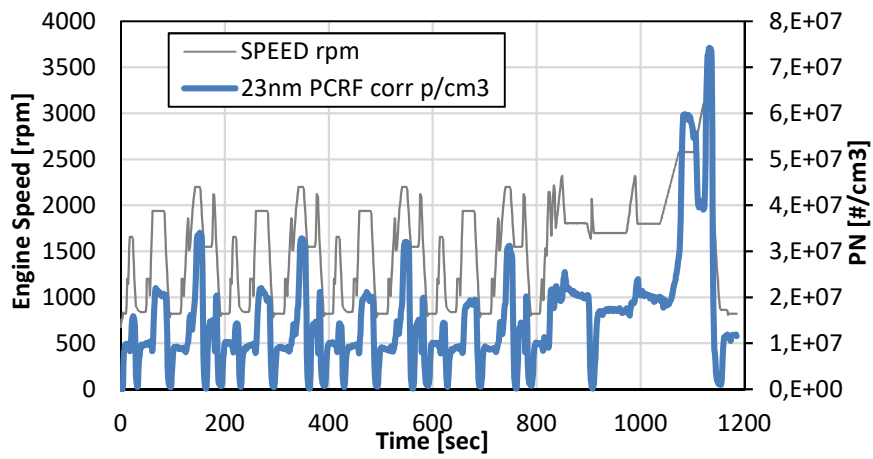
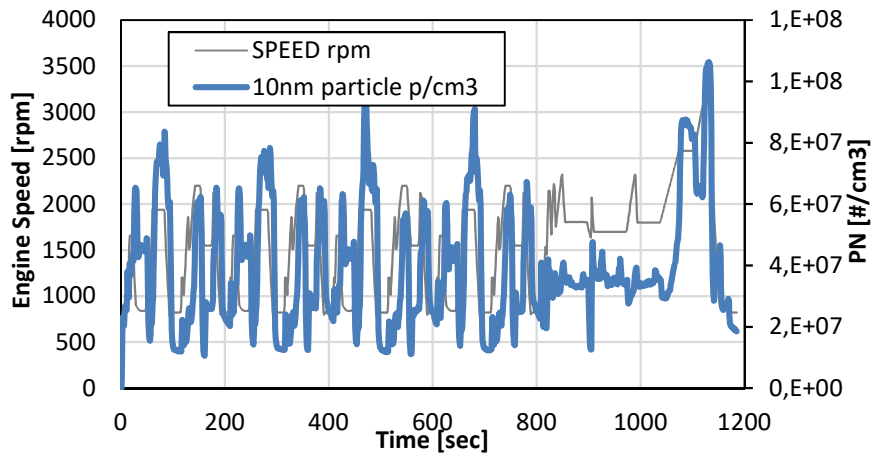
1222_NEDC_3_DV6



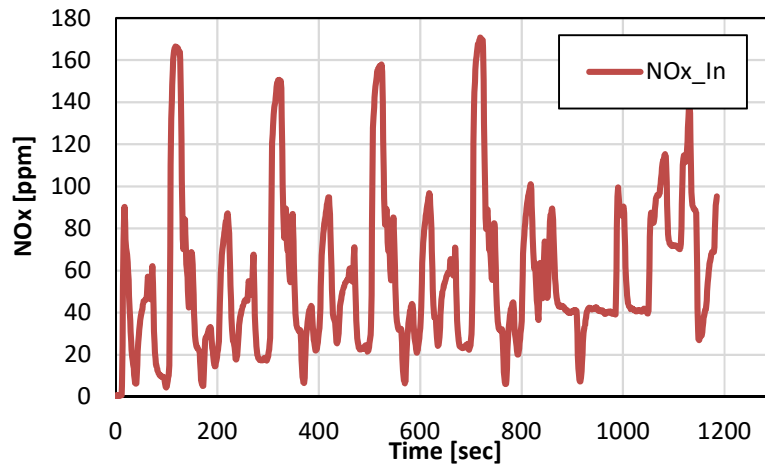
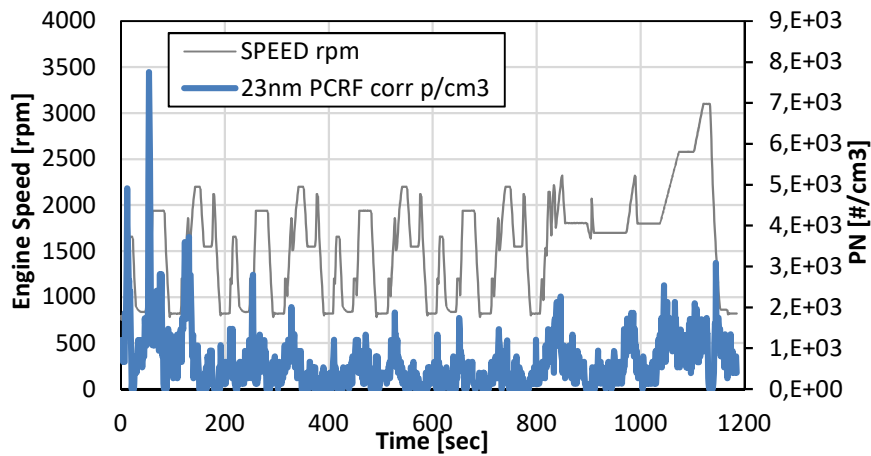
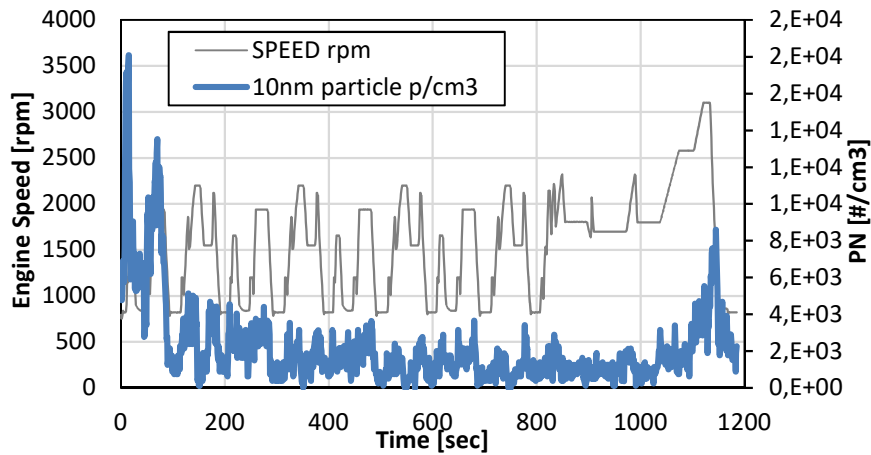


1222_NEDC_2_DV6

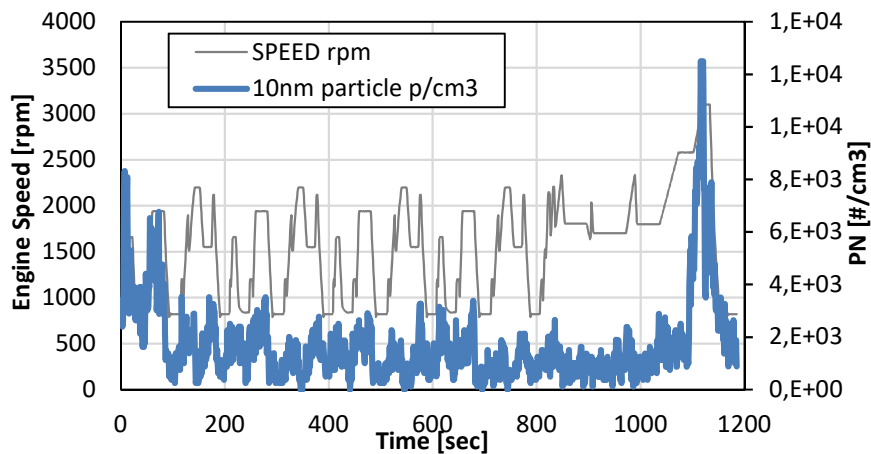


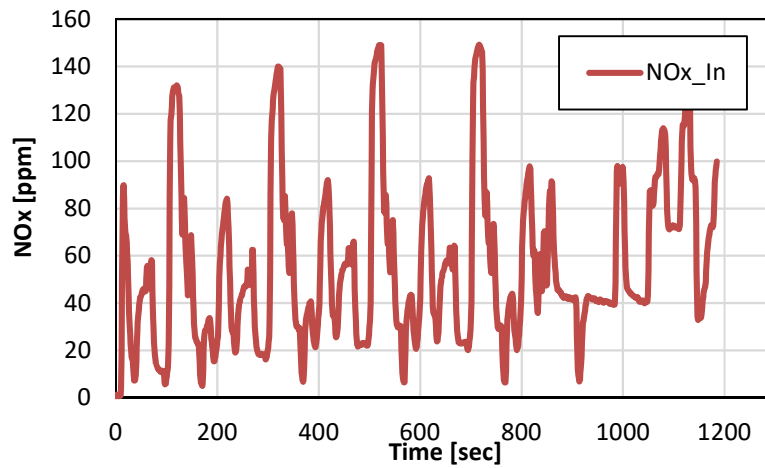
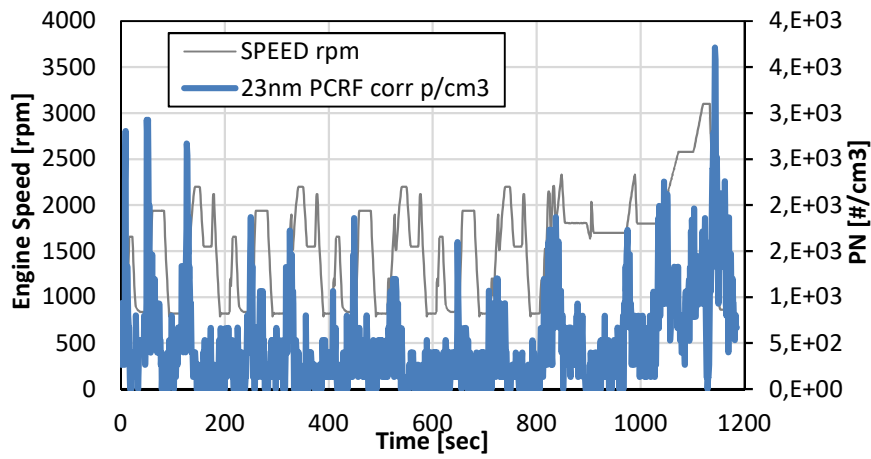
**1221_NEDC_3_DV6**

0116_NEDC_2_DV6

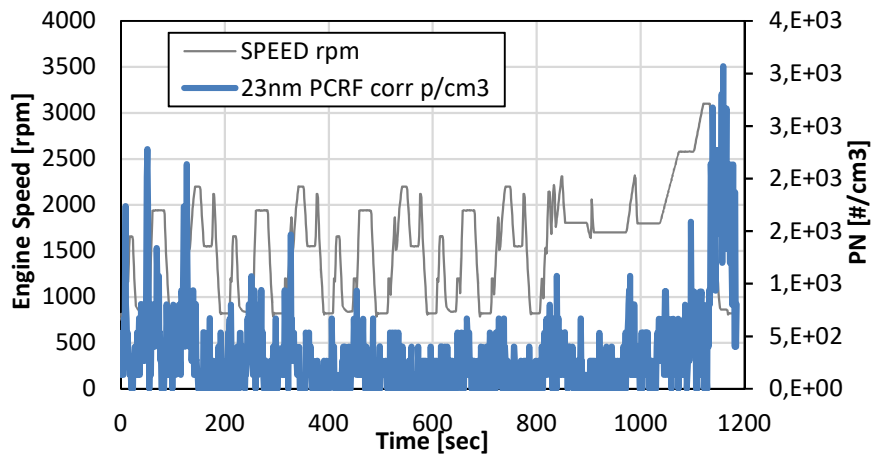
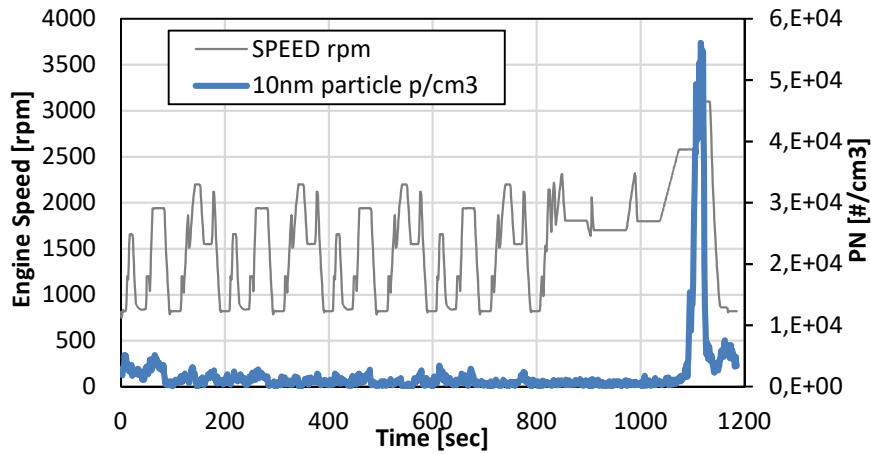


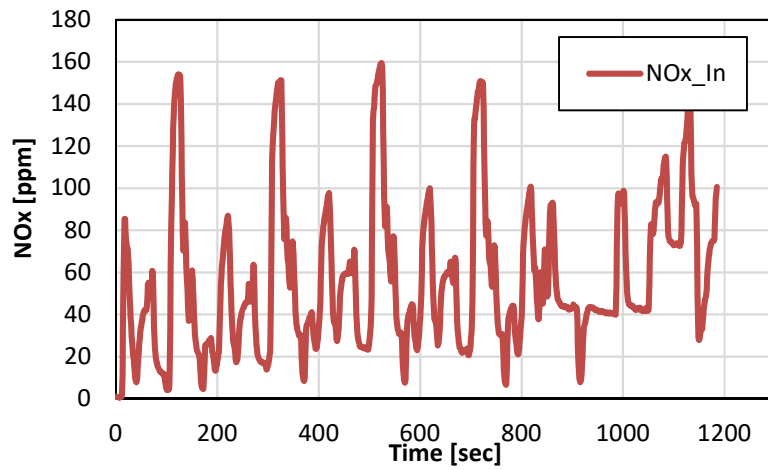
0116_NEDC_4_DV6



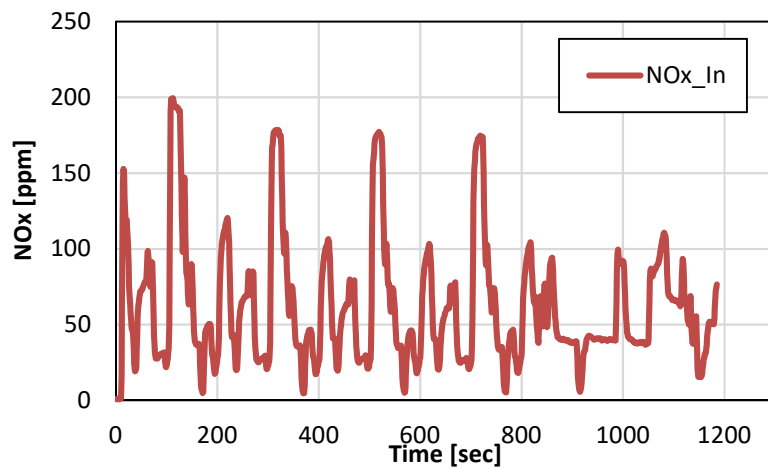
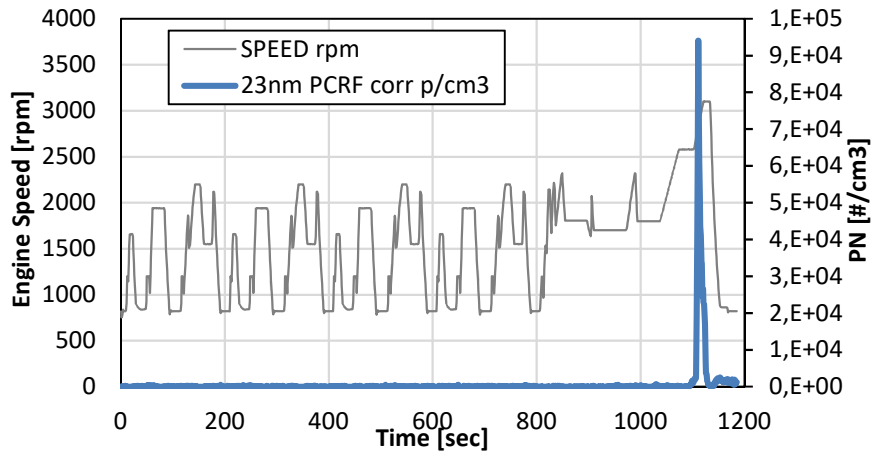
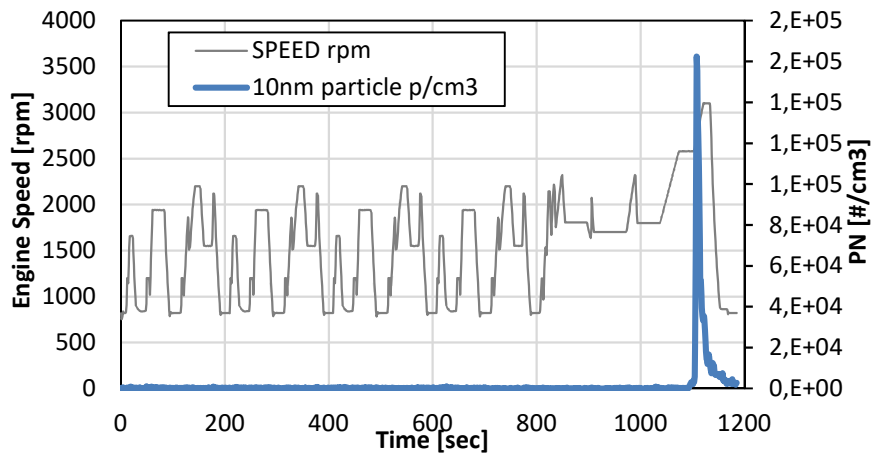


0116_NEDC_6_DV6

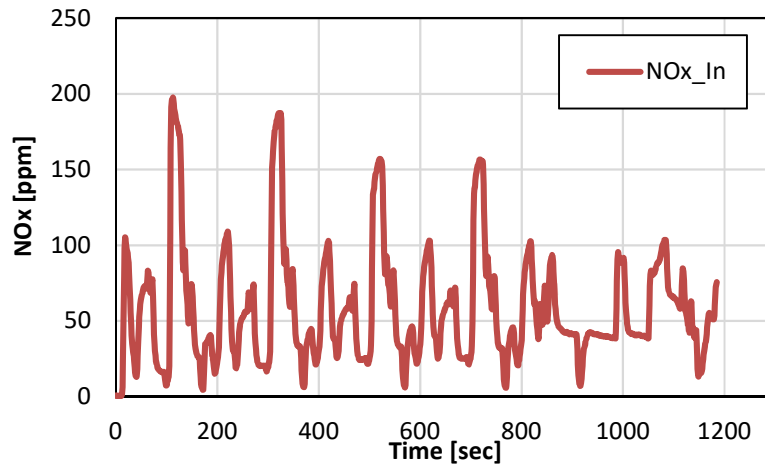
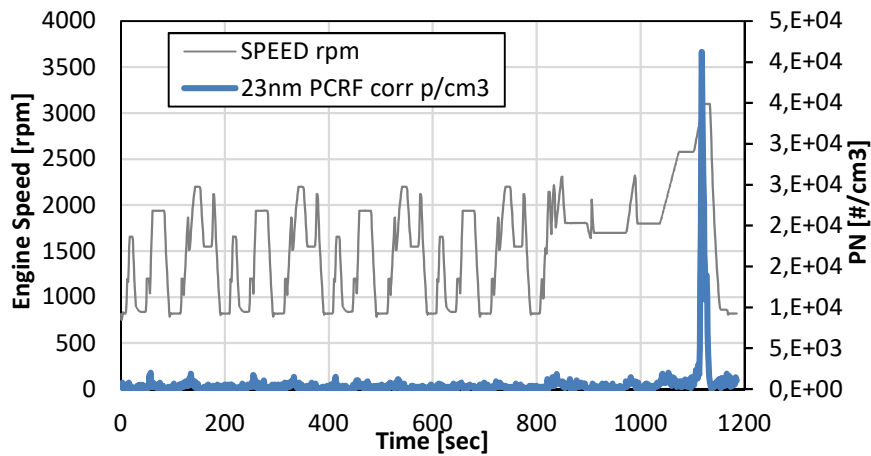
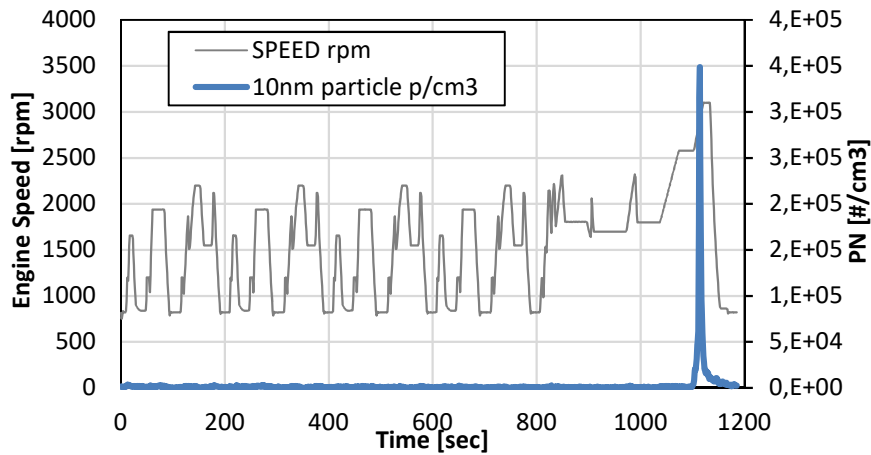




