

Eero Kotimäki

## **MENETELMÄ TYÖKONEIDEN PÄÄSTÖTAVOITTEIDEN SAAVUTTAMISEKSI**

Case study: Tier 5 -päästötavoitteisiin close-coupled SCR -tekniikalla

# **MENETELMÄ TYÖKONEIDEN PÄÄSTÖTAVOITTEIDEN SAAVUTTAMISEKSI**

Case study: Tier 5 -päästötavoitteisiin close-coupled SCR -tekniikalla

Eero Kotimäki  
Opinnäytetyö (YAMK)  
Kevät 2022  
Tekniikan ylempi ammattikorkeakoulu-  
tutkinto, Lean-johtaminen  
Oulun ammattikorkeakoulu

## TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Tekniikan ylempi ammattikorkeakoulututkinto, Lean-johtaminen

---

Tekijä: Eero Kotimäki

Opinnäytetyön nimi: Menetelmä työkoneiden päästötavoitteiden saavuttamiseksi. Case study: Tier 5 -päästötavoitteisiin close-coupled SCR -tekniikalla

Työn ohjaajat: Janne Ilomäki, Matti Rahko, Arno Amberla

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: syksy 2022

Sivumäärä: 65 + 8 liitettä

---

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin osana non-road-työkoneiden dieselmoottoreiden pakokaasujen puhdistusjärjestelmää toimivan SCR-järjestelmän mitoitusperiaatteita, jotta voitiin tutkia, voidaanko nykyistä tekniikkaa hyödyntämällä saavuttaa suunnitteilla olevat uudet Tier 5 -tason päästövaatimukset. Yhtenä mahdollisena ratkaisuvaihtoehtona Tier 5 -tason jälkikäsitteilylaitteistolle pidetään ns. close-coupled SCR -layoutia, jossa perinteisen pakokaasunpuhdistusjärjestelmän etupuolelle sijoitetaan erillinen SCR-kenno sekä ureanruiskutusyksikkö, jolloin etummainen kenno saadaan lämmitettyä käyttölämpötilaan mahdollisimman nopeasti kylmäkäynnistyksen jälkeen. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää close-coupled SCR -layoutin etummaisen järjestelmän osan toimintaan vaikuttavat tekijät, pyrkiä optimoimaan järjestelmän toiminta vaadituissa olosuhteissa ja minimoimaan järjestelmän vaatimien komponenttien tuomat lisäkustannukset ja tilantarvevaatimukset.

Työ suoritettiin Proventia Oy:n toimeksiannosta osana Business Finlandin rahoittamaa Clean Propulsion Technologies -hanketta. Business Finlandin rahoittamassa CPT-hankekonsertiossa pyritään hankkeessa mukana olevien yritysten ja yliopistojen yhteistyön avulla kehittämään uusia ratkaisuja kiristyvän päästölainsäädännön tavoitteiden saavuttamiseksi.

Kirjallisuusaineistoon ja alan julkaisuihin pohjautuneen selvitystyön tulosten perusteella suunniteltiin useita erilaisia järjestelmiä moottorilaboratoriotesteihin, joissa todennettiin järjestelmien suorituskyvyt oikeita päästömittaussyklejä käyttäen. Työn aikana luotiin pohja kehitystyön toimintamallille, jota noudattamalla jatkossa esitettävien uusien päästömääräysten tai muiden asiakaslähtöisten tavoitteiden täyttämiseen vaadittavat konkreettiset toimenpiteet saadaan järjestelmällisesti tehtyä.

Mittaustulosten perusteella close-coupled SCR -layoutilla on mahdollista pienentää dieselmoottorin pakokaasupäästöjä nykytasosta ja saavuttaa ehdotetut Tier 5 -tason NO<sub>x</sub> -päästörajat NRTC-mittaussykleissä. Cc-järjestelmän toiminnan kannalta merkittävimmät tekijät ovat lämpötilahallinta, termisen massan määrä ennen EAT:ia, urearuiskutuksen kontrollointi, kennokombinaatiot ja virtausjakaumat kennoilla. Tier 5 -lainsäädännön valmistuttua tulee varmistaa, että muidenkin päästökomponenttien osalta järjestelmän toiminta on vaaditulla tasolla.

---

Asiasanat: close-coupled SCR, dieselmoottorin pakokaasupäästöt, emissiolainsäädäntö, non-road mobile machinery NRMM, SCR-tekniologia, Tier 5 -lainsäädäntö, twin-SCR

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Master's degree in Engineering, Lean management

---

Author: Eero Kotimäki

Title of thesis: Method for meeting the emission demands for non-road mobile machinery. Case study: Reaching Tier 5 targets with close-coupled SCR technology

Supervisors: Janne Ilomäki, Matti Rahko, Arno Amberla

Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2022

Number of pages: 65 + 8 appendices

---

In this Master's thesis the aim was to investigate and determine factors affecting the development process of non-road mobile machinery diesel engine's emission aftertreatment systems for Tier 5 applications. One approach is to use twin-SCR system, where first SCR is added in upstream of typical Stage 5 or Tier 4F level aftertreatment system. The first part of the system is called a close-coupled SCR and second a main SCR. Moreover, dosing and mixing of required liquidous reactant takes place in two different locations, each being upstream of current SCR in question. In this thesis, the focus is, first, on acquiring an overall understanding of factors affecting the performance of close-coupled SCR and, second, on optimizing the performance to develop a method to meet the requirements of upcoming stringent regulations.

This study was commissioned by Proventia Oy, which belongs to the Clean Propulsion Technologies project consortium. This consortium is led by the University of Vaasa and funded by Business Finland, and it aims to develop new sustainable solutions for marine and non-road transport in cooperation with companies and research organizations.

Research was done by studying publications and literature related to the title of Thesis and several different test layouts were designed to evaluate and confirm the findings of research in actual engine lab using standardized emission cycles. During the research, method for meeting the emission demands for non-road mobile machinery was established, to ensure straight-forward workflow during possible future challenges with emission legislation.

According to the results, it is possible to further reduce emissions from current state of diesel engine with close-coupled SCR layout and even reach proposed limits for NO<sub>x</sub>-emissions of Tier 5 legislation. To gain best performance out of aftertreatment system with close-coupled SCR in all conditions, attention must be paid on temperature control and amount of upstream thermal mass, accurate controlling of urea dosing, combination and layout of used substrates and flow velocity and ammonia uniformity levels. As soon as Tier 5 legislation is finalized, it must be ensured that also levels of secondary emissions are reached in addition to NO<sub>x</sub>-emissions.

---

Keywords: close-coupled SCR, emissions of diesel engine, emission regulations, non-road mobile machinery NRMM, SCR-technology, Tier 5 regulations, twin-SCR

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	9
2	PÄÄSTÖLAINSAÄDÄNTÖ JA DIESELMOOTTORIN PAKOKAASUPÄÄSTÖT .....	11
2.1	Non-road-päästölainsäädäntö ja sen kehitys.....	11
2.1.1	Tier 5 -lainsäädäntö .....	13
2.1.2	Päästömittaussyklit .....	14
2.2	Päästöjen syntyminen dieselmoottorissa.....	15
2.2.1	NO <sub>x</sub> -päästöjen syntymekanismit polttomoottorissa .....	16
2.2.2	NO <sub>x</sub> -päästömekanismeihin vaikuttaminen.....	17
2.2.3	N <sub>2</sub> O-päästöjen syntymekanismit .....	18
2.3	Pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmät.....	18
2.3.1	Hapetuskatalysaattori .....	19
2.3.2	Hiukkassuodatin.....	20
2.3.3	SCR-teknologia.....	21
2.3.4	ASC käyttö NH <sub>3</sub> -päästöjenhallinnassa .....	25
2.3.5	Komponenttien järjestyksen merkitys jälkikäsittelylaitteistossa .....	26
2.4	Päästöjen mittaustekniikat laboratoriossa .....	27
3	TUTKIMUSONGELMA .....	29
3.1	SCR-järjestelmän käyttölämpötilan saavuttamisen nopeuttamiseen vaikuttavat tekijät.....	29
3.2	Close-coupled SCR -konsepti .....	30
3.3	SCR-kennon mitoitus- ja valintaperusteet .....	31
3.3.1	Lämpötilaprofiilin vaikutus SCR-kennokemian valintaan.....	32
3.4	Ureamikserin vaatimukset .....	33
3.5	Twin SCR -järjestelmän kustannusvaikutusten arviointi ja optimointi .....	34
4	TYÖN TOTEUTUS .....	35
4.1	Olemassa olevan tiedon analysointi ja käsittely .....	35
4.1.1	Anturivirheiden ja viiveiden kompensointi .....	35
4.1.2	Testattujen järjestelmien suorituskyvyn arviointi .....	36
4.2	Lämpösimulaatioiden hyödyntäminen termisen massan optimoinnissa .....	37
4.3	Virtaussimulaatioiden hyödyntäminen järjestelmän mitoituksessa ja mikserin suunnittelussa .....	40

5	TULOSTEN ESITTELY.....	41
5.1	Testijärjestelmien esittely .....	41
5.2	Twin-SCR järjestelmän toiminta NRTC-sykleissä Stage V -tason järjestelmään verraten .....	42
5.3	Cc-järjestelmän suorituskyvyn arviointi alphasweep-testeissä .....	45
5.4	Cc-järjestelmän ureasuuttimen ominaisuuksien vaikutus suorituskykyyn.....	47
5.5	Cc-järjestelmän ammoniakkipin seuraukset.....	48
6	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	51
6.1	Jatkotutkimustarpeet .....	52
7	TOIMINTAMALLIN KEHITYS .....	54
7.1	Tavoitteen määrittely ja projektin perustaminen .....	54
7.2	Projektin rajaus.....	55
7.3	Nykytilanteen kuvaus .....	55
7.4	Resursointi ja aikataulutus.....	56
7.5	Työn suoritus.....	56
7.6	Yhteenveto ja projektin päättäminen .....	58
8	POHDINTA.....	60
	LÄHTEET.....	62
	LIITTEET .....	68

AdBlue = kaupan nimi SCR-käytössä olevalle urealiuokselle (DEF, Diesel Exhaust Fluid)

Alpha-arvo =  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$ , urealiuoksen ruiskutuspyynti suhteessa laskennalliseen tavoitearvoon

Alphasweep = Ajetaan tiettyjä kuormituspisteitä eri alpha-arvoilla

ASC = Ammonia Slip Catalyst, "slippikatti", SCR:n perään sijoitettu kenno  $\text{NH}_3$ -päästöjen hallintaan

cc = close-coupled, lähekkäin sijoitettu, moottorin lähelle sijoitettu

CPSI = Cells Per Square Inch, kennojen aukkoluku

DOC = Diesel Oxidation Catalyst, hapetuskatalysaattori

DPF = Diesel Particulate Filter, partikkelisuodatin

EAT = Exhaust Aftertreatment, moottorin pakokaasujen jälkikäsittely

EATS = Exhaust Aftertreatment System, moottorin pakokaasujen jälkikäsittelylaitteisto

EGR = Exhaust Gas Recirculation, pakokaasujen takaisinkierrätys

GWP = Global Warming Potential, ilmakehän lämmityspotentiaali hiilidioksidiin verraten

$\text{H}_2\text{O}$  = vesi

LPI = Late Post Injection, polttoaineen myöhäistetty jälkiruiskutus

$\text{N}_2$  = typpi

$\text{N}_2\text{O}$  = dityppioksidi, ilokaasu

$\text{NH}_3$  = ammoniakki

$\text{NH}_3$  slip = "slippaus", "ammoniakkislippi", SCR-kennon läpi tuleva ammoniakki

NO = typpioksidi, typpimonoksidi

$\text{NO}_2$  = typpidioksidi

$\text{NO}_x$  = yhteisnimitys typpimonoksidille ja typpidioksidille ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ )

$\text{NH}_4\text{NO}_3$  = Ammoniumnitraatti, nestemäinen tai kiinteä AdBluen kertymä, urean kristallisaatio

NRMM = non-road mobile machinery, liikkuvat työkonet

NRTC = non-road transient test cycle, työkonien transientti testisykli

PGM = Platinum group metal, platinaryhmän metalli

SCR = Selective Catalytic Reaction, SCR-katalysaattori

SV = Space Velocity, vaihtuma

O<sub>2</sub> = happi

# 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä selvitetään osana työkoneiden dieselmoottoreiden pakokaasujenpuhdistusjärjestelmää toimivan SCR-järjestelmän mitoitusperiaatteet, jotta voidaan tutkia, voidaanko nykyistä tekniikkaa hyödyntämällä saavuttaa suunnitteilla olevat uudet Tier 5 -tason päästövaatimukset. Yhtenä mahdollisena ratkaisuvaihtoehtona pidetään ns. close-coupled SCR -layoutia, jossa perinteisen pakokaasunpuhdistusjärjestelmän etupuolelle sijoitetaan erillinen SCR-kenno ja ureanruiskutusyksikkö, jolloin etummainen kenno saadaan lämmitettyä käyttölämpötilaan mahdollisimman nopeasti kylmäkäynnistyksen jälkeen. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää

- miten Tier 5 -päästölainsäädäntö vaikuttaa työkoneiden pakokaasun jälkikäsitteilyjärjestelmän toimintavaatimuksiin
- mitkä tekijät vaikuttavat close-coupled SCR etummaisen järjestelmän osan suorituskykyyn, erityisesti NO<sub>x</sub> ja N<sub>2</sub>O -päästöjenhallinnassa
- miten optimoidaan close-coupled-järjestelmän toiminta
- miten tutkimustuloksia voidaan hyödyntää muiden tulevaisuuden päästölainsäädäntöjen vaatimusten täyttämiseksi.

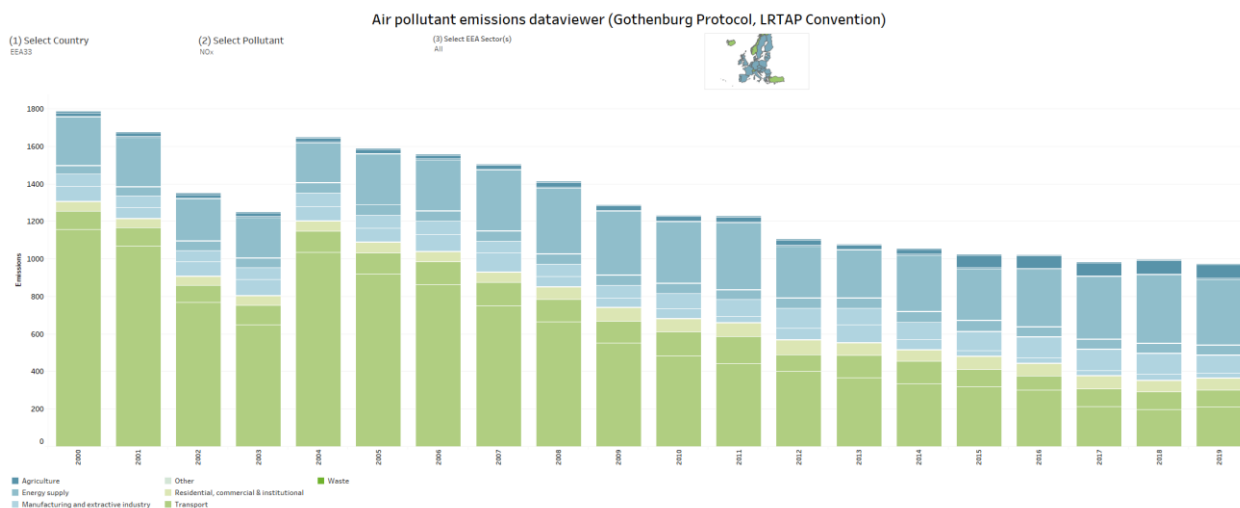
Määrittelyä varten täytyy selvittää ja ymmärtää lainsäädännön asettamat vaatimukset, päästökomponenttien muodostumiseen vaikuttavat tekijät, päästöjen mittausten menetelmät sekä puhdistusjärjestelmän komponenttien toimintaperiaatteet. Mikäli järjestelmällä ei olisi kustannus- tai tilantarverajoitteita, järjestelmän mitoittaminen nollapäästöjä varten olisi huomattavasti helpompaa kuin tilanteessa, jossa suunnitellaan sarjavalmisteiseen tuotteeseen komponenttia, joka ei itsessään tuota käyttäjälle lisäarvoa.

Työ suoritetaan Proventia Oy:n toimeksiannosta osana Business Finlandin rahoittamaa Clean Propulsion Technologies -hanketta. Business Finlandin rahoittamassa CPT-hankekonsertiossa pyritään hankkeessa mukana olevien yritysten ja yliopistojen yhteistyön avulla kehittämään uusia ratkaisuja kiristyvän päästölainsäädännön tavoitteiden saavuttamiseksi. Hanketta johtaa Vaasan yliopisto ja hankkeessa on mukana kuusi tutkimusorganisaatiota ja yhdeksän yritystä. Hankkeen kokonaisbudjetti on noin 15 miljoonaa euroa [1].

Selvitystyön tulosten perusteella laaditaan yksi tai useampi järjestelmä moottorilaboratoriotesteihin, joissa todennetaan järjestelmän toimivuus oikeita päästömittaussyklejä käyttäen. Työn aikana pyritään luomaan kehitystyön toimintamalli, jota noudattamalla jatkossa esitettävien uusien päästö-  
määrysten tai muiden asiakaslähtöisten tavoitteiden täyttämiseen vaadittavat konkreettiset toimenpiteet saadaan järjestelmällisesti tehtyä.

## 2 PÄÄSTÖLAINSÄÄDÄNTÖ JA DIESELMOOTTORIN PAKOKAASUPÄÄSTÖT

Liikenteen päästöt ovat olleet 2000-luvun alkupuolella merkittävin lähde NO<sub>x</sub>-päästöille Euroopassa, mutta kiristyneen lainsäädännön ja tekniikan kehittymisen myötä liikenteen NO<sub>x</sub>-päästöt suhteessa kokonaispäästöihin ovat pienentyneet merkittävästi. Vuonna 2000 liikenteen kokonaispäästöt olivat 1 252 gigagrammaa ja muodostivat 70 % kaikista NO<sub>x</sub>-päästöistä. Non-road-kaluston päästöt muodostivat tuolloin noin 8 % liikenteen päästöistä. Vuonna 2019 liikenteen päästöt olivat pudonneet 300 gigagrammaa, muodostaen enää noin 30 % kokonaispäästöistä. Non-road kaluston osuus liikenteen päästöissä oli kuitenkin kasvanut lähes 30 %:iin [4]. KUVA 1 :ssä esitettyjen tulosten perusteella liikenteen NO<sub>x</sub>-päästöt ovat pienentyneet merkittävästi Euroopassa muihin teollisuuden päästölähteisiin verrattuna. Muista teollisuuden NO<sub>x</sub>-päästöistä vuonna 2019 merkittävimmän osan muodosti energiantuotanto 40 % osuudella kokonaispäästöistä.

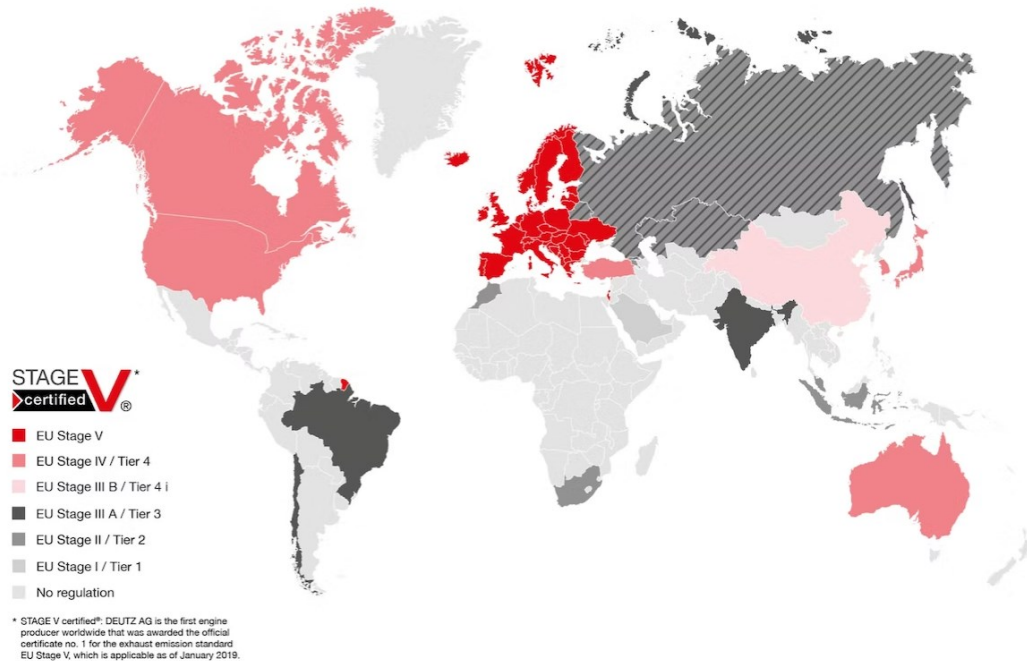


KUVA 1. Euroopan NO<sub>x</sub>-päästöt päästölähteittäin lajiteltuna (3)

### 2.1 Non-road-päästölainsäädäntö ja sen kehitys

Non-road-päästölainsäädännön merkittävimmät luokitukset tulevat eurooppalaisen ja pohjoisamerikkalaisen lainsäädännön määritelmien mukaan. Euroopassa lainsäädännön portaita nimitetään Stage-luokituksiksi, kun taas Pohjois-Amerikan lainsäädännössä portaat on jaettu Tier-luokituksiksi [7]. Tier 1 -päästölainsäädäntö astui voimaan vuonna 1996 ja vastaavasti Stage 1 vuotta myöhemmin ja tällä hetkellä eurooppalaisen lainsäädännön viimeisin luokitus on Stage V, kun taas pohjois-

amerikkalaisen lainsäädännön viimeisin käyttöönotettu luokitus on Tier 4. Kuvassa 2 esitetyn kartan mukaisesti näitä kahta päästöluokitusmenetelmää on käytetty maailmanlaajuisesti myös Pohjois-Amerikan ja Euroopan ulkopuolella.



KUVA 2. Tier 1...5 ja Stage I...V päästöluokitusten käyttö maailmalla [5]

Euroopan ja Pohjois-Amerikan päästölainsäädännöt eroavat käyttöönottoajoiltaan ja päästörajoiltaan hieman toisistaan, mutta pääpiirteittäin lainsäädännöissä luokitellaan päästörajat samalla tavalla teholuokan mukaan ja mitattaville päästökomponenteille ilmoitetaan suurimmat sallitut päästömäärät grammoina tuotettua kilowattituntia kohden määritellyn päästösyklin mukaisen ajosuorituksen aikana [8]. Kuvassa 3 esitetään non-road dieselmootoreiden päästörajat teholuokan ja käyttöönottovuoden mukaan lajiteltuina.

