



**Miljøministeriet**  
Miljøstyrelsen

# Rensning af brændeovnsrøg med plasmateknologi

MUDP Rapport

April 2021

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Thomas Nørregaard Jensen, Teknologisk Institut

Quynh Thu Nguyen, Teknologisk Institut

Stig Koust Hansen, Teknologisk Institut

Morten Gottlieb Warming-Jespersen, Teknologisk Institut

Frank Juel Nielsen, Morsø Jernstøberi A/S

Espen Løkkevig, Jøtul AS

Fotos:

Teknologisk Institut

ISBN: 978-87-7038-292-2

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse

# Indhold

<b>1.</b>	<b>Forord</b>	<b>5</b>
<b>2.</b>	<b>Ordforklaring</b>	<b>6</b>
<b>3.</b>	<b>Sammenfatning og konklusion</b>	<b>7</b>
<b>4.</b>	<b>Summary and conclusion</b>	<b>9</b>
<b>5.</b>	<b>Introduktion</b>	<b>11</b>
5.1	Emissioner fra brændeovne og deres regulering	11
5.2	Projektets formål	12
5.3	Projektets udførelse	13
<b>6.</b>	<b>Anvendelsesområder for kold plasma</b>	<b>14</b>
6.1	Anvendelser af kold plasma som beskrevet i den videnskabelige litteratur	14
6.1.1	Indledning	14
6.1.2	Sammenfatning	14
6.1.3	Introduktion til plasma	15
6.1.4	Kold plasma til rensning af brændeovnsrøg	15
6.1.5	Plasma til rensning af røggas fra diverse typer forbrændinger	17
6.1.6	Kold plasma til helt andre anvendelser	19
6.1.7	Referencer	19
6.2	Fagligt udgangspunkt til start af udviklingsarbejdet	20
6.2.1	Udvikling af plasmaenhed til rensning af røg fra brændeovne	20
6.2.2	Klargøring af ovne til implementering af plasmaløsning	21
6.2.2.1	Jøtul	21
6.2.2.2	Morsø	22
6.2.2.3	Aduro	22
6.3	Strukturering og planlægning af projektet	22
<b>7.</b>	<b>Analysemetoder</b>	<b>24</b>
7.1	Partikelmåling	24
7.1.1	Partikelantal med NanoScan SMPS	24
7.1.2	Partikelantal med OPS	25
7.1.3	Partikelmasse med DustTrak DRX	25
7.1.4	Black carbon	25
7.1.5	Gravimetrisk støvmåling	25
7.2	Gasser	27
<b>8.</b>	<b>Airmanager plasmaenhed</b>	<b>29</b>
8.1	Introduktion til Airmanager	29
8.2	Plasmaenhed koblet på det tertiære luftindtag	29
8.2.1	Forsøgsopstilling og fremgangsmåde	29
8.2.2	Resultater og diskussion	31
8.3	Plasmaenhed koblet på skorstenen	32
8.3.1	Forsøgsopstilling og fremgangsmåde	32

8.3.2	Resultater og diskussion	34
8.4	Udvikling af ny styring til Airmanager-plasmagenerator	35
8.5	Testmåling på syntetisk røggas	36
<b>9.</b>	<b>Tantec-plasmaenhed</b>	<b>38</b>
9.1	Introduktion til Tantec	38
9.2	Måling i skorsten på Teknologisk Institut	38
9.2.1	Forsøgsopstilling og fremgangsmåde	38
9.2.2	Resultater og diskussion	39
9.3	Test af enhed i testkammer hos Teknologisk Institut	40
9.3.1	Forsøgsopstilling og fremgangsmåde	40
9.3.2	Resultater og diskussion	41
9.4	Måling i skorsten hos Jøtul	43
9.5	Måling i skorsten hos Morsø	44
9.5.1	Formål	44
9.5.2	Procedure	44
9.5.3	Udtryk og definitioner	45
9.5.4	Resultater	46
9.5.5	Konklusion	52
<b>10.</b>	<b>Plasmaenhed fra Newcastle University</b>	<b>53</b>
10.1	Introduktion til gruppen på Newcastle University	53
10.2	Målekampagne hos Teknologisk Institut med Newcastle-plasmaenhed	53
10.2.1	Forsøgsopstilling og fremgangsmåde	53
10.2.2	Resultater og diskussion	54
<b>Bilag 1.Oversigt over forskningsprojekter inden for plasma- og forbrændingsteknologi</b>		<b>57</b>
<b>Bilag 2.Poster fra Leeds og Newcastle University</b>		<b>58</b>