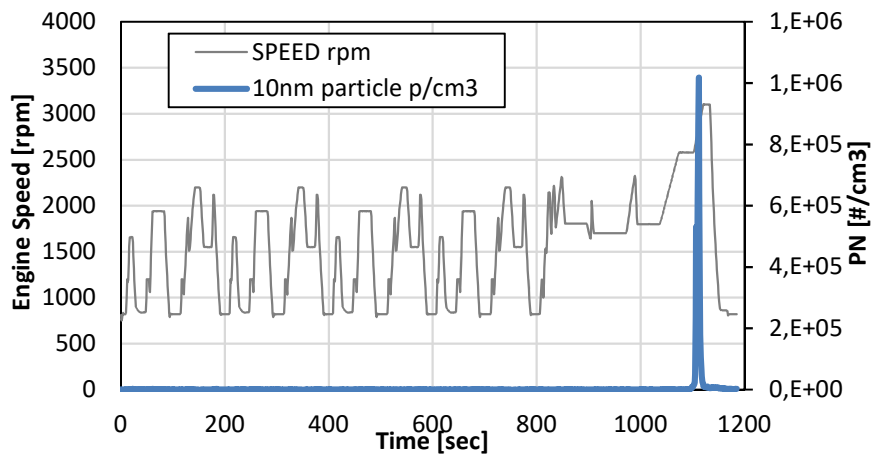
0116_NEDC_1_DV6

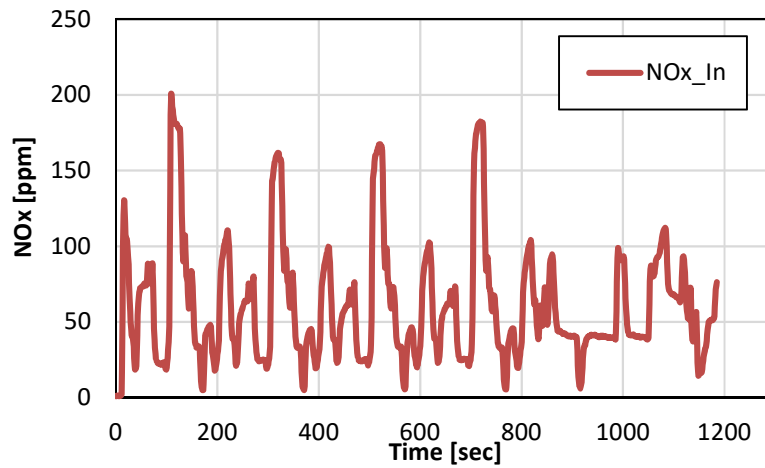
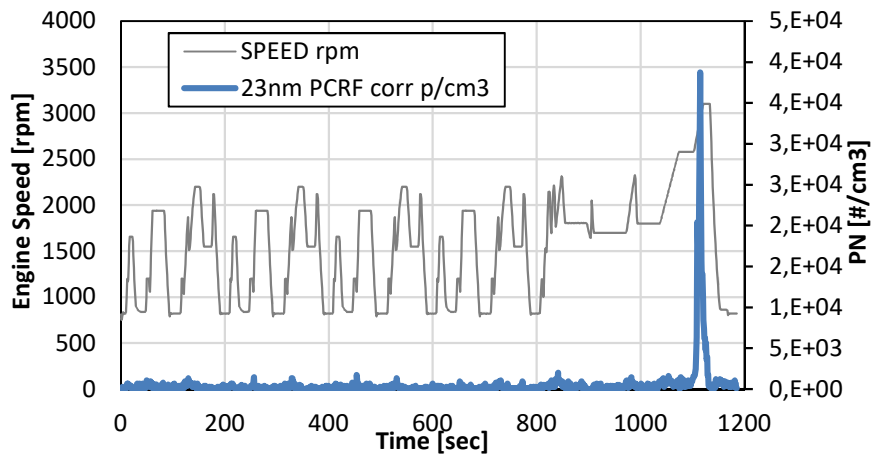


0116_NEDC_3_DV6

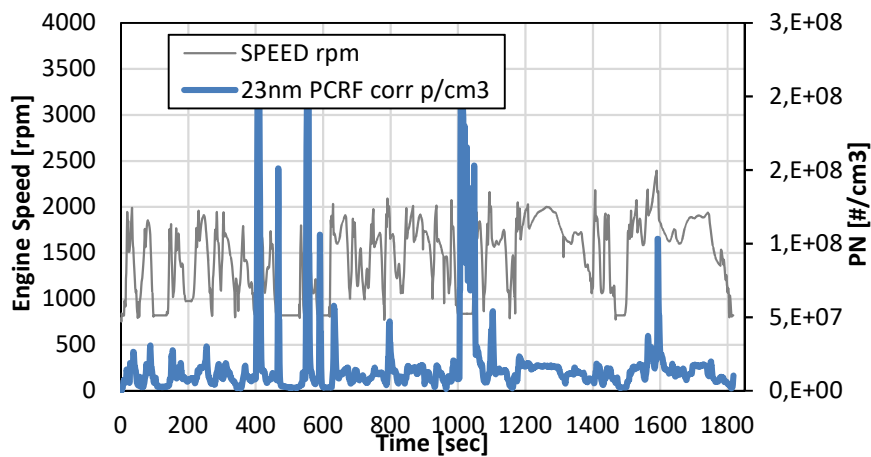
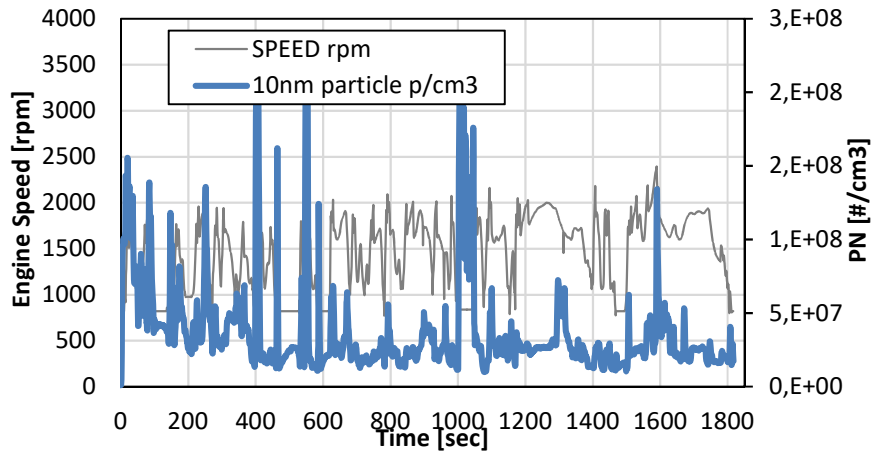


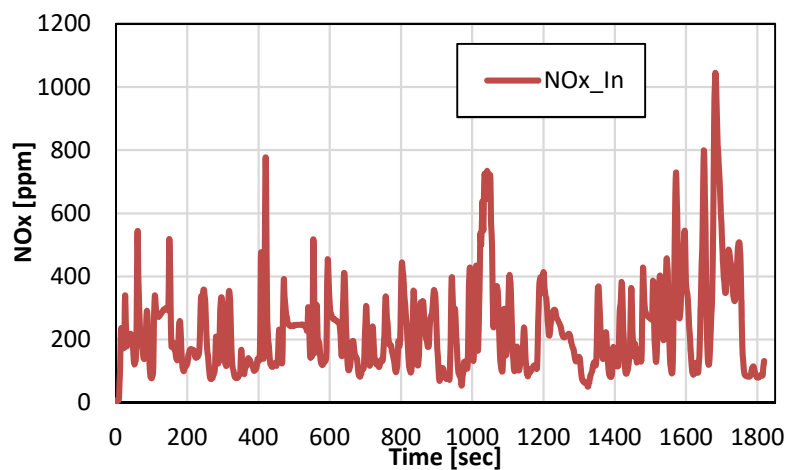
0116_NEDC_5_DV6



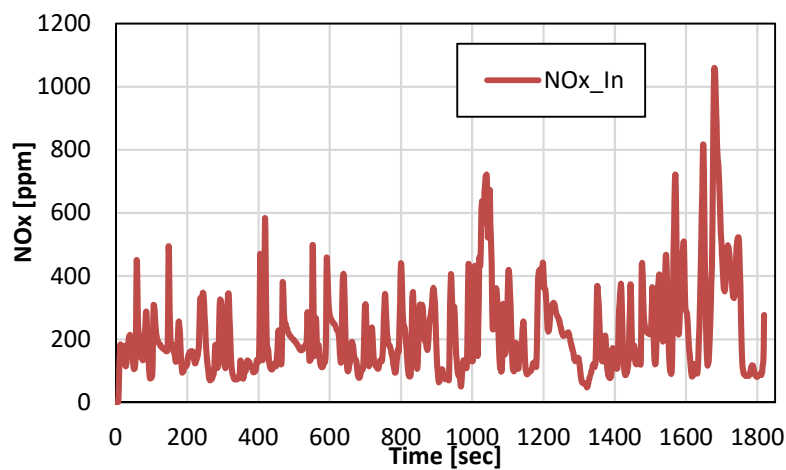
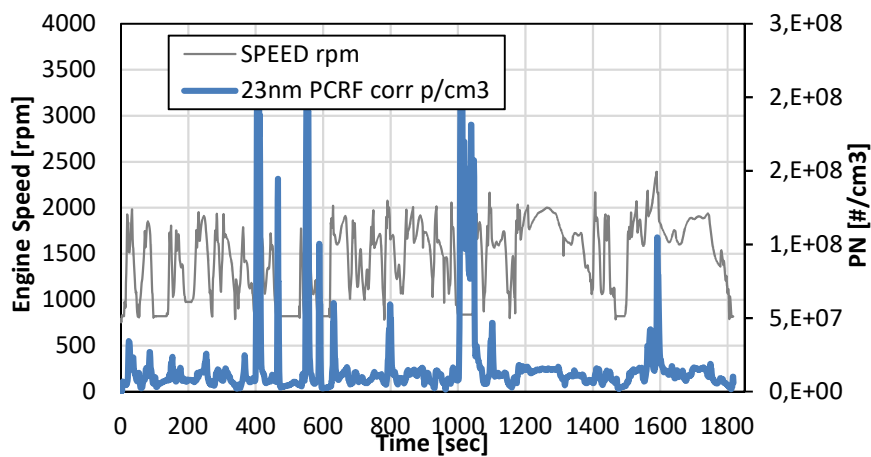
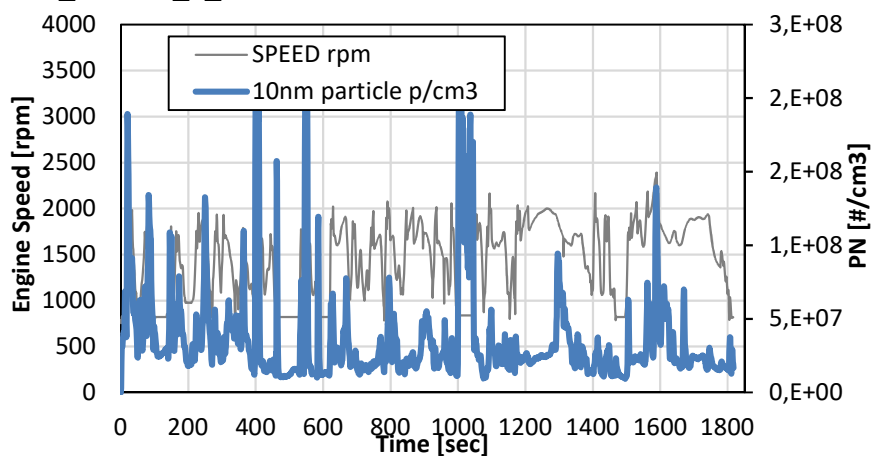


0830_WLTC_1_DV6

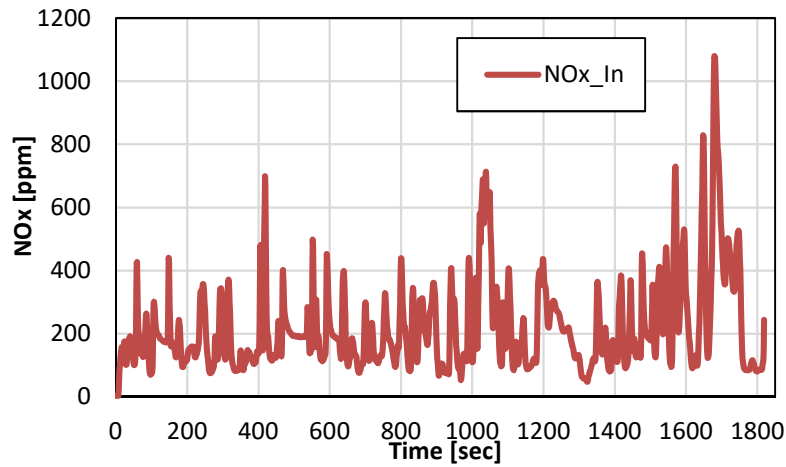
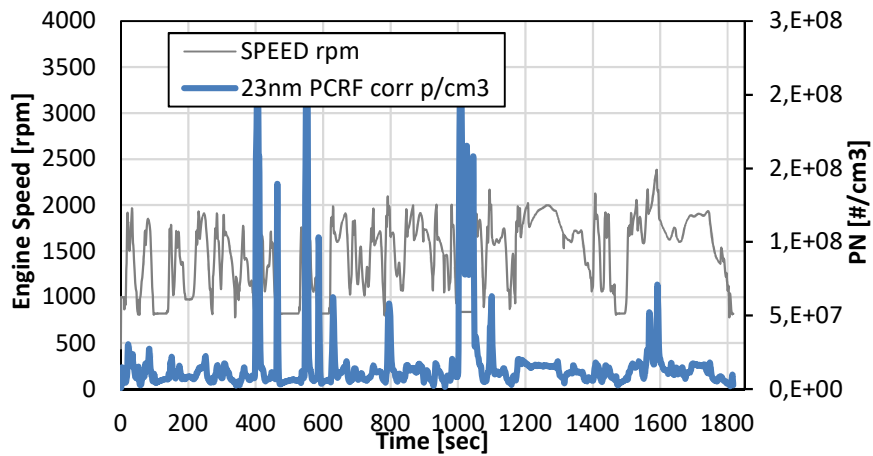
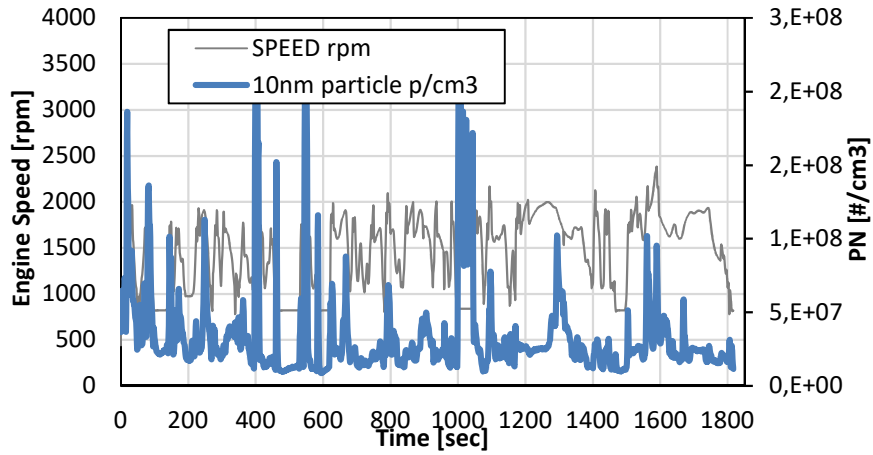




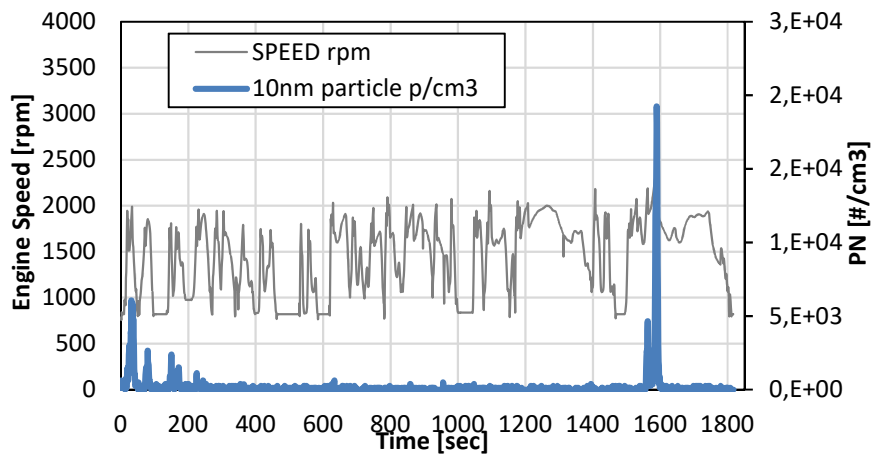
0830_WLTC_3_DV6

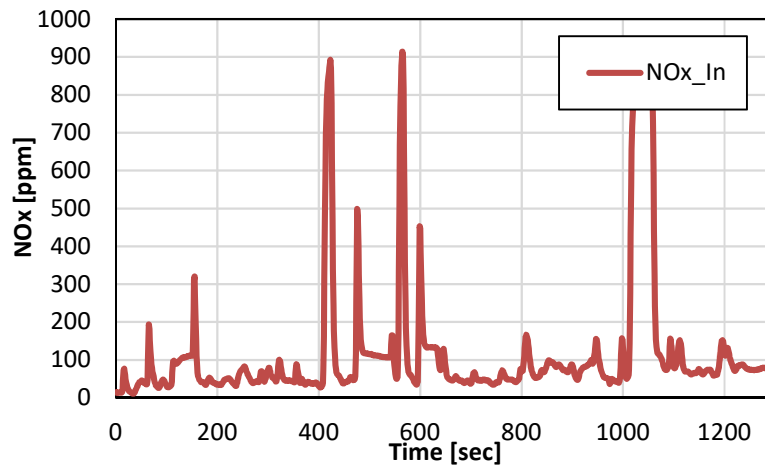
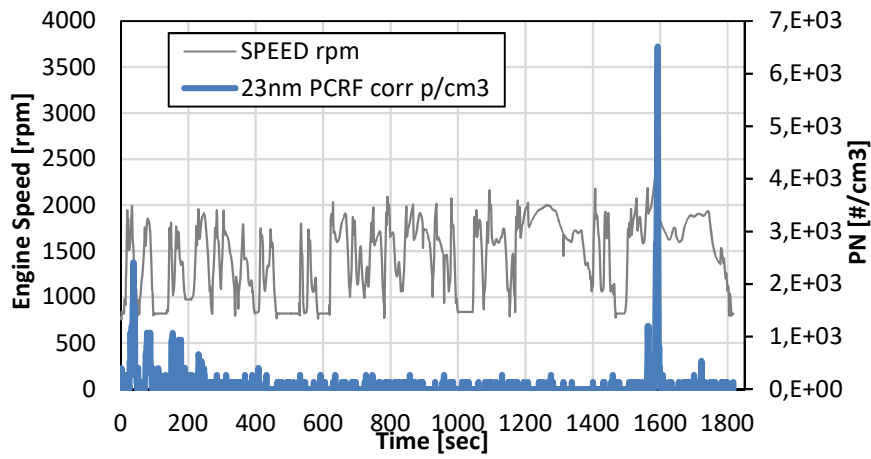