Table 1. Off Road Compression - Ignition Diesel Engine Standards (NMHC + Nox/CO/PM in g/bhp hr.)

hp (kw)	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015+
≥ 50 (37)				N/A <sup>(a)</sup>						5.6 (7.5)				3.5 (4.7)					3.5		
< 75 (55.5)				6.9 (9.2)						3.7 (5.0)				3.7 (5.0)					3.7		
				N/A						0.30 (0.40)				0.22 <sup>(c)</sup>					0.02 <sup>(d)</sup>		
≥ 75 (55.5)				N/A						5.6 (7.5)				3.5 (4.7)				0.14			0.14
< 100 (75)				6.9 (9.2)						3.7 (5.0)				3.7 (5.0)				2.5			0.29
				N/A						0.30 (0.40)				0.3				3.7			3.7
				N/A						0.22 (0.30)				0.22				0.01 <sup>(h-d)</sup>			0.01 <sup>(h)</sup>
≥ 100 (75)			N/A <sup>(a)</sup>	6.9 (9.2)					4.9 (6.6)				3.0(4.0)					0.14			0.14
< 175 (130) <sup>(g)</sup>				N/A					3.7 (5.0)				3.7 (5.0)					2.5			0.29
				N/A					0.22 (0.30)				0.22					3.7			3.7
				N/A					0.22 (0.30)				0.22					0.01 <sup>(h-d)</sup>			0.01 <sup>(h)</sup>
≥ 175 (130)		1.0 (1.3) <sup>(b)</sup>							4.9 (6.6)				3.0 (4.0)				0.14				0.14
< 300 (225) <sup>(g)</sup>		6.9 (9.2)							2.6 (3.5)				2.6 (3.5)				1.5				0.3
		8.5 (11.4)							0.15 (0.20)				0.15 <sup>(d)</sup>				2.6				2.6
		0.40 (0.54)															0.015 <sup>(h-d)</sup>				0.01 <sup>(h)</sup>
≥ 300 (225)		1.0 (1.3) <sup>(b)</sup>							4.8 (6.4)				3.0 (4.0)				0.14				0.14
< 600 (450) <sup>(g)</sup>		6.9 (9.2)							2.6 (3.5)				2.6 (3.5)				1.5				0.3
		8.5 (11.4)							0.15 (0.20)				0.15 <sup>(d)</sup>				2.6				2.6
		0.40 (0.54)															0.015 <sup>(h-d)</sup>				0.01 <sup>(h)</sup>
≥ 600 (450)		1.0 (1.3) <sup>(b)</sup>							4.8 (6.4)				3.0 (4.0)				0.14				0.14
≤ 750 (560) <sup>(g)</sup>		6.9 (9.2)							2.6 (3.5)				2.6 (3.5)				1.5				0.3
		8.5 (11.4)							0.15 (0.20)				0.15 <sup>(d)</sup>				2.6				2.6
		0.40 (0.54)															0.015 <sup>(h-d)</sup>				0.01 <sup>(h)</sup>
> 750 (560) <sup>(g)</sup>						1.0 (1.3) <sup>(b)</sup>							4.8 (6.4)				0.3				0.14
						6.9 (9.2)							2.6 (3.5)				2.6				2.6
						8.5 (11.4)							0.15 (0.20)				0.07 <sup>(b)</sup>				0.03 <sup>(b)</sup>
						0.40 (0.54)											0.07 <sup>(b)</sup>				0.07 <sup>(b)</sup>
≥ 750	Generators					1.0 (1.3) <sup>(b)</sup>							4.8 (6.4)				0.3				0.14
≤ 1207						6.9 (9.2)							2.6 (3.5)				2.6				0.5
						8.5 (11.4)							0.15 (0.20)				2.6				2.6
						0.40 (0.54)											0.07 <sup>(b)</sup>				0.02 <sup>(b)</sup>
> 1207	Generators					1.0 (1.3) <sup>(b)</sup>							4.8 (6.4)				0.3				0.14
						6.9 (9.2)							2.6 (3.5)				0.5				0.5
						8.5 (11.4)							0.15 (0.20)				2.6				2.6
						0.40 (0.54)											0.07 <sup>(b)</sup>				0.02 <sup>(b)</sup>

- a. The PM standard for hand-start, air cooled, direct injection engines below 6 bhp may be delayed until 2010 and be set at 0.45 g/bhp-hr.  
b. Standards given are NMHC/NOx/CO/PM in g/bhp-hr.  
c. Engine families in the power category may alternately meet Tier 3 PM standards (0.3 g/bhp-hr) from 2008-2011 in exchange for introducing final PM standards in 2012.  
d. The implementation schedule shown is the three-year alternate Nox approach. Other schedules are available.  
e. Certain manufacturers have agreed to comply with these standards by 2005.  
Note: This chart was converted into bhp units based on the chart at <http://www.arb.ca.gov/msprog/offroad/offroad.htm> 2/7/06.

■	Tier 1	■	Interim Tier 4
■	Tier 2	■	Final Tier 4
■	Tier 3		

### KUVA 3. Työkonemoottorien jaottelu Tier-luokituksiin valmistusvuoden ja moottorin tehon perusteella

#### 2.1.1 Tier 5 -lainsäädäntö

Kalifornian osavaltion lainsäädännöstä vastaava California Air Resources Board (CARB) on esittänyt, että uusi Tier 5 -lainsäädäntö astuisi voimaan vuoden 2028 alusta alkaen. Yhdysvaltain ympäristösuojeluvirasto EPA ei ole ollut toistaiseksi ottanut kantaa Tier 5 -määrittelyyn, joten tässä tutkimuksessa viitataan myöhemmin CARB:n Tier 5 -esitykseen, ellei toisin mainita. Esityksen mukaan suunnitteilla on nykyisen NO<sub>x</sub>-tason leikkaus 90 % pienemmäksi ja hiukkaspäästöjen leikkaus 75 % pienemmäksi nykyiseen Tier 4F -tasoon verraten. Valtaosa työkoneista osuu luokkaan Tier 4F -jaottelussa teholuokkiin 130-560 kW, jolloin Tier 5 -päästölainsäädännön päästörajat voisi näyttää seuraavanlaisilta:

- NMHC: 0,019 g/kWh
- NO<sub>x</sub>: 0,04 g/kWh
- CO: 0,35 g/kWh
- PM: 0,005 g/kWh. [2]

Ehdotettujen primääripäästörajojen lisäksi kuvassa 4 esitettyjen kasvihuonekaasujen päästörajojen määrittelyistä suunnitellaan ensimmäistä kertaa osaksi non-road-dieselmoottorien lainsäädäntöä.

CONCEPTUAL TIER 5 TAILPIPE GHG STANDARDS (FULL USEFUL LIFE)					
POLLUTANT	POWER CATEGORIES				
	kW < 19 (g/kW-hr)	19 ≤ kW < 56 (g/kW-hr)	56 ≤ kW < 130 (g/kW-hr)	130 ≤ kW ≤ 560 (g/kW-hr)	kW > 560 (g/kW-hr)
CO <sub>2</sub> Reducing	n/a	n/a	700 to 720 5 to 8.6% below Tier4F	660 to 680 5 to 8.6% below Tier4F	n/a
CO <sub>2</sub> Capping	n/a	840	n/a	n/a	700
N <sub>2</sub> O Capping	n/a	0.120	0.120	0.120	0.120
CH <sub>4</sub> Capping	n/a	0.010-0.017	0.010-0.017	0.010-0.017	0.010-0.017

KUVA 4. Elokuussa 2022 CARB:n julkaisema ehdotus työkoneiden kasvihuonekaasupäästöjen leikkaukseen [3]

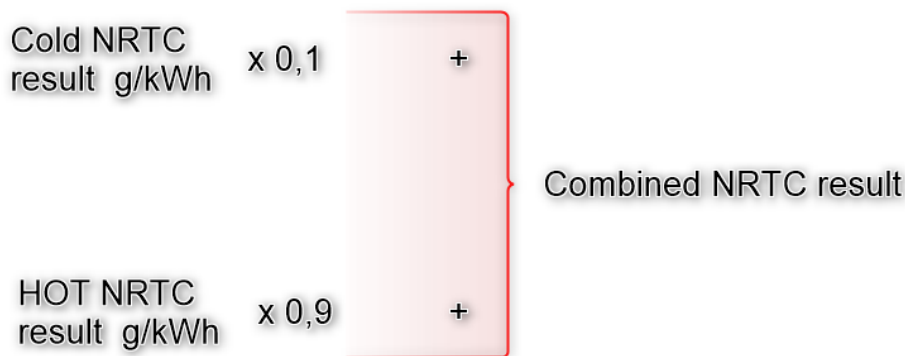
Päästömääräysten kiristymisen lisäksi Tier 5 -lainsäädännön määrittelyssä tutkitaan tieliikennepuolella jo normiksi muodostuneen käytönaikaisen valvonnan (OBD) ja uuden matalakuormitteista ajosuoritetta kuvaavan testisyklin käyttöönottoa työkoneemootoreissa [2].

## 2.1.2 Päästömittaussyklit

Sovellettavat päästörajat määräytyvät siis maantieteellisen alueen, käyttöympäristön, moottoritehon ja valmistusvuoden mukaan. Käyttöympäristöllä tarkoitetaan sitä, onko ajoneuvo työkone- vai tieliikennekäytössä. Päästörajojen toteutuminen mitataan sovellettavan päästöluokituksen perusteella valittavasta päästösyklistä, jolla pyritään simuloimaan todellista ajosuoritetta. Päästöjen syntyminen on voimakkaasti riippuvainen ajosuoritteesta, joten standardoituja testisyklejä tarvitaan vertailukelpoisten tulosten saavuttamiseksi.

Tämän opinnäytetyön yhteydessä testilaitteistot on testattu NRTC-testisyklin mukaan. NRTC-testisykli ajetaan moottoridynamometrissä ja sen kesto on 1 238 sekuntia. Testisyklissä määritellään aikariippuvaisesti moottorin pyörintänopeus ja vääntömomentti prosentteina testattavan moottorin maksimiarvoihin verraten. NRTC-syklissä mittaussuorite jaetaan kahteen jaksoon tekemällä ensin

kylmän jakson mittaus heti moottorin kylmäkäynnistyksen jälkeen, jonka jälkeen sammutetaan moottori 20 minuutiksi (soak period) ja toistetaan mittaussuorite pakolinjan ja moottorin ollessa vielä lämmin. Jälkimmäistä mittaussjaksoa nimitetään kuumaksi mittaussjaksoksi. Kokonaispäästöt lasketaan kuvassa 5 esitettyjen painokertoimien avulla siten, että kylmän mittaussjakson ja kuuman mittaussjakson tulokset lasketaan yhteen. Euroopassa kylmän mittaussjakson painokerroin kokonaistuloksessa on 10 % ja Yhdysvalloissa 5 %. Keskimääräinen tehonkäyttö NRTC-syklissä on noin 37 % prosenttia [9].



*KUVA 5. Esimerkki yhdistetyn NRTC tuloksen laskennasta käyttäen EU:n 10 % kylmän mittaussjakson painokerrointa*

Tier 5 -päästölainsäädännössä on esitetty käytettäväksi uutta matalaa kuormitusastetta simuloivaa LLAC-päästömittaussykliä, jonka kesto on 4337 sekuntia ja keskimääräinen käytetty teho on vain 15 % [10]. Tämä asettaa päästöjenhallintajärjestelmät haasteellisempaan tilanteeseen, sillä matalampi kuormitusaste johtaa matalampiin pakokaasun lämpötiloihin, joka tunnetusti vaikeuttaa päästöjenhallintajärjestelmien toimintaa.

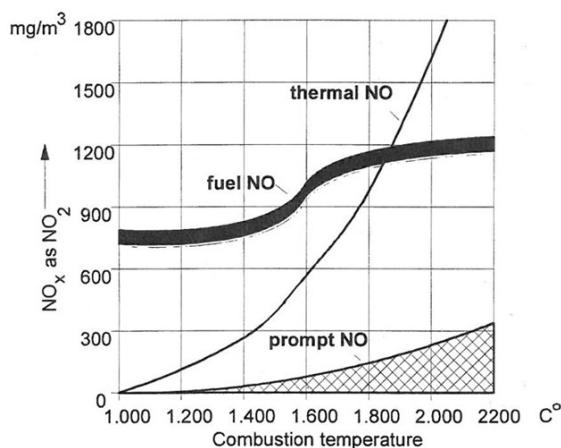
## 2.2 Päästöjen syntyminen dieselmoottorissa

Dieselmoottorin haitalliset pakokaasupäästöt koostuvat lähinnä hiilivedyistä, hiilidioksidista, typen oksideista ja nokipartikkeleista. Lisäksi pakokaasussa voi olla huonosta polttoainelaadusta tai voiteluaineista lähtöisin olevia rikkidioksideja. Typpioksidi NO ja typpidioksidi NO<sub>2</sub> ilmoitetaan usein yhdistettynä NO<sub>x</sub>-päästöiksi. Palamattomia hiilivetyjen ja nokipartikkelien syntyminen dieselmoot-

torissa johtuu pääosin epätäydellisestä palamisesta. Palamisprosessi on hyvin monimutkainen tapahtuma, johon vaikuttavat moottorissa useat tekijät, kuten imuilman lämpötila, ruiskutetun polttoaineen määrä ja ajoitus, sekä moottorin imuilman massavirta ja ahtopaine. Epätäydellinen palaminen voi johtua esimerkiksi polttoaineen huonosta sekoittumisesta nopean kuormitusmuutoksen aikana tai tilanteesta, jolloin moottorin puristustahdin aikana osa ilman ja polttoaineen seoksesta puristuu männän ja sylinterin väliin jäävään rakoön, sekä männän ja männänrenkaiden väliin. Kaapeissa raoissa sekoitussuhde jää puutteelliseksi, eikä palaminen tapahdu täydellisesti tai palamista ei tapahdu ollenkaan. Myöhempien työkiertojen aikana palamattomat kaasut vapautuvat pakokaasun sekaan nostaten palamattomien hiilivetyjen ja partikkelipäästöjen määrää pakokaasussa. [6, s. 567–570]

### 2.2.1 NO<sub>x</sub>-päästöjen syntymekanismit polttomoottorissa

Valtaosa NO<sub>x</sub>-päästöistä muodostuu typpioksidista, joka on peräisin typpeä sisältävästä imuilmasta. Dieselmoottorin päästöistä NO<sub>2</sub>:n osuus kaikista NO<sub>x</sub>-päästöistä voi olla suurimmillaan jopa 30 %, mutta sen tyypillinen käytönaikainen vaihteluväli on suuruusluokkaa 5–15 % ja sen suhde kokonaispäästöihin on voimakkaasti riippuvainen sylinterin palamispaineesta [6, s. 573-577]. Yleisesti typen oksidien muodostumiseen vaikuttaa merkittävästi moottorin palamislämpötila siten, että palamislämpötilan noustessa typen oksidien muodostumiseen vaikuttavan kemiallisen reaktion nopeusvakiot kasvavat merkittävästi, lisäten NO<sub>x</sub>-päästöjen määrää [6, s. 573]. Moottorin NO<sub>x</sub>-päästöt aiheutuvat kolmen eri syntymekanismin kautta, joita ovat thermal NO<sub>x</sub>, fuel NO<sub>x</sub> ja prompt NO<sub>x</sub> ja niiden riippuvuus palamislämpötilasta esitetään alla olevassa kuvassa.



KUVA 6. Lämpötilan vaikutus NO<sub>x</sub>-syntymekanismeihin [15]

Thermal NO muodostuu imuilman sisältämän typen palamisreaktion seurauksena. Typpimolekyylien hajottamiseen tarvitaan kuitenkin huomattavan korkeita lämpötiloja, mistä johtuen reaktio on voimakkaasti lämpötilariippuvainen ja alkaa tapahtua merkittävässä määrin vasta +1300 °C lämpötilaa korkeammissa palolämpötiloissa. Mentäessä yli 1800 asteen lämpötiloihin thermal NO<sub>x</sub> muodostaa valtaosan moottorin NO<sub>x</sub>-päästöistä. Fuel NO<sub>x</sub> puolestaan muodostuu polttoaineeseen sidotun typen palamisesta, mistä johtuen käytettävän polttoaineen typpipitoisuus on merkittävä tekijä. Prompt NO<sub>x</sub> syntyy palotapahtumassa liekkirintaman etureunassa ja sitä esiintyy pääosin rikkaalla polttoaineseoksella [15].

### 2.2.2 NO<sub>x</sub>-päästömekanismeihin vaikuttaminen

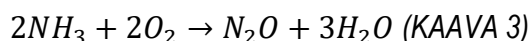
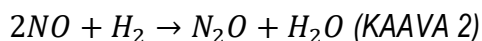
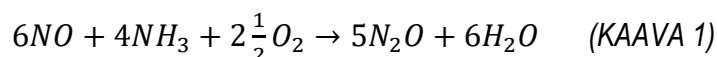
Typeä sisältämättömiä polttoaineita käyttämällä ja oikealla ilma-polttoaineseoksella saadaan siis tehokkaasti vaikutettua fuel NO<sub>x</sub> ja prompt NO<sub>x</sub> -syntymekanismeihin. Thermal NO<sub>x</sub> -syntymekanismiin voitaisiin vaikuttaa palamislämpötilaa laskemalla, mutta korkea palamislämpötila on seurausta moottorin litratehon ja puristussuhteen kasvattamisesta.

Palamislämpötilan huippuarvoa voidaan tehokkaasti alentaa EGR-teknologiaa hyödyntämällä, jonka toimintaperiaatteena on johtaa osa pakokaasuista takaisin imusarjaan ja sitä kautta palotilaan. EGR:n käytön avulla saadaan seoksen happipitoisuutta pienentämällä hidastettua palamisreaktiota ja laskettua palamisprosessin aikaista huippulämpötilaa [16 s.494]. Lisäksi pakokaasun sisältämien partikkelien ansiosta pakokaasuun sitoutuu enemmän energiaa kuin puhtaaseen imuilmaan, mikä myös madaltaa huippulämpötilaa. EGR tuo kuitenkin hyötyjen lisäksi mukanaan haittapuolia. Ulkoisia haittoja ovat ohjauksen monimutkaistuminen sekä tilantarpeen ja kustannusten valmistuskustannusten kasvu. Sisäisinä haittoina on polttoaineen kulutuksen lievä kasvu ja savutuksen merkittävä lisääntyminen, jos EGR käyttöä kasvatetaan liian suureksi [16 s.494]. Lisäksi EGR:n haittapuoliksi voidaan lukea moottorien ikääntyessä ja osien kuluessa pakokaasun kautta imusarjaan päätyvien polttoaine- ja öljyjäämien määrän kasvu, mikä aiheuttaa öljykarstan kertymistä imusarjaan ja imukanavien tukkeentumista.

### 2.2.3 N<sub>2</sub>O-päästöjen syntymekanismit

N<sub>2</sub>O-päästöihin, eli kansankielellä ilokaasun syntymiseen on alettu kiinnittämään huomioita 2000-luvun jälkeen modernien jälkikäsitteilyjärjestelmien yleistyessä. N<sub>2</sub>O luokitellaan kasvihuonekaasuksi, jonka ilmakehän lämmityspotentiaali hiilidioksidiin verraten on noin 300-kertainen ja sen vaikutusaika ilmakehässä on laskentatavasta riippuen noin 120–140 vuotta. Palamistapahtuman aikana palotilassa syntyy N<sub>2</sub>O:ta, mutta liekkirintaman edetessä N<sub>2</sub>O poistuu kaasusta palamisreaktioiden yhteydessä, ja moottorin tuottamat N<sub>2</sub>O-päästöt jäävät mataliksi. [17]

N<sub>2</sub>O-päästörajoja ei ole ennen Tier 5 -tason ehdotusta määritelty työkoneille, mikä on mahdollisesti vaikuttanut siihen, ettei jälkikäsitteilyjärjestelmän aiheuttamiin N<sub>2</sub>O-päästöihin ole kiinnitetty niin merkittävästi huomiota. NO<sub>x</sub>- ja PM-päästöjen hallinnan takia jälkikäsitteilyjärjestelmiin on lisätty platinaa sisältäviä komponentteja ja tutkimuksissa on havaittu, että platina mahdollistaa N<sub>2</sub>O:n muodostumiseen tarvittavat reaktiot jälkikäsitteilyjärjestelmän yhteydessä sopivissa olosuhteissa. Reaktioiden määrät riippuvat kennotyypistä, lämpötilasta ja vallitsevasta kennon space velocity -arvosta. SV-arvon määräytyminen esitellään kappaleessa 3.3. N<sub>2</sub>O:n muodostumisen mahdollistavat reaktiot ovat



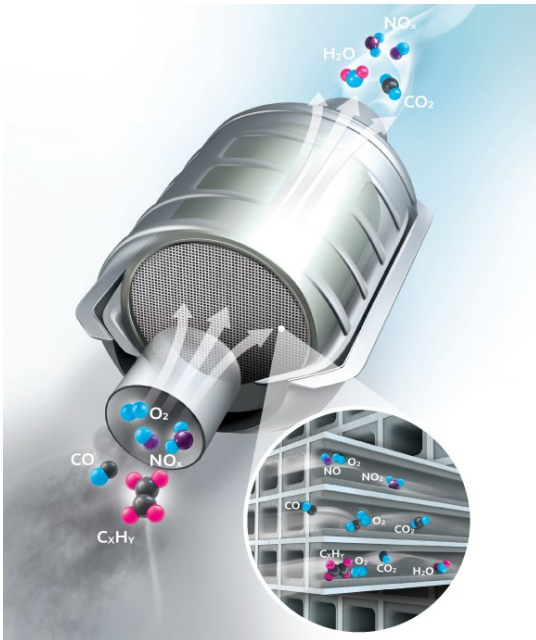
joissa NO on typpimonoksidi, NH<sub>3</sub> on ammoniakki, NO on typpimonoksidi, H<sub>2</sub>O on vesi, N<sub>2</sub>O on dityppioksidi eli ilokaasu, H<sub>2</sub> on vety ja O<sub>2</sub> on happi. [17]. Jälkikäsitteilyjärjestelmän eri komponenttien vaikutuksia N<sub>2</sub>O:n muodostumiseen esitellään tarkemmin kappaleessa 2.3.

## 2.3 Pakokaasujen jälkikäsitteilyjärjestelmät

Terveys- ja ilmastohaittojen pienentämiseksi dieselmootoreiden pakolinjaan on kehitetty jälkikäsitteilyjärjestelmiä, joilla voidaan pienentää pakokaasupäästöjä merkittävästi muutenkin kuin sylinterin sisällä tapahtuvaan palamisprosessiin vaikuttamalla. Jälkikäsitteilyjärjestelmien tavoitteena on leikata päästötasot kulloinkin kyseessä olevan lainsäädännön vaatimalle tasolle.

### 2.3.1 Hapetuskatalysaattori

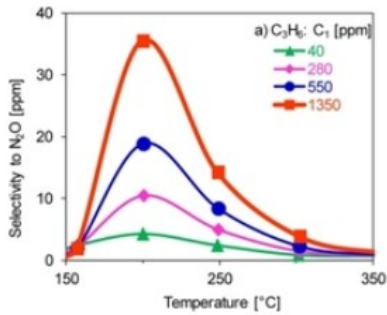
Hapetuskatalysaattori eli DOC (diesel oxidation catalyst) on tyypillisesti ensimmäinen osa jälkikäsitteilyjärjestelmää ja sen tarkoituksena on hapettaa pakokaasussa esiintyvät palamattomat hiilivedyt (HC) ja häkä (NO) vedeksi ja hiilidioksidiksi. Tämän lisäksi hapetuskatalysaattorilla saadaan lisättyä pakokaasun typpidioksidipitoisuutta ( $\text{NO}_2$ ) hapettamalla osa pakokaasun sisältämästä NO:sta, mikä edesauttaa hapetuskatalysaattorin jälkeen sijoitettujen jälkikäsitteilyjärjestelmän komponenttien toimintaa. Kohonnut  $\text{NO}_2/\text{NO}$ -suhde edistää hiukkassuodattimen (DPF) ajonaikaista passiivista regenerointia, sekä mahdollistaa nopean typen oksidien pelkistymisreaktiot SCR-kennoilla [18].  $\text{NO}_2$ -pitoisuus kaasussa ei saisi kuitenkaan ylittää NO-pitoisuutta kaasussa, sillä muuten mahdollistetaan haitallisen  $\text{N}_2\text{O}$ :n muodostumisen SCR-reaktioissa [11]. Alla olevassa kuvassa esitetään tyypilliset hapetuskatalysaattorin reaktiot ja kennomainen, läpivirtaava rakenne.