# 1. Forord

Nærværende rapport er afslutningsrapporten for projektet "Rensning af brændeovnsrøg med kold plasma-teknologi" under Miljøstyrelsens tilskudsordning Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP). Projektet er gennemført i perioden fra november 2017 til marts 2020 med det overordnede formål at udvikle, implementere og evaluere effekten af kold plasmateknolog til rensning af brændeovnsrøg.

Projektet er gennemført i et samarbejde mellem Jøtul AS, Morsø Jernstøberi A/S, Aduro A/S, Airmanager og Teknologisk Institut. Rapporten giver et samlet overblik over det arbejde, der er udført i løbet af projektet og over de væsentligste udfordringer, resultater og konklusioner.

Teknologisk Institut

Aarhus, marts 2020

## 2. Ordforklaring

Nedenfor er vist en kort oversigt over forkortelser, som anvendes i denne rapport

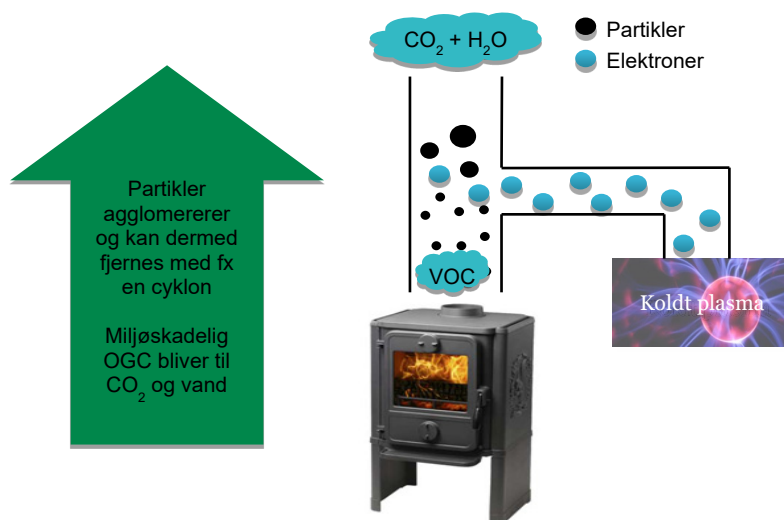
<b>Forkortelse</b>	<b>Engelsk betegnelse</b>	<b>Dansk betegnelse</b>
BC	Black carbon	-
CO	Carbon monoxide	Kulmonoxid/kulilte
CO <sub>2</sub>	Carbon dioxide	Kuldioxid
DIN+	German dust measurement	Tysk standardiseret støvmåling
DUT	Device under test	Enhed under test
NH <sub>3</sub>	Ammonia	Ammoniak
NO	Nitrogen oxide	Kvælstofoxid
NO <sub>2</sub>	Nitrogen dioxide	Kvælstofdioxid
NO <sub>x</sub>	Nitrous gases (sum of NO and NO <sub>2</sub> )	Nitrøse gasser (NO+NO <sub>2</sub> )
NS	Norwegian Standard	Norsk Standard
OGC	Organic gasous compounds	Organiske gasser
PM	Particulate Matter	Partikulært materiale
PSD	Particle Size Distribution	Partikelstørrelsesfordeling
PN	Particle Number Concentration	Partikelantalskoncentration
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer	-
TSP	Total suspended particles	Alle partikler op til 30-100 µm
THC	Total hydrocarbon	Total mængde kulbrinter
VOC	Volatile organic carbon	Flygtige organiske forbindelser

### 3. Sammenfatning og konklusion

Opgørelser af luftkvalitet fra DCE dokumenterer, at luftkvaliteten i Danmark konstant er blevet renere de sidste 30 år. Danmark har ikke været noteret for nogen overskridelse af EU's grænseværdier for luftkvalitet for partikler. Grænseværdierne for partikler udgør 40 µg/m<sup>3</sup> for PM10 og 25 µg/m<sup>3</sup> for PM2,5. Den gennemsnitlige eksponeringsfaktor for PM2,5 (AEI) opgjort som de seneste tre års gennemsnit er siden 2010 faldet med 30 %, så Danmark sammen med Norge, Sverige og Finland i dag er de lande i EU, der har den bedste luftkvalitet.