0904_WLTC_2_DV6

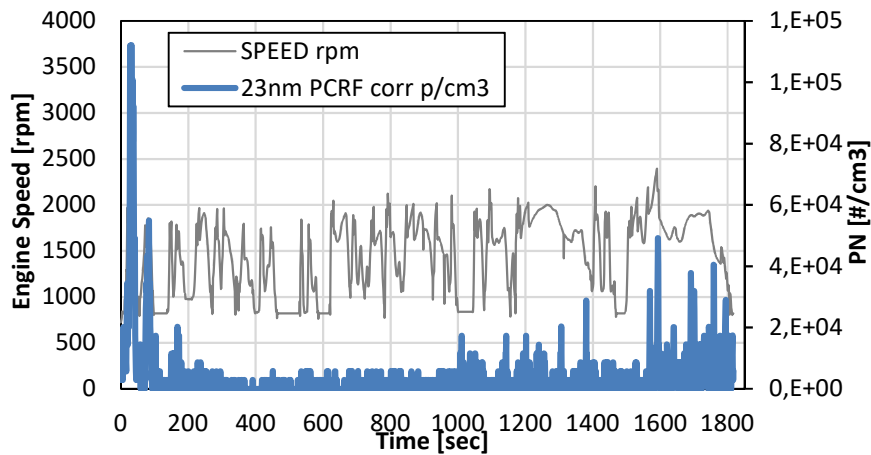
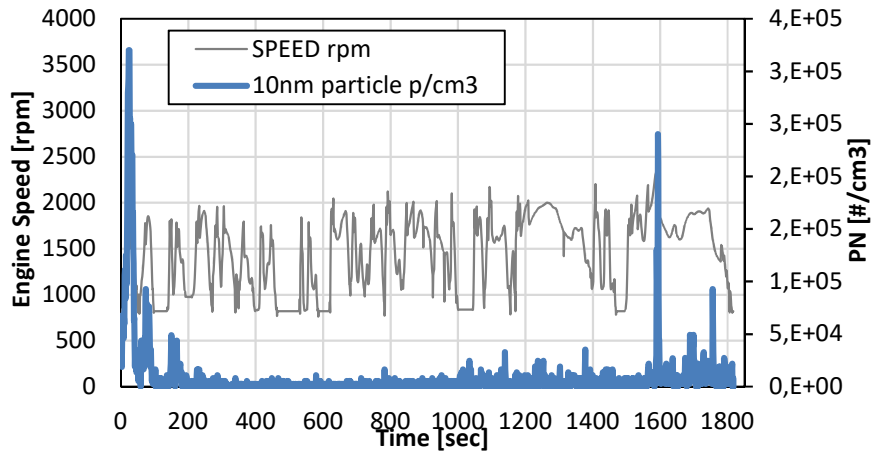


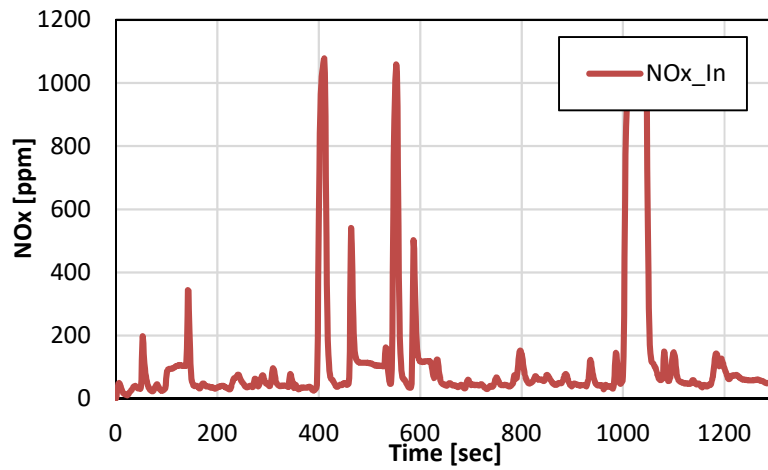
0916_WLTC_1_DV6



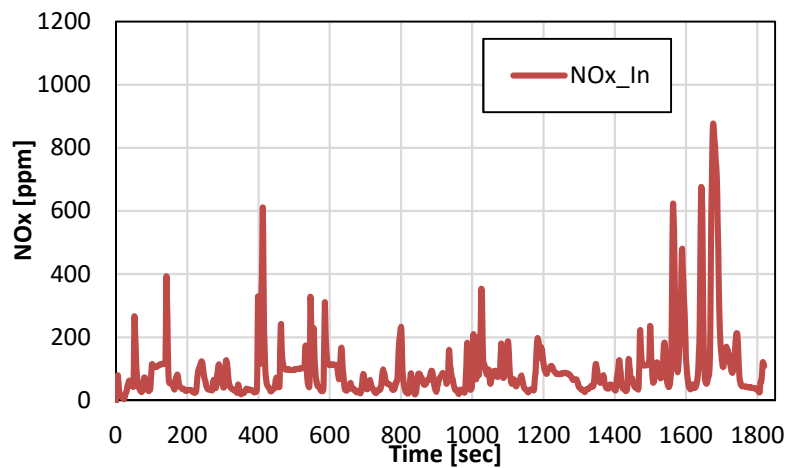
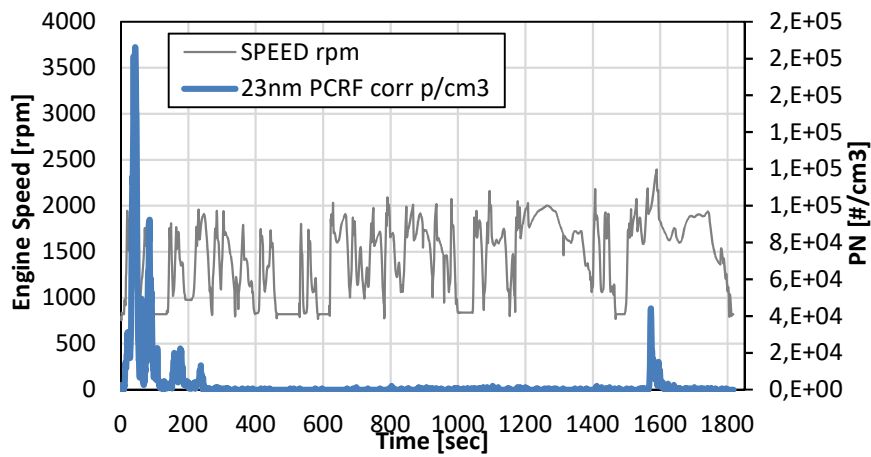
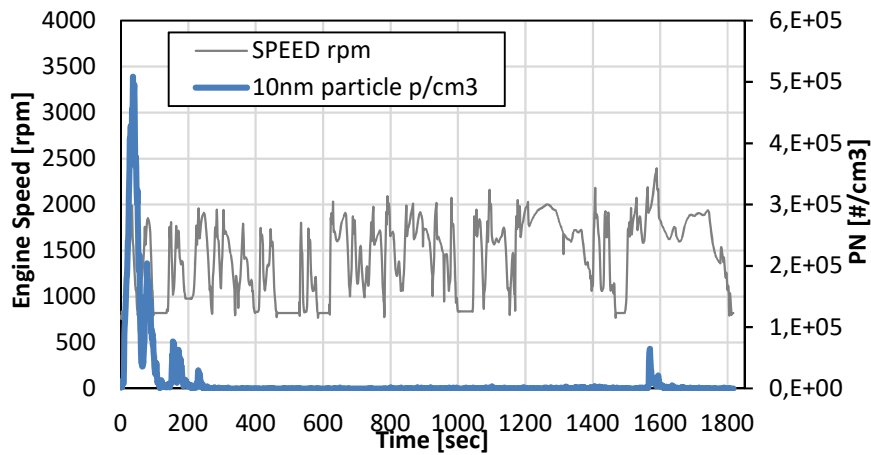


0917_WLTC_2_DV6

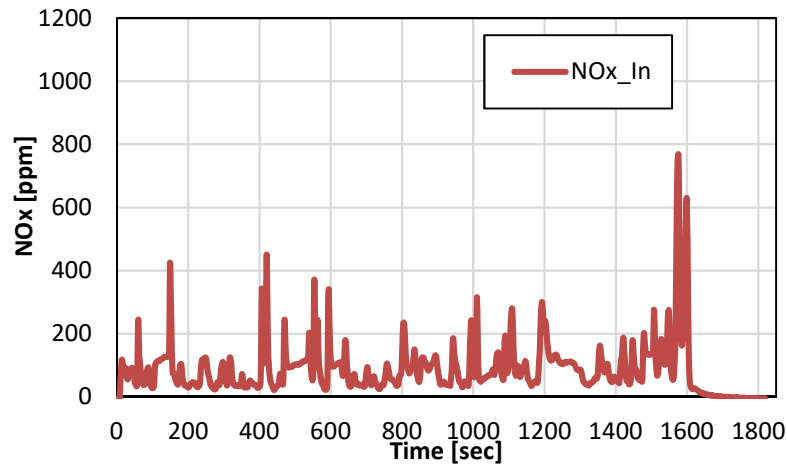
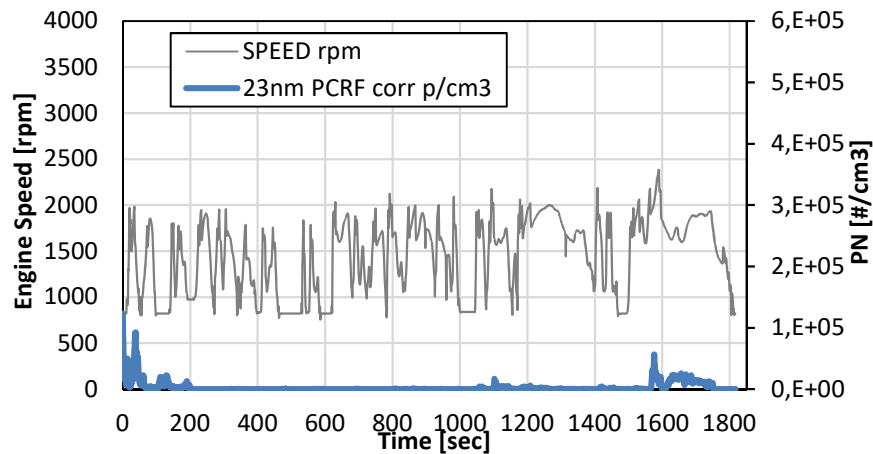
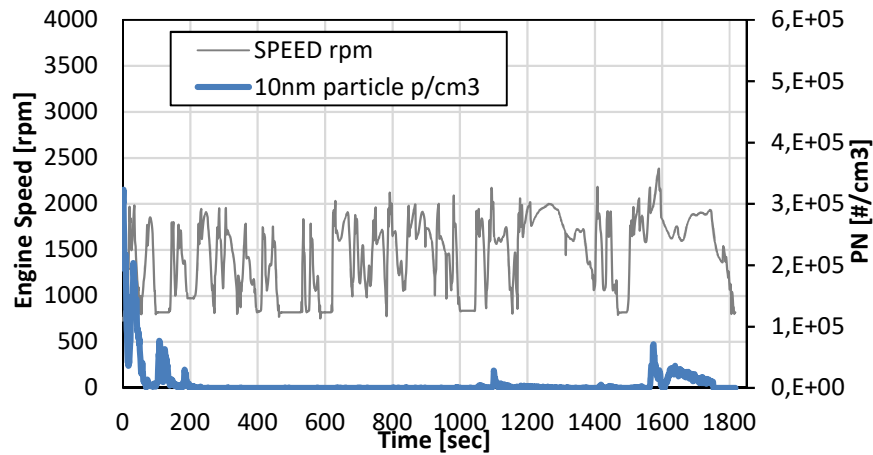




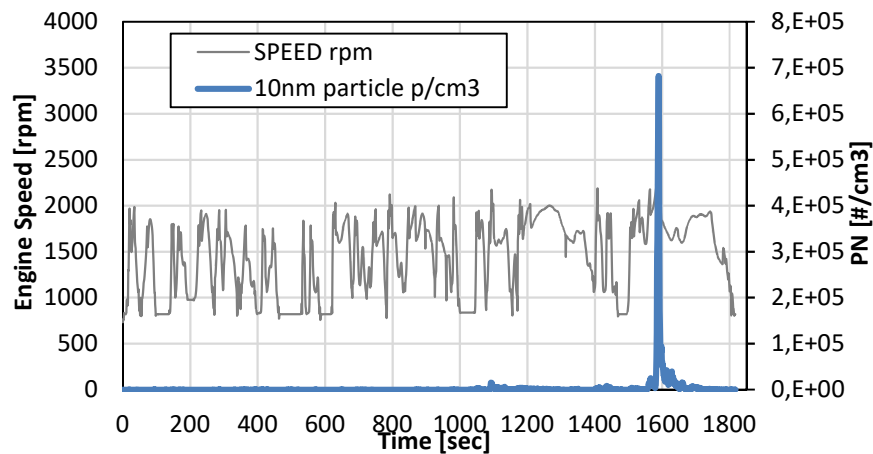
1206_WLTC_1_DV6

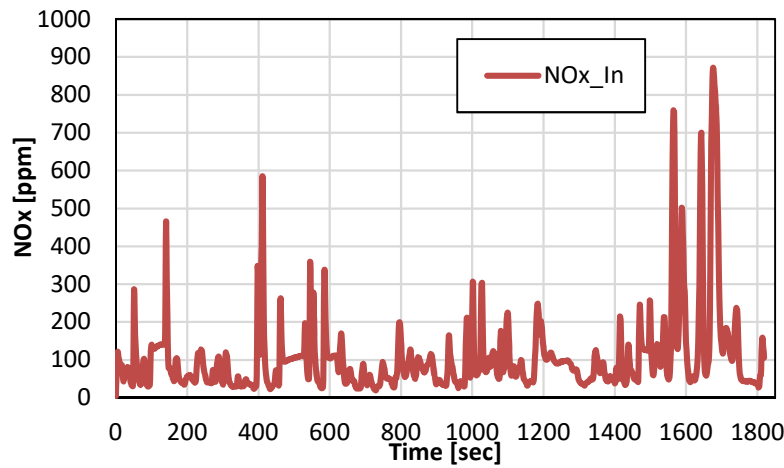
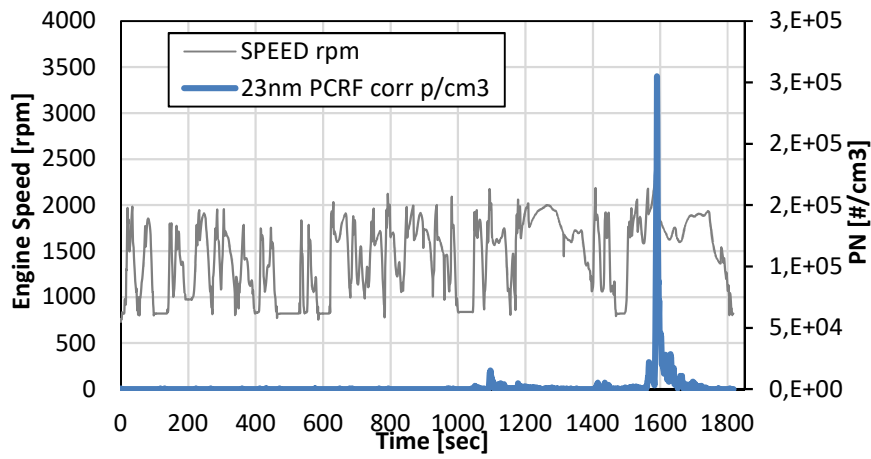


1206_WLTC_3_DV6

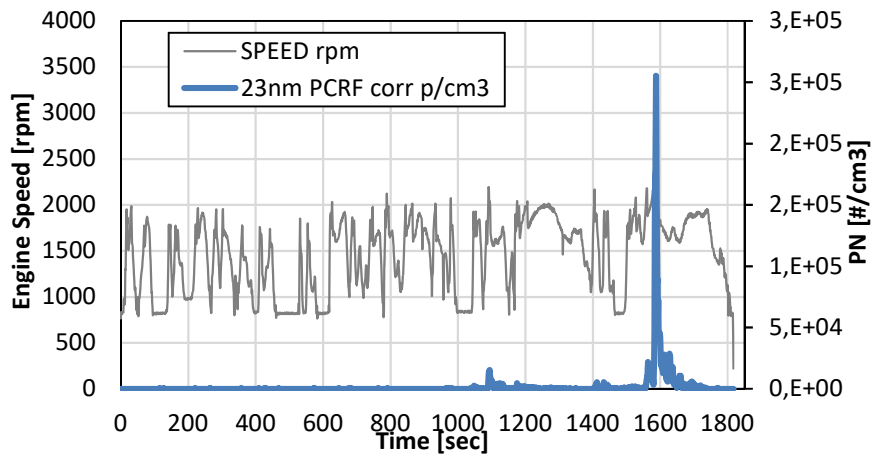
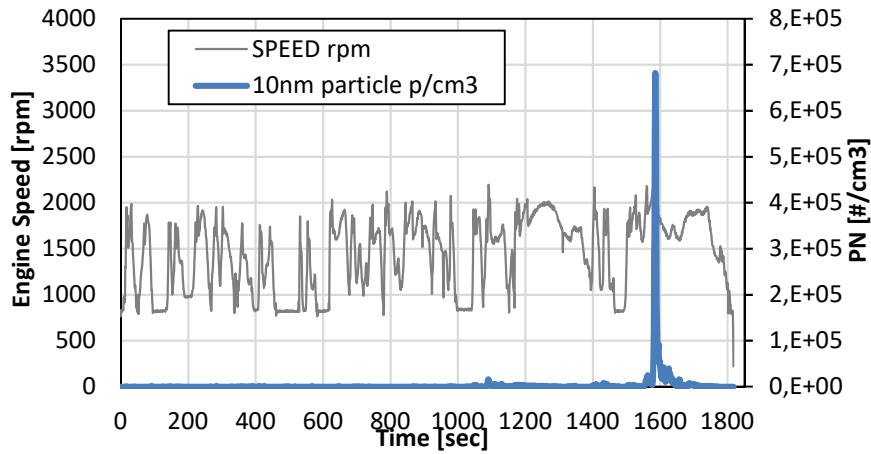


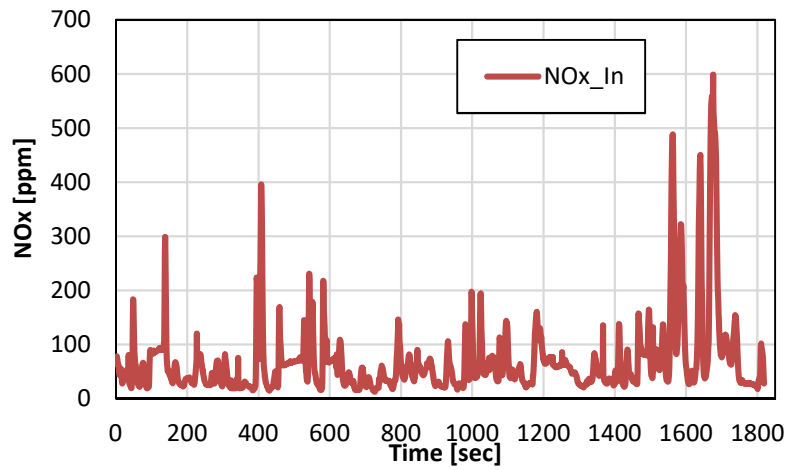
1206_WLTC_2_DV6



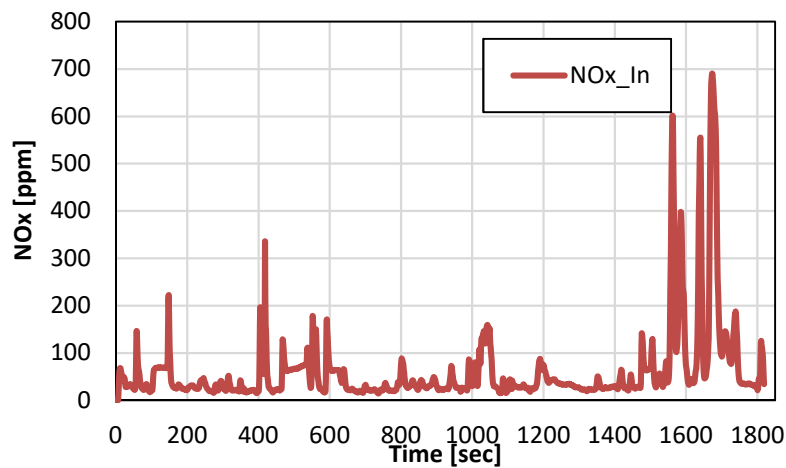
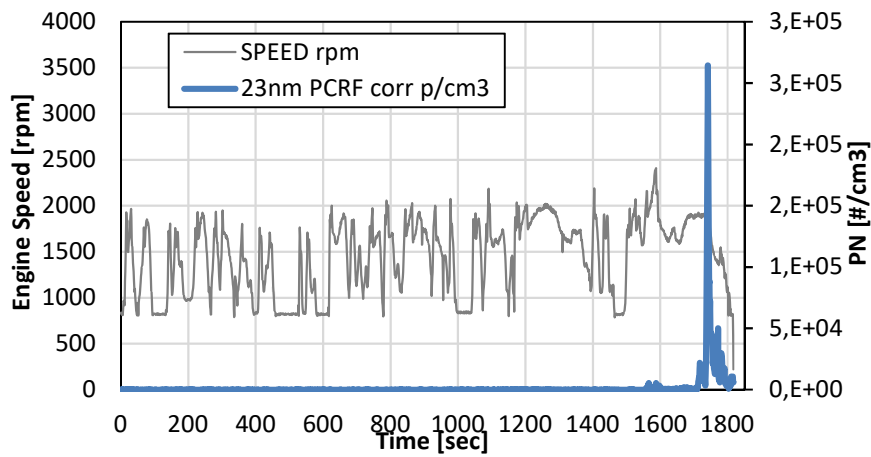
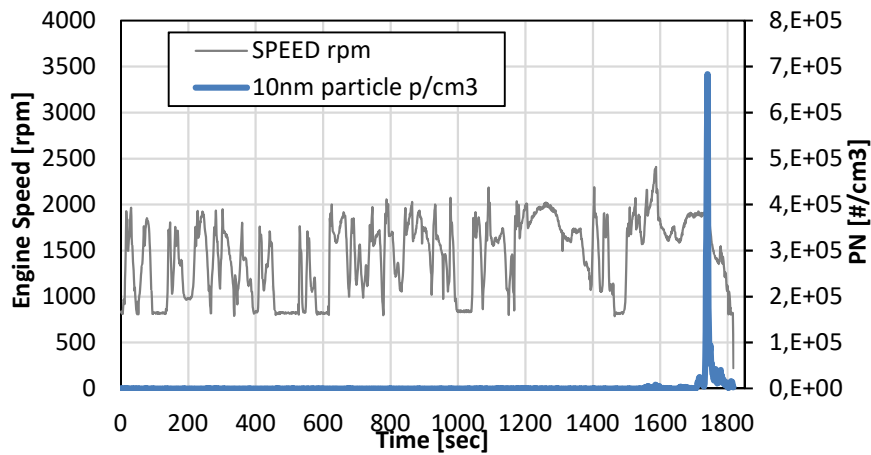