KUVA 7. Hapetuskatalysaattorin havainnekuva [19]

Hapetuskatalysaattori mahdollistaa myöhäistetyn jälkiriiskutuksen (LPI, late post injection) tai ulkoisen pakosarjaan lisätyn polttoainesuuttimen käyttämisen pakokaasujen lämpötilan nostamiseen DPF:n ja SCR:n toimintakyvyn ylläpitämiseksi. Tarkkaan hallitun jälkiriiskutuksen avulla pakokaasujen hiilivetyttöisyyttä saadaan nostettua ja hiilivetyrikas kaasuseos saa hapetuskatalysaattorilla aikaan eksotermisen reaktion, joka nostaa merkittävästi pakokaasun lämpötilaa [18].

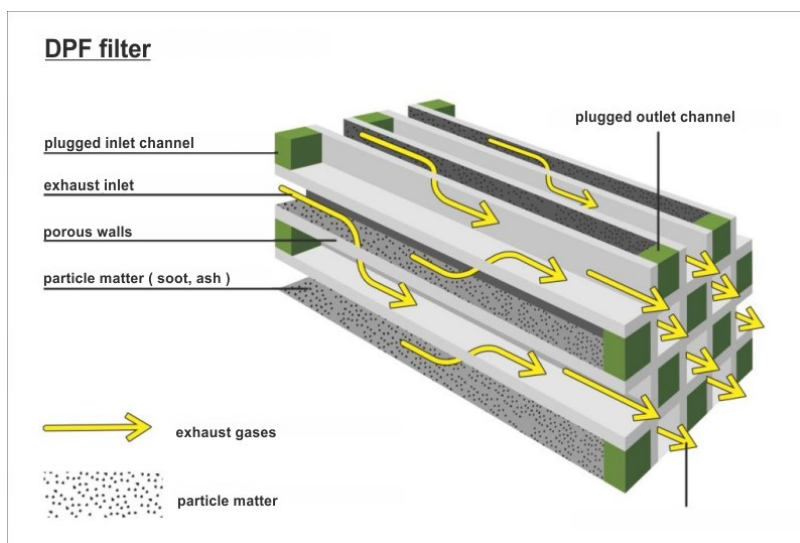
Hapetuskatalysaattorin haittapuoliksi voidaan kuitenkin laskea aiemminkin mainittu  $N_2O$ -syntymekanismien mahdollistaminen.  $N_2O$ :ta voi muodostua hapetuskatalysaattorilla ei-toivottuna sivutuotteena hiilivetyjen hapetusreaktioissa.  $N_2O$ :n voimakas riippuvuus pakokaasun lämpötilasta ja hiilivetytypitoisuudesta esitetään alla olevassa kuvassa. Hiilivetyjen läsnä ollessa  $N_2O$ :n muodostuminen on voimakkainta 150–250°C:een lämpötiloissa. [21]



KUVA 8.  $N_2O$ :n muodostumisen riippuvuus hapetuskatalysaattorilla lämpötilasta ja hiilivetytypitoisuuksista [21]

### 2.3.2 Hiukkassuodatin

Hiukkassuodatin eli DPF (Diesel Particle Filter) koostuu keraamisesta kennorakenteesta, jossa joka toinen kennon solu on tukittu KUVA 9:ssä esitetyllä tavalla toisesta päästä molemmilla pinoilla. Pakokaasu pakotetaan virtaamaan huokoisen seinärakenteen läpi, jolloin partikkelit suodattuvat pakokaasusta ja kertyvät päästä tukittuihin kennon pillimäisiin soluihin. [22]

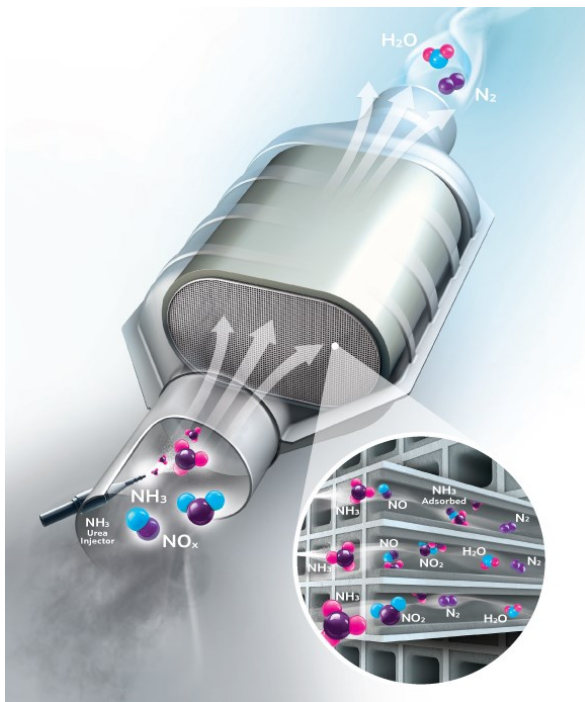


KUVA 9. Hiukkassuodattimen rakennekuva [23]

Hiukkassuodattimen toiminnan kannalta oleellinen osa on regenerointi, jonka tarkoituksena on hapettaa suodattimeen kertynyt noki. Palamattomat partikkelit kerääntyvät tuhkaksi suodattimeen. Tässä opinnäytetyössä DPF ei ole tutkimuksen kohteena, mutta Erkki Holopainen käsittelee aihetta kattavasti diplomityössään [24].

### 2.3.3 SCR-teknologia

SCR-teknologian tarkoituksena on pelkistää pakokaasussa esiintyvät terveydelle haitalliset typen oksidit ( $\text{NO}_x$ ) vaarattomiksi vedeksi ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ja typeksi ( $\text{N}_2$ ) SCR-kennossa ammoniakkin avulla. Ajo-neuvokäytössä ammoniakki lisätään tyypillisesti pakolinjaan moottorin jälkeen ruiskuttamalla pakokaasun sekaan AdBlue-kauppanimellä tunnettua 32,5-prosenttista urea-vesiliuosta, joka höyrystyessään muuttuu vesihöyryksi ja ammoniakiksi. KUVA 10:ssä esitetään SCR-kennon tyypilliset reaktiot ja läpivirtaava kennorakenne.

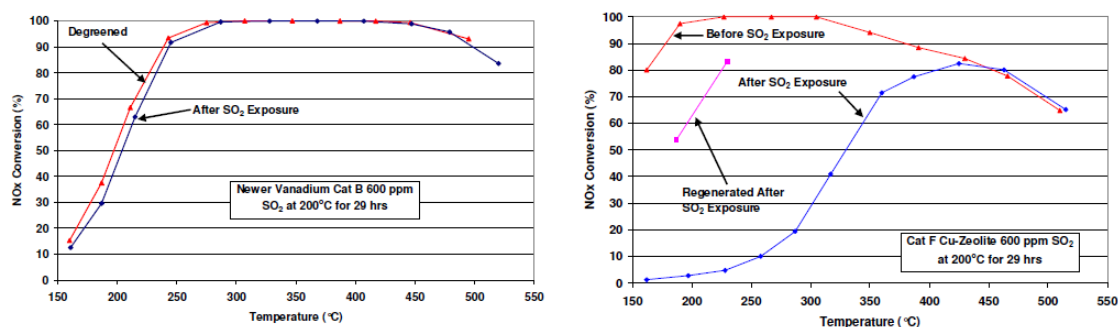


KUVA 10. SCR-katalysaattorin havainnekuva [14]

Höyrystymistä voidaan tehostaa ruiskuttamalla urea-vesiliuos pakolinjaan rakennettuun sekoittimeen (mixer), jonka oikean muotoilun avulla saadaan ruiskusta lähteneet pisarat höyrystymään tehokkaasti ennen, kuin pisarat osuvat rakenteiden seiniin ja näin lisättyä suurinta mahdollista ruiskutusmäärää. Pakokaasun ja ammoniakkin seos pyritään saamaan mahdollisimman tasaiseksi seokseksi, jonka jälkeen seos ohjataan SCR-kennon läpi. SCR-kennolle pyritään muodostamaan

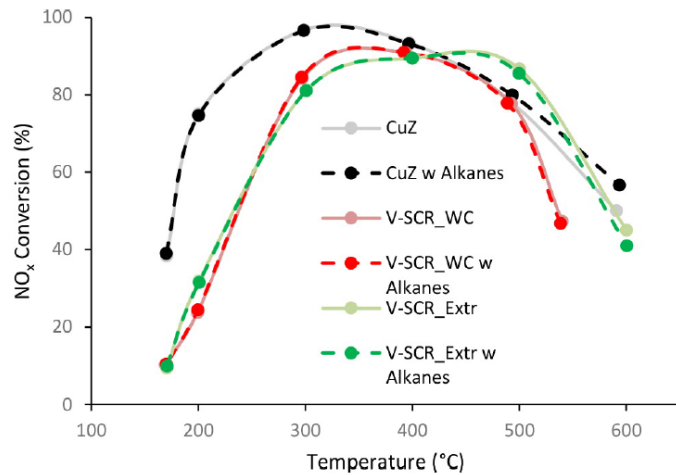
virtausohjureiden avulla mahdollisimman tasainen ammoniakki- ja nopeusjakauma (UI, Uniformity Index) parhaan suorituskyvyn takaamiseksi.

SCR-kenno on läpivirtaava elementti, jonka pinnoituksessa kalliiden jalometallien sijaan käytetään kennotyypistä riippuen kuparia (Cu) tai vanadiinia (V) ja titaania (Ti) tai rautaa (Fe). [13,14]. Laajasti käytettyjen vanadiinipohjaisten V-SCR:ien rinnalle on viime vuosina noussut merkittävään osaan kuparizeoliittipohjaiset Cu-z SCR:t niiden korkeamman lämpötilakeston ja suuremman käyttölämpötilaikkunan ansiosta. Lisäksi vanadiinin käyttöön epäillään liittyvän ympäristöriskejä [25]. Cu-z SCR:ien toimintaa kuitenkin rajoittaa rikkimyrkyttyminen, joka on ongelma erityisesti käytettäessä huonolaatuisia korkearikkisiä polttoaineita. Rikkimyrkytyksen seurauksena Cu-z SCR:n suorituskyky romahtaa, mutta V-SCR:n toimintaan rikillä ei ole kohtuullisina pitoisuuksina niin suurta vaikutusta KUVA 11:ssä esitettyjen havaintojen mukaan [27, s.6]. Cu-z SCR:n desulfatointi yli 500 °C lämpötilassa palauttaa suorituskyvyn kuitenkin alkuperäiselle tasolle ainakin tilanteissa, joissa rikkidioksidipitoisuus ei ole ylittänyt yli 500 ppm pitoisuuksia [30].



KUVA 11. Vanadiini- ja kupari-SCR:n erot suorituskyvyssä rikkialtistumisen seurauksena [27 s.6]

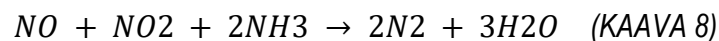
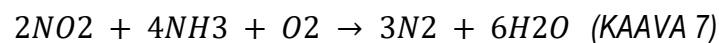
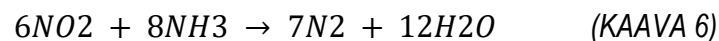
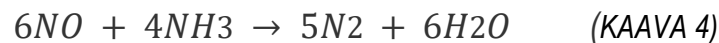
Vuonna 2014 julkaistun tutkimuksen mukaan V-SCR:ien korkein sallittu käyttölämpötila rajoittuu käytettyjen vanadiinin ja volframin höyrystyslämpötilojen mukaan. Ylitettäessä 550 °C:een lämpötilan, alkavat molemmat aineet höyrystymään havaittavissa määrin kennosta ja höyrystyminen kiihtyy lämpötilan noustessa korkeammaksi [28]. V-SCR:n pidempi yhtäjaksoinen altistuminen yli 520 °C lämpötiloille aiheuttaa nopeasti kennon ikääntymisen ja suorituskyvyn romahtamisen [29]. Suuremman käyttölämpötilaikkunan lisäksi Cu-z SCR:illä saavutetaan matalissa lämpötiloissa paremmat NO<sub>x</sub>-alenumat V-SCR:ien sijaan KUVA 12:ssa esitetyllä tavalla.



KUVA 12. Cu-z SCR:n toiminta verrattuna erilaisiin V-SCR:iin [26, s.6]

Kennojen kemiasta riippuen ammoniakkin varastointikykyissä on myös eroja: Cu-z SCR pystyy varastoimaan ammoniakkia paremmin kuin V-SCR. Tästä johtuen V-SCR reagoi Cu-z SCR:ää nopeammin ammoniakkipitoisuuden laskuun. [31]

Tällä hetkellä käytetyistä SCR:stä valtaosa on ekstruudamalla valmistettuja keraamikennoja ja vain marginaalinen osa valmistetaan pinnoitetusta metallikennosta. SCR-kennolla tapahtuu lukuisia kemiallisia reaktioita, joista NO<sub>x</sub>-konversioiden kannalta merkittävimmät ovat



joissa NO on typpimonoksidi, NH<sub>3</sub> on ammoniakki, N<sub>2</sub> on typpi, H<sub>2</sub>O on vesi, NO<sub>2</sub> on typpidioksidi ja O<sub>2</sub> on happi.

Kaava 5 kuvaa useimmiten esiintyvän reaktion ”standard SCR reaction” ja puolestaan kaavat 6–8 kuvaavat nopeita reaktiota ”fast SCR reaction”, joiden toimintaan vaadittavaa typpidioksidia voidaan tarkoituksellisesti lisätä pakokaasuun esimerkiksi SCR-laitteiston etupuolelle sijoitetulla hapetuskatalysaattorilla. Kaava 8 kuvaa erittäin nopeaa, erityisesti matalissa lämpötiloissa merkittävästi vaikuttavaa pelkistymisreaktiota. [11].

Ruiskutettavan urealiuoksen määrän laskentaa varten tarvitaan pakokaasun massavirta, lämpötila ja  $\text{NO}_x$ -pitoisuus. Lämpötila ja  $\text{NO}_x$ -pitoisuus saadaan mitattua suoraan pakolinjaan sijoitetuista antureista, mutta pakokaasun massavirta lasketaan mittaamalla moottorin imuilman massavirtaa ja lisäämällä siihen ruiskutetun polttoaineen massavirta.

Urealiuoksen ruiskutusmäärää kuvataan ruiskutuspyynnillä, joka lasketaan kertomalla laskennallinen vaadittava ruiskutusmäärä alpha-arvolla. Alpha-arvolla kuvataan alenematavoitetta ja 1:n arvo tarkoittaa sitä, että pakolinjaan ruiskutetaan yhtä monta ammoniakkimolekyyliä kuin sisään tulevan pakokaasun  $\text{NO}_x$ -pitoisuuden täydellinen pelkistäminen vaatisi. Yli 1:n arvoista puhutaan ylikuiskutuksesta ja vastaavasti alle 1:n arvot ovat aliruiskutusta. Ideaalitalanteessa 1:n alpha-arvon pitäisi tuottaa 100 %  $\text{NO}_x$ -konversio, mutta todellisuudessa nopeasti muuttuvat mitattavat parametrit ja SCR-katalyytin ja ureamikserin suorituskyvystä riippuvat rajoitteet pakottavat ohjauksen tapahtumaan vaihtelevalla alpha-arvolla [35].

SCR:n päätoiminen tehtävä on  $\text{NO}_x$ -päästöjen leikkaus, mutta tutkimusten mukaan hapetuskatalysaattorissa tapahtuvien reaktioiden tavoin SCR-reaktioiden sivutuotteina voi syntyä haitallista  $\text{N}_2\text{O}$ :ta kahta reittiä. Ensimmäinen reitti on pinnoille muodostuneen ammoniumnitraatti  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ :n ja sen kaltaisten komponenttien hajoamisesta johtuvien reaktioiden kautta ja toinen reitti on  $\text{NH}_3$ :n hapettumisesta aiheutuvan reaktion kautta SCR:llä. [11; 21, s.4–5].

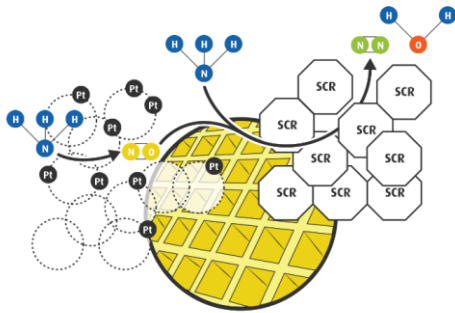
Tutkimusten mukaan ainakin  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  -suhde vaikuttaa  $\text{N}_2\text{O}$ :n syntyyn SCR:llä siten, että alle 0,5 suhteella  $\text{N}_2\text{O}$  muodostuminen on maltillista, mutta suhteen noustessa 0,5:sta korkeammaksi alkaa  $\text{NH}_3$ :n läsnä ollessa  $\text{N}_2\text{O}$ :ta muodostua merkittävässä määrin fast-SCR reaktioista ylijäävän  $\text{NO}_2$ :n takia. Kuitenkin jo alle 0,5  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  -suhteella kuparin tai vanadiinin käyttö kennossa edesauttaa  $\text{N}_2\text{O}$ :n muodostumista, kuparin alkaessa vaikuttaa merkittävästi lämpötilan noustessa yli 375 °C:een. Vanadiinin vaikutukset  $\text{N}_2\text{O}$ :n muodostumisessa alkavat näkyä vasta lämpötilan noustessa yli 450 °C:een. Niukalla kuparilatauksella varustettu Cu-z SCR:n tai Fe-z SCR:n selektiivisyys

$N_2O$ :n muodostamiseen on vähäistä. Kuitenkin  $NO_2/NO_x$  -suhteen noustessa yli 0,5:n alkaa rautapohjaisillakin kennoilla muodostua merkittäviä määriä  $N_2O$ :ta jo matalissa lämpötiloissa. [21, s.5]

### 2.3.4 ASC käyttö $NH_3$ -päästöjenhallinnassa

100 %  $NO_x$ -konversio voitaisiin saavuttaa ideaalitulanteessa, jossa täysin homogeenisen seoksen  $NH_3/NO_x$ -suhde olisi 1 ja ammoniakki- ja nopeusjakauma olisivat täysin tasaiset, pakokaasun lämpötila olisi riittävä sekä valittu SCR-kenno soveltuisi ominaisuuksiltaan käyttöolosuhteisiin. Käytännössä täydellinen pakokaasujen sekoittuminen kaikissa, nopeasti muuttuvissa tilanteissa on täysin mahdotonta ja tämän lisäksi korkeiden konversiotavoitteiden saavuttaminen voi vaatia ns. yliruis- kutusta äkillisissä kuormituspiikeissä. Huonosta sekoittumisesta tai yliruis- kutuksesta johtuen osa ammoniakista ( $NH_3$ ) voi päästä SCR-kennon läpi aiheuttaen ei-toivottuja ammoniakkipäästöjä.

$NH_3$  -päästöjenhallintaa varten on kehitetty erillinen Ammonia Slip Catalyst (ASC), joka SCR:stä poiketen sisältää jalometalleja, kuten palladiumia ja platinaa. Lisäämällä ASC SCR:n perään pysytään nopeasti eliminoimaan suuria määriä ammoniakkiä jalometallien tehostamalla tavallisilla SCR-reaktioilla KUVA 13:ssa esitetyllä tavalla ja samalla parantamaan  $NO_x$ -konversiosuhdetta [12].

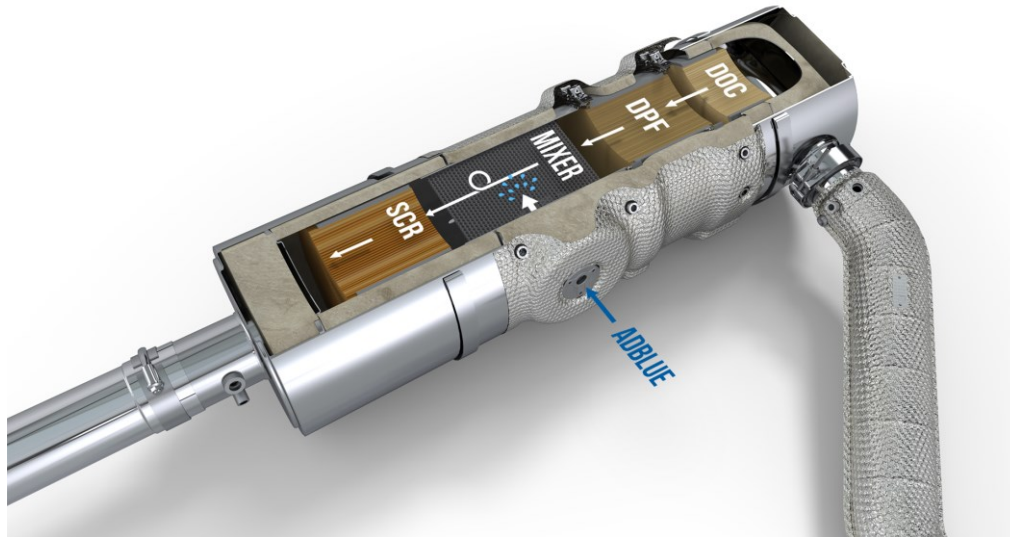


KUVA 13. ASC-reaktiot [12]

ASC:n käytön haittapuolena on jalometallien aiheuttama kustannusten kasvu ja lisäksi ASC:n sisältämät jalometallit edesauttavat kappaleessa 2.2.3 esitellyn tavan mukaan  $N_2O$ -päästöjen synty- mistä. [21].

### 2.3.5 Komponenttien järjestyksen merkitys jälkikäsittelylaitteistossa

KUVA 14:ssa esitetään Stage V -tason järjestelmä, jossa DOC:n, DPF:n, mikserin ja SCR:n järjestyks määräytyy kuvan mukaiseksi jokaisen komponentin oikean toiminnan takaamiseksi.



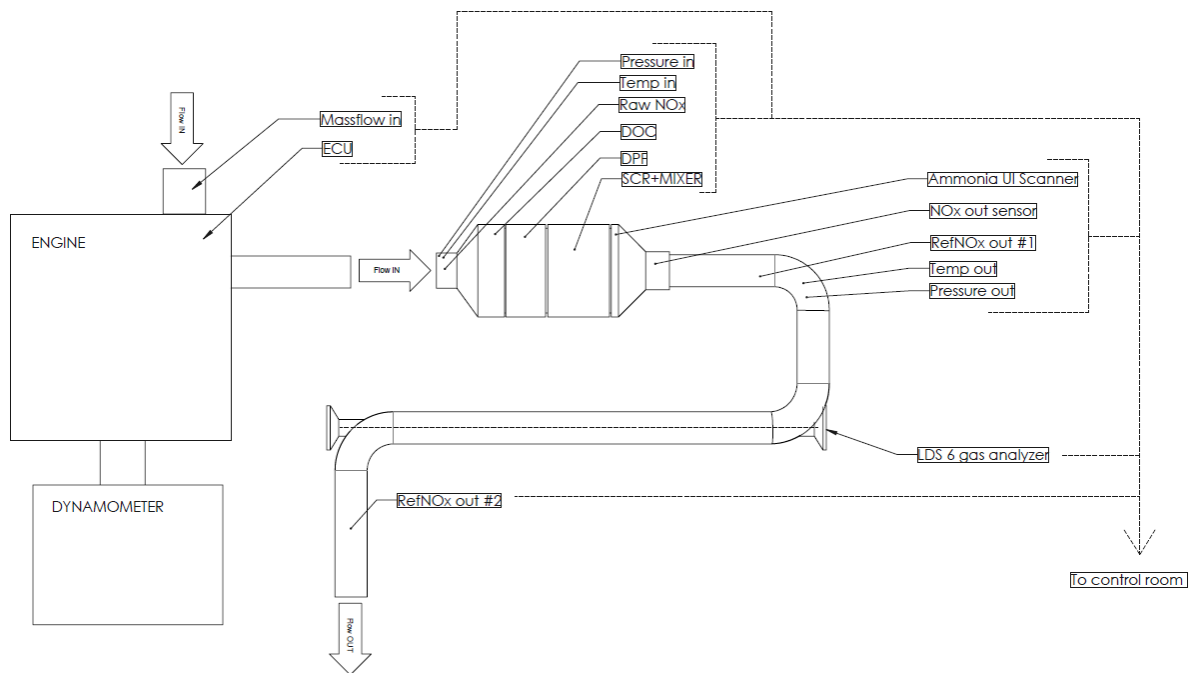
KUVA 14. Stage 5 -tason EAT-järjestelmä.

50 %:n  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -suhteella SCR:n toiminta on tehokkaimmillaan nopeiden SCR-reaktioiden ansiosta ja koska moottorin raakapäästöissä suhde on merkittävästi pienempi, tulee SCR:n sijaita hapetuskatalysaattorin jälkeen pakokaasuvirrassa. Lisäksi hapetuskatalysaattorin ansiosta kohonnut  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -suhde edesauttaa hiukkassuodattimen passiivista regenerointia ja hapetuskatalysaattori mahdollistaa aktiivisen regeneroinnin tarvitseman lämpötilannoston esimerkiksi myöhäistetyn polttoaineen ruiskutuksen avulla. Näistä syistä johtuen myös hiukkassuodatinkin on hyvä sijoittaa hapetuskatalysaattorin jälkeen.

SCR:n lämpenemisen nopeuttamiseksi suotuisampaa olisi sijoittaa DOC ja SCR ennen hiukkassuodatinta. Hiukkassuodattimen passiivinen regenerointi on mahdollista lämpötilan noustessa yli 275 asteen, mutta  $\text{NO}_x/\text{PM}$ -suhde täytyy kuitenkin olla riittävän korkea, jopa 20:1–25:1 [22]. Normaalikäytössä  $\text{NO}_x$ -konversiotavoitteen ollessa yli 99 %, ei SCR:n jättöpuolelle jäisi riittävästi noen hapetusreaktion tarvittavaa  $\text{NO}_2$ :sta, minkä seurauksena hiukkassuodattimen passiivista regenerointia ei tapahtuisi ollenkaan. Jos hiukkassuodattimen regeneroinnissa tulisi jatkuvasti turvautua käytönaikaiseen aktiiviseen regenerointiin esimerkiksi myöhäistämällä polttoaineen ruiskutusta, lisäisi se polttoaineenkulutusta ja  $\text{CO}_2$ -päästöjä.

## 2.4 Päästöjen mittaustekniikat laboratoriossa

Laboratorio-olosuhteissa päästömittauksia voidaan suorittaa dynamometriin kiinnitettyllä moottorilla. Moottoria ohjataan ja kuormitetaan halutulla tavalla riippuen siitä, mitä kyseisen testin aikana halutaan moottorista mitata. Mittausdata luetaan kaikista moottoriin, dynamometriin ja pakolinjaan liitettyistä antureista ja tallennetaan aikaleimattuun taulukkoon. Alla olevassa kuvassa esitetään yksinkertaistettu näkymä tyypillisestä mittausjärjestelystä ja antureiden sijoittelusta moottorilaboratoriossa.



KUVA 15. Yksinkertaistettu layoutkuva moottorilaboratoriosta

Koko järjestelmän jälkeen olevaan putkeen on asennettu lasermittalaite LDS6, jolla saadaan tarkasti mitattua jäännösammoniakki poistuvasta pakokaasusta. AVL SESAM FTIR -mittalaitteella saadaan mitattua lähes kaikki tärkeimmät päästökomponentit, NO<sub>x</sub>, NO, CO, NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O ja N<sub>2</sub>O halutusta mittapisteestä. Puuttuvat komponentit saadaan mitattua MEXA 7000 tai MEXA ONE -analysointilaitteita käyttämällä, joilla voidaan mitata pakokaasusta NO<sub>x</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, THC ja CO-päästökomponentit sekä pakokaasun lambda-arvo. Lisäksi järjestelmään on kytketty useita lämpötilaantureita, painemittausantureita ja tavallisia NO<sub>x</sub>-antureita. Kaikki moottorinohjainlaitteen vaatimat

alkuperäiset anturit on myös asennettu paikoilleen ja niiden mittaama tieto saadaan tallennettua samaan nauhoitukseen muiden anturien kanssa.

Kennojakaumamittauksia varten on kehitetty mittalaite, jossa yksittäistä FTIR-mittalaitteeseen kytkettyä mittapäätä ohjataan kahden askelmoottorin avulla toteutetulla mekanismilla, jonka avulla mittapäätä voidaan liikutella koordinaattiohjatusti kennon jättöpuolella. Kennojakaumamittauksessa SCR-kennon jättöpuolelta mitataan NO<sub>x</sub>-arvoja staattisessa kuormituspisteessä AdBlue-ruiskutuksen ollessa aktiivinen ja mitattujen arvojen perusteella arvioidaan ammoniakkin jakautumisen tasaisuutta SCR-kennolla.

### 3 TUTKIMUSONGELMA

Syksyllä 2021 ajettujen testien perusteella optimiolosuhteissa nykyisellä Stage V -tason järjestelmällä olisi mahdollista saavuttaa niukasti jopa Tier 5 -taso NRTC-syklissä NO<sub>x</sub>-päästöjen osalta, mutta ilman minkäänlaista turvamarginaalia. Käytännössä olosuhteista, tuotannon hajonnasta ja muista muuttujista johtuen EAT-järjestelmillä on aina pientä hajontaa suorituskyvyssä, jolloin toiminnan varmistamiseksi kaikissa tilanteissa lopputulokseen olisi hyvä saada hieman turvamarginaalia. Erityisesti NO<sub>x</sub>-päästöjä syntyy heti kylmäkäynnistyksen jälkeen, ensimmäisten minuuttien aikana ennen kuin järjestelmän komponentit ovat saavuttaneet riittävän toimintalämpötilan. Uusien, matalammassa lämpötilassa tapahtuvien syklien uhka ajaa kehitystä siihen suuntaan, että EAT-järjestelmä täytyy saada heräämään entistä nopeammin heti kylmäkäynnistyksen jälkeen. Stage V -tason järjestelmässä EAT-layout koostuu seuraavista komponenteista luetellussa järjestyksessä DOC, DPF, mixer ja SCR.

NO<sub>x</sub>-päästöjen pelkistämisen kannalta oleellisin komponentti SCR on tässä layoutissa viimeisenä, mistä johtuen sen lämpeneminen kylmäkäynnistyksen jälkeen kestää huomattavan kauan. Käynnistyshetken jälkeen moottorin palamistapahtumassa syntyvä lämpö imeytyy kylmään moottorilohkoon, jäähdytysnesteeseen, moottoriöljyyn, pakoputkistoon, hapetuskatalysaattoriin, partikkeli-suodattimeen, mikseriin ja vasta viimeisenä SCR-katalysaattoriin. Matalakuormitteisessa syklissä SCR:n lämpeneminen voi kestää hyvinkin pitkään, minkä seurauksena testisyklille asetetut NO<sub>x</sub>-päästörajat voidaan ylittää jo ennen kuin SCR:n käyttölämpötila saavutetaan. Käytännössä ongelma on siis SCR:n liian hidas lämpeneminen.

#### 3.1 SCR-järjestelmän käyttölämpötilan saavuttamisen nopeuttamiseen vaikuttavat tekijät

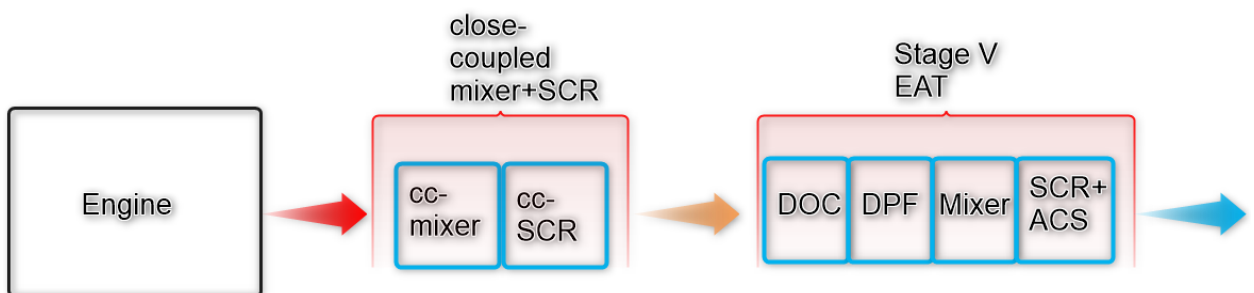
Moottorinohjauksella voidaan vaikuttaa pakokaasujen lämpötilaan heti kylmäkäynnistyksen jälkeen esimerkiksi lisäämällä polttoaineen ruiskutusta tai kuristamalla imuilmaa. Dieselmoottoreita ajetaan tyypillisesti reilulla ilmaylimäärällä, jolloin imuilmaa voidaan kuristaa ilman, että puhtaan palamistapahtuman tarvitseva hapen määrä laskisi liian pieneksi. Kun imuilmaa kuristetaan, saadaan palotilaan johdettavan ilmamassan määrää laskettua. Ruiskutettavan polttoaineen määrän pysyessä vakiona, on palotapahtuman aikana lämmitettävä pienempi määrä kaasua, minkä seurauksena kaasut saavuttavat korkeamman lämpötilan. Imuilman kuristaminen kuitenkin kasvattaa

pumppaushäviöitä, sillä imutahdin aikana moottori joutuu tekemään enemmän työtä sylinterin täyttämiseksi.

Palotapahtuman tuottama lämpö pitäisi saada ohjattua moottorin jälkeen mahdollisimman häviöttömästi SCR-kennolle, jotta SCR kennon käyttölämpötilat saavutettaisi nopeasti heti kylmäkäynnistyksen jälkeen. Oleellimmat asiat häviöiden syntyyn ovat moottorin ja SCR-kennon väliin jäävien osien termisen massan määrä, käytettyjen materiaalien lämmönjohtokyky ja komponenttien eristys. Optimaalinen tilanne syntyisi silloin, jos moottorin tuottama lämpö saataisi täysin häviöttömästi SCR-kennolle. Kuitenkin kappaleessa 2.3.5 esitellyistä rajoitteista johtuen perinteisessä EAT-layoutissa SCR:n ja moottorin väliin tulee vaadittavan putkiston lisäksi hapetusкаталысааttori, DPF ja mikseri, joiden yhteenlaskettu terminen massa on moninkertainen SCR-kennoon verraten. Kylmäkäynnistyksen jälkeen pakokaasu virtaa kylmien komponenttien läpi jäähtyen tehokkaasti, jolloin SCR:lle saapuva pakokaasu on merkittävästi viileämpää kuin moottorista poistuva pakokaasu. Tällöin SCR:n lämpeneminen käyttölämpötilaan tapahtuu huomattavasti hitaammin kuin tilanteessa, jossa pakokaasut ohjattaisi SCR:lle heti moottorin jälkeen.

### 3.2 Close-coupled SCR -konsepti

Yhtenä ratkaisuvaihtoehtona kylmäkäynnistyksen jälkeisten päästöjen leikkaamiseksi on ns. close-coupled SCR tai twin-SCR -nimityksillä kulkevat konseptit, joissa perinteisen Stage V -tasoa vastaavan jälkikäsitelyjärjestelmän etupuolelle seuraavan kuvan tavoin kokonaan erillinen ureamikseri ja SCR.



KUVA 16. Close-coupled SCR -layout

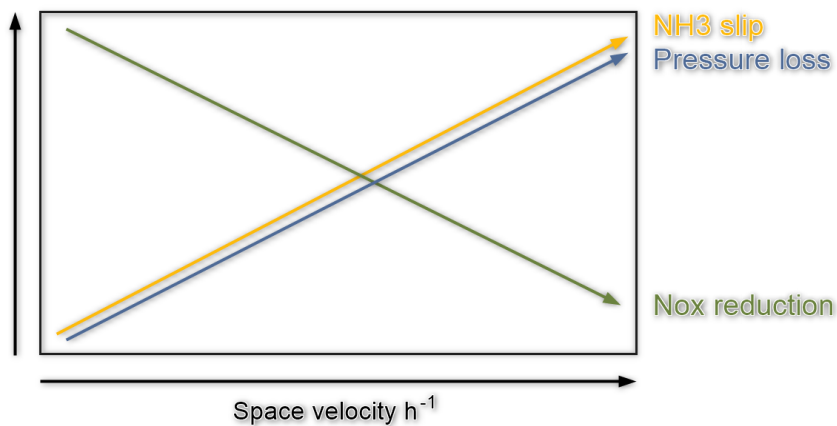
Close-coupled SCR -konseptin toiminta perustuu siihen, että terminen massa ennen SCR-kennoa saadaan mahdollisimman pieneksi, jolloin kaikki moottorin tuottama lämpötila saadaan SCR-kennolle. Cc-järjestelmää seuraava Stage V -tason järjestelmä vastaisi puolestaan muiden kuin NO<sub>x</sub>-päästöjen puhdistamisesta siihen asti, kunnes Stage V -tason järjestelmän viimeisinä komponentina oleva SCR saavuttaisi toimintalämpötilan. Tämän jälkeen cc-järjestelmän ruiskutusmääriä voitaisi pienentää ja siirtää päävastuu myös NO<sub>x</sub>-päästöjen käsittelystä jälkimmäiselle SCR:lle, jolloin DPF:n passiiviseen regenerointiin tarvittavaa NO<sub>2</sub>:sta olisi riittävästi saatavilla ja SCR järjestelmän ammoniakkilatauksen kontrollointi yksinkertaistuisi, kun kahden kennon sijaan voitaisi keskittyä yhden kennon urearuiskutuksen ohjaukseen.

### 3.3 SCR-kennon mitoitus- ja valintaperusteet

SCR-kennoa valittaessa tulee tuntee kohdemoottorin raakapäästötaso, pakokaasun lämpötila- ja massavirtaprofiilit ja alenematavoite. Lisäksi suurin sallittu SCR-kennon tuottama vastapaine pakolinjaan tulee selvittää. Kokonaisen EAT-järjestelmän maksimivastapaine täydellä moottorin kuormituksella ilmoitetaan turboahtimen jälkeen mitattuna ylipaineena, jolle tyypillinen arvo sovelluksesta riippuen kaikkine osineen on noin 200–350 mbar, josta pääjärjestelmän SCR-kennon osuus on suuruusluokaltaan 20–60 mbar. SCR:n toimintaan ja mitoitukseen vaikuttavia tekijöitä ovat käytettävä kennokemia, kennon ulkomitat ja -muoto, kennon aukkoluku (CPSI, cells per square inch) ja seinämävahvuus. Ajoneuvokäytössä useimmiten SCR-kennot ovat sylinterin muotoisia keraamisia kennoja, joiden ulkohalkaisija ja pituus ilmoitetaan tuumina. Kennon tilavuuden määrittelyssä käytetään termiä vaihtuma (SV, space velocity), joka määritellään kennolle jakamalla normalisoitu (NTP) kennon läpi virtaava tilavuusvirta kennon tilavuudella [36].

$$SV = \frac{\text{Tilavuusvirta} \left[ \frac{m^3}{h} \right]}{\text{Kennon tilavuus} [m^3]} [h^{-1}] \quad \text{KAAVA 9}$$

SV:n suuruudella on merkittävä vaikutus SCR:n toimintaan. KUVA 17 kuvaa oleellisempien parametrien parametrin riippuvuutta SV-arvoon. Pieni SV mahdollistaa suuren määrän SCR-reaktioita, jolloin saavutetaan korkea NO<sub>x</sub>-konversio ja matalat ammoniakkipitoisuudet [36]. Kennon tuottama painehäviö pienenee SV-arvon kasvaessa, mutta on huomioitava, että painehäviön suuruuteen vaikuttaa oleellisesti kennon tilavuuden lisäksi kennon aukkoluku, sekä kennon halkaisija-pituussuhde. Pitkä ja kapea kenno tuottaa korkeamman painehäviön, kun puolestaan saman tilavuuden omaava lyhyt ja isolla halkaisijalla oleva kenno.



KUVA 17. Vaihtuman (SV) vaikutus SCR-kennon toimintaan

Mitoituksen näkökulmasta mahdollisimman pieni SV-arvo tuottaisi parhaan lopputuloksen, mutta tarpeettoman iso kennon tilavuus suhteessa mitoitettuun tilavuusvirtaan nostaa vain kustannuksia ja tilantarvetta ilman saavutettavaa lisähyötyä.

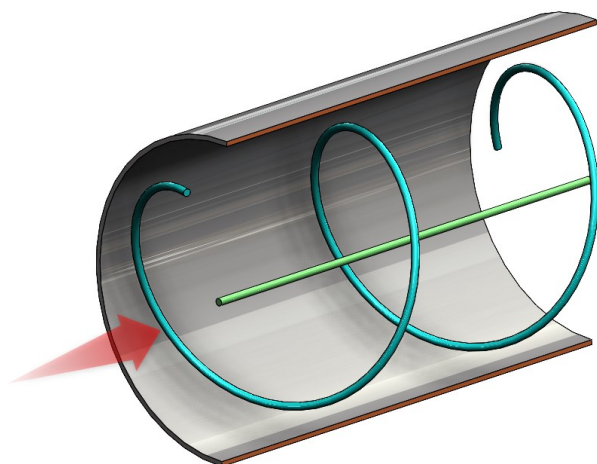
### 3.3.1 Lämpötilaprofiilin vaikutus SCR-kennokemian valintaan

Ennen käytettävän SCR-kennokemian valintaa tulee tietää käyttökohteen lämpötilaprofiili. Kappaleessa 2.3.3 esitettyjen rajoitusten perusteella vanadiini-SCR:n käyttöä tulisi välttää, jos pakokaasun lämpötila suunnitellussa käyttökohteessa ylittää 520 °C:een lämpötilan kennon ennaikaisen ikäytymisen ja suorituskyvyn laskemisen välttämiseksi. Toisaalta, jos pakokaasun lämpötilaa ei voida mitenkään nostaa yli 500 °C:een, tulisi kupari-SCR:n käyttöä välttää kennon rikkimyrkyttymisen takia. Tyypillisesti lämpötilaa pakojärjestelmässä saadaan nostettua moottorin LPI-toiminnon ja hapetuskatalysaattorin avulla, jolloin palamattomat hiilivedyt syttyvät hapetuskatalysaattorilla nostaten nopeasti pakokaasun lämpötilaa.

Lämpötilarajoitteet tuovatkin haasteita cc-SCR:n kennokemian valintaan. V-SCR käyttö cc-SCR:nä tarkoittaisi sitä, että hiukkassuodattimen regenerointiin ja mahdollisen pää-SCR:nä toimivan Cu-Z SCR:n rikkialtistumisen jälkeiseen desulfatointiin tarvittava lämpötilannosto täytyisi tapahtua vasta cc-SCR:n jälkeen. Tällöin LPI-toiminnon ollessa aktiivisena palamattomat hiilivedyt kulkeutuisivat V-SCR:n läpi, eikä siitä aiheutuvia mahdollisia seurauksia tunneta. Mikäli cc-SCR:ksi valittaisi Cu-Z SCR, täytyisi cc-SCR:n etupuolelle lisätä vielä erillinen hapetuskatalysaattori LPI-toiminnan tueksi ja desulfatoinnin mahdollistamiseksi, ellei moottorinohjauksella voitaisi nostaa pakokaasujen lämpötiloja riittävän korkeaksi, yli 500 °C:een.

### 3.4 Ureamikserin vaatimukset

Ureamikserin tehtävänä on varmistaa, että kaikki järjestelmään ruiskutettu AdBlue-liuos saadaan höyrystymään ennen nestemäisen liuoksen osumista kiinteisiin rakenteisiin ja että höyrystynyt ammoniakki jakautuu SCR-kennolle mahdollisimman tasaisesti. Mikserin tulee toimia luotettavasti kaikissa olosuhteissa ja muuttuvia tekijöitä toiminnan suhteen ovat lämpötila, massavirta ja urean ruiskutusmäärä. Mikserin sijoittelun ja valmistuskustannusten kannalta mahdollisimman pieni fyysinen koko olisi toivottavaa, joten höyrystyminen ja sekoittuminen tulisi tapahtua mahdollisimman lyhyellä matkalla ruiskutuksen jälkeen. Tyypillisesti mikserirakenteilla pyritään luomaan virtaukseen pyörteitä, joka sekoittavat höyrystyvän ammoniakkin tasaisesti samalla lisäten pisaroiden kulkemaa matkaa. Alla olevassa kuvassa havainnollistetaan, kuinka sinisellä kuvattu pyörteilevä pisararata kulkee huomattavasti pitemmän matkan saman pituisessa putkessa, kuin vihreällä kuvattu suora pisararata mahdollistaen pisaroiden höyrystymisen lyhyemmällä matkalla.



KUVA 18. Pyörteen vaikutus pisaran kulkemaan matkaan saman pituisessa putkessa

Pyörteen lisääminen virtaukseen vaatii kuitenkin aina virtaussuunnan muuttamista, joka lisää järjestelmän tuottamaa vastapainetta. Moottorivalmistajat määrittelevät kokonaisvastapaineen jälkikäsittelyjärjestelmille, jota ei voida ylittää missään olosuhteissa moottorin toiminnan takaamiseksi. Tyypillisesti mikseri muodostaa merkittävimmän osan koko jälkikäsittelyjärjestelmän vastapaineesta. Tästä johtuen mikserin mitoitus on käytännössä aina kompromissi, jossa toiminta pyritään optimoimaan siten, että mikserin suorituskyky on riittävä myös pienillä massavirroilla ilman, että maksimikuormituspisteissä moottorivalmistajan vastapainerajoja ylitetään.