0916_WLTC_2_DV6

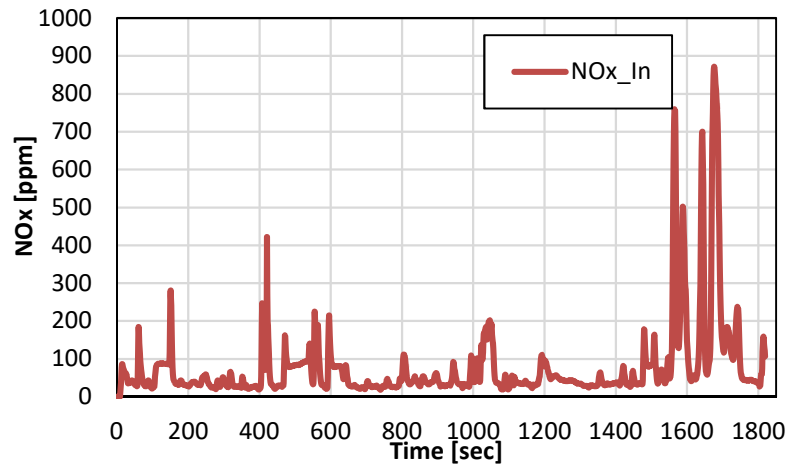
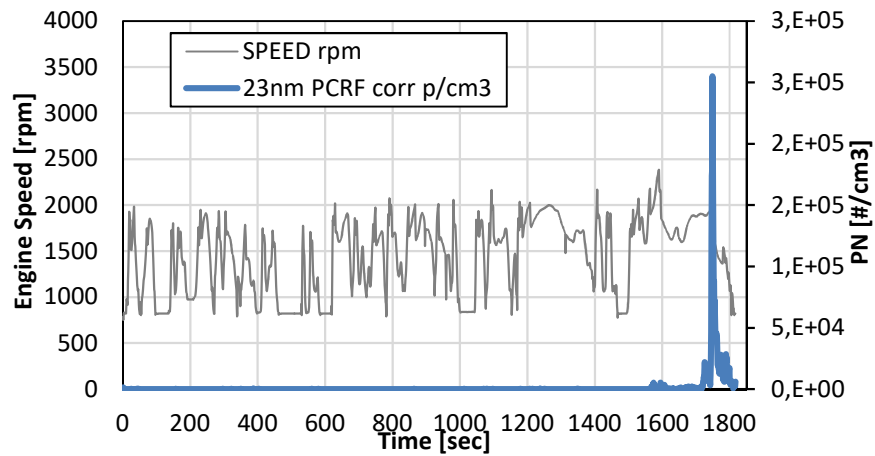
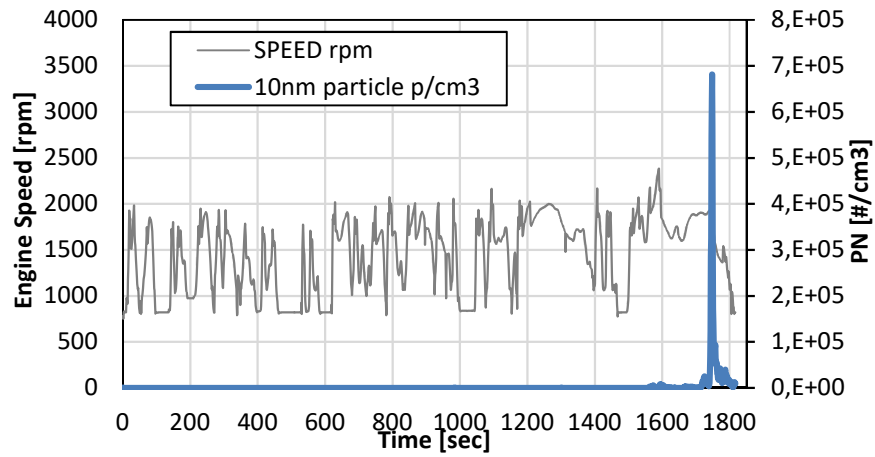




0918_WLTC_1_DV6



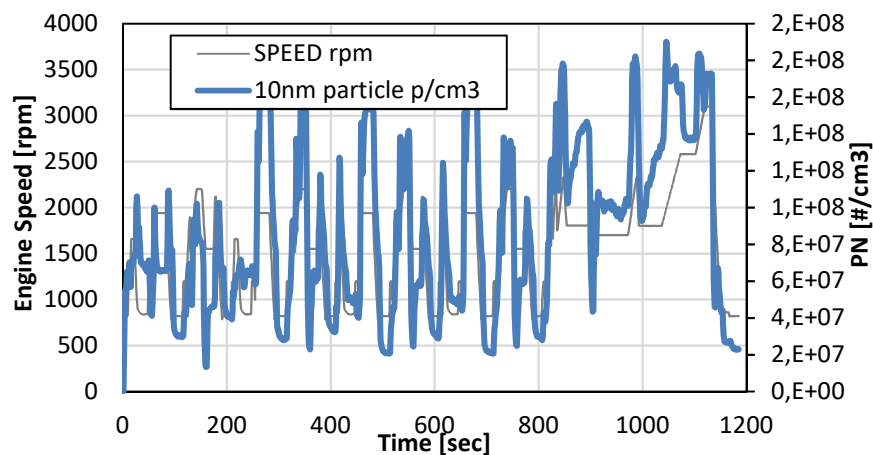
0918_WLTC_3_DV6

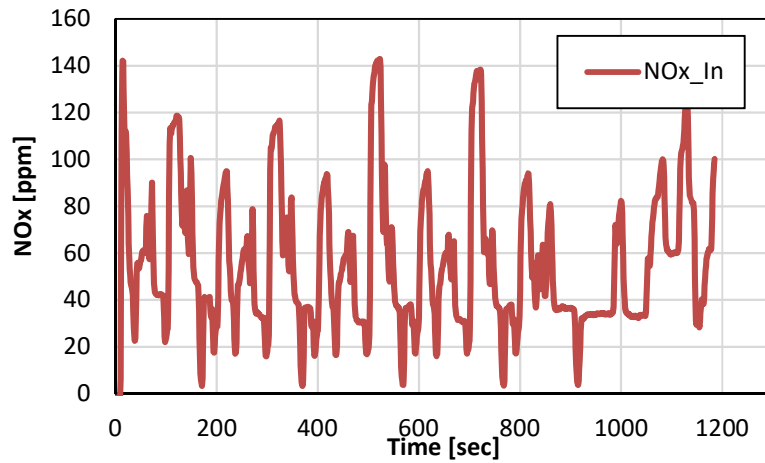
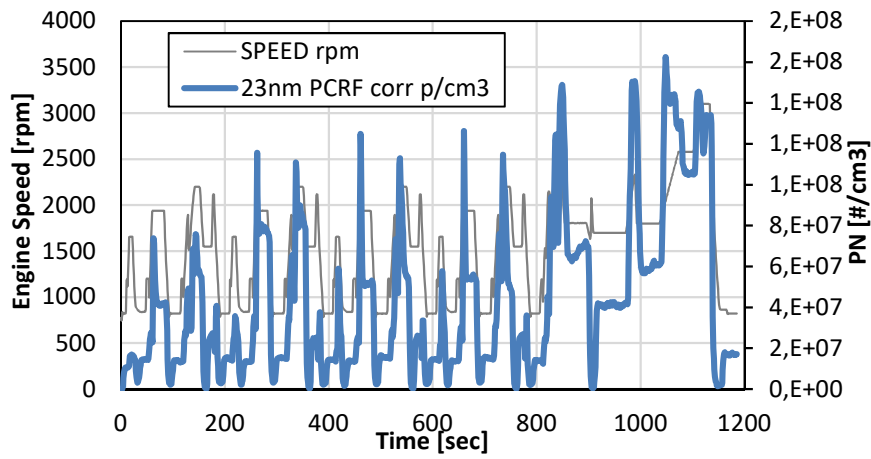


M6. EGR és vízbefecskendezés vizsgálat adatai, diagramjai

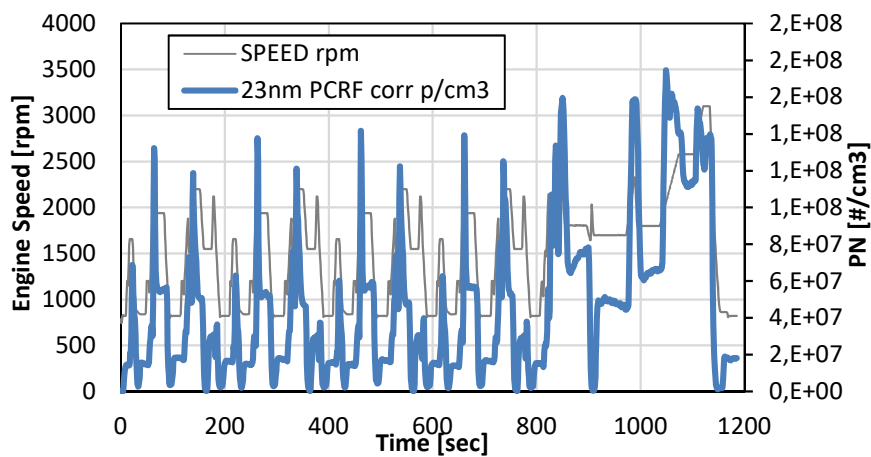
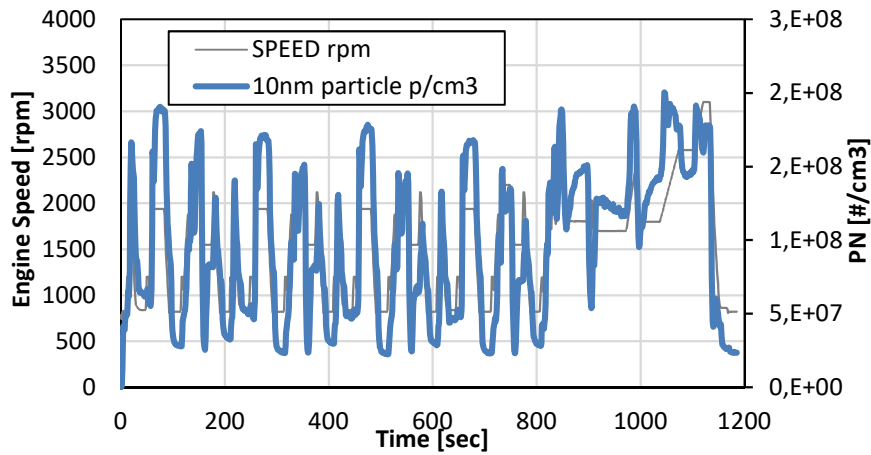
	Teszt azonosító	10nm #/kWh	23nm #/kWh	NOx g/kWh	Humidity g/kWh
Nyers	1222_NEDC_4_DV6	1,00E+15	3,54E+14	7,136	150,042
	1222_NEDC_3_DV6	9,48E+14	3,63E+14	7,238	150,298
	1222_NEDC_2_DV6	9,77E+14	3,81E+14	7,262	154,509
	1221_NEDC_3_DV6	9,58E+14	3,73E+14	7,369	163,810
EGR	1219_NEDC_1_DV6	1,22E+15	6,04E+14	1,718	84,299
	1218_NEDC_2_DV6	1,36E+15	6,51E+14	1,735	91,095
	1220_NEDC_3_DV6	1,26E+15	5,99E+14	1,627	91,136
Vízbefecsk.	1221_NEDC_4_DV6	1,75E+15	4,48E+14	4,972	156,484
	0105_NEDC_8_DV6	2,07E+15	3,55E+14	5,053	139,559
	0105_NEDC_6_DV6	2,27E+15	3,60E+14	5,285	134,112
	1221_NEDC_1_DV6	1,52E+15	4,99E+14	5,272	159,418
	0110_NEDC_9_DV6	1,85E+15	4,03E+14		
EGR + Vízbef.	1220_NEDC_2_DV6	1,37E+15	6,51E+14	1,442	92,797
	1218_NEDC_1_DV6	1,60E+15	5,40E+14	1,493	100,132
	1220_NEDC_1_DV6	1,46E+15	6,61E+14		84,778
	0110_NEDC_7_DV6	1,37E+15	5,50E+14	1,418	51,038

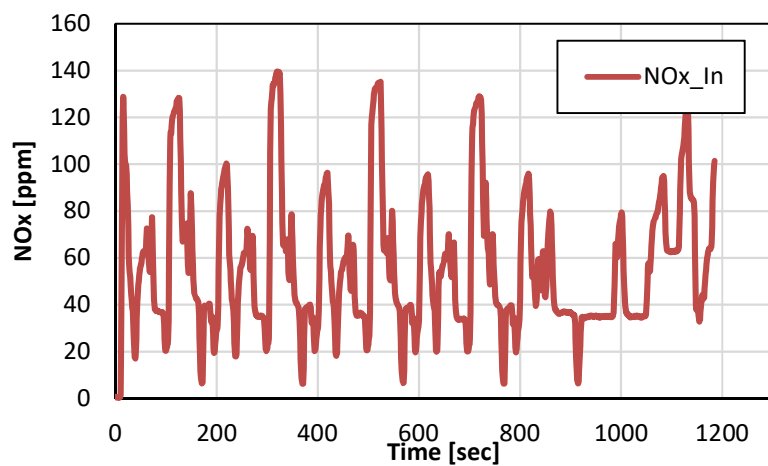
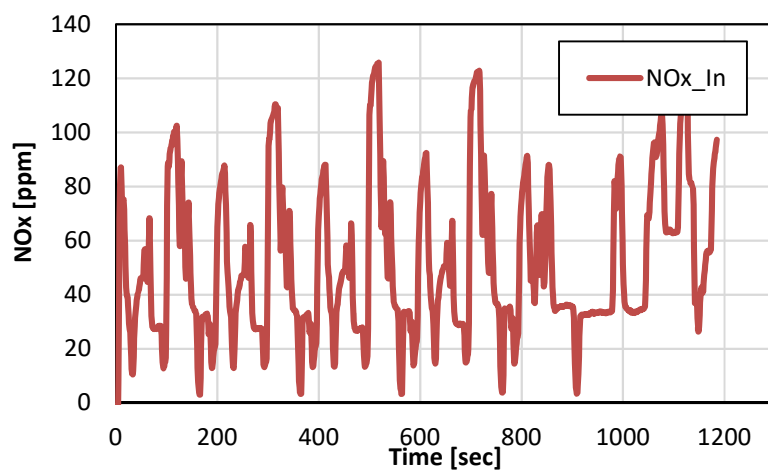
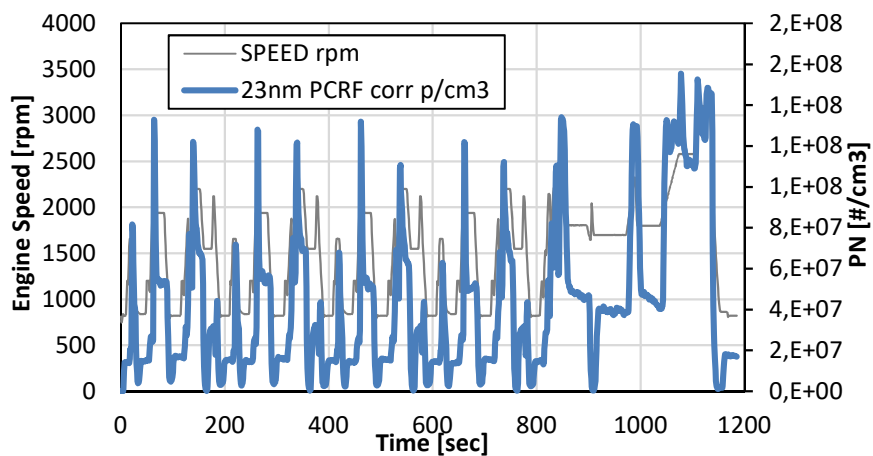
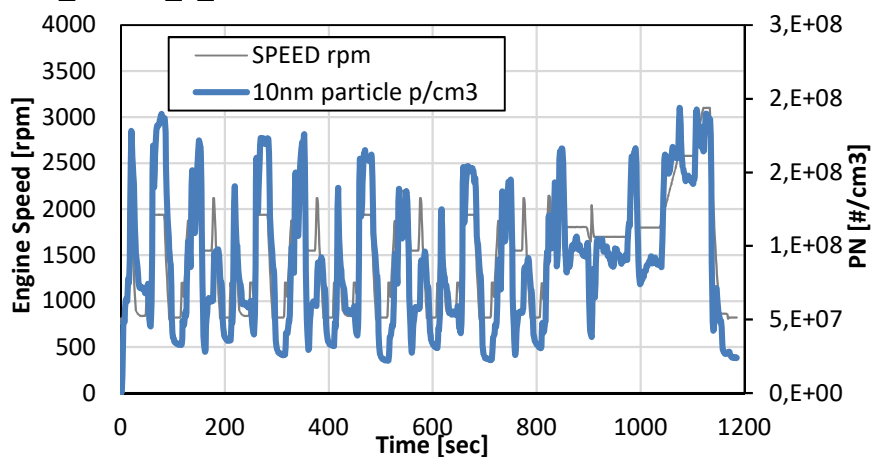
szűrve

Nyers: lásd M5 Teljes rendszerrel végzett mérések**1219_NEDC_1_DV6**

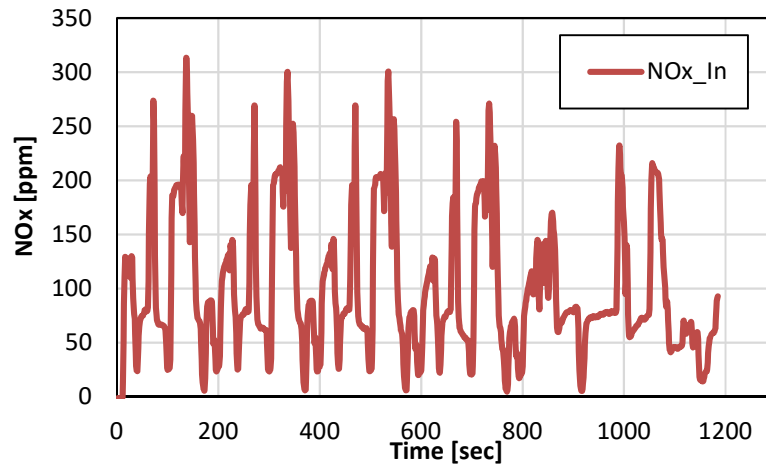
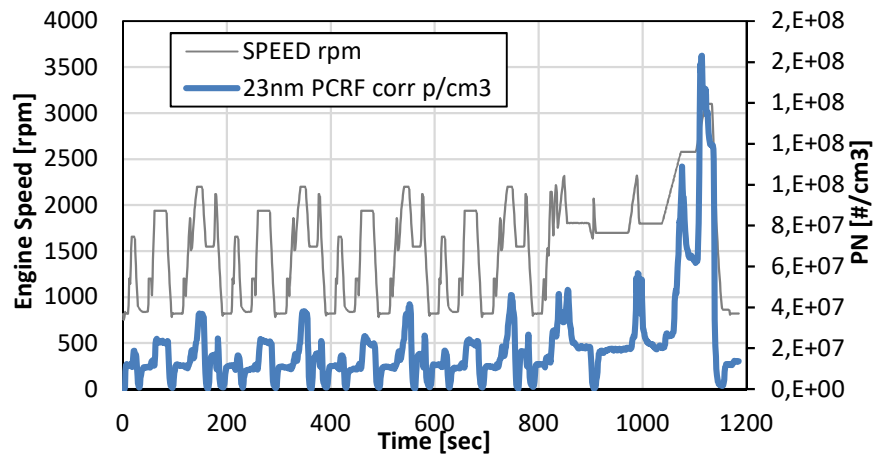
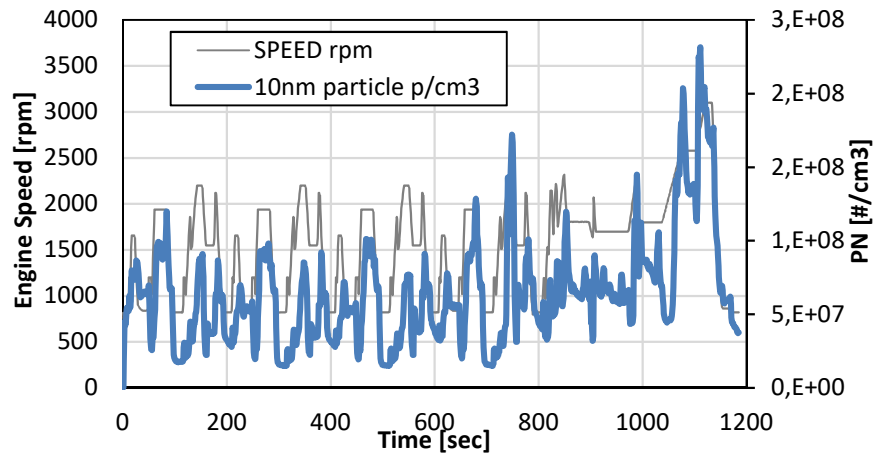


1218_NEDC_2_DV6

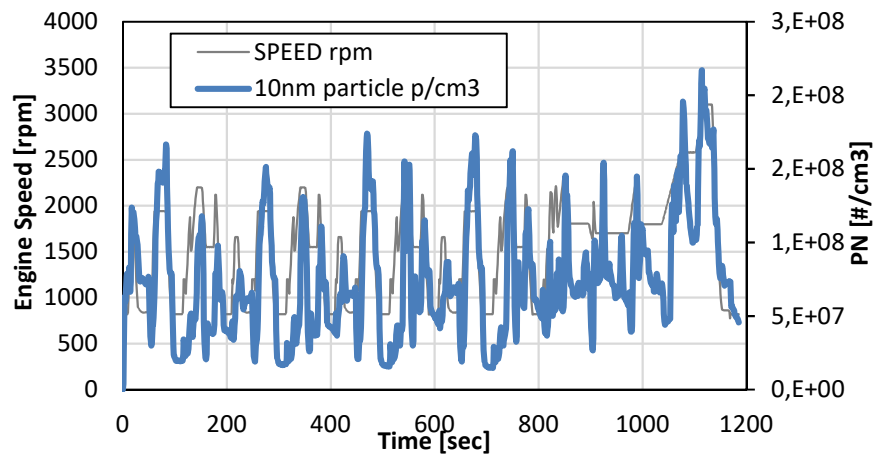


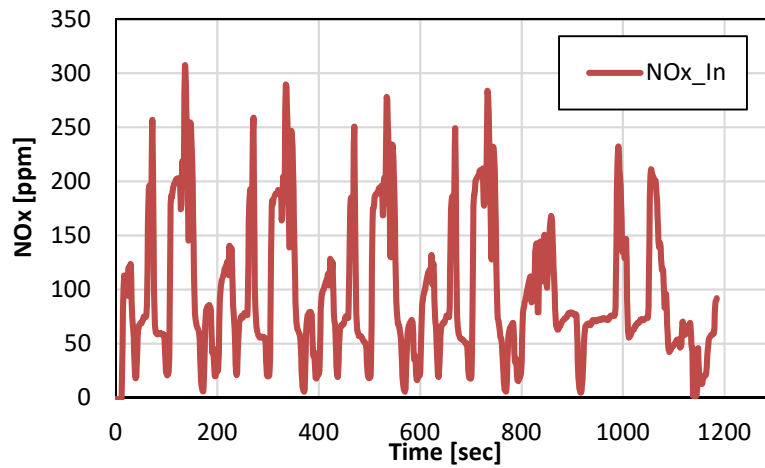
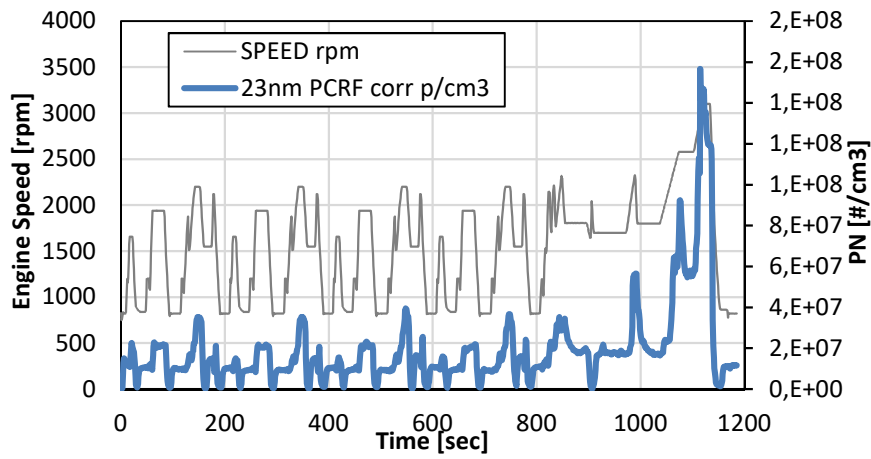
**1220_NEDC_3_DV6**

1221_NEDC_1_DV6

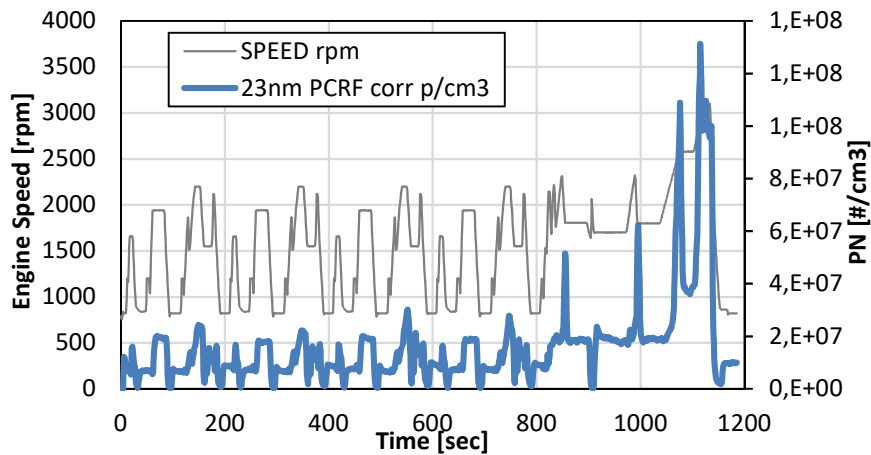
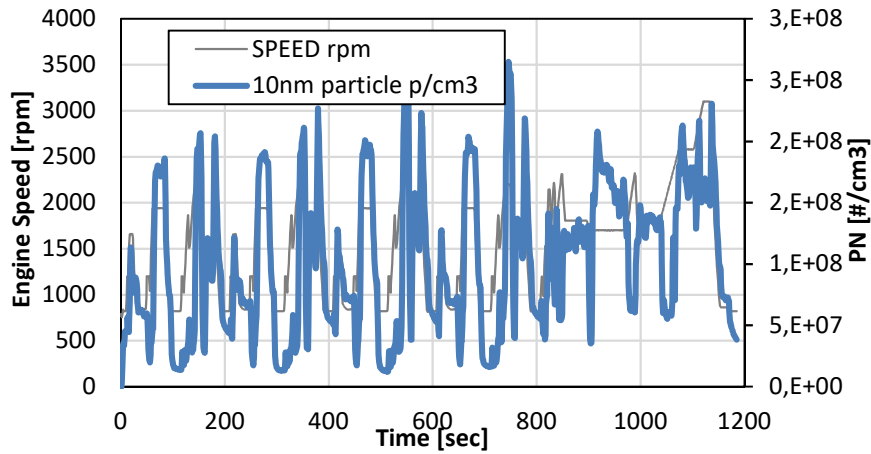


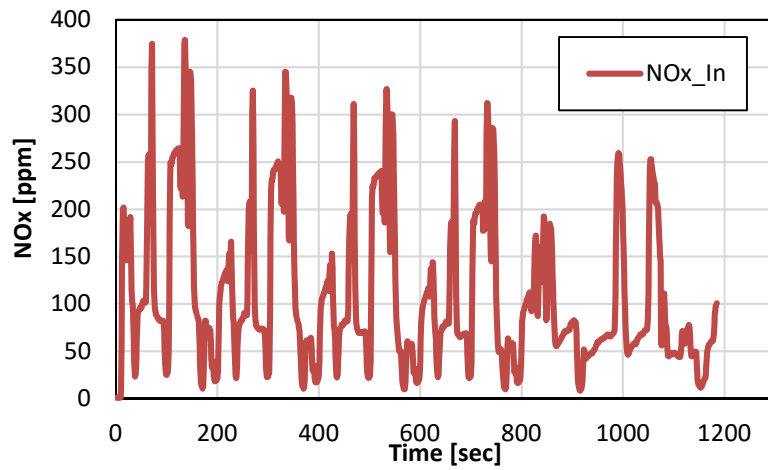
1221_NEDC_4_DV6



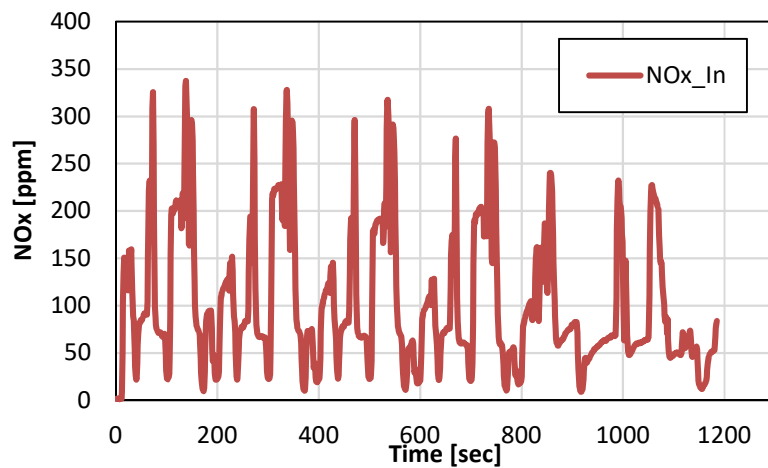
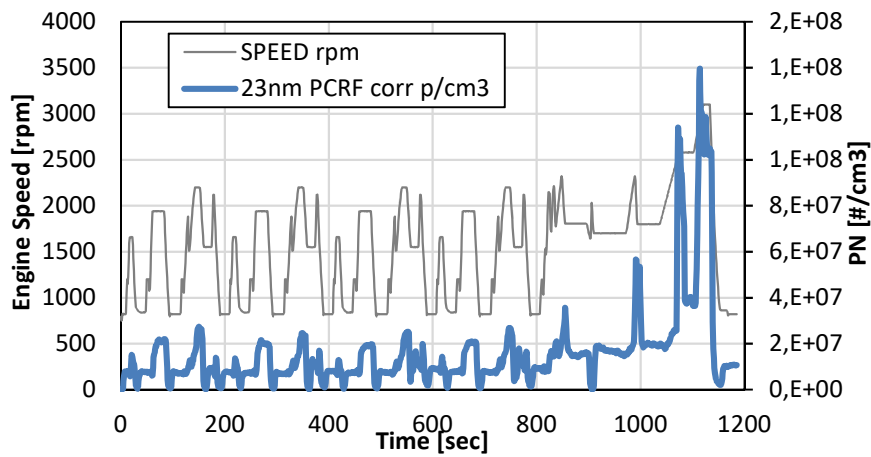
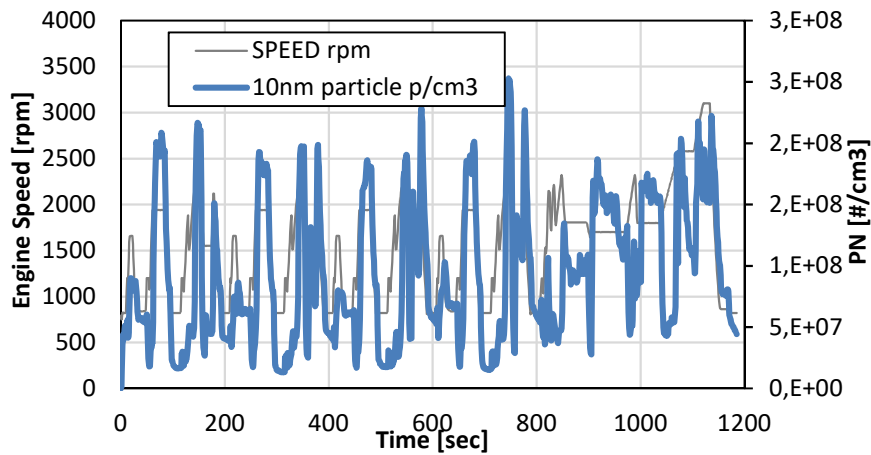


0105_NEDC_6_DV6

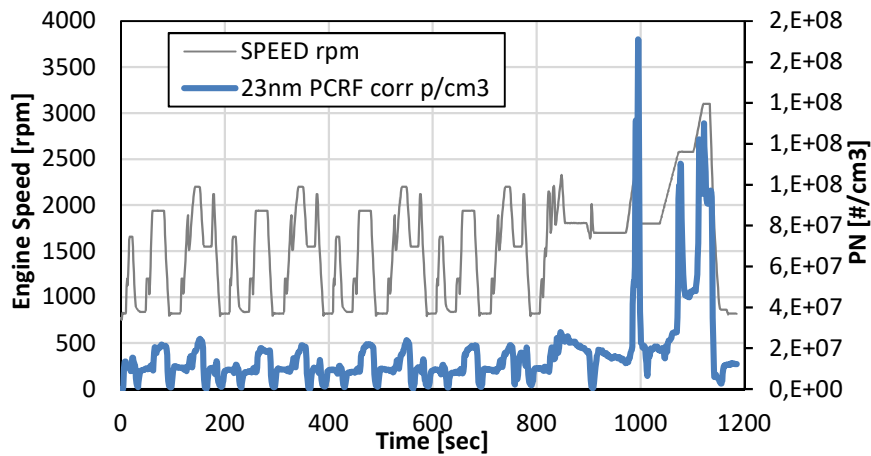
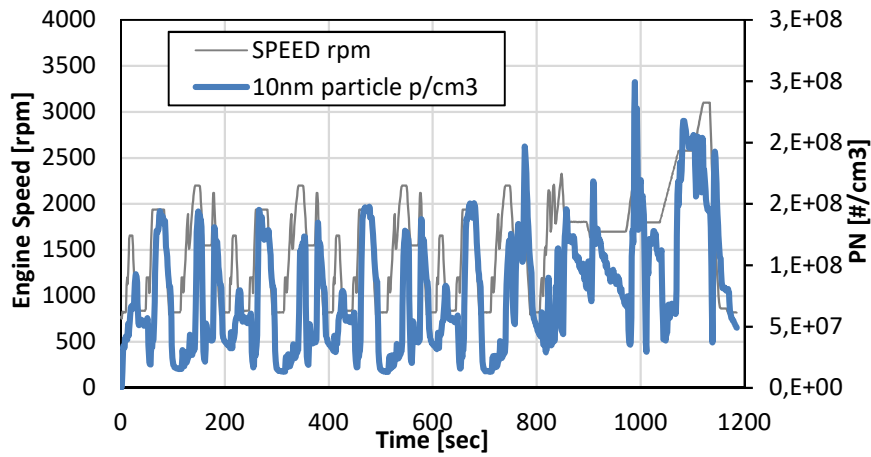




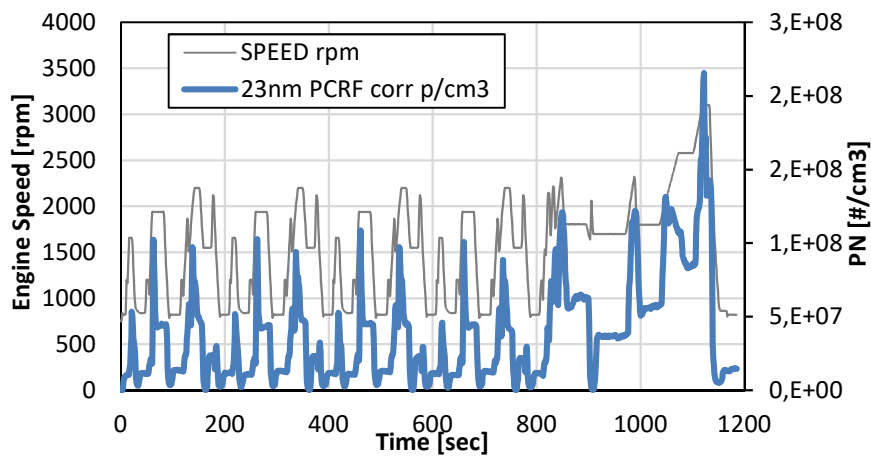
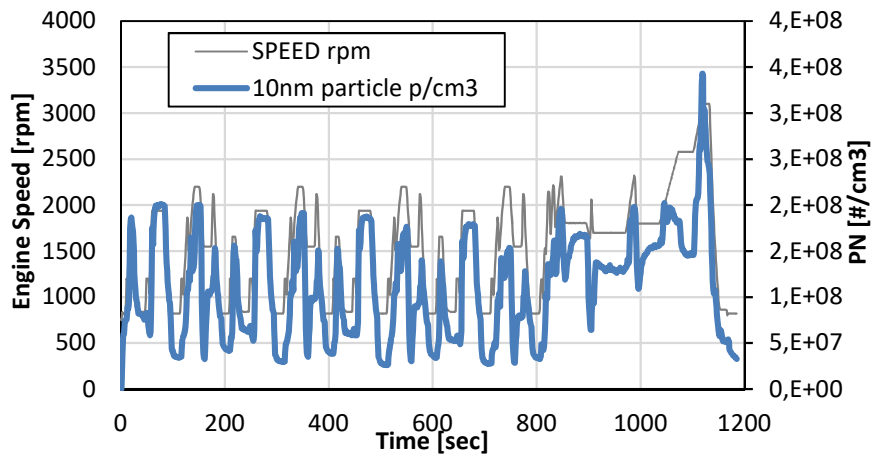
0105_NEDC_8_DV6

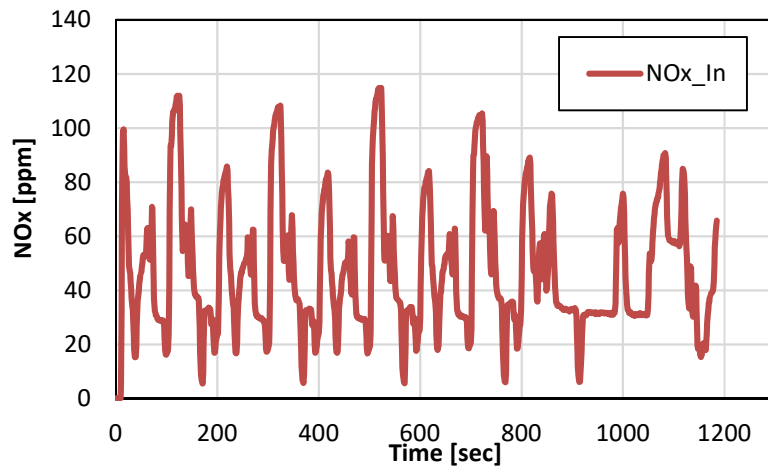


0110_NEDC_9_DV6

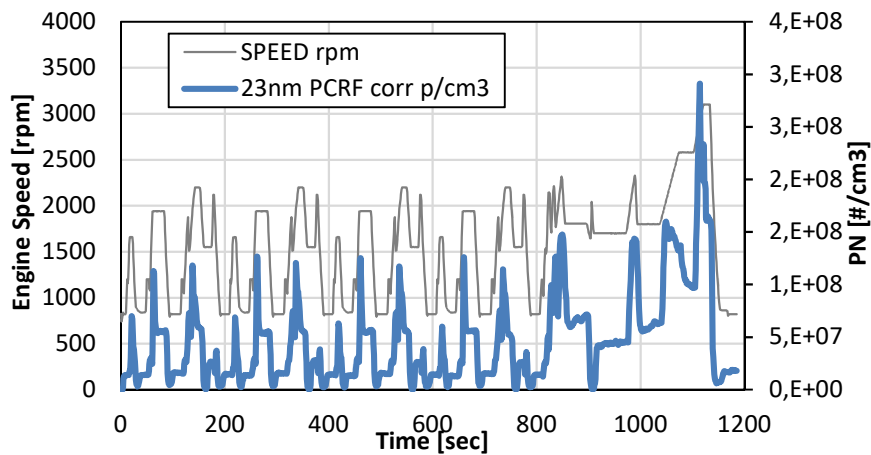
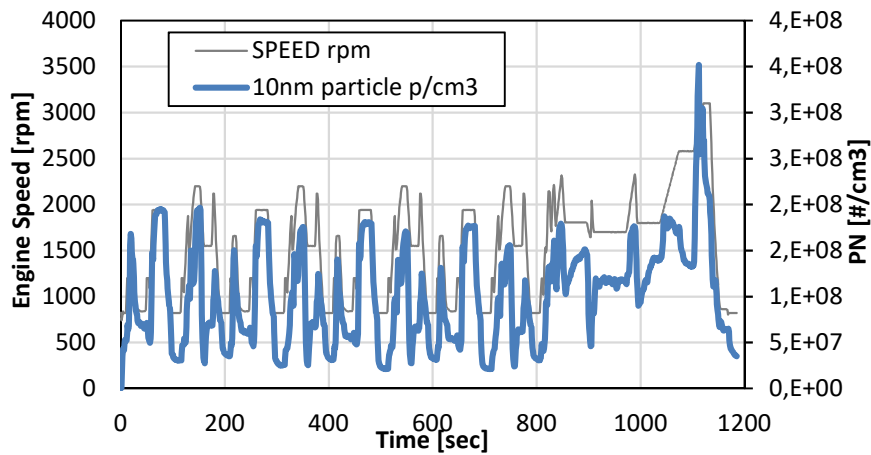