### 3.5 Twin SCR -järjestelmän kustannusvaikutusten arviointi ja optimointi

CC-järjestelmän vaatimien osien lisääminen nykyisen jälkikäsitteilyjärjestelmän etupuolelle tulee lisäämään järjestelmän kokonaiskustannuksia. Lisättävät komponentit ovat:

- cc-mikseri
- ureasuutin, sen letkut ja johdot cc-mikserille
- yhdysputket ja liittimet cc-komponenttien välille
- cc-SCR
- NO<sub>x</sub>- ja lämpötila-anturit cc-järjestelmän ja pääjärjestelmän väliin
- mahdollisesti cc-DOC.

Cc-mikserin kustannukset muodostuvat valmistuskustannuksien kautta, joten mikserin rakenne tulisi suunnitella mahdollisimman yksinkertaiseksi ja helposti valmistettavaksi. Cc-järjestelmän ureasuutin olisi hyvä saada mahdollisimman lähelle pääjärjestelmän suutinta, jolloin urean syöttölinjojen ja suuttimen jäähdytysnestelinjojen reitityksestä aiheutuvat lisäkustannukset pysyisivät pieninä. Yhdysputket olisi hyvä pitää mahdollisimman lyhyinä jo pelkän termisen massan säästämisen kannalta ja integroida ne osaksi cc-mikseriä. Liitoksia tulisi välttää mahdollisuuksia kustannusten ja lämpötilahäviöiden välttämiseksi. Cc-SCR:n fyysisen koon ja käytettävän kemian valinta tulisi tehdä siten, että järjestelmän suorituskyky olisi juuri ja juuri riittävällä tasolla järjestelmän ikäytymisenkin jälkeen. Cc-SCR:n valinnan yhteydessä olisi hyvä selvittää, mikä suhde cc-SCR:n ja pää-SCR:n käytönaikaisille alenematavoitteille on optimaalinen kustannusten ja järjestelmän kokonais-suorituskyvyn kannalta. Lisättävien antureiden korvaaminen voisi onnistua tarkan laskennan ansiosta, mutta jatkuvasti muuttuvissa olosuhteissa toiminnan tarkka laskennallinen määrittäminen voi olla mahdotonta. Kustannusten näkökulmasta cc-DOC:in käyttöä tulisi välttää, mutta lainsäädännön asettamat päästörajat ovat kuitenkin määräävä tekijä. Jos tavoitteisiin ei päästä ilman cc-DOC:ia, on sen tuoma lisäkustannus hyväksyttävä.

## 4 TYÖN TOTEUTUS

Syksyn 2021 aikana oli suoritettu laboratoriotestejä kahdelle erilaiselle twin-SCR järjestelmälle, joiden suorituskykyä oli arvioitu ja vertailtu useilla eri testisykleillä ja -suoritteilla. Jokaisesta suoritteesta oli tallennettu excel-tiedosto, johon oli tallennettu koko mittausyökin ajalta sekunnin taajuu-  
della useiden eri antureiden mittaamaa ja laskemaa dataa. Lokitiedostojen lisäksi testeistä oli laadittu asiakkaan toimesta kooste, jossa vertailtiin tuloksia ja tuotiin esille havaintoja mittauksista.

### 4.1 Olemassa olevan tiedon analysointi ja käsittely

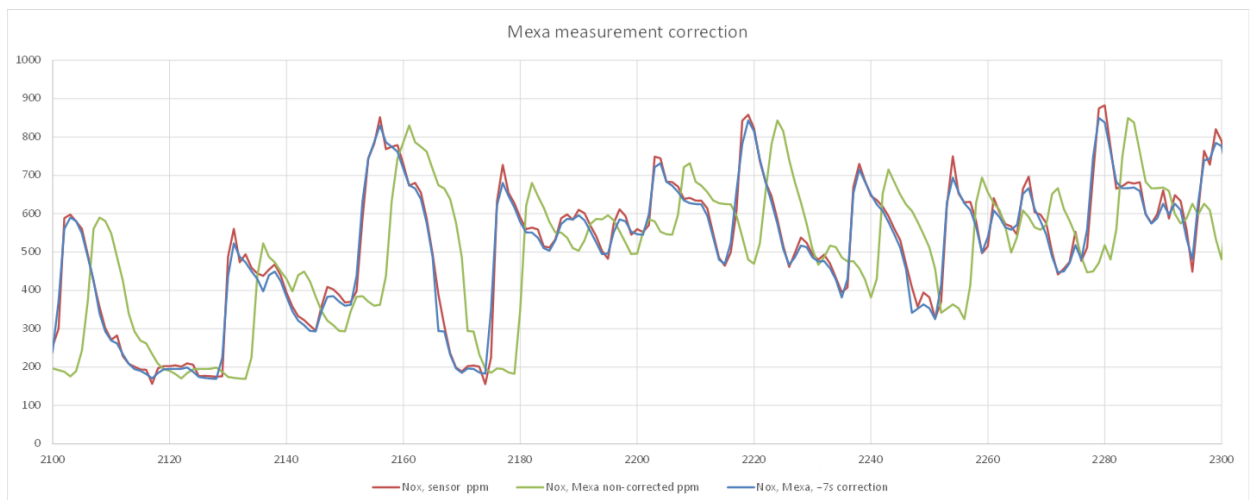
Syksyllä suoritettujen testien lisäksi kolmas järjestelmä oli testattu 2022 alkuvuodesta. Ensimmäisenä tavoitteena oli tutustua aiempien mittaustulosten lisäksi näihin mittaustuloksiin ja määrittellä ne parametrit, joita järjestelmien suorituskyvyn vertailuun tarvittaisiin. Tärkeimmiksi parametreiksi suorituskyvyn perusteella valikoituivat seuraavat:

- imuilman massavirta, joka kuvaa moottorin läpi virtaavan ilman massaa
- polttoaineen suihkutusmäärä, joka lisätään imuilman massaan pakokaasun massavirran selvittämiseksi
- pakokaasun lämpötila heti moottorin jälkeen mitattuna
- moottorin NO<sub>x</sub>-raakapäästöt
- SCR-kennojen jälkeiset pakokaasun lämpötilat
- SCR-kennojen jälkeiset NO<sub>x</sub> ja NH<sub>3</sub> -pitoisuudet
- järjestelmän jälkeen mitatut NO<sub>x</sub>-pitoisuudet
- moottorin hetkellinen teho ja kierrosnopeus
- ympäröivän ilman kosteus, paine ja lämpötila.

#### 4.1.1 Anturivirheiden ja viiveiden kompensointi

Mexa-analysaattori sijaitsee laboratorion 2-kerroksessa ja mitattava pakokaasunäyte johdetaan letkua pitkin pakolinjasta analysaattorille analysaattorin sisäisen pumpun avulla. Letkun pituudesta johtuen pakokaasunäytteen siirtyminen pakolinjasta analysaattoriin tapahtuu viiveellä. Testisyklin aikaisia kokonaispäästöjä laskiessa viiveellä ei ole suurtakaan merkitystä, mutta hetkellisiä g/kWh päästöarvoja viive aiheuttaa laskentavirheittä erityisesti nopeiden kuormituspiikkien aikana, jolloin

lokiin kirjataan suuri teho, mutta tuotettua tehoa kohden syntyy vain vähän päästöjä ja kuormituspiikin jälkeen sama asia tapahtuu käänteisesti. Tämän viiveen määrittelemiseksi lokitiedostosta laadittiin sekuntitasolla kuvaaja, jossa analysaattorin mittapisteen viereen oli asennettu tavallinen NO<sub>x</sub>-anturi. Tutkittavaksi alueeksi valittiin lämmitysmittaussyklistä kohta, jossa jätöpuolelta mitattiin suurimmat NO<sub>x</sub>-pitoisuudet, jotta tavallisen anturin resoluutio riitti muodostamaan selkeitä muotoja kuvaajaan. Kuvaajasta katsottiin anturin piirtämää käyrää ja etsittiin samanmuotoisia laaksoja ja huippuja analysaattorin piirtämästä käyrästä. Viiveen kompensointi haettiin sopivaksi aikaistamalla analysaattorin mittaamaa dataa, kunnes kuvaajien muodot kohtasivat toisensa alla olevan kuvan esittämällä tavalla. Sopivaksi aikaistukseksi osoittautui 7 sekuntia.



KUVA 19. Mexan mittausviiveen arviointi ja korjaus

#### 4.1.2 Testattujen järjestelmien suorituskyvyn arviointi

Testattujen järjestelmien suorituskykyyn vaikuttavien tekijöiden arviointi aloitettiin laatimalla laboratoriotesteissä käytettyjä järjestelmä mahdollisimman tarkasti kuvaavat virtuaaliset virtaustilavuusmallit Solidworks-ohjelmistolla. Tarkoituksena oli selvittää, kuinka hyvät nopeus- ja ammoniakkijakaumat testatuilla järjestelmillä saavutettiin cc-SCR:lle, jotta voitaisiin määritellä, jäikö etummaisen SCR:n potentiaalia mahdollisesti hyödyntämättä epätäydellisistä jakaumista johtuen. Jälkimmäisen SCR:n jakaumia ei tarkasteltu, sillä niiden tiedettiin olevan sarjatuotantoon hyväksytyssä tuotteessa vaatimusten mukaisella tasolla. Varsinaiseen CFD-simulointiin käytettiin Star CCM-ohjelmistoa.

## 4.2 Lämpösimulaatioiden hyödyntäminen termisen massan optimoinnissa

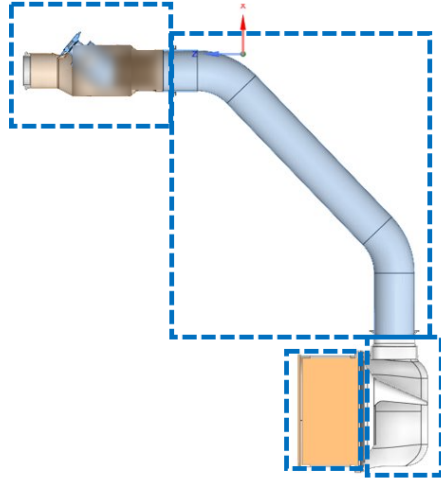
Cc-SCR:ää edeltävän termisen massan vaikutusta tutkittiin lämpösimulaatioiden avulla. Tavoitteena oli selvittää kuinka paljon nopeammin cc-SCR saavuttaisi käyttölämpötilan kylmäkäynnistyksen jälkeen, jos kaikki pakokaasun sisältämä lämpöenergia käytettäisi vain cc-SCR:n lämmittämiseen. Todellisuudessa osa tästä energiasta käytetään väliputken ja cc-mikserin lämmittämiseen. Simuloinnista saatavalla teoreettisella arvolla haluttiin ymmärtää saavutettavan hyödyn suuruusluokka, jos perinteisellä tavalla rakennettu pakolinja optimoitaisi termisen massan näkökulmasta mahdollisimman pieneksi.

Simulointi suoritettiin Proventia Oy:n CFD-laskentaryhmän toimesta seuraavin oletuksin:

- Lämpötila jakautuu täysin tasaisesti kaasun ja kiinteiden kappaleiden kanssa
- Tutkittavasta kappaleesta poistuva kaasu on samassa lämpötilassa kuin kappale
- Simulaation alussa kappale on lämpötilassa  $T_0$  ja ajan  $t$  kuluttua kappale ja kaasu on lämpötilassa  $T$

Järjestelmän lämpötilakäytöstä tutkittiin testijärjestelmä UL\_2:n mittadatan perusteella seuraavan kuvan mukaisella järjestelyllä. Järjestelmä jaettiin osiin, joille määriteltiin massa ja materiaalin perusteella ominaislämpökapasiteetti. Muille osille ominaislämpötilakapasiteetti oli tunnettu, mutta cc-SCR-kennon ominaislämpökapasiteetti määriteltiin mittadatan perusteella seuraavanlaisesti:

- Simuloitiin cc-SCR kennon jälkeistä lämpötilaa esittävä lämpötilakuvaaja moottorin massavirran ja pakokaasun lämpötilan perusteella arvioimalla cc-SCR:n ominaislämpötilakapasiteetti
- Säädettiin cc-SCR:n ominaislämpötilakapasiteettia, kunnes simuloitu lämpötilakuvaaja vastasi moottorilaboratoriosta mitattua lämpötilakuvaajaa



KUVA 20. Lämpösimuloinnissa käytetty UL\_2-testijärjestelmän osa ja termisen massan jako

Tämän jälkeen lämpötilakuvaaja luotiin simulaatiomallissa uudestaan siten, että sama lämpötila ja massavirta syötettiin järjestelmän läpi, mutta kaikki termisen massa asetettiin nolaksi ennen cc-SCR:ää. Simulaatiossa kaikki moottorin tuottama lämpöenergia siirtyi häviöttömästi cc-SCR:lle. Seuraavassa kuvassa esitetään UL\_2-testijärjestelmästä kylmä-NRTC-syklissä mitatun cc-SCR:n lämpötilan lisäksi simulaatiomallissa ilman termistä massaa luotu lämpötilakuvaaja. Todellisuudessa termisen massan nollaus ennen cc-SCR:ää on täysin mahdotonta, mutta tällä tutkimuksella haluttiin selvittää teoreettinen potentiaali sille, kuinka paljon nopeammin lämpötila cc-SCR:llä nousisi, jos termistä massaa vähennetään. Termisen massan puolittaminen tai merkittävä vähentäminen on hyvinkin mahdollista ja simulaation perusteella tehdyt havainnot tulee ottaa huomioon cc-SCR:ää edeltävien komponenttien suunnittelussa.



KUVA 21. Cc-SCR:n lämpötilakäytös kennoa edeltävän termisen massan kanssa ja ilman edeltävää termistä massaa

Termisen massan poistamisen vaikutusta arvioitiin mittaamalla aikaa, kuinka kauan kylmäkäynnistyksen jälkeen cc-SCR:llä kestää saavuttaa 200 °C:een lämpötila. Testijärjestelmä UL\_2:n mukaisilla komponenteilla cc-SCR:n lämpeneminen huoneenlämmöstä 200 °C:een NRTC-testisyklin aikana kesti 143 sekuntia, kun taas ilman termistä massaa saman lämpötilan saavuttaminen kesti vain 108 sekuntia. Teoriassa siis 200 asteen lämpötila voitaisiin saavuttaa 35 sekuntia nopeammin, jos kaikki pakokaasun lämpöenergia saataisi ohjattua cc-SCR:n lämmittämiseen.

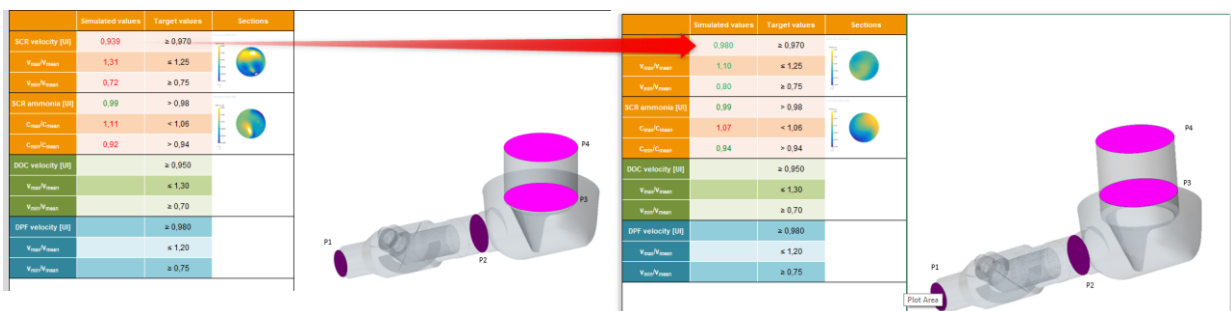
Simuloinnissa SCR:n ominaislämpötilakapasiteetin määrittelyvaiheessa oletuksena oli, että kiinteät osat lämpenevät samaan lämpötilaan kuin kappaleista poistuva kaasu. Ruostumattoman teräksen kohtalaisen huonosta lämmönjohtokyvystä johtuen todellisuudessa kylmäkäynnistyksen jälkeen pakokaasu tulee olemaan kuumempaa kuin hitaasti lämpenevät putkiosat, jolloin lämpöenergiahäviöt olisivat pienempiä kuin simuloinnissa. SCR-kennon rakenteesta johtuen kennolla on valtavasti pakokaasun kanssa kosketuksissa olevaa ohutseinäistä pinta-alaa, mistä johtuen lämpöenergia siirtyy tehokkaasti pakokaasusta kennoon. Näistä tekijöistä johtuen todellisuudessa SCR voisi läm-

metä vielä hieman simuloitua arvoa nopeammin. Simuloinnissa ei kuitenkaan otettu huomioon putkesta ulospäin säteilevää lämpöhäviötä, joka on testausjärjestelmissä pyritty minimoimaan tehokkaalla putkien eristämällä.

### 4.3 Virtaussimulaatioiden hyödyntäminen järjestelmän mitoituksessa ja mikserin suunnittelussa

Virtaussimulaatioiden perusteella voidaan arvioida kehitteillä olevan järjestelmän toimintaa ennen fyysisen tuotteen valmistusta. Simulointimallien käytöllä säästetään merkittävästi aikaa ja kustannuksia, sillä simulointimallin rakentaminen tapahtuu merkittävästi fyysistä tuotetta nopeammin ja pienemmällä kustannuksella. Simulointivaiheessa käyttäjä rakentaa simulointimallin ja määrittelee parametrit, joiden pohjalta laskentaohjelmisto suorittaa simuloinnin. Simuloinnin tavoitteena on varmistaa, että järjestelmän kokonaisvastapaine on sallituissa rajoissa ja kennojen virtausjakaumat ovat riittävällä tasolla. DOC- ja DPF-kennoilta tutkitaan nopeusjakauman tasaisuutta ja SCR-kennoilta nopeusjakauman lisäksi ammoniakkipitoisuuden tasaisuutta. Lisäksi simulointimallissa voidaan tutkia urearuiskutuksen pisaroiden lentoratoja ja höyrystymismatkoja. Simulointimallin tulosten perusteella geometriaa säädetään haluttuun suuntaan ja simulaatio toistetaan korjatuilla parametreilla. Kehityskierroksia toistetaan, kunnes järjestelmän suorituskyky on simulointimallissa halutulla tasolla määritellyissä olosuhteissa.

Alla olevassa kuvassa esitetään kahden testijärjestelmän simulointituloksista kuvankaappaukset. Oikeanpuolimmainen kuva on muuten sama järjestelmä kuin vasemmalla, mutta cc-SCR-kennoa on siirretty 50 mm kauemmaksi kennoa edeltävästä virtausohjurista, jolloin nopeusjakauma kerkeää tasoittua ennen kennoa ja nousee 0,939:stä 0,98:aan. Alphasweep-testeissä havaittiin, että pelkkä nopeusjakauman parantaminen vaikutti testatun järjestelmän kohdalla siten, että keskialenemat paranivat hieman ja kennon jälkeen mitattu ammoniakkipitoisuus pieneni kaikissa pisteissä n. 10 %.



KUVA 22. UL\_4 ja UL\_4.1 -järjestelmien cc-SCR:n jakaumasimulaatiot

## 5 TULOSTEN ESITTELY

Mittaukset suoritettiin Proventian moottorilaboratoriossa kevään 2022 aikana ja niitä verrattiin aiemmin syksyllä 2021 suoritetuista mittauksista saatuihin tuloksiin. Testimoottorina käytettiin 6-sylinteristä Stage V -tason 7,4-litraista turboahdettua ilman EGR:ää olevaa dieselmoottoria.

### 5.1 Testijärjestelmien esittely

Testijärjestelmät valmistettiin Proventia Oy:n protopajalla Oulunsalossa. Kaikissa järjestelmissä on käytetty samaa Stage V -tason järjestelmää, jonka etupuolelle on vaihdettu erilaisia twin SCR -konseptin mukaisia testijärjestelmiä. Anturointi on pyritty pitämään samana kaikkien testien aikana ja järjestelmille suoritettujen erilaisten testien määrä pyrittiin pitämään mahdollisimman vähän, että tuloksia voidaan vertailla keskenään ja mitatun datan määrä pysyy kohtuullisena. Testijärjestelmissä käytettiin joko 10,5"x5,5" tai 7,5"x6" vanadiini-SCR:ää, joissa oli SCR:n yhteydessä ASC-pinnoitus kennon jättöpuolella. Järjestelmissä testattiin kolmea erilaista cc-mikseriä.

Alla olevassa taulukossa kuvataan järjestelmien nimeämisjärjestelmä, ja järjestelmien poikkileikkaukuvat ja anturilayout esitellään liitteissä 1-8.

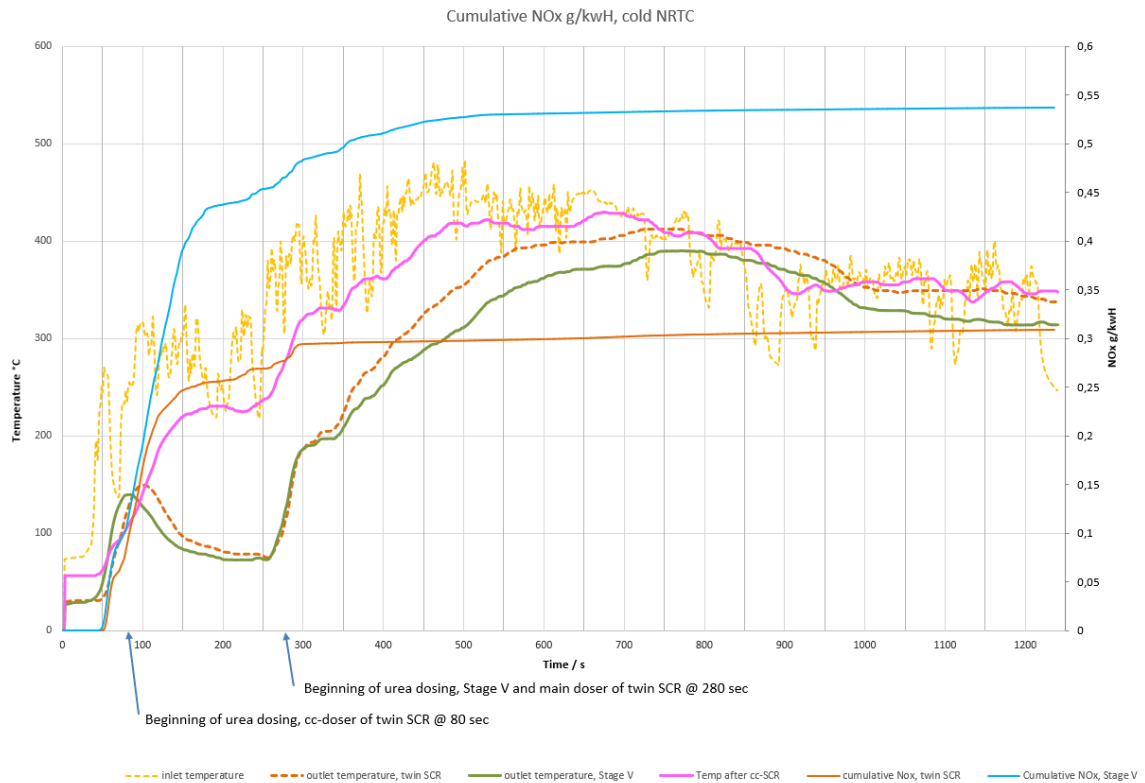
Number	cc-mixer type	Notes	F-koodi	cc-SCR diam / inch	cc-SCR length / inch	Dosing module	cc-SCR volume, incl ASC / dm3	cc-SCR type
UL_1	Inline			10,5	5,5	7,2 kgh	7,8	V-SCR
UL_2	putkimikseri		F97240	10,5	5,5	7,2 kgh	7,8	V-SCR
UL_2.1	putkimikseri	50 mm tilaa SCR:n eteen	F107404	10,5	5,5	7,2 kgh	7,8	V-SCR
UL_3	Putkimikseri, lyhyet putket		F102410	7,5	6	7,2 kgh	4,3	V-SCR
UL_4	Supertornado		F105981	7,5	6	7,2 kgh	4,3	V-SCR
UL_4.1	Supertornado	50 mm tilaa SCR:n eteen	F106794	7,5	6	7,2 kgh	4,3	V-SCR
UL_4.1B	Supertornado	50 mm tilaa SCR:n eteen	F106794	7,5	6	7,2 kgh	4,3	V-SCR
UL_4.2	Supertornado	50 mm tilaa SCR:n eteen	F107394	10,5	5,5	7,2 kgh	7,8	V-SCR
ULs_4.2	Supertornado	50 mm tilaa SCR:n eteen	F107394	10,5	5,5	4,2 kgh	7,8	V-SCR

TAULUKKO 1. Testijärjestelmien numerointi

## 5.2 Twin-SCR järjestelmän toiminta NRTC-sykleissä Stage V -tason järjestelmään verraten

Järjestelmien suorituskykyä vertailtiin NRTC-sykleissä mittaamalla NO<sub>x</sub>-päästöt poistoputkesta ja laskemalla syklinaikainen kumulatiivinen NO<sub>x</sub>-kertymä moottorin tuottamaa kilowattia kohden. Joissain testeissä pakolinja ei ollut ollut täysin jäähtynyt, tai anturidatan tallennus oli aloitettu hieman väärään aikaan, mistä syntyi mittavirheitä testituloksiin. Erot erilaisten twin SCR -konseptien kesken jäivät niin pieniksi, ettei mittavirheiden huomioinnin jälkeen järjestelmien suorituskykyä voinut luotettavasti asettaa selkeään paremmuusjärjestykseen. Poikkeuksena oli UL\_1-testijärjestelmä, jossa oli sijoitettu täysikokoinen inlinemikseri ja SCR Stage V -tason järjestelmän etupuolelle. UL\_1-järjestelmän kanssa NO<sub>x</sub>-päästöt nousivat selkeästi suuremmiksi, jopa pelkkää Stage V -tason järjestelmää korkeammalle. Stage V -ajoissa käytetty moottorin kalibrointi ei vastaa sarjavalmistuksessa käytettävää ohjelmistoversiota.