1218_NEDC_1_DV6

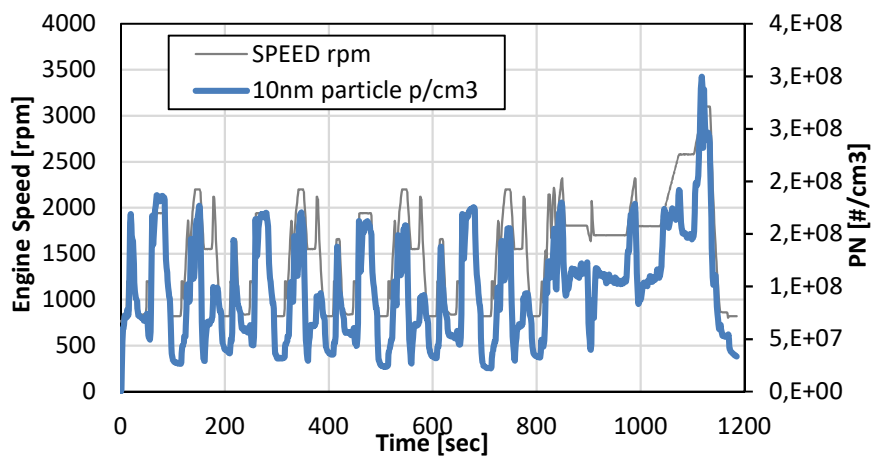


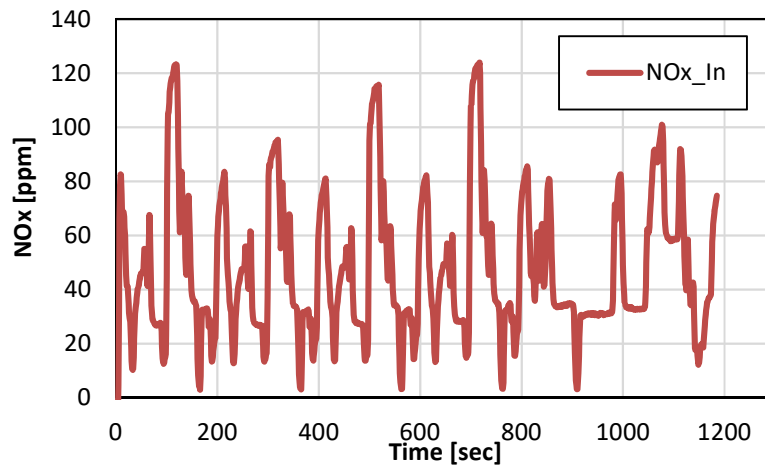
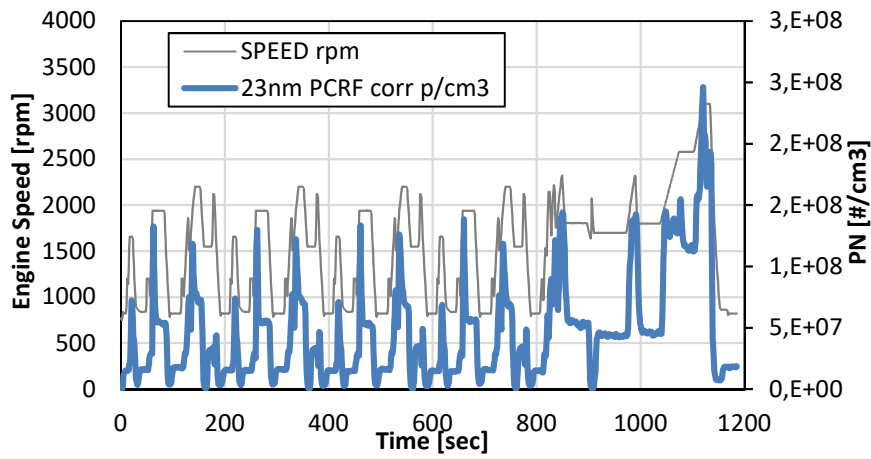


1220_NEDC_1_DV6

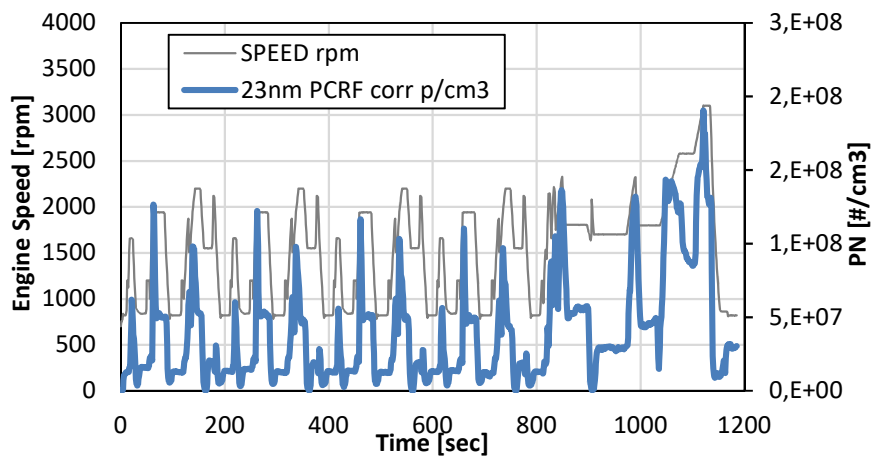
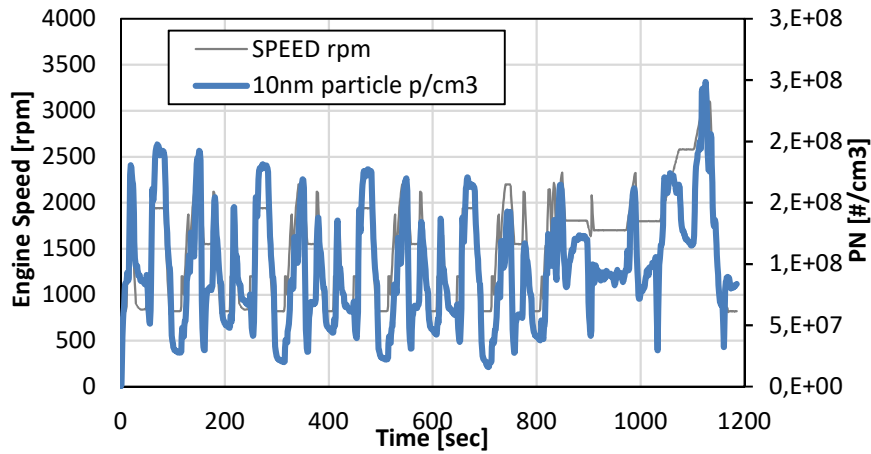


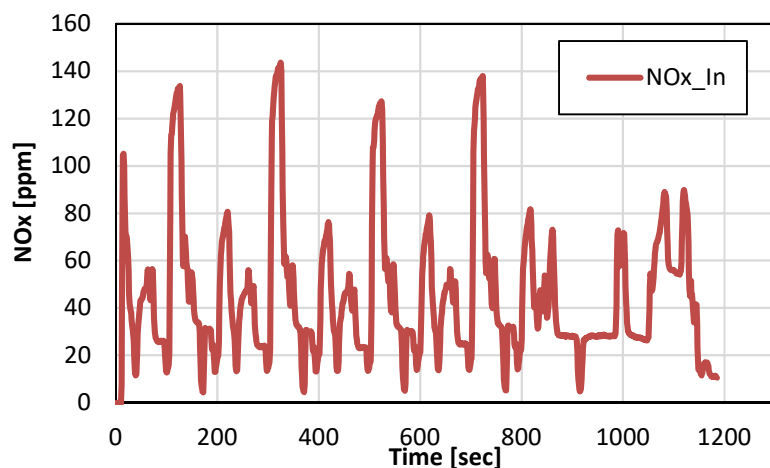
1220_NEDC_2_DV6





0110_NEDC_7_DV6

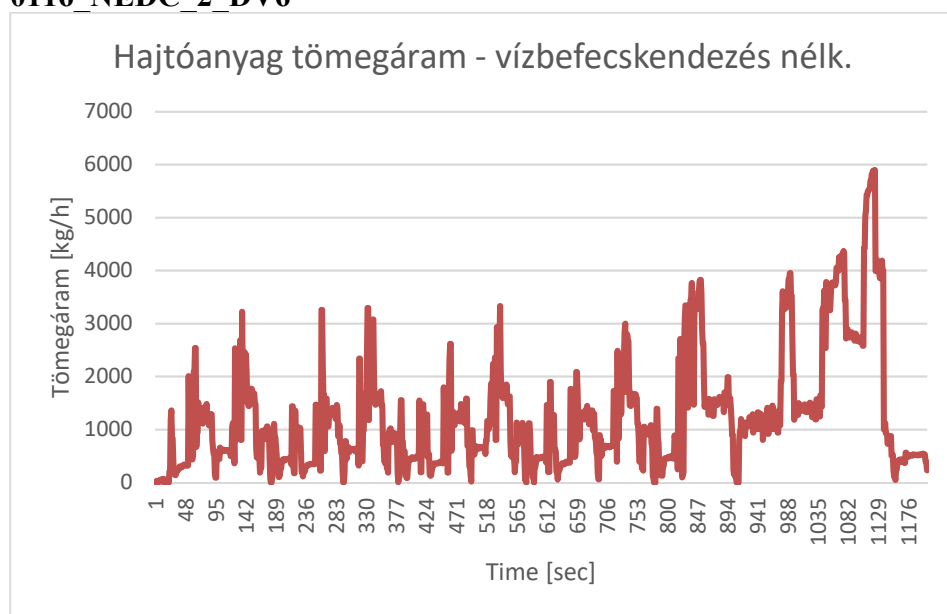




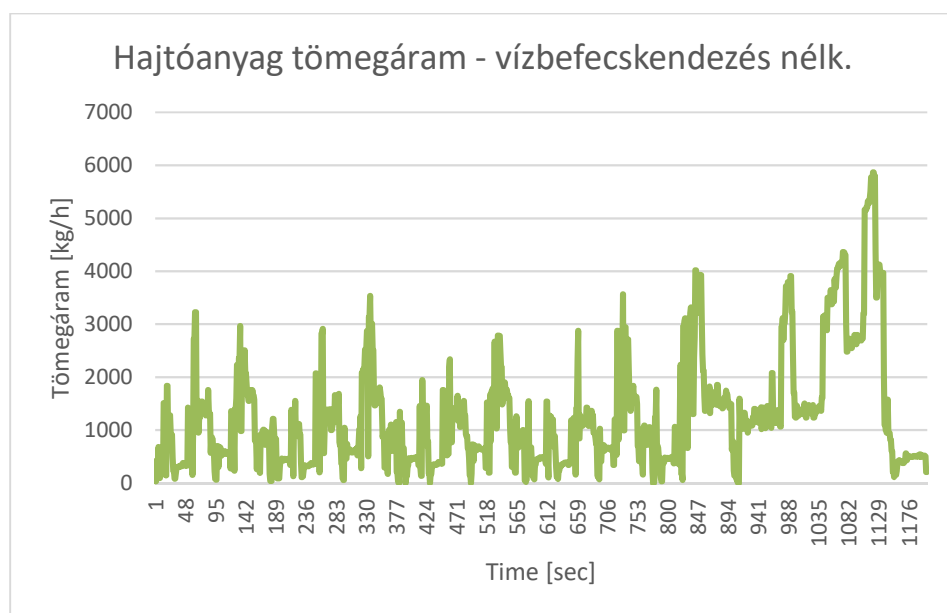
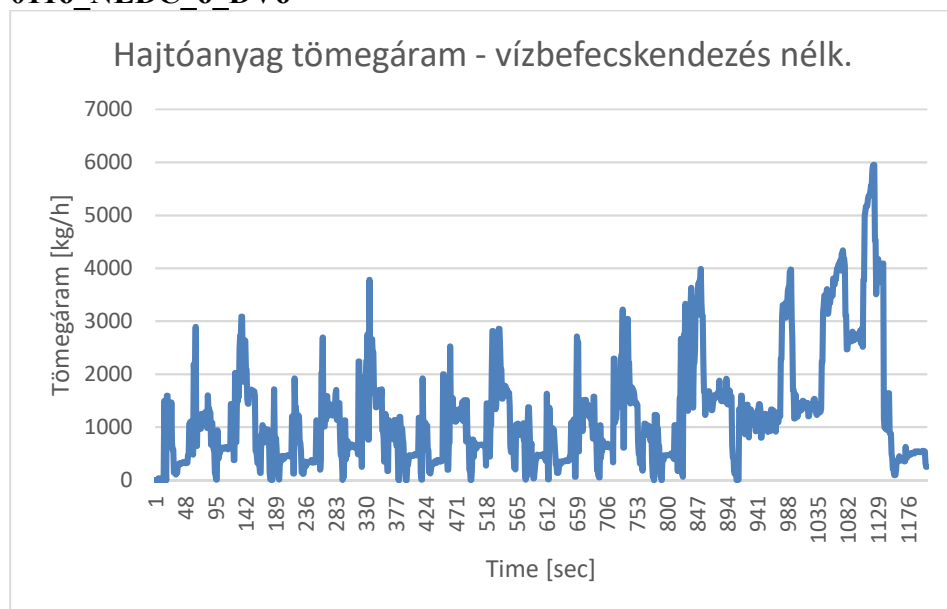
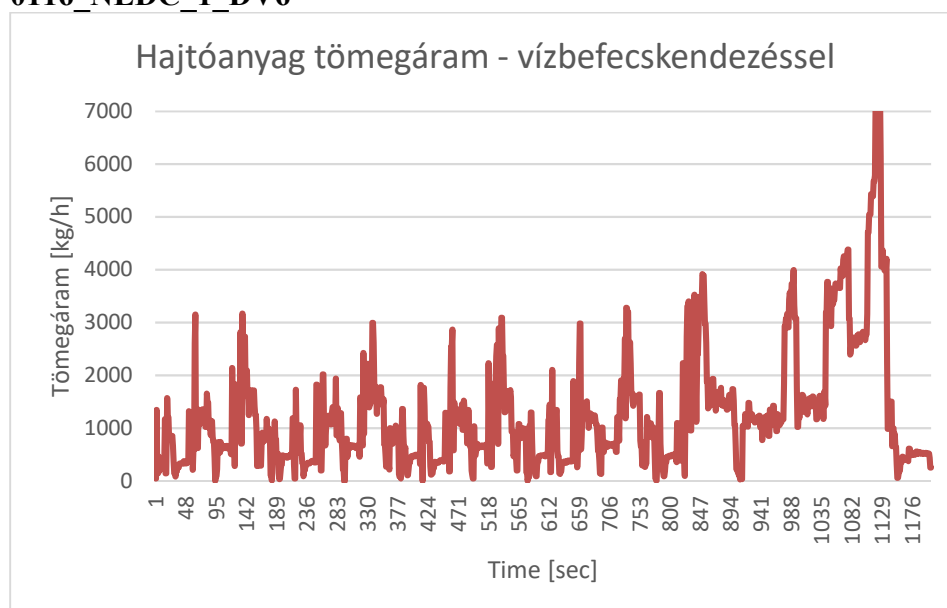
M7. Vízbefecskendezés hajtóanyag fogyasztásra gyakorolt hatása, adatok, diagramok

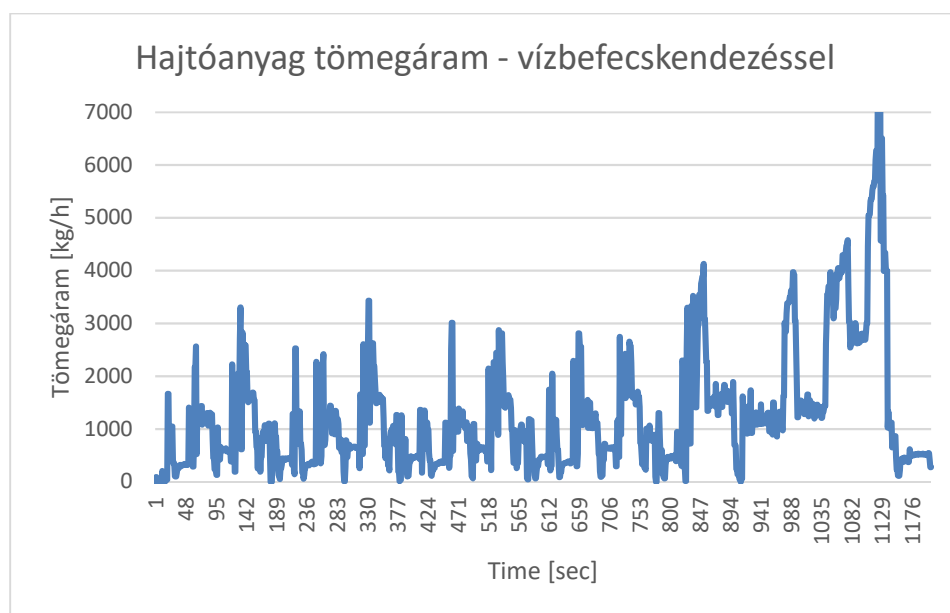
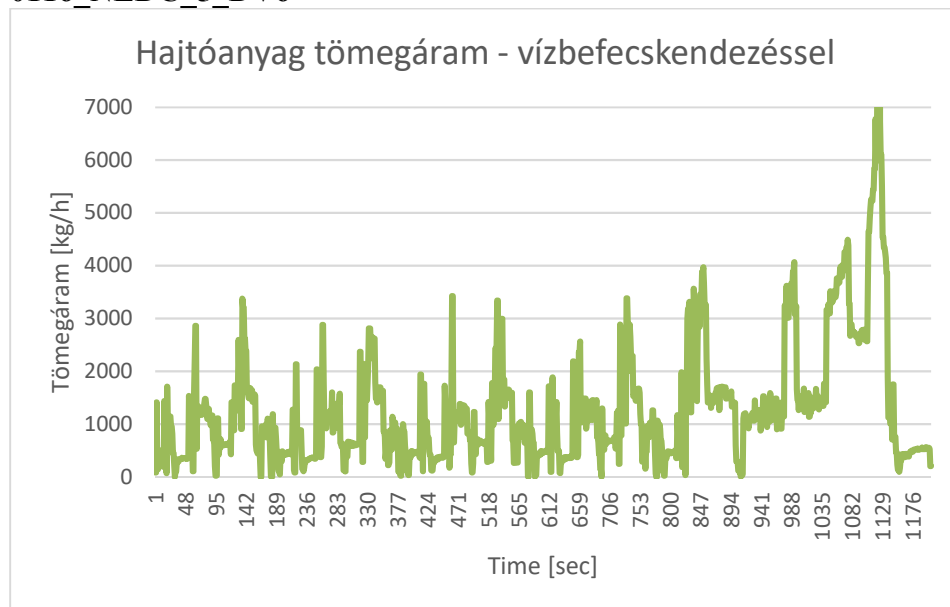
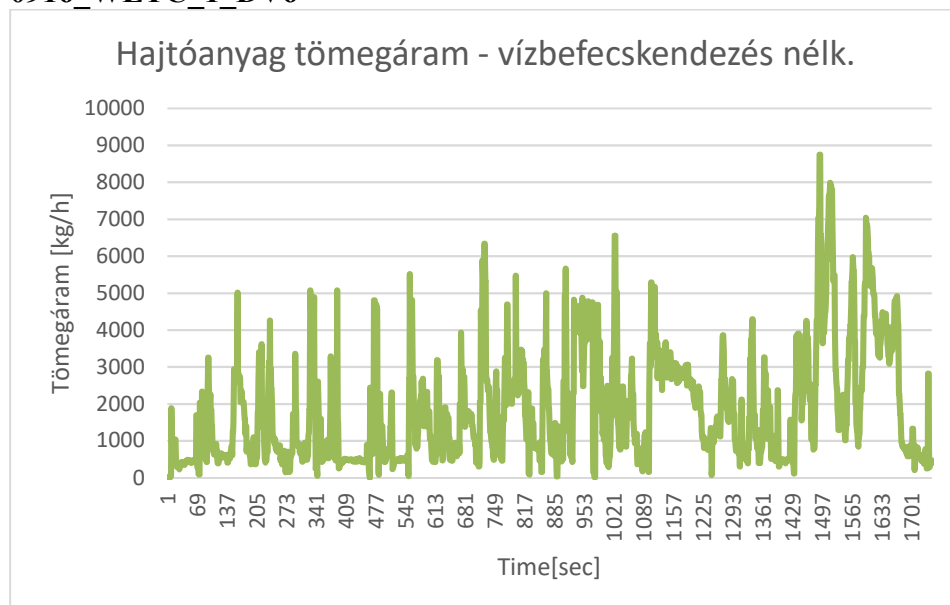
		Teszt azonosító	hajtóanyag t.áram kg/h
NEDC	EGR + DOC + DPF	0116_NEDC_2_DV6	1507,341
		0116_NEDC_4_DV6	1524,739
		0116_NEDC_6_DV6	1504,686
	EGR + DOC + DPF + vízbefecskendezés	0116_NEDC_1_DV6	1531,828
		0116_NEDC_3_DV6	1527,123
		0116_NEDC_5_DV6	1555,766
WLTC	EGR + DOC + DPF	0916_WLTC_1_DV6	3246,990
		0917_WLTC_2_DV6	3268,700
		0327_WLTC_2_DV6	3233,189
	EGR + DOC + DPF + vízbefecskendezés	1206_WLTC_2_DV6	3249,831
		0918_WLTC_3_DV6	3126,305
		0326_WLTC_2_DV6	3212,606

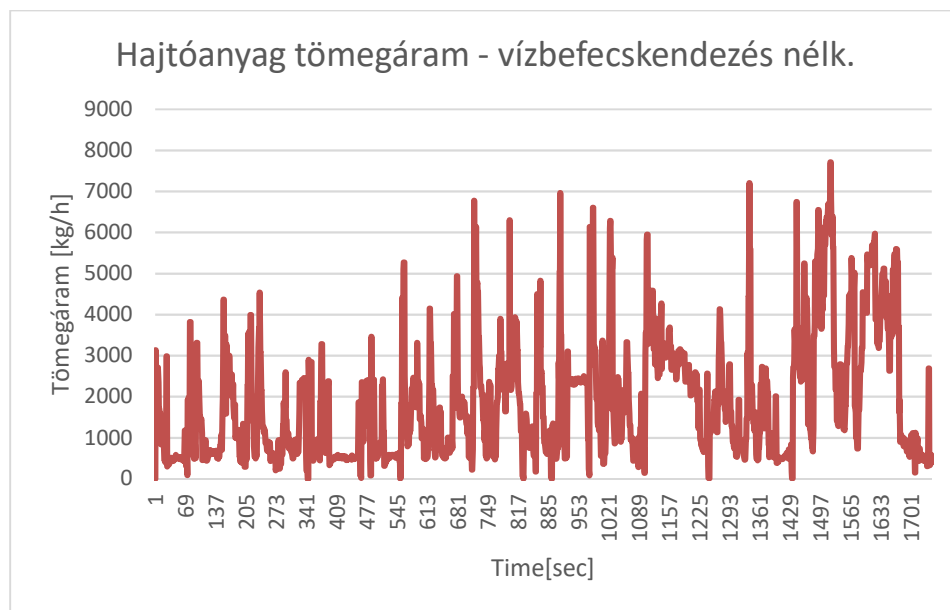
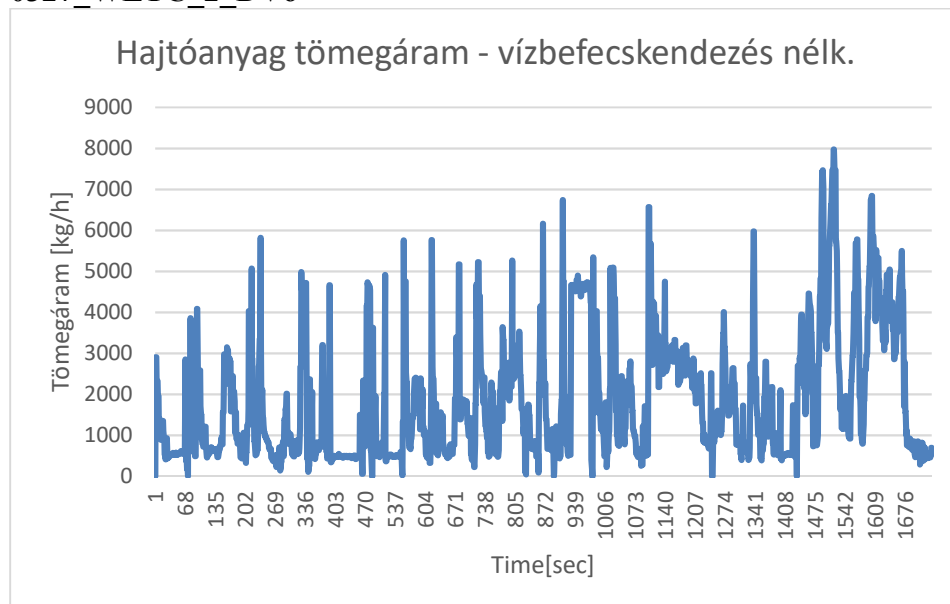
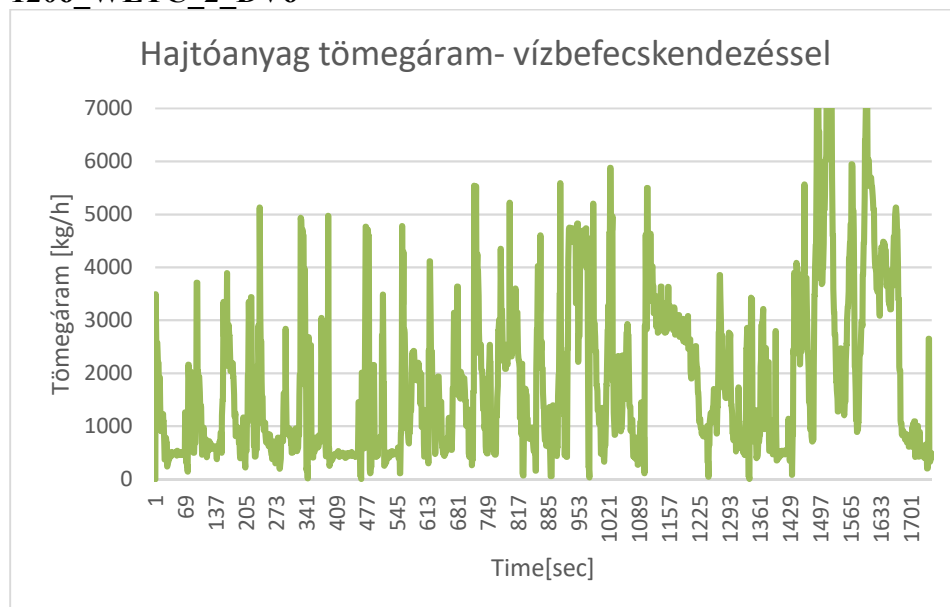
0116_NEDC_2_DV6

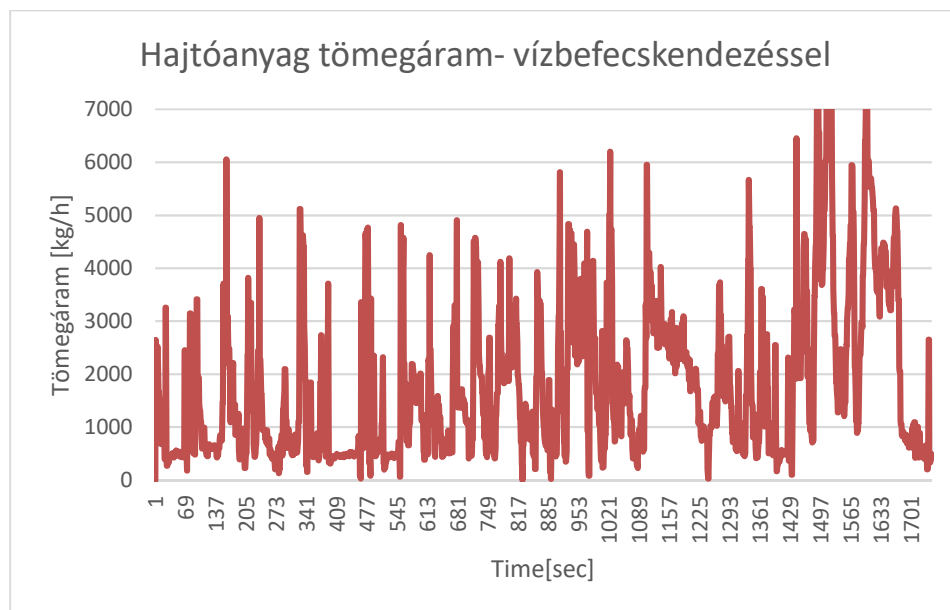
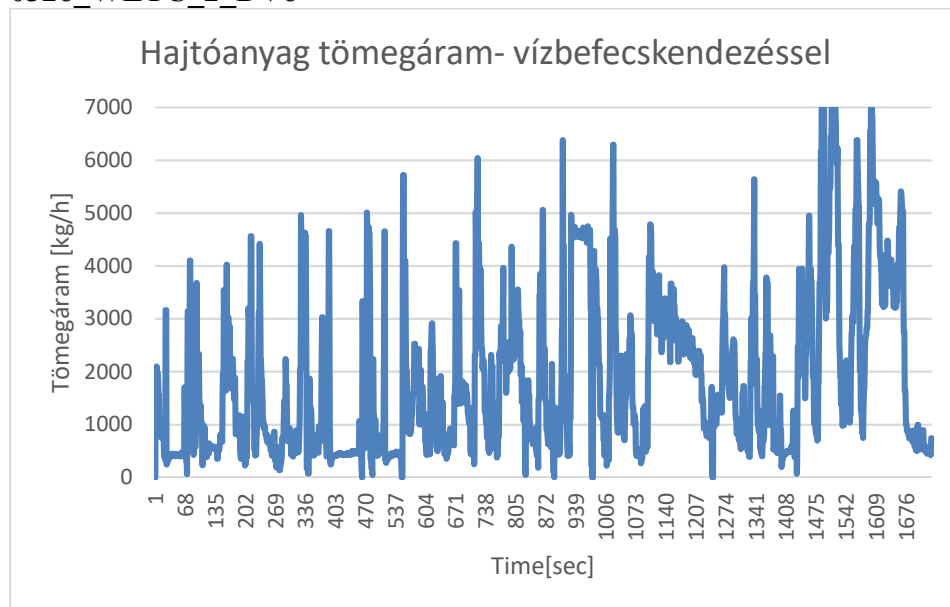


0116_NEDC_4_DV6

**0116_NEDC_6_DV6****0116_NEDC_1_DV6****0116_NEDC_3_DV6**

**0116_NEDC_5_DV6****0916_WLTC_1_DV6****0917_WLTC_2_DV6**

**0327_WLTC_2_DV6****1206_WLTC_2_DV6****0918_WLTC_3_DV6**

**0326_WLTC_2_DV6**

M8. PN₁₀ emisszió változás helyének vizsgálata, adatok, diagramok

	Teszt azonosító	10 nm #/kWh
EGR	1219_NEDC_1_DV6	1,22E+15
	1218_NEDC_2_DV6	1,36E+15
	1220_NEDC_3_DV6	1,26E+15
EGR + Vízbefecs.	1220_NEDC_2_DV6	1,37E+15
	1218_NEDC_1_DV6	1,60E+15
	1220_NEDC_1_DV6	1,46E+15
	0110_NEDC_7_DV6	1,37E+15

EGR + DOC	0112_NEDC_2_DV6	1,33E+15
	0112_NEDC_4_DV6	1,20E+15
	0112_NEDC_6_DV6	1,25E+15
	0112_NEDC_8_DV6	1,18E+15
EGR + DOC + Vízbefecs.	0112_NEDC_1_DV6	1,23E+15
	0112_NEDC_5_DV6	1,10E+15
	0112_NEDC_7_DV6	1,12E+15

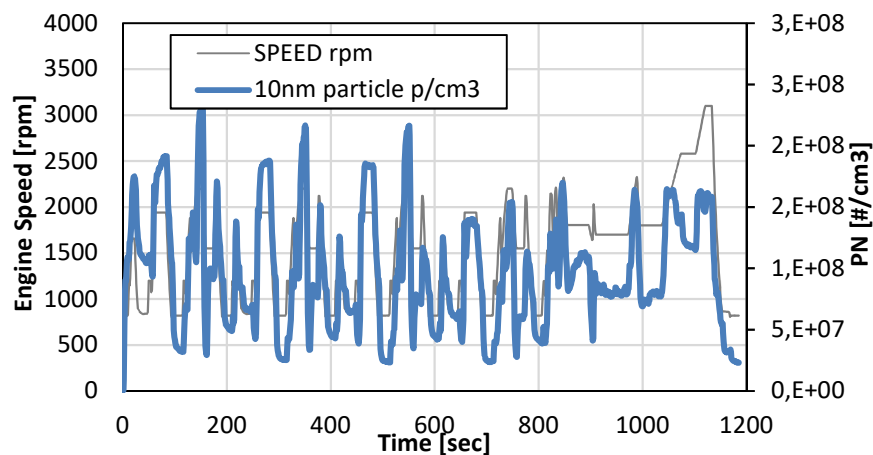
EGR + DOC + DPF	0116_NEDC_2_DV6	2,99E+10
	0116_NEDC_4_DV6	2,33E+10
	0116_NEDC_6_DV6	2,95E+10
EGR + DOC + DPF + Vízbefecs.	0116_NEDC_1_DV6	2,45E+10
	0116_NEDC_3_DV6	4,10E+10
	0116_NEDC_5_DV6	8,19E+10

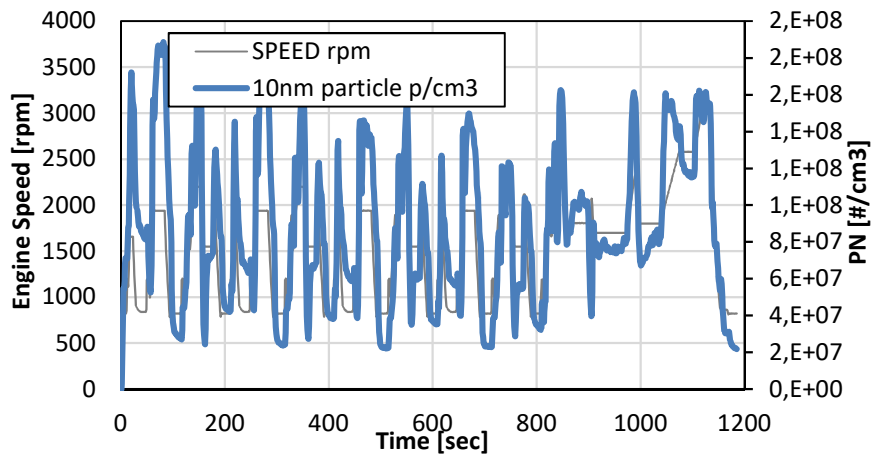
EGR: lásd M6 EGR és vízbefecskendezés

EGR+Vízbefecs.: lásd M6 EGR és vízbefecskendezés

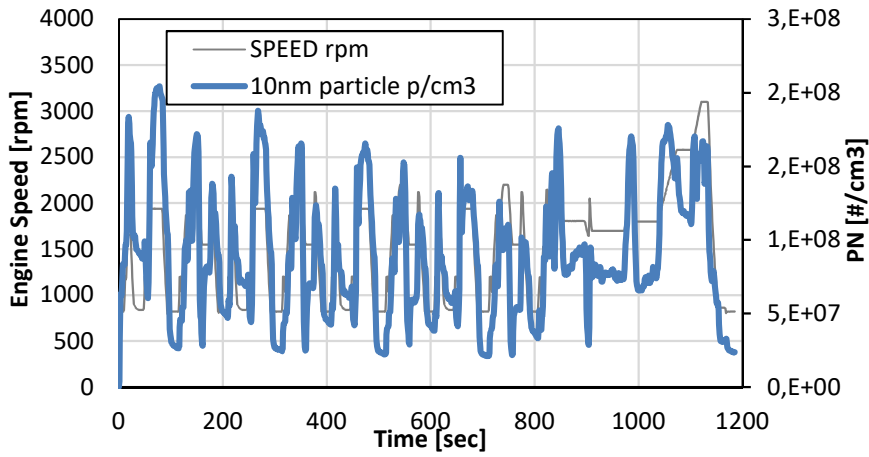
EGR+DOC+DPF.: lásd M5 Teljes rendszerrel végzett mérések

EGR+DOC+DPF+Vízbefecs.: lásd M5 Teljes rendszerrel végzett mérések

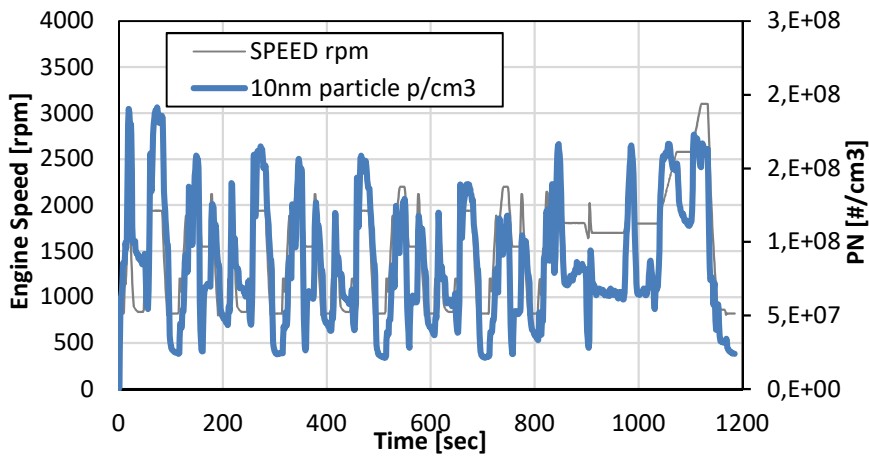
0112_NEDC_2_DV6**0112_NEDC_4_DV6**



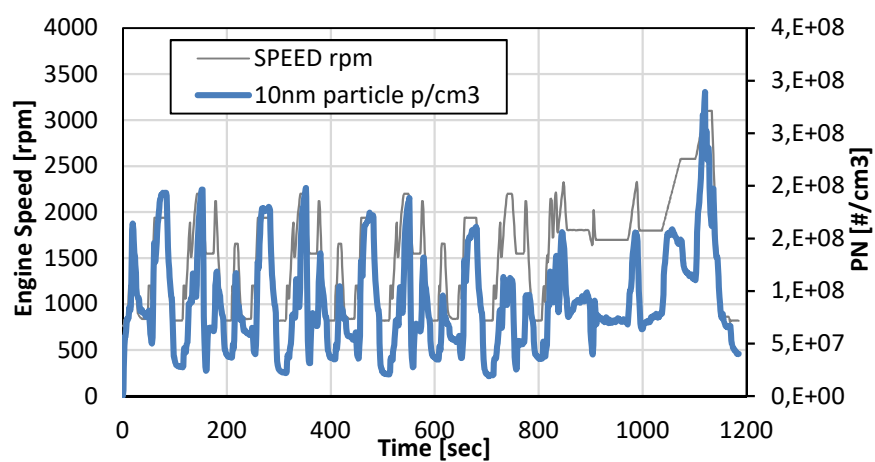
0112_NEDC_6_DV6



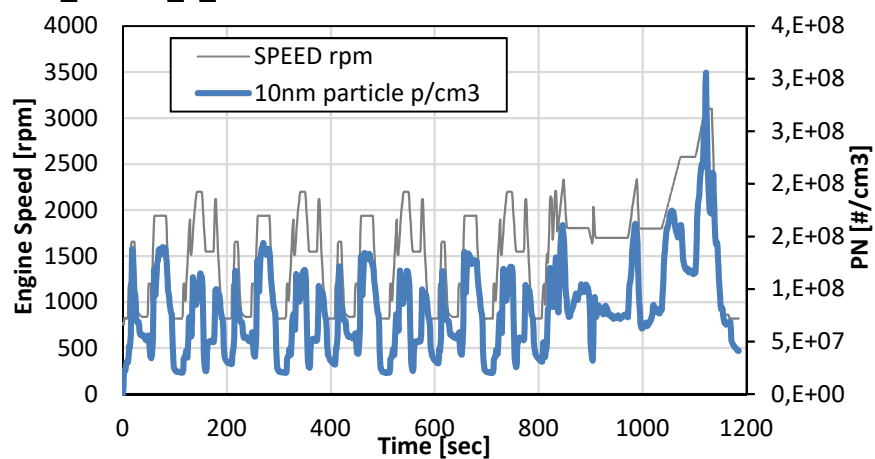
0112_NEDC_8_DV6



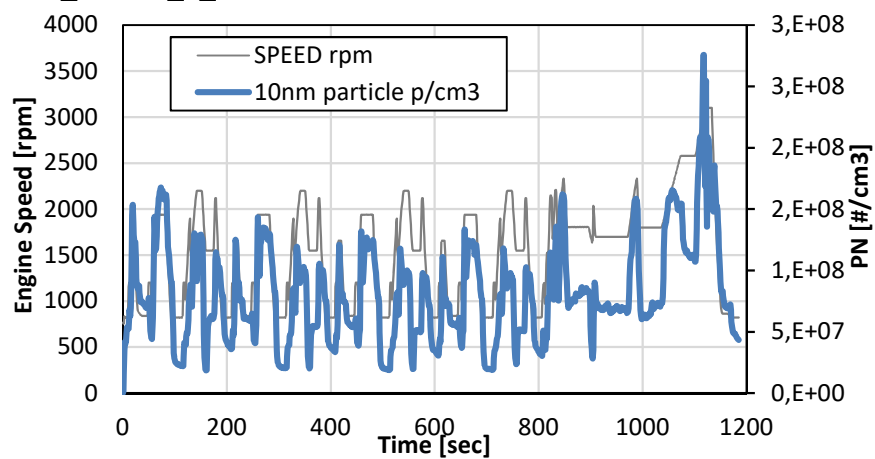
0112_NEDC_1_DV6



0112_NEDC_5_DV6



0112_NEDC_7_DV6



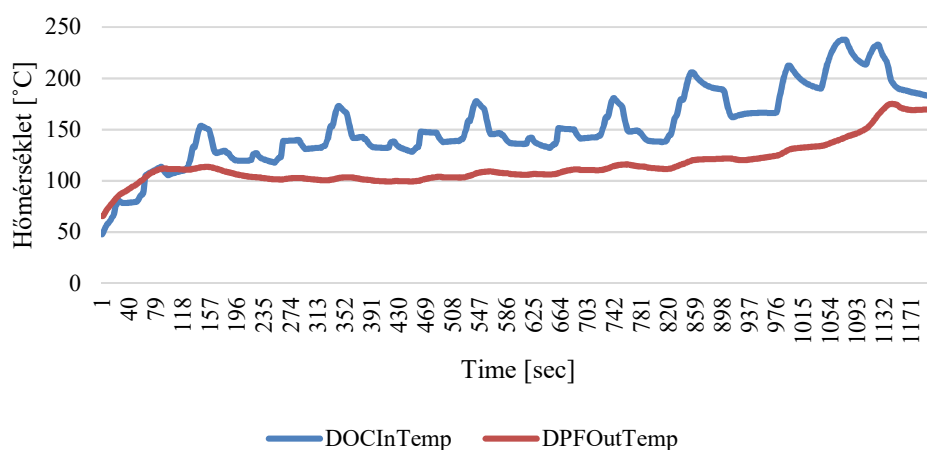
M9. Utókezelő rendszer hőmérsékleteinek vizsgálata, adatok, diagramok