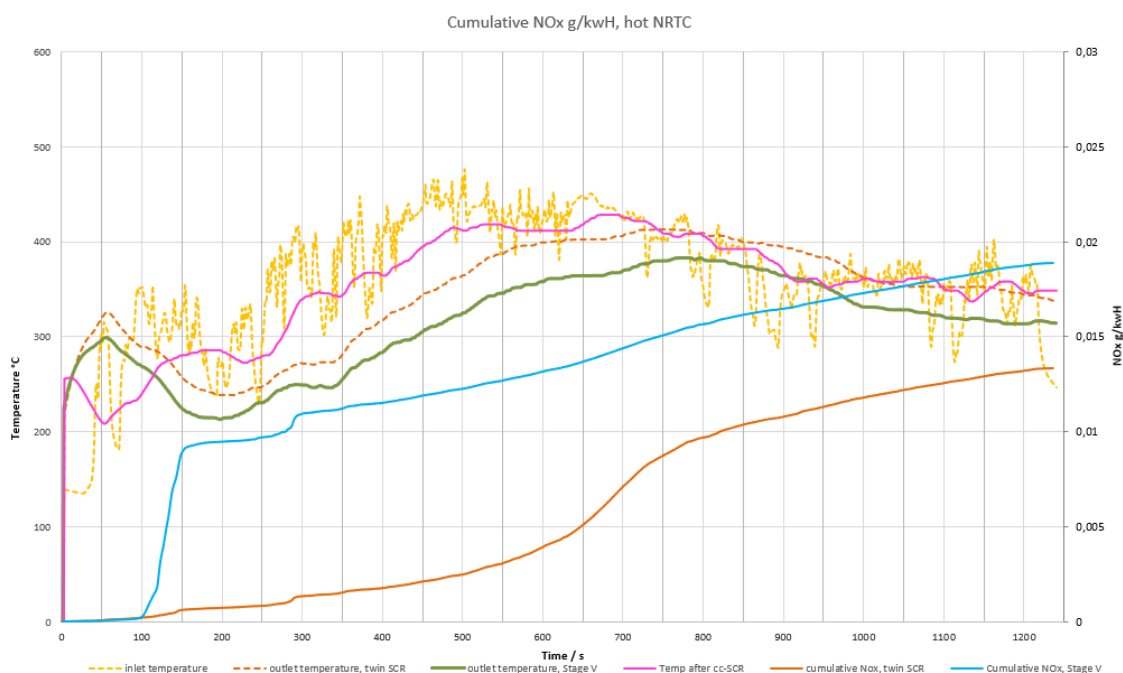
Seuraavassa kuvassa esitetään parhaiten suoriutuneen UL\_4 twin SCR -järjestelmän mittaustuloksia Stage V-tason järjestelmään verraten. Kuvassa näkyy myös molempien järjestelmien poistoputkesta mitattu lämpötila, ja urearuiskutuksen alkamisajankohdat. Syklin alussa Stage V-tason järjestelmän poistoputkesta mitataan korkeampia lämpötiloja, koska twin SCR -konseptissa lisättyjen cc-komponenttien tuoma termien massa sitoo lämpöenergiaa. Twin SCR -konseptissa etummaiselle SCR:lle voidaan kuitenkin aloittaa urearuiskutus huomattavasti aikaisemmin, noin 80 sekuntia syklin alkamisen jälkeen cc-SCR:n huomattavasti nopeamman lämpenemisen ansiosta. Stage V -tason järjestelmän kanssa urearuiskutus voidaan aloittaa vasta 280 sekuntia syklin alkamisen jälkeen, mistä johtuen kumulatiivinen NO<sub>x</sub>-taso kerkeää nousta korkealle tasolle.



**KUVA 23.** Twin SCR -järjestelmän suorituskyky kylmä-NRTC-syklissä Stage V-tason järjestelmään verraten

Kuuma-NRTC-syklissä kaikissa järjestelmissä urearuiskutukset aloitetaan n. 30 sekuntia syklin alkamisen jälkeen, mutta siitä huolimatta twin-SCR konseptilla kumulatiiviset NO<sub>x</sub>-päästöt jäävät hie-man Stage V -tason järjestelmää matalammaksi seuraavan kuvan esittämällä tavalla. Lämpötiloissa on nähtävissä termisen massan vaikutus ja lämmön säilyminen järjestelmän komponenteissa, sillä syklin alussa cc-SCR:n jälkeen mitatut lämpötilat ovat matalampia kuin poistoputkesta mitattu lämpötila. Tämä johtuu siitä, että kylmä-NRTC-syklin aikana järjestelmän osiin varastoitunut lämpö purkautuu ja näkyy poistoputkessa korkeampina lämpötiloina. Cc-SCR:n lämpötila ylittää

poistoputkesta mitatun lämpötilan vasta noin 100 sekuntia syklin alkamisen jälkeen.



KUVA 24. Twin SCR-järjestelmän suorituskyky kuuma-NRTC-syklissä Stage V-tason järjestelmään verraten

Tier 5:n NO<sub>x</sub>-päästörajaksi on ehdotettu 0,04 g/kWh ja tulokset laskettiin molemmilla 5 %:n ja 10 %:n painokertoimilla, jotta voidaan tarkastella tuloksia Yhdysvaltojen ja Euroopan lainsäädäntöjen näkökulmasta. Yhdysvalloissa käytettävä 5 % painokerroin helpottaa hieman tilannetta, sillä kylmä-NRTC:n aikana syntyneet NO<sub>x</sub>-päästöt ovat yli kymmenkertaisia kuuma-NRTC-syklin päästöihin verraten. Oletettavasti Euroopassa kuitenkin otetaan aikanaan Stage VI -lainsäädännössä samankaltaiset rajat 10 % painotuksella, joten kehitteillä olevan uuden järjestelmän olisi hyvä suoriutua jo niistä vaatimuksista.

Sykleistä saatiin seuraavat tulokset:

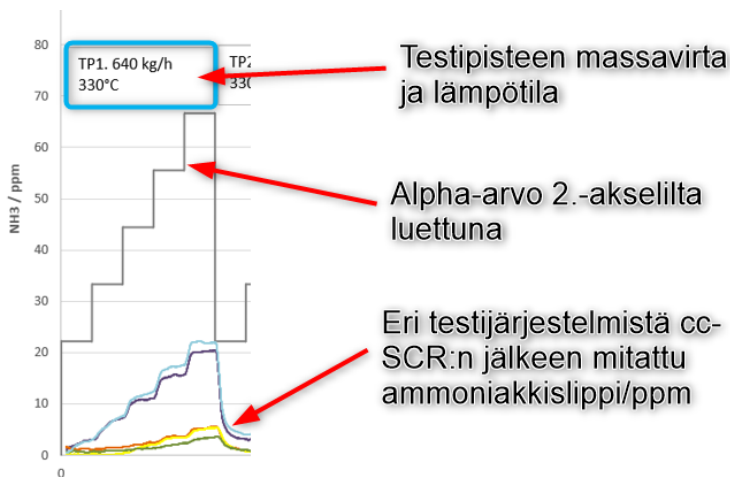
- Stage V, kylmä-NRTC 0,54 g/kWh ja kuuma-NRTC 0,019 g/kWh
- Twin SCR, kylmä-NRTC 0,3 g/kWh ja kuuma-NRTC 0,013 g/kWh
- Stage V, combined-NRTC 0,0711 g/kWh 10 % painotuksella ja 0,045 g/kWh 5 % painotuksella
- Twin SCR, combined-NRTC 0,042 g/kWh 10 % painotuksella ja 0,027 g/kWh 5 % painotuksella.

Tulosten perusteella Stage V -tason järjestelmä ylittäisi asetetun tavoitteen reilusti 10 % painotuksella ja myös niukasti 5 % painotuksella. Testatut twin SCR -konseptin mukaiset järjestelmät eivät

pääse vielä tavoitteeseen 10 % painotuksella, mutta 5 % painotuksella päästään jo selkeästi tavoitellulle päästötasolle.

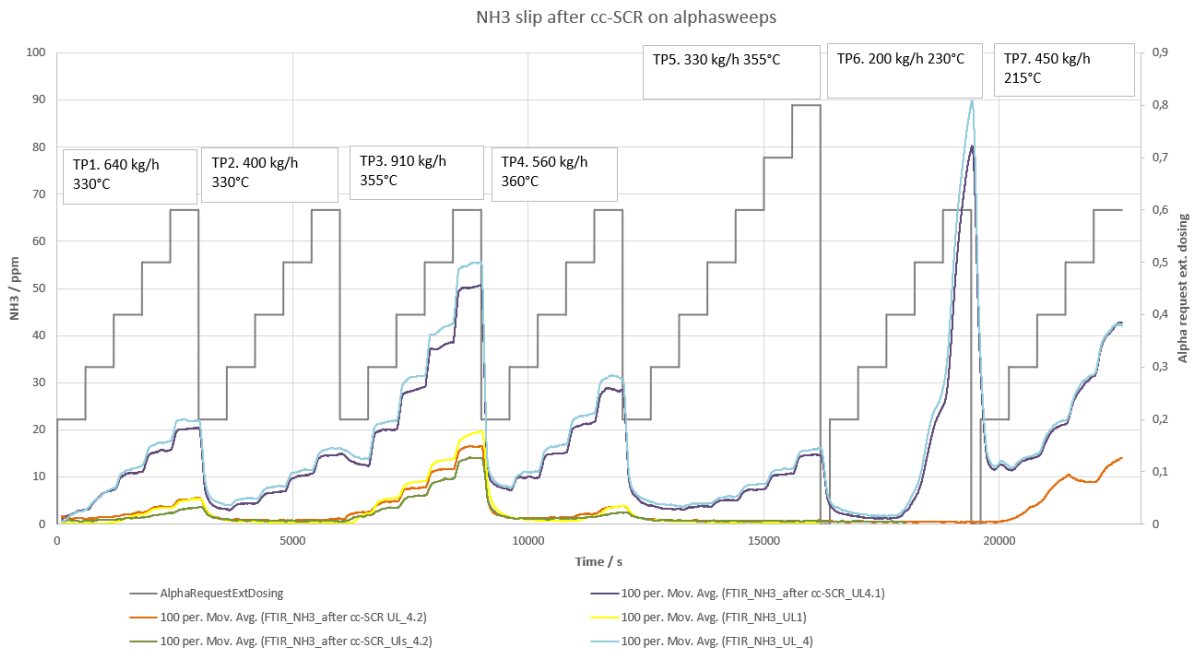
### 5.3 Cc-järjestelmän suorituskyvyn arviointi alphasweep-testeissä

Järjestelmien suorituskykyä arvioitiin alphasweep-testien perusteella siten, että cc-SCR kennon jälkeen mitattiin  $\text{NH}_3$ -pitoisuuksia FTIR-mittalaitteella. Mikserin ja SCR:n suorituskyvyn ollessa hyvällä tasolla kuormituspisteeseen nähden, pitäisi  $\text{NH}_3$ -pitoisuuksien pysyä matalalla. Kaikki järjestelmät ajettiin testipisteissä 1–5, joiden lisäksi osa järjestelmistä testattiin kahdessa matalan lämpötilan lisäpisteessä 6 ja 7. KUVA 25:ssä esitellään alphasweep-kuvaajien tulkintaan vaadittavat tiedot. Ammoniakkislippi on ei-toivottu ominaisuus, jonka haluttaisi pysyä mahdollisimman matalana kaikissa testipisteissä.



KUVA 25. Alphasweep-kuvaajien tulkinta

KUVA 26:ssä on esitetty viiden eri testijärjestelmän mitattuja ammoniakkipitoisuuksia cc-SCR:n jälkeen alphasweep-testeissä. UL\_4 ja UL\_4.1 testijärjestelmien ainoat eroavaisuudet on SCR-kennon siirto, jolloin nopeusjakauma parani 0,939:stä (UL\_4) 0,980:aan (UL\_4.1) (esitelty tarkemmin kappaleessa 4.3). Nopeusjakauman paraneminen näkyy ammoniakkipitoisuuksissa siten, että tasaisempi nopeusjakauma pienentää cc-SCR:n jättöpuolelta mitattuja ammoniakkipitoisuuksia.



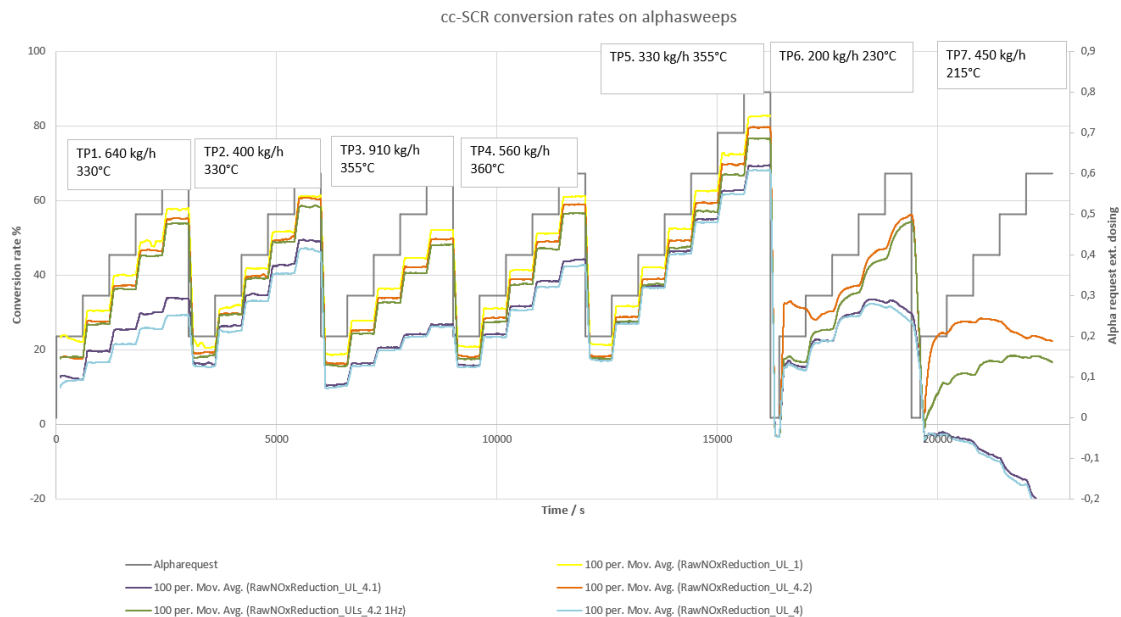
KUVA 26. Mitatut NH<sub>3</sub>-päästöt cc-SCR:n jälkeen alphasweep-testeissä

UL\_4.2 ja UL\_1 -järjestelmissä käytetyllä isommalla cc-SCR kennolla mitatut ammoniakkipitoisuudet jäivät selkeästi matalammalle kuin pienemmällä cc-SCR:llä varustetuissa testijärjestelmissä. Testipisteissä 2 ja 5 ammoniakkia ei tullut kennon läpi käytännössä ollenkaan, kun kuormituspisteessä 4 ammoniakkia alkoi hieman näkyä myös cc-SCR:n jättöpuolella.

Järjestelmät UL\_1 ja UL\_4.2 ovat toteutettu samankokoisilla cc-SCR kennoilla, mutta mikseri ja mikserin ja cc-SCR:n väliin jäävä osuus poikkeavat toisistaan. UL\_1 on toteutettu yhteen linjaan integroidulla mikserillä, kun puolestaan UL\_4.2 järjestelmässä on käytetty erillistä mikseriyksikköä ja sekoitusputkea. Näiden järjestelmien suorituskyvyissä ei ollut suuria eroja. Pieni ero UL\_4.2 eduksi on kuitenkin nähtävissä, joka selittynee sillä, että kovilla virtausnopeuksilla pitempi sekoitusmatka mahdollistaa tasaisemman urean höyrystymisen ja sekoittumisen. Kaikista pienimmät ammoniakkipitoisuudet mitattiin järjestelmällä ULs\_4.2 ja ureasuuttimen ominaisuuksien vaikutuksia ammoniakkislippiin esitellään tarkemmin kappaleessa 5.4.

Testipisteessä 6 ammoniakkia tulee pienemmällä kennolla varustetuista UL\_4 ja UL\_4.1 -järjestelmistä jo tuntuvasti läpi, kun taas isommalla kennolla varustettu UL4\_2 alkaa päästää ammoniakkia läpi vasta matalamman lämpötilan pisteessä 7. Testipisteessä 7 raakapäästöaso on ollut mittauksen aikana noin puolet pienempi kuin testipisteessä 6, mikä selittää pienemmän ammoniakkislipin UL\_4 järjestelmän mittauksissa.

Matalan lämpötilan testipisteessä 7 ammoniakkipiippä alkoi näkyä myös isommalla kennolla varustetussa järjestelmässä cc-SCR:n jälkeen. Kun samaa mittaustilannetta tutkittiin cc-SCR:n konversiosuhteessa KUVA 27:n mukaan, huomattiin konversiokäytöksen olevan samankaltainen kuin mitattu ammoniakkipiippikäytös. Järjestelmät, joissa slipaus oli suurta, tuottivat huonommat alenemat ja vastaavasti slipin ollessa pientä, seurasi järjestelmän konversiosuhde kohtuullisen hyvin pyydettyä alpha-arvoa.



KUVA 27. Konversiosuhteet CC-SCR:n yli alphasweep-testeissä

Testipisteessä 7 testijärjestelmien suorituskyky romahtaa, ja testijärjestelmät UL\_4 ja UL\_4.1 tuottavat jo negatiivisilta konversiosuhteita. Negatiivinen konversiosuhde syntyy silloin, kun cc-SCR:n jättöpuolelta tavallisella NO<sub>x</sub>-anturilla mitatut yhteenlasketut NO<sub>x</sub>- ja NH<sub>3</sub>-pitoisuudet ylittävät raakaNO<sub>x</sub>-pitoisuuden. Kylmä NRTC -syklissä kaikilla järjestelmillä kesti vähintään 130 sekuntia käynnistyksen jälkeen, ennen kuin cc-SCR saavutti 215 asteen lämpötilan. Tuona aikana järjestelmästä riippuen alenema oli 0–20 %, joka muodostaa merkittävän osan kylmä NRTC -syklin kumulatiivisesta NO<sub>x</sub>/kWh -päästö määrästä kappaleen 5.2 havaintojen mukaan.

#### 5.4 Cc-järjestelmän ureasuuttimen ominaisuuksien vaikutus suorituskykyyn

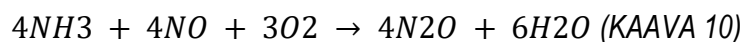
Oletuksena cc-järjestelmän ureasuuttimelle oli käyttää samaa suutinta kuin pääjärjestelmälle, mutta tutkitun moottorin tapauksessa raakapäästötason ja cc-järjestelmälle asetetun pääjärjestel-

mää matalamman alenemataavoitteen seurauksena ruiskutusmäärät jäivät selkeästi suuttimen maksimituottoa alemmalle tasolle. Suuttimen ruiskutuskäytöksestä oli aiempien tutkimusten perusteella tiedossa, että suuttimen sisäinen paine pyritään vakioimaan ja ruiskutusmäärää säädetään suuttimen aukioloaikaa pulssittamalla. Pulssittaminen tapahtuu tietyllä taajuudella, jolloin suutin on tietyn ajan täysin auki ja tietyn ajan täysin kiinni. Näiden tietojen perusteella arvioitiin, cc-järjestelmän ureasuuttimeksi voitaisi valita maksimituotoltaan pienempi suutin ja siten saavuttaa tasaisempi urean tuotto pakolinjaan.