		Teszt azonosító	DOC in °C	DPF out °C
NEDC	EGR + DOC + DPF	0116_NEDC_2_DV6	237,830	175,123
		0116_NEDC_4_DV6	238,754	175,146
		0116_NEDC_6_DV6	238,038	175,331
	EGR + DOC + DPF + Vízbefecskendezés	0116_NEDC_1_DV6	238,038	179,908
		0116_NEDC_3_DV6	236,584	178,521
		0116_NEDC_5_DV6	238,430	179,630

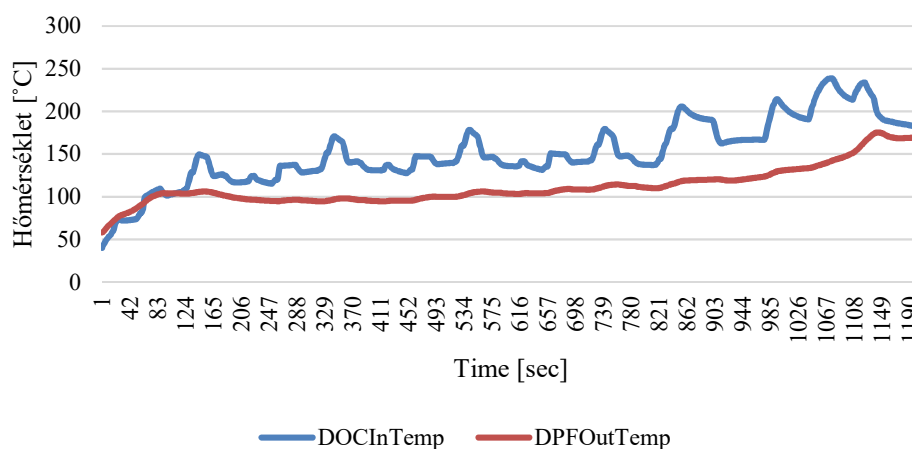
WLTC	EGR + DOC + DPF	0916_WLTC_1_DV6	334,677	265,797
		0917_WLTC_2_DV6	335,880	264,434
		1206_WLTC_1_DV6	359,676	318,245
	EGR + DOC + DPF + Vízbefecskendezés	0326_WLTC_2_DV6	381,608	282,379
		0918_WLTC_3_DV6	367,048	318,799
		0918_WLTC_1_DV6	366,048	318,822

0116_NEDC_2_DV6

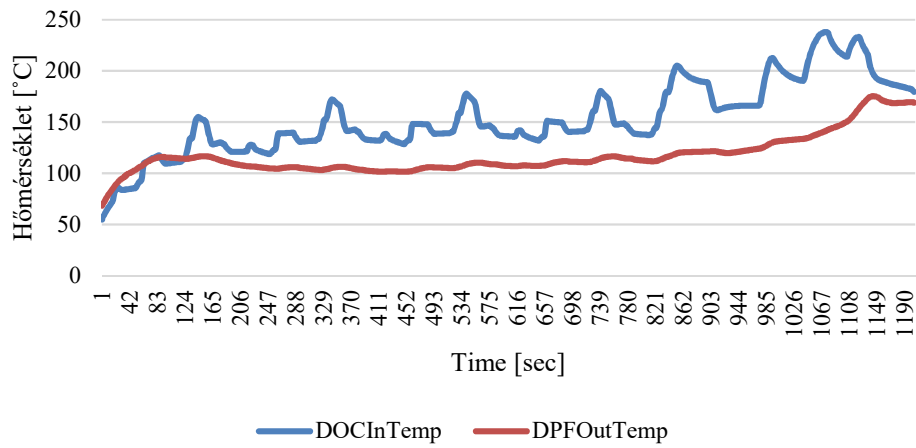
NEDC - vízbefecskendezés nélkül

**0116_NEDC_4_DV6**

NEDC - vízbefecskendezés nélkül

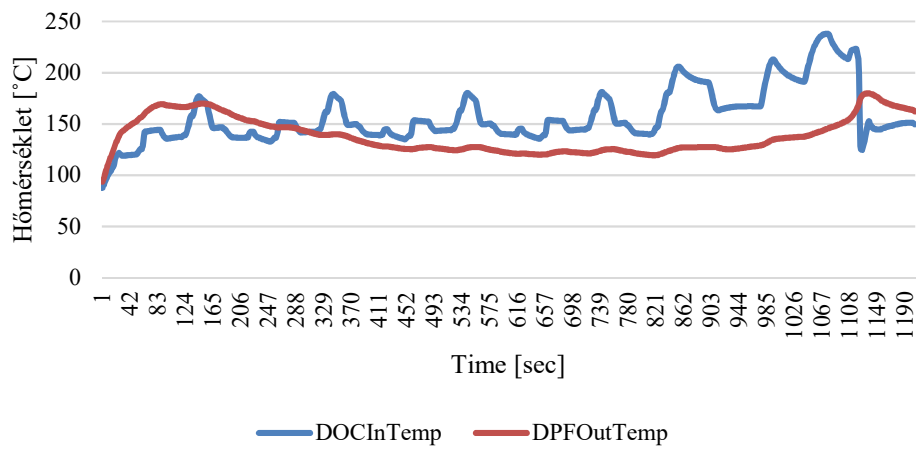
**0116_NEDC_6_DV6**

NEDC - vízbefecskendezés nélkül



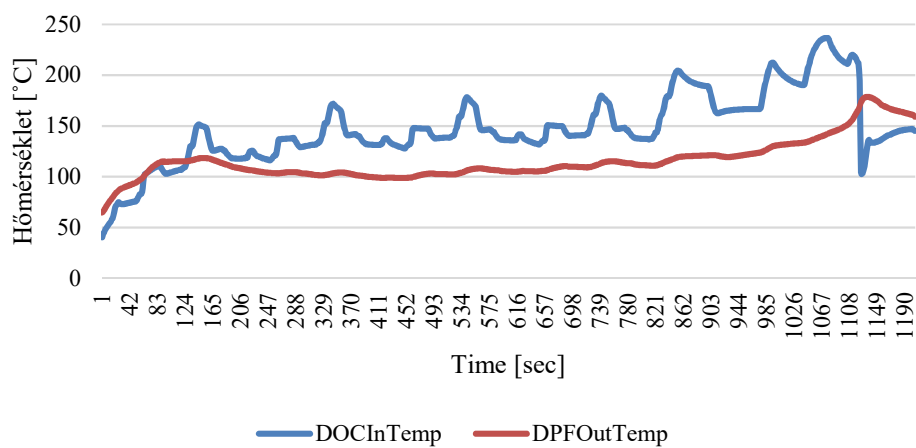
0116_NEDC_1_DV6

NEDC - vízbefecskendezéssel



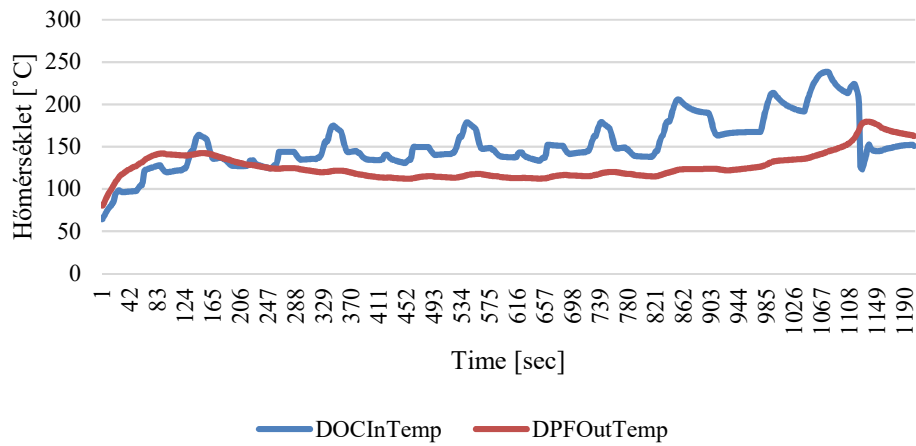
0116_NEDC_3_DV6

NEDC - vízbefecskendezéssel



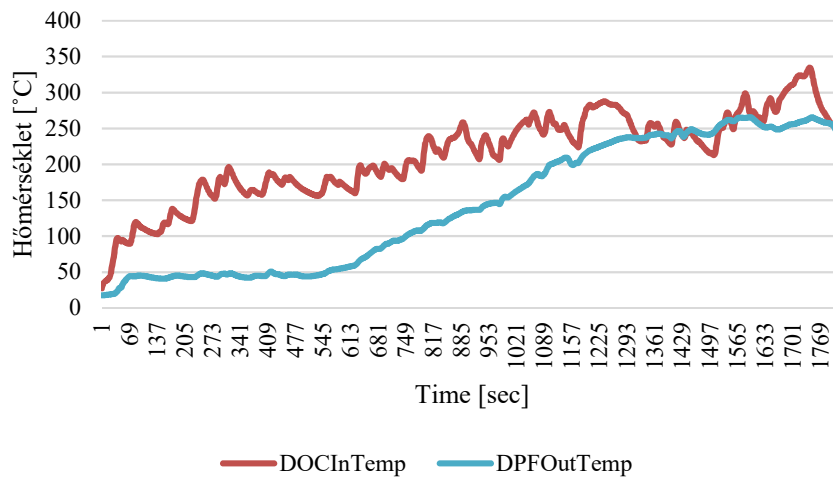
0116_NEDC_5_DV6

NEDC - vízbefecskendezéssel



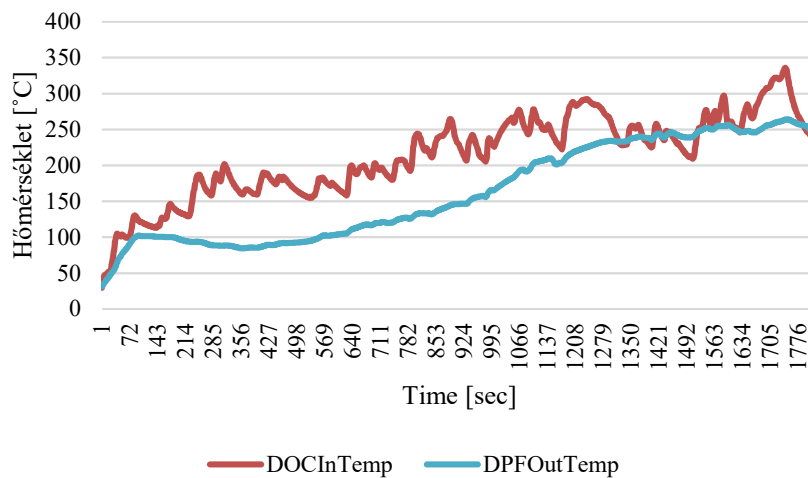
0916_WLTC_1_DV6

WLTC - vízbefecskendezés nélkül



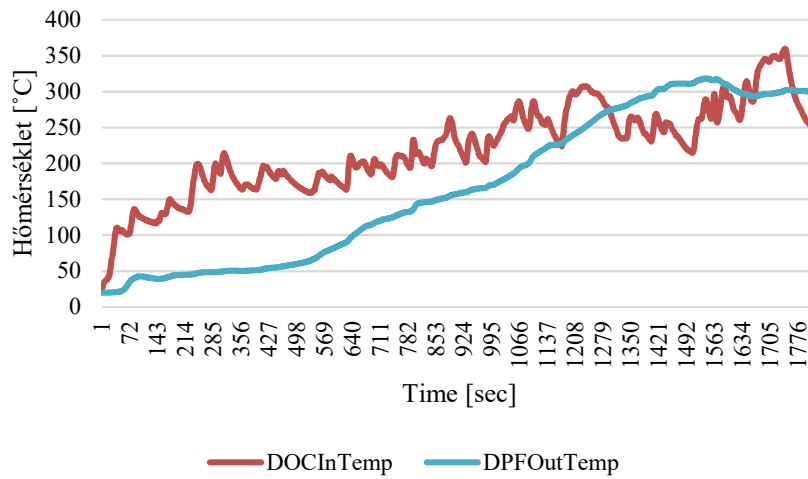
0917_WLTC_2_DV6

WLTC - vízbefecskendezés nélkül



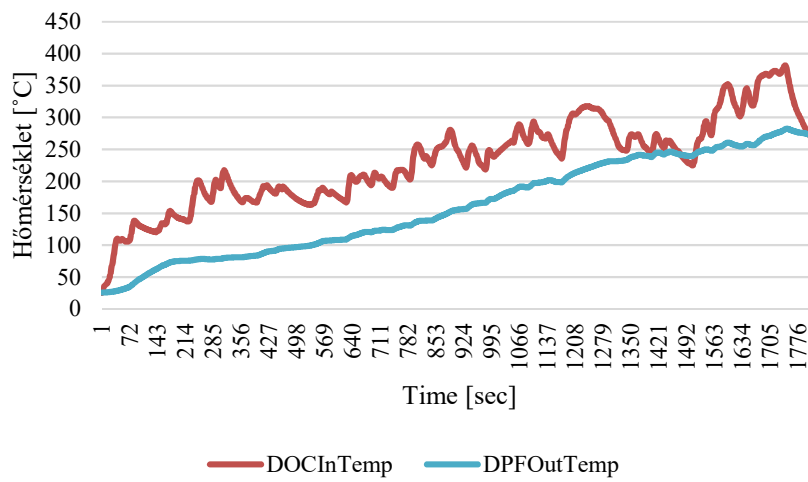
1206_WLTC_1_DV6

WLTC - vízbefecskendezés nélkül



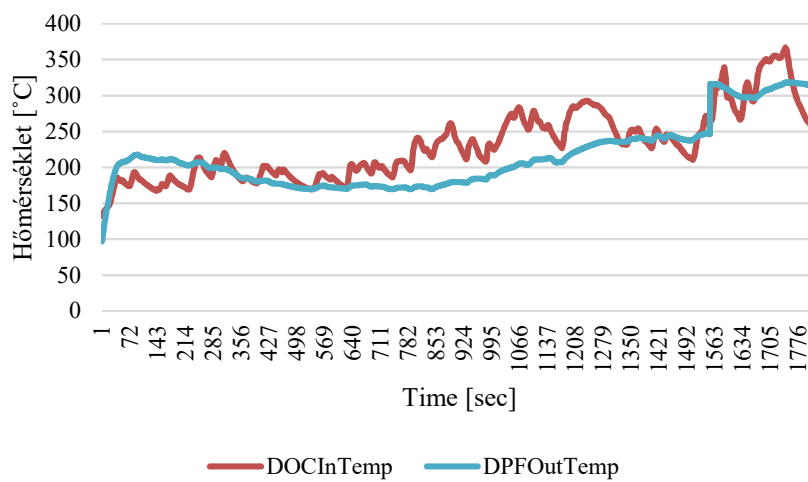
0326_WLTC_2_DV6

WLTC - vízbefecskendezéssel



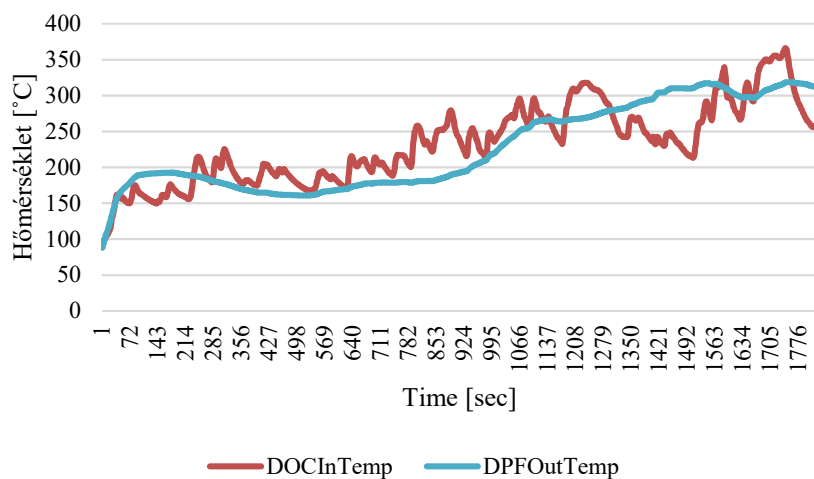
0918_WLTC_3_DV6

WLTC - vízbefecskendezéssel



0918_WLTC_1_DV6

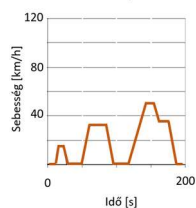
WLTC - vízbefecskendezéssel



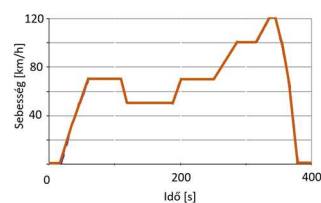
M10. Európai uniós emissziós ciklusok

Személyautó (PC) és könnyű teherautó (MD) ciklusok

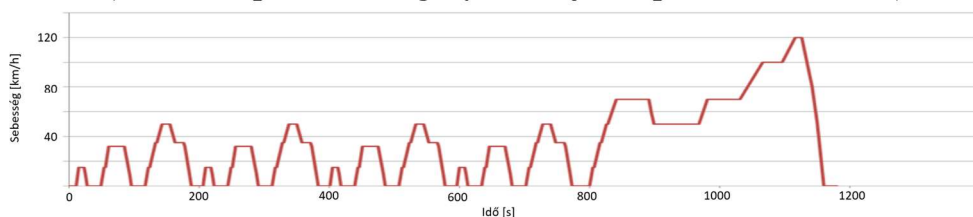
ECE 15 (Urban cycle - Városi vezetési ciklus)



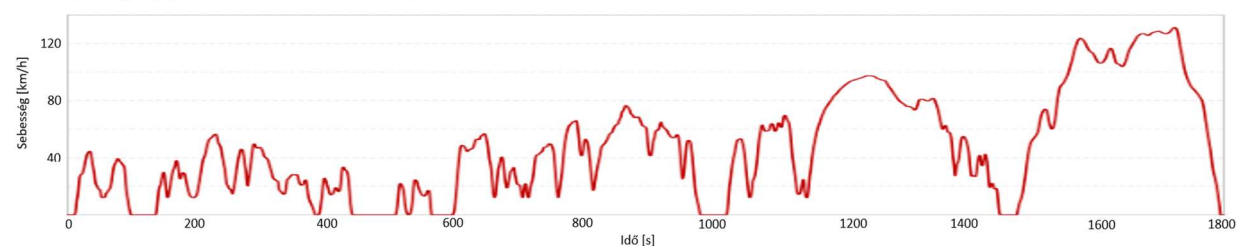
EUDC (Extra Urban Driving Cycle – Extrém városi vezetési ciklus)



NEDC (New European Driving Cycle – Új európai vezetési ciklus)



WLTC (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle – Világszerte harmonizált könnyű gépjármű teszt ciklus)



Ciklusok karakterisztikái

	Mértékegység	ECE 15	EUDC	NEDC	WLTC
Távolság	km	0.9941	6.9549	10.9314	23.2660
Teljes idő	s	195	400	1180	1800
Alapjáratú idő	s	57	39	267	242
Átlag sebesség (megállásokkal)	km/h	18.35	62.59	33.35	51.78
Átlag sebesség (megállások nélkül)	km/h	25.93	69.36	43.10	56.25
Maximum sebesség	km/h	50	120	120	131.3
Átlagos gyorsulás	m/s ²	0.599	0.354	0.506	(na)
Maximum gyorsulás	m/s ²	1.042	0.833	1.042	1,58

Nehéz teherautó (HD) ciklus

WHSC (Worldwide Harmonized Stationery Cycle - Világszerte harmonizált állandósult ciklus)

Lépés	Sebesség	Terhelés	Súly faktor	Lépés hossza
–	%	%	–	s
0	Motoring	–	0,24	–
1	0	0	0,17/2	210
2	55	100	0,02	50
3	55	25	0,10	250
4	55	70	0,03	75
5	35	100	0,02	50
6	25	25	0,08	200
7	45	70	0,03	75
8	45	25	0,06	150
9	55	50	0,05	125
10	75	100	0,02	50
11	35	50	0,08	200
12	35	25	0,10	250
13	0	0	0,17/2	210
Összesítve			1,00	1895