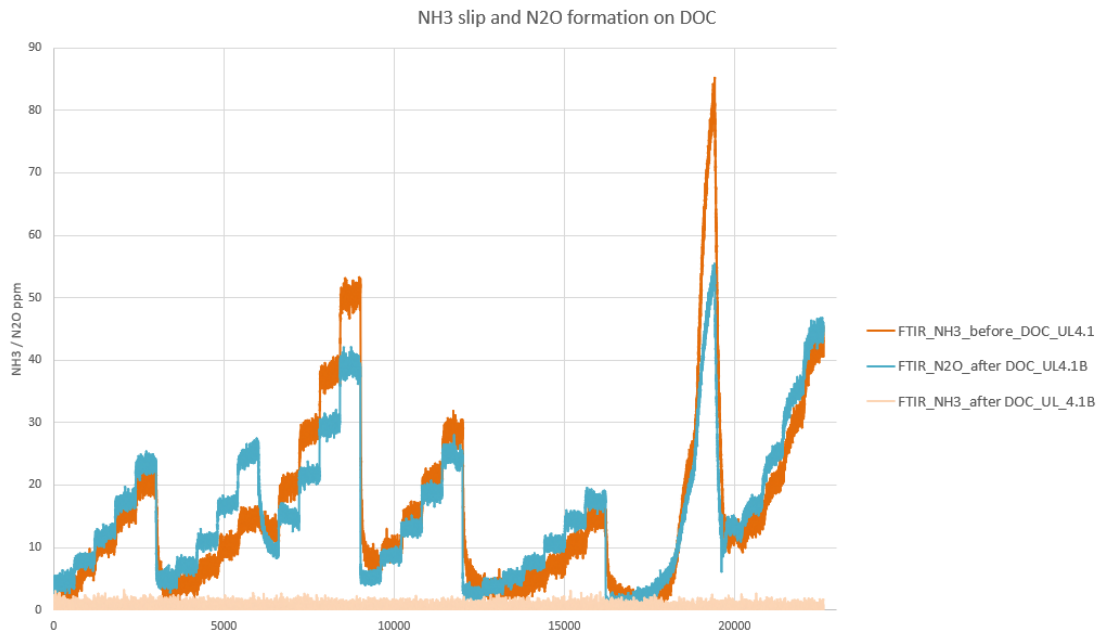
Mittauksissa tutkittiin erikokoisten suuttimien toimintaa erilaisilla ohjaustaajuuksilla mittaamalla aukioloaikoja ja urean tuottoa. Tulokset tukivat aiempaa havaintoa siitä, että suuttimen koon pienentäminen mahdollistaa suuttimen pitemmät aukioloajat, mikä tasaa ammoniakkin määrän vaihteluita putkistossa. Ammoniakin tasaisempi tuotto pakolinjaan puolestaan pienensi ammoniakkislippiä ja paransi NO<sub>x</sub>-konversiota. Mittaustuloksia ei ole sisällytetty opinnäytetyön julkaistavaan versioon kokonaisuudessaan.

## 5.5 Cc-järjestelmän ammoniakkislipin seuraukset

Testijärjestelmässä cc-komponenttien jälkeen oli sijoitettuna tyypillinen Stage V -tason järjestelmä, jonka ensimmäinen komponentti on hapetuskatalysaattori. Cc-SCR:n perässä olevasta ASC:stä huolimatta ylikuormituksesta tai nopeasta kuormitustilan vaihtelusta johtuen osa ammoniakista voi päästä ensimmäisen SCR-kokoonpanon läpi, jolloin ammoniakki päätyy hapetuskatalysaattoriin. Hapetuskatalysaattorille päätyessään ammoniakki muodostaa välittömästi typpidioksidia eli ilokaasua (N<sub>2</sub>O), joka on luokiteltu erittäin voimakkaaksi kasvihuonekaasuksi [32].



Yllä olevassa kaavassa esitellään reaktioyhtälö, jossa ammoniakki hapettuu ilokaasuksi ja vedeksi. Erilaisille kasvihuonekaasuiksi luokitelluille päästökomponenteille on määritelty CO<sub>2</sub> ekvivalenttikertoimet, joilla voidaan arvioida kyseisen kaasun ympäristövaikutuksia (Global Warming Potential, GWP) hiilidioksidiin verraten. 20 vuoden ajalta laskettu GWP kerroin ilokaasulle on 298 kertainen verrattuna hiilidioksidiin [33]. Testijärjestelmässä tutkittiin, miten voimakkaasti ammoniakki muuntuu ilokaasuksi hapetuskatalysaattorilla, ja kuinka suuren osan kokonaishiilidioksidiekvivalentista ilokaasu muodostaa. Mittaus suoritettiin FTIR-mittalaitteella hapetuskatalysaattorin molemmin puolin sijoitetuista näytteenottopisteistä ja KUVA 28:ssä esitetään mittauksen tulokset.



KUVA 28. NH<sub>3</sub> -> N<sub>2</sub>O reaktio DOC:illa

Mittauksien perusteella havaittiin, että kaikki DOC:ille päätyvä NH<sub>3</sub> hapettuu N<sub>2</sub>O:ksi ja H<sub>2</sub>O:ksi. Ammoniakkislipistä johtuvan N<sub>2</sub>O:n vaikutuksia arvioitiin kertomalla mitattu N<sub>2</sub>O-pitoisuus CO<sub>2</sub>-ekvivalentilla 298 ja sitä verrattiin mitattuun CO<sub>2</sub>:n määrään. Kuormituspisteestä ja ruiskutusmäärästä riippuen N<sub>2</sub>O lisää kokonaiskasvihuonepäästöjä 0–20 %, muodostaen pahimmillaan merkittävän vaikutuksen lopputulokseen. Selvitystyön alkuvaiheessa Tier 5 -lainsäädäntöön oli suunniteltu lisättäväksi CO<sub>2</sub> päästörajat, mutta ns. sekundääripäästöille luonnosvaiheessa ei ollut vielä esitetty rajoja.



KUVA 29. N<sub>2</sub>O CO<sub>2</sub>-ekvivalentilla kerrottuna suhteessa mitattuun CO<sub>2</sub>:een

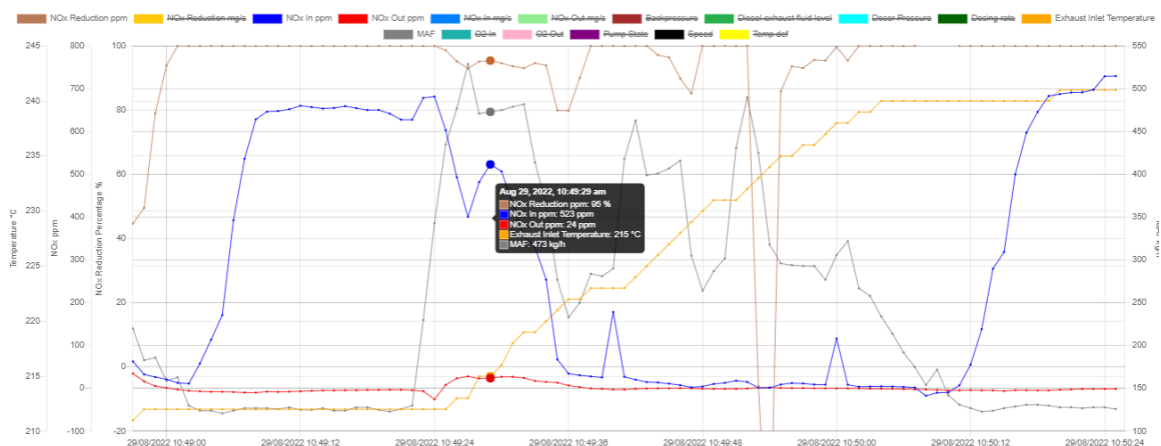
Vertailun vuoksi Lontoon alueella käyttöön otetussa CVRAS-ohjelmassa Euro VI -tason raskaalle kalustolle on määritelty, että yhteenlasketut sekundääripäästöt  $N_2O$  ja  $CH_4$   $CO_2$ -ekvivalenteilla kerrottuna pitää olla vähemmän kuin 5 % kokonaiskasvihuonekaasupäästöistä [34]. Tähän lukuun verraten mitattu jopa 20 %  $N_2O$ :n muodostama osuus kokonaispäästöistä on huomattavan korkea. Urearuiskutuksen tarkka kontrolli cc-SCR:llä on siis hyvin tärkeää, sillä kaikki cc-SCR:n läpi pääsevä ammoniakki on haitallista kokonaispäästöjen kannalta, eikä ylikuiskuttamalla saada ”kylästyä” tai valmisteltua pakokaasuseosta seuraavaa SCR:ää varten, koska DOC eliminoi ammoniakkin täysin.

Selvitystyön edetessä  $N_2O$ :lle CARB julkaisi ehdotuksen 0,120 g/kWh  $N_2O$  capping-rajoituksesta 19–560 kW -teholuokkiin. Suoritetuissa kylmä-NRTC-mittauksissa ainoa  $N_2O$ :ta mittaava FTIR-mittalaite oli kuitenkin sijoitettuna cc-järjestelmän jälkeen, jolloin koko järjestelmän jälkeen mitattuja kumulatiivisia  $N_2O$ -pitoisuuksia ei voitu laskea.

## 6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Aiempien päästölainsäädäntöjen tavoin Tier 5 tulee nostamaan päästörajoja niin, että uusia tekniikoita joudutaan ottamaan käyttöön päästötavoitteiden saavuttamiseksi. Testatut close-coupled-konseptia hyödyntävät järjestelmät antoivat merkkejä siitä, että kyseistä tekniikkaa hyödyntämällä päästöjä saadaan leikattua nykyistä tasoa matalammaksi. Uudet vaatimukset vaativat järjestelmiltä entistä varmempaa toimintaa koko tuotteen eliniän ajan ja lisäksi nostavat erityisesti kylmäkäynnistyksen jälkeisten ja matalakuormitteisten ajosuoritteiden aikana syntyvien päästöjen hallinnan tarvetta. Tier 5 -lainsäädäntöä tarkastellessa on seurattava myös eurooppalaisen Stage VI -lainsäädännön kehittymistä, jotta sen asettamat vaatimukset otetaan huomioon uusien päästölaitteistoiden kehittämisessä. Työkone-, moottori- ja jälkikäsitteilylaitteistoiden valmistajien näkökulmasta on huomattavasti yksinkertaisempaa, jos rinnakkaisiin, lähes samantasoisin päästöluokkiin saadaan toimittaa samankaltaisia laitteita.

Testitulosten perusteella close-coupled SCR -järjestelmän toiminnan kannalta oleellisimpia seikkoja ovat kennokemia ja -kombinaatio, cc-järjestelmää edeltävän termisen massan minimointi ja tarkasti kontrolloitu, hallittu tasainen urean annostelu pakokaasuun ja höyrystyneen ammoniakkin tasainen ohjaaminen cc-SCR-kennolle. Tässä työssä ei varsinaisesti tutkittu eri kennokemioiden ja -kombinaatioiden vaikutuksia, mutta alphasweep-testeissä 215 °C:een lämpötiloissa saatujen heikkojen tuloksien mahdollisia syitä päätettiin tutkia tarkemmin kennovalinnan näkökulmasta. Testijärjestelmiin verraten hieman pidemmillä vanadiini SCR:llä varustettuja järjestelmiä löytyy Proventian Procure Drive™ -liveseurantapalvelusta useista ajoneuvoista. Tuloksia verrattiin ajoneuvoon, jossa on layoutissa SCR:n etupuolella DOC lisäämässä pakokaasun NO<sub>2</sub>-pitoisuutta kappaleessa 2.3.3 esitellyn fast SCR -reaktion mahdollistamiseksi. KUVA 30:ssa esitetyn kuvankaappauksen perusteella DOC:illa ja vanadiini SCR:llä varustetun järjestelmän pitäisi pystyä jopa 80–100 % alenemiin jo 215 °C lämpötiloissa.



KUVA 30. Kuvankaappaus Procare Drive™ -palvelusta

## 6.1 Jatkotutkimustarpeet

Termisen massan määrä ennen SCR:ää on oleellisessa osassa kylmäkäynnistyksen jälkeisissä tilanteissa. Jatkotutkimuksissa tulisi selvittää toteutuskelpoinen ratkaisu lämpöhäviöiden minimointiin kylmäkäynnistyksen yhteydessä, jotta pakokaasun lämpöenergia saadaan käytettyä tehokkaasti kennojen lämmitykseen.

DOC:in lisääminen cc-SCR:n etupuolelle lisää tilantarvetta, kustannuksia ja termistä massaa. Jatkotutkimuksissa tulisi selvittää, onko DOC:in tuoma hyöty kuitenkin niin suuri, että DOC:in kanssa saavutettaisiin paremmat alenemat, vaikka termisen massan lisäys hidastaa cc-SCR:n lämpenemistä. CC-järjestelmää mitoitettaessa tulisi osata määritellä tavoitearvot alenemaprosentille, jota cc-SCR:illä tavoitellaan. Lisäksi jo mitoitusvaiheessa tarvitaan moottorin raakapäästötiedot ja toimintaan liittyvät parametrit. Tietojen perusteella cc-järjestelmän komponentit osattaisiin mitoittaa niin pieniksi kuin mahdollista. Pienempikokoiset kennot tuovat kustannussäästöä ja vähentävät termistä massaa ja pienempituottoisella ureasuuttimella voitaisiin saada tasaisempi ammoniakintuotto putkistoon.

Testitulosten perusteella kyseenalaiseksi jäi, onko vanadiini-SCR:n toiminta ilman DOC:ia riittävän tehokasta matalissa lämpötiloissa. DOC:in lisääminen osaksi cc-järjestelmää puolestaan mahdollistaisi matalissa lämpötiloissa paremmin toimivan kupari-SCR:n käytön cc-järjestelmässä, jolloin kupari-SCR:n tarvitsema desulfatointilämpötila voitaisiin saavuttaa myöhäistetyn polttoaineen jälki-

ruiskutuksen ja cc-DOC:in avulla. Samalla lämpötilannostolla voitaisi suorittaa myös DPF:n mahdollisesti tarvitsema aktiivinen regenerointi ja pää-SCR:n desulfatointi. Tutkimustiedon mukaan hapetuskatalysaattori tuottaa kuitenkin merkittävästi N<sub>2</sub>O:ta hiilivetytipoisuuksien noustessa, joten N<sub>2</sub>O:n tuotto regeneroinnin aikana tulisi selvittää mittaamalla ja arvioida sen vaikutus kokonaispäästöihin.

Lisäksi koko järjestelmän riittävän toiminnan varmistamiseksi testitulosten aikana tulisi mitata koko järjestelmän jälkeen myös sekundääriemissiot, joista tulisi erityisesti kiinnittää huomiota uutena rajoitettavaan N<sub>2</sub>O-pitoisuuksiin. N<sub>2</sub>O syntymekanismien ymmärtämiseksi jälkikäsitteilyjärjestelmästä tulisi mitata N<sub>2</sub>O-pitoisuuksia jälkikäsitteilyjärjestelmän eri kohdista, erilaisissa lämpötilatilanteissa ja erilaisilla urean ruiskutusmäärillä. Yleisesti mittaustapahtumiin on kiinnitettävä erityishuomioita, sillä poistoputkesta mitattavat pitoisuudet ovat jo niin pieniä, että pienetkin mittaus- tai anturivirheet muuttavat tuloksia oleellisesti, jolloin johtopäätösten tekeminen hankaloituu.

Lähtökohtaisesti cc-SCR:n pääkäyttö tapahtuisi matalissa lämpötiloissa, mutta olisi hyvä selvittää kuinka NO<sub>x</sub>-konversiot käyttäytyvät pää-SCR:llä hiukkassuodattimen aktiivisen regeneroinnin aikana ja määritelläänkö lainsäädännössä pitääkö pakokaasupäästöjen pysyä määriteltyjen rajojen sisällä myös tilapäiseksi ilmiöksi luokiteltavan aktiivisen regeneroinnin aikana. Tällöin hiukkassuodattimen jälkeinen lämpötila kohoaa useiksi minuuteiksi yli 500 asteen, jolloin SCR:n suorituskyky ei ole välttämättä enää optimaalisella tasolla. Regeneroinnin aikana cc-SCR:llä voitaisi leikata NO<sub>x</sub>-tasoa matalammaksi, jolloin kokonaispäästötaso säilyisi maltillisempänä huolimatta siitä, että pää-SCR:llä ylitetään optimaalinen toimintalämpötila.

Päästöjen jälkikäsitteilyn tarpeessa oleellisessa osassa on moottorin raakapäästötasot, joihin jälkikäsitteilyllä ei voi vaikuttaa. Korkeammat raakapäästötasot vaativat jälkikäsitteilyjärjestelmältä parempaa suorituskykyä, mutta toisaalta suorituskykyinen jälkikäsitteilylaitteisto tarjoaa moottorinohjauksen kehitykseen vapauksia. Järjestelmien toiminnan kannalta onkin oleellista, että järjestelmien saumattoman toiminnan lisäksi myös järjestelmien kehittäjät toimivat yhteistyössä ja ymmärtävät kokonaisuuden haasteet ja rajoitteet.

## 7 TOIMINTAMALLIN KEHITYS

Tavoitteena oli laatia case study -esimerkkiä hyödyntäen toimintamalli, jonka avulla tulevaisuuden päästömääräyksien aiheuttamat haasteet saataisi ratkottua standardoitua menetelmää hyväksikäyttäen. Tässä kappaleessa käydään tuotekehitysprojektin vaiheet läpi ja pohditaan, voisiko prosesseja virtaviivaistaa ja hukkaa poistaa lean-ajattelua hyödyntämällä.

### 7.1 Tavoitteen määrittely ja projektin perustaminen

Kehitystyöllä pyritään vastaamaan joko asiakkaan vaatimukseen tai tekemään sisäistä tutkimusta ja kehitystä, jolla pyritään saavuttamaan kilpailijoihin nähden etulyöntiasema määrättyssä markkinatilanteessa. Molemmissa tapauksissa on erittäin oleellista määrittellä tavoite, johon kehitystyöllä pyritään ja milloin kehitystyö voidaan todeta valmiiksi. Jos mahdollista, tavoite kuvataan siten, että sille voidaan määrittellä selkeät mittarit.

Käytetyn case study -esimerkin tilanteessa, jos lainsäädännön määrittelemät päästöraajat olisivat tiedossa, määriteltäisi tavoitteeseen tavoitellut päästöraajat tietyille päästökomponenteille valitussa mittaussykliin sen sijaan, että tavoite olisi ”vähentää pakokaasupäästöjä”. Mittareita tarkkailemalla voitaisi seurata projektin etenemistä ja todeta lopuksi saavutettiin asetetut tavoitteet. Tavoitetta määriteltäessä olisi hyvä miettiä, voidaanko mahdollisia tuloksia hyödyntää myös muissa sovelluksissa.

Case study -esimerkin kaltaisessa tilanteessa on odotettavissa, että Tier 5 -lainsäädännön voimaantulon jälkeen Euroopan lainsäädäntö Stage VI -lainsäädäntö tullaan ottamaan voimaan samankaltaisena. Välttääkseen kahden erilaisen järjestelmän kehityksen eri lainsäädännön vaikutuksen alaisille maantieteellisille alueille, tulisi eurooppalaisen Stage VI -lainsäädännön kehittymistä seurata tiiviisti Yhdysvaltojen Tier 5 -järjestelmien kehityksen yhteydessä. Projektiin osallistuvien henkilöiden ja sidosryhmien kesken sovitaan projektin tulosten jakamisesta - mitä tietoja jaetaan kenellekin ja kuka omistaa oikeudet niiden jatkokäytöstä.

## 7.2 Projektin rajaus

Tavoitteen selkiytyttyä määritellään projektin roolit ja vastuut projektiin osallistuvien henkilöiden ja sidosryhmien kesken esimerkiksi RASIC-mallia hyödyntäen, sekä määritellään projektin tavoiteaikataulu. Määritellään selkeästi projektin sisältö ja ne seikat, joihin kehitteillä olevan projektin puitteissa ei voida vaikuttaa ja mitkä ovat lopputuloksen kannalta oleelliset asiat.

Case study -esimerkissä projekti oli kohtuullisen kevyesti rajattu aikataulun ja käytettävissä olevien resurssien suhteen, mutta työn edetessä rajaukset kuitenkin tarkentuivat. Tutkittavien ja testattavien asioiden suhteen projekti rajattiin keskittymään vain yhdentyypiseen SCR:ään, tietyissä testisykleissä ja ilman DOC:ia. Rajaus oli tarpeen, sillä rajauksienkin kanssa mitattua dataa tuli paljon ja datan analysointi teetti huomattavan paljon töitä. Seuraavassa kehityshankkeessa rajauksen voisi tehdä resurssien ja aikataulun suhteen huolellisemmin jo suunnitteluvaiheessa, jolloin projektin etenemisen ja jäljellä olevien resurssien seuranta olisi helpompaa. Rajausta tehdessä voisi hyödyntää Hoshin-suunnittelun periaatteita koko organisaation osallistamisesta jo tavoitteiden määrittelyvaiheessa, jolloin jokainen projektiin osallistuva henkilö pääsisi vaikuttamaan jo aikaisessa vaiheessa projektin kulkuun. Tällöin rajausta tehdessä otetaan huomioon kaikkien osaaminen ja tietotaito ja voidaan välttyä tarpeettoman työn teolta, tai siltä, että suljetaan jokin oleellinen asia projektin ulkopuolelle. Jokaisen projektiin osallistuvan on hyvä ymmärtää projektin kokonaistavoite oman yksittäisen tehtävän lisäksi, jolloin pelkän vaaditun tehtävän suorittamisen lisäksi henkilöstöllä on mahdollista antaa projektille enemmänkin, kuin vain pyydetty minimisuoritus. Oppivan organisaation kannalta onkin oleellista, että henkilöstöllä on mahdollista suoriutua tehtävistä jopa hieman asetettua tavoitetta paremmin kokeilemalla uusia toimintatapoja ja kehitysideoita.

## 7.3 Nykytilanteen kuvaus

Tavoitteen määrittelyn jälkeen tulee kuvata nykytilanne tavoitteisiin peilaten, jolloin saadaan määritettyä määränpään lisäksi projektin lähtötaso. Nykytilanteen kuvauksessa määritellään nykyisen, toiminnaltaan tavoitejärjestelmää lähimpänä olevan tunnetun järjestelmän suorituskyky samoilla mittareilla, joilla tulevan kehitystyön arviointia suoritetaan. Määrittelyn avulla saadaan käsitys siitä, kuinka kauas tavoitteista nykyinen taso jää, eli kuinka paljon on kehityttävä tavoitteiden saavuttamiseksi. Nykytilanteen kuvauksessa määritellään myös kaikki ne tekijät, jotka vaikuttavat uuden

järjestelmän kehitykseen. Lisäksi arvioidaan muuttujien vaikutukset projektin kulkuun ja lopputulokseen.

Case study -esimerkissä nykytilanne voidaan kuvata kahdesta eri näkökulmasta. Ensimmäinen näkökulma on fyysisen järjestelmän toiminta, jolloin kuvataan nykyisen Stage V -tason järjestelmän toiminta Tier 5 -tavoitteisiin peilaten. Toinen näkökulma on tuotekehitysprosessin toiminta, jossa kuvataan tuotekehitysprosessin kulku nykyisiä käytäntöjä hyödyntäen.

#### **7.4 Resursointi ja aikataulutus**

Projektin aikataulun määrittelyssä jaetaan projektin etenemisessä tarvittavat vaiheet alku- ja loppupäivämäärien välille. Työmäärä kuhunkin vaiheeseen arvioidaan, ja resursseja projektille varataan budjetti huomioiden siten, että työt saadaan tehtyä aikataulun mukaisesti. Jälkikäsitteilylaitteiston prototyypivaiheen kehitystyö koostuu karkeasti seuraavista vaiheista:

- lähtötietojen selvittäminen
- komponenttivalinnat
- tilamallin rajaus
- alustava suunnittelu
- virtauslaskenta
- valmistettavuuden arviointi
- prototyypin valmistus
- laboratoriotestaukset
- tulosten analysointi ja johtopäätökset.

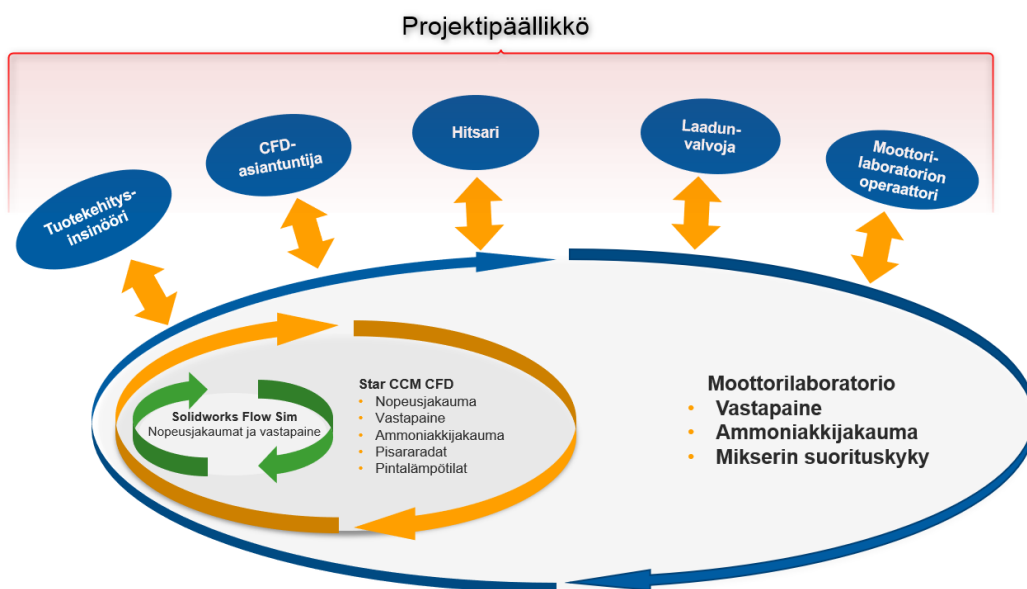
Projektille käytettävissä oleva aika ja resurssit jaetaan eri vaiheiden kesken ja määritellään tarvittavat katselmointiportit kriittisille vaiheille. Lisäksi määritellään projektin ne vaiheet, joiden aloitus on riippuvainen tietyn vaiheen valmistumisesta esimerkiksi gant-kaavion avulla.

#### **7.5 Työn suoritus**

Työn suorituksen onnistumisen ja tietojen hyödyntämisen kannalta ensiarvoisen tärkeää on yhtenevä ja selkeä dokumentointi koko projektin ajan ja kaikki tehdyt toimenpiteet perustuvat projekti-

suunnitelmaan. Projektisuunnitelmaan on mahdollista tulla muutoksia työn edetessä, mutta muutokset päivitetään suunnitelmaan ja kirjataan projektisuunnitelman muutoshistoriaan. Työtä tehdessä tulokset pitää kirjata ja dokumentoida sillä ajatuksella, että joku muukin kuin itse tekijä tarvittaessa löytää tulokset ja pystyy niitä tulkitsemaan. Raportointiin ja raporttien nimeämiseen käytetään standardoituja tapoja. Mittalaitteiden kalibroinnista huolehditaan säännöllisesti.

Esimerkkitapauksessa tuotekehitysprosessi koostuu alla olevan kuvan tavoin kolmesta rinnakkain etenevästä sisäkkäisestä kehityskierrosta, joihin kaikki projektiin osallistuvat henkilöt lisäävät oman työpanoksensa tietyissä vaiheissa. Työ alkaa tuotekehityssinsinöörin tekemällä alustavalla suunnittelulla Solidworks-ohjelmistolla, josta lupaavat kehitelmät siirretään jatkojalostukseen CFD-asiantuntijoille. CFD-asiantuntijoiden Star CCM-ohjelmistolla tekemä simulointimallien rakentaminen ja laskentakierros on hieman työläämpää kuin alustava suunnittelu ja sen tekeminen kestää hieman pidempään ja sitoo enemmän resursseja. Simulointikierron jälkeen edelleen lupaavilta näyttävät kehitelmät valmistetaan protopajalla hitsarien toimesta ja tuotteiden mittatarkkuus varmistetaan 3D-skannaamalla laadunvalvojen toimesta. Moottorilaboratorion henkilöstö suorittaa todelliset mitaukset järjestelmälle. Tuloksien perusteella järjestelmää järjestelmän kehitystä jatketaan alemmissa kehityskierroksissa, kunnes järjestelmän toiminta saadaan vaaditulle tasolle laboratoriotesteissä.



KUVA 31. Tuotekehitysprosessin kuvaus

Nykyinen toimintamalli on tehokas ja monipuolisesti henkilöstöä osallistava prosessi, mutta se tuottaa lyhyessä ajassa suuren määrän dataa ja prosessissa on osallisena useita henkilöitä eri organi-

saation tasoilta. Nykyisellään haasteena onkin miten ja minne data tallennetaan, miten sitä analysoidaan ja miten analysoitu tietoa saadaan hyödynnettyä työn aikana ja seuraavia kehitysprojekteja suunnitella. Lisäksi aina tieto ei liiku edestakaisin suorittavalle tasolle asti.

Nykyisellään laboratorioista saatava mittadata ja anturien nimeämien ei ole täysin standardisoitua eri testausolosuhteiden välillä, mistä johtuen analysointivaiheessa datan tulkitsemisiin liittyvissä haasteissa syntyy hukkaa. Lisäksi analysointi tapahtui käsin Microsoft Excel -sovelluksella, joka osoittautui hitaaksi menetelmäksi suuren datan analysoinnissa. Samasta moottorisolusta ja samasta testistä saatu mittadata on aina tietyn formaatin mukaista, joten datan analysointi ja graafien luonti olisi mahdollista automatisoida. Tämän työn yhteydessä automatisointia kokeiltiin Excelin makroja tai Power Query -laajennusta käyttäen, mutta testidataa oli keretty jo analysoida niin suuria määriä perinteisillä menetelmillä, ettei uusista järjestelmistä olisi saanut tähän projektiin merkittävää hyötyä ja niiden käyttö osoittautui haastavaksi. Jatkossa datan analysointia varten tulisi etsiä paremmin tarkoitukseen soveltuva työkalu.

Saaduista tuloksista osa tallennetaan Microsoft Sharepoint -pilvipalveluun projektikohtaisiin kansioihin, kokousten muistiinpanot Microsoft Onenote -sovellukseen projektikohtaisiin hakemistoihin ja osa tuloksista jää henkilöiden välisiin Teams- tai sähköpostiviestiketjuihin. Suunnitelma luodaan projektin alkuvaiheessa, mutta sen päivittäminen tai seuranta jää usein vähälle, vaikka lähtötietoihin tulisi muutoksia. Muistinvaraisten asioiden varmisteluun tai hankalasti löytyvän tiedon hakemiseen hukkaantui aikaa. Tämän välttämiseksi seuraavissa projekteissa voisi laatia yhden Project charter -tyyppisen pääsivun, jossa olisi ylläpidettyjen lähtötietojen lisäksi linkit kaikkiin eri sijainteihin tallennettuihin projektin kannalta oleellisiin tuloksiin.

## **7.6 Yhteenveto ja projektin päättäminen**

Projektin päättymisestä tiedotetaan kaikkia projektiin osallistuneita henkilöitä ja sidosryhmiä. Projektin päätyttyä laaditaan projektiin osallistuneiden henkilöiden kesken yhteenvetoraportti projektista, jossa vastataan ainakin seuraaviin kysymyksiin:

- Saavutettiinkö projektin tavoitteet?
- Pysyikö projekti aikataulussa?
- Toteutuiko projektin budjetti?
- Syntyikö projektissa jatkokehitystarpeita?

- Mitä opittiin?

Projektin tulokset jaetaan suunnitteluvaiheessa sovitulla tavalla projektiin osallistuvien henkilöiden ja tahojen kesken ja niitä hyödynnetään seuraavien kehitysprojektien suunnittelussa.

## 8 POHDINTA

Onnistuneen projektiluontoisen työn perusta on hyvä suunnitelma. Tämän opinnäytetyön suorittamista varten laadittiin osana opinnäytetyön kick-off-kurssia ideapaperi, joka toimi opinnäytetyön suunnitelmana. Ideapaperiin kirjoitettiin opinnäytetyön alustava otsikko ja listattiin teoriaosuudessa läpikäytäviä ja selvitystä vaativia aiheita, sekä kerättiin ainestoa ja lähdemateriaalia teoriaosuutta varten. Opinnäytetyön tutkimusongelma kuvattiin ideapaperiin yksinkertaisesti listaamalla tutkimuksen keskiössä olevat aiheet ranskalaisilla viivoilla. Ideapaperiin määriteltiin myös empiriaosion sisältö listaamalla kaikki kehitystyöhön liittyvät työvaiheet, mutta opinnäytetyön aloituspalaverin yhteydessä aihetta rajattiin hieman ja opinnäytetyöstä päätettiin jättää pois testijärjestelmien valmistusta ja suunnittelua koskevat kohdat. Tärkeimpänä kohtana oli selkeä aikataulutusta, joka rytmitti työn tekemistä ja pilkkoi ison kokonaisuuden pienempiin osakokonaisuuksiin. Tämän suunnitelman pohjalta kehitystyön tekeminen ja raportin laatiminen tuntui mielekkäältä, johdonmukaiselta kokonaisuudelta ja aikataulun mukaisten välietappien saavuttaminen kannusti työn tekemisessä.

Työn suorituksessa riitti haasteita. Päästöjen syntymekanismit ja niihin vaikuttavat tekijät vaikuttivat olevan erittäin laajasti tutkittu aihe, ja niistä löytyi lukuisia julkaisija ja tutkielmia. Siitä huolimatta useiden tutkimusten ja havaintojen perusteella voitiin todeta, että kokonaisuutena pakokaasujen jälkikäsitteilyssäilaitteistoissa tapahtuvat reaktiot ovat hyvin monisäikeisiä, hyvin monista eri tekijöistä riippuvia tapahtumia, joiden eksakti ja aukoton määrittely, mittaaminen tai käytöksen ennustaminen on haastavaa tai jopa mahdotonta. Ylipäätyään jälkikäsitteilyjärjestelmässä tapahtuviin reaktioihin vaikuttavien tekijöiden edes suurpiirteinen hahmottaminen osoittautui huomattavan haastavaksi tehtäväksi. Jälkikäsitteilyjärjestelmän lisäksi pakokaasun lämpötilaan ja koostumukseen voidaan vaikuttaa merkittävästi jo moottorinohjauksen puolella, mikä lisää kokonaisuuden monimutkaisuutta.

Lainsäädännön keskeneräisyys työn aloituksen aikana vaikeutti tavoitteiden määrittelemistä. Selvitystyö on kuitenkin aloitettava hyvissä ajoin, jotta aikanaan voimaan tuleviin määräyksiin ehditään reagoida. Tyypillisesti pelkän jälkikäsitteilyjärjestelmän osalta suunnittelu aloitetaan 3–4 vuotta ennen sarjatuotannon aloittamista, joten Tier 5 -tason laitteissa käytettävän teknologian valinta tulee tehdä lähivuosien aikana. Ehdotettuun Tier 5 -lainsäädäntöön tuli tarkennuksia työn suorituksen

aikana, mistä johtuen joitain raportin osia jouduttiin täsmentämään ja päivittämään jälkikäteen. Laboratoriotesteissä ei viimeisimpänä tulleita tarkennuksia esimerkiksi N<sub>2</sub>O-päästörajojen osalta ehditty ottaa huomioon.

Kokonaisuutena työn suorittaminen oli erittäin mielenkiintoinen projekti, joka lisäsi ymmärrystä päästölainsäädännöstä ja sen määräytymisestä, dieselmoottorin pakokaasupäästöjen syntymekanismista, jälkikäsittelyjärjestelmän toiminnasta ja sen mitoitukseen vaikuttavista tekijöistä. Määritelyihin tutkimuskysymyksiin löytyi vastaukset ja jatkoselvitystarpeitakin keksittiin. Proventian moottorilaboratorio ja muut työtilat tarjosivat erinomaiset puitteet tutkimuksen tekemiselle. Haluan lopuksi kiittää Arno Amberlaa työn ohjauksesta ja mielenkiintoisen aiheen tarjoamisesta, Tuomas Tyniä työtehtävien järjestelämisestä siten, että opiskelu mahdollistui työn ohessa ja laboratorion koko henkilöstöä kattavasta tuesta työn suorituksen aikana, sekä kaikkia muitakin työn suoritusta edesauttaneita henkilöitä.

## LÄHTEET

1. Business Finland 2021. Finnish consortium aims for a breakthrough in marine and off-road transport sustainability. Hakupäivä 26.2.2022. <https://www.businessfinland.fi/en/whats-new/news/cision-releases/2021/finnish-consortium-aims-for-a-breakthrough-in-marine-and-off-road-transport-sustainability>.
2. CARB, California Air Resources Board 2021. Potential Amendments to the Diesel Engine Off-Road Emission Standards: Tier 5 Criteria Pollutants and CO2 Standards. Hakupäivä 26.2.2022. <https://ww2.arb.ca.gov/es/our-work/programs/tier5/about>.
3. CARB, California Air Resources Board 2022. Potential Tier 5 Rulemaking Greenhouse Gas (GHG) Reducing and Capping Standards. Hakupäivä 28.9.2022. [https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2022-08/Capping%20Standards%20for%20Workgroup%20Meeting%2008082022%20V7%20Post%20Chris%20Revisions\\_ADA\\_07252022\\_%2802%29\\_SA\\_DL\\_JL.pdf](https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2022-08/Capping%20Standards%20for%20Workgroup%20Meeting%2008082022%20V7%20Post%20Chris%20Revisions_ADA_07252022_%2802%29_SA_DL_JL.pdf).
4. European Environment Agency 2021. Air pollutant emissions data viewer (Gothenburg Protocol, LRTAP Convention) 1990-2019. Hakupäivä 28.3.2022. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/air-pollutant-emissions-data-viewer-4>.
5. OEM Off-highway 2018. Engine Optimization for Stage V. Hakupäivä 28.9.2022. <https://www.oemoffhighway.com/engines/article/21023578/engine-optimization-for-stage-v>.
6. Heywood, J. B. 1988. Internal Combustion Engine Fundamentals. Singapore: McGraw-Hill Book Co
7. DieselNet. Emission standards for nonroad diesel engines, United States. ECOpoint. Inc. Hakupäivä 30.4.2022. <https://dieselnet.com/standards/us/nonroad.php>.

8. DieselNet. Emission standards for nonroad diesel engines, EU. ECOpoint. Inc. Hakupäivä 30.4.2022. <https://dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>.
9. DieselNet. International emission test cycles. Nonroad Transient Cycle (NRTC). ECOpoint. Inc. Hakupäivä 27.5.2022. <https://dieselnet.com/standards/cycles/nrtc.php>.
10. DieselNet. International emission test cycles. Nonroad Low Load Application Cycle (LLAC). ECOpoint. Inc. Hakupäivä 27.5.2022. <https://dieselnet.com/standards/cycles/llac.php>.
11. Majewski, W. Addy 2022. Selective Catalytic Reduction. DieselNet. ECOpoint. Inc. Hakupäivä 23.9.2022. [https://dieselnet.com/tech/cat\\_scr.php](https://dieselnet.com/tech/cat_scr.php).
12. Umicore Automotive Catalysts. Ammonia Slip Catalyst (ASC). Hakupäivä 27.5.2022. <https://ac.umicore.com/en/technologies/ammonia-slip-catalyst/>.
13. Umicore Automotive Catalysts. Selective Catalytic Reduction (SCR). Hakupäivä 27.5.2022. <https://ac.umicore.com/en/technologies/selective-catalytic-reduction/>.
14. Johnson Matthey. Selective catalytic reduction (SCR). Hakupäivä 27.5.2022. <https://matt-hey.com/products-and-markets/transport/mobile-emissions-control/diesel-applications/selective-catalytic-reduction>.
15. Task Force on Techno-Economic Issues (TFTEI) 2018. Reduction of NO<sub>x</sub> emissions. Hakupäivä 3.6.2022. <http://tftci.citepa.org/en/industrial-sources/reduction-of-nox-emissions#formation-process-in-combustion>.
16. Henningsen, S. 1998. Handbook of Air Pollution From Internal Combustion Engines, 1998. USA: Academic press limited.
17. Hoekman, S. K. 2020. Review of Nitrous Oxide (N<sub>2</sub>O) Emissions from Motor Vehicles. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 13(1), 79–98. Hakupäivä 7.10.2020. <https://www.jstor.org/stable/27034495>.

18. Majewski, W. Addy 2021. Diesel oxidation catalyst. DieselNet. ECOpoint. Inc. Hakupäivä 3.6.2022. [https://dieselnet.com/tech/cat\\_doc.php](https://dieselnet.com/tech/cat_doc.php).
19. Johnson Matthey. Diesel oxidation catalyst (DOC). Hakupäivä 30.9.2022. <https://matthey.com/products-and-markets/transport/mobile-emissions-control/diesel-applications/diesel-oxidation-catalyst>
20. Majewski, W. Addy 2020. Heat-Up catalyst systems 2020. DieselNet. ECOpoint. Inc. Hakupäivä 3.6.2022. [https://dieselnet.com/tech/engine\\_thermal-management\\_heat-up-catalyst.php](https://dieselnet.com/tech/engine_thermal-management_heat-up-catalyst.php).
21. Kamasamudram, K., Henry, C., Currier, N., & Yezerets, A. 2012. N<sub>2</sub>O Formation and Mitigation in Diesel Aftertreatment Systems. SAE International Journal of Engines, 5(2), 688–698. Hakupäivä 7.10.2022. <http://www.jstor.org/stable/26278393>.
22. Majewski, W. Addy 2020. Catalytic Diesel Filters. DieselNet. ECOpoint. Inc. Hakupäivä 23.9.2022. [https://dieselnet.com/tech/dpf\\_catalytic.php#systems](https://dieselnet.com/tech/dpf_catalytic.php#systems).
23. DPF structure. Otomatic, DPF cleaning machines manufacturer. Hakupäivä 30.9.2022. <https://www.otomatic.co.uk/dpf-structure/>
24. Holopainen, Erkki 2015. Hiukkassuodattimen regenerointi ulkoisella polttoaineen jälkiriiskutuksella. Oulun yliopisto. Konetekniikan osasto. Diplomityö. Hakupäivä 7.10.2022. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-201505281700>.
25. SAE international 2021. A Durable and Efficient Cu Zeolite based SCR Catalyst for Cold Start and High Temperature DeNO<sub>x</sub> Applications. Hakupäivä 15.7.2022. <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2021-26-0190/>.
26. Ottinger, N., Veele, R., Xi, Y., & Liu, Z. G. 2016. Conversion of Short-Chain Alkanes by Vanadium-Based and Cu/Zeolite SCR Catalysts. SAE International Journal of Engines, 9(2), 1241–1246. Hakupäivä 30.9.2022 <http://www.jstor.org/stable/26284893>.
27. Girard, J. W., Montreuil, C., Kim, J., Cavataio, G., & Lambert, C. 2009. Technical Advantages of Vanadium SCR Systems for Diesel NO<sub>x</sub> Control in Emerging Markets. SAE International Journal

of Fuels and Lubricants, 1(1), 4. Hakupäivä 30.9.2022. 88–494. <http://www.jstor.org/stable/26272026>.

28. Hoej, J., & Beier, M. J. 2014. Vanadium-Based SCR Systems: Release of Vanadium and Tungsten during Operation and Possibilities for Reducing Vanadium Emissions. SAE International Journal of Engines, 7(3), 1397–1400. Hakupäivä 30.9.2022. <http://www.jstor.org/stable/26277851>.

29. V-SCR lämpötilankesto ja ikääntyminen. Sisäinen lähde.

30. Brookshear, D., Nam, J., Nguyen, K., Toops, T., Binder, A. 2015. Impact of sulfation and desulfation on NO<sub>x</sub> reduction using Cu-chabazite SCR catalysts. Journal Article, Catalysis Today. Hakupäivä 30.9.2022. <https://www.osti.gov/biblio/1201286>.

31. Kurikka, Jukka 2022. Laboratorioinsinööri. Proventia Oy. Teams-keskustelu 30.9.2022.

32. Zhu M., Lai J-K., Wachs I. E. 2017. Formation of N<sub>2</sub>O Greenhouse Gas during SCR of NO with NH<sub>3</sub> by Supported Vanadium Oxide Catalysts. Operando Molecular Spectroscopy & Catalysis Laboratory, Department of Chemical & Biomolecular Engineering, Lehigh University, Bethlehem, PA 18015, United States. Hakupäivä 12.8.2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926337317310937>.

33. Climate Change Connection. CO<sub>2</sub> equivalents. Hakupäivä 12.8.2022. <https://climatechange-connection.org/emissions/co2-equivalents/>.

34. Zemo Partnership. The Clean Vehicle Retrofit Technology Guide. Hakupäivä 10.8.2022. [https://www.zemo.org.uk/assets/reports/ZEMO\\_RETROFIT\\_GUIDE\\_2021\\_Final.pdf](https://www.zemo.org.uk/assets/reports/ZEMO_RETROFIT_GUIDE_2021_Final.pdf).

35. K. Dongkyu, L. Changhee 2019. Performance Evaluations in Relation to Experimental Parameters in a Marine Generator Engine. Department of Mechanical and Shipbuilding Convergence Engineering, Pukyong National University, Busan 48547, Korea. Hakupäivä 10.8.2022. <https://www.mdpi.com/2077-1312/7/3/67/htm>.

36. SCR Space velocity. Sisäinen lähde.

## LIITTEET

UL\_1-testijärjestelmä, 10,5"x5,5" cc-SCR + inlinemikseri, liite 1

UL\_2-testijärjestelmä, 10,5"x5,5" cc-SCR + putkimikseri, liite 2

UL\_2.1-testijärjestelmä, 10,5"x5,5" cc-SCR + putkimikseri, liite 3

UL\_3-testijärjestelmä, 7,5"x6" cc-SCR + putkimikseri, liite 4

UL\_4-testijärjestelmä, 7,5"x6" cc-SCR + 49 supertornado ilman DOC:ia, liite 5

UL\_4.1-testijärjestelmä, 7,5"x6" cc-SCR + 49 supertornado ilman DOC:ia, liite 6

UL\_4.2-testijärjestelmä, 10,5"x5,5" cc-SCR + 49 supertornado ilman DOC:ia, liite 7

Anturilayout testijärjestelmissä, liite 8

UL\_1-testijärjestelmä, 10,5"x5,5" cc-SCR + inlinemikseri

LIITE 1

*Järjestelmien poikkileikkaukuvia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*

UL\_2-testijärjestelmä, 10,5"x5,5" cc-SCR + putkimikseri

LIITE 2

*Järjestelmien poikkileikkauksuvia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*

UL\_2.1-testijärjestelmä, 10,5"x5,5" cc-SCR + putkimikseri

LIITE 3

*Järjestelmien poikkileikkauskuvia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*

UL\_3-testijärjestelmä, 7,5"x6" cc-SCR + putkimikseri

LIITE 4

*Järjestelmien poikkileikkauksuvia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*

UL\_4-testijärjestelmä, 7,5"x6" cc-SCR + 49 supertornado ilman DOC:ia  
*Järjestelmien poikkileikkauskuvia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*

LIITE 5

UL\_4.1-testijärjestelmä, 7,5"x6" cc-SCR + 49 supertornado ilman DOC:ia  
*Järjestelmien poikkileikkauskuvia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*

LIITE 6

UL\_4.2-testijärjestelmä, 10,5"x5,5" cc-SCR + 49 supertornado ilman DOC:ia

LIITE 7

*Järjestelmien poikkileikkaukuvia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*

Anturilayout testijärjestelmissä

LIITE 8

*Järjestelmien poikkileikkaukuvia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*