Reduktionen i indenlandsk udledning af PM2,5 dokumenteret af DCE understøttes af målinger af partikelemission fra brændeovne under prøver på Teknologisk Institut. Målingerne er udført efter den norske standard NS3058 i årene 2002 til dato. I den periode er middelemissionen faldet fra ca. 6 g/kg brænde til ca. 2 g/kg brænde. Det målte fald i partikelemission skyldes især den teknologiske udvikling af de danske brændeovne. Ovnene har fået betydeligt bedre luftsystemer og bedre isolerede brændkamre, dvs. primære virkemidler, der vedvarende forbedrer forbrændingskvaliteten. Forbrændingsmæssigt er optimeringen af brændeovne tæt på optimal, hvad angår det praktisk mulige i forhold til de primære forbedringer (brændkammer og lufttilsætning). Skal branchen i fremtiden sikre endnu lavere emissioner, er der behov for at undersøge de mulige sekundære reduktionsløsninger såsom filtre, katalysatorer og evt. kold plasma, forudsat at kold plasma viser sig at have en positiv effekt over for emissioner.

Nærværende projekts overordnede formål har været at udvikle, integrere og evaluere kold plasma-teknologi eller ikke-termisk plasma til rensning af brændeovnsrøg. Plasma betegner en energirig tilstand lignende et stof på gasform og består af en samling af ioniserede gasatomer og frie elektroner. Plasma er også kendt som den fjerde tilstandsform (udover fast form, flydende form og gasform). Kold plasma dannes typisk under atmosfærisk tryk eller vakuum ved en temperatur på 30 °C - 60 °C. Ambitionen i projektet har været at anvende kold plasma-teknologi til at få partiklerne i røggassen til at agglomerere, så de kunne fjernes med fx en cyklon, samtidig med at større molekyler som OGC skulle nedbrydes til kuldioxid og vand. Dette koncept er skitseret i nedenstående figur.



Airmanager har som underleverandør været ansvarlig for udviklingen af en plasmaenhed. Senere i projektet har Tantec A/S stillet en plasmaenhed til rådighed for projektet, og der er ydermere blevet udført målinger med plasmaenheder udviklet på Newcastle University. Billeder af de tre plasmaenheder anvendt i projektet er vist nedenfor med Airmanager-enheden til venstre, Tantec-enheden i midten og Newcastle-enheden til højre. Brændeovnsproducenterne Jøtul, Morsø og Aduro har bidraget med input til vidensindsamling om plasmateknologi, faglig viden i forbindelse med implementering og forsøgsdesign samt udviklingsmålinger i det omfang, det har været muligt.



Indledningsvist blev enheden fra Airmanager testet i det tertiære luftindtag og senere i skorstenen. Målingerne i disse målekampaner viste ingen signifikante forskelle på forsøg med hhv. uden plasma, og ingen systematiske trends kunne identificeres. Efterfølgende blev Airmanager-enheden skilt ad og ombygget til at kunne variere på både frekvens og spænding, og der blev ført syntetisk røggas gennem enheden. Heller ikke ved dette forsøg kunne der identificeres en signifikant ændring af emissionerne, uanset hvilken spænding/frekvens plasmaenheden blev påtrykt. Målinger har desuden vist, at frigivelsen af ozon ( $O_3$ ) stiger med spændingen.

Tantec-enheden var den anden enhed, der blev testet. Ved denne test blev der udført en referencemåling på en brændeovn uden enheden tændt efterfulgt af 2 dage med enheden tændt. Målinger herfra viste en svag effekt af, at størrelsen af partiklerne voksede (ca. 10 %). Desuden sås en svag reduktion af både kulmonoxid (CO) og organiske gasser (OGC). Til gengæld viste målingerne en stigning af  $NO_x$ -emissioner på ca. en faktor 15 på de to måledage med enheden tændt. Tantec-enheden blev herefter testet hos både Jøtul og Morsø, hvor enheden heller ikke viste signifikant reduktion af emissioner. Endelig blev enhedens effekt vurderet i et testkammer på 20 m<sup>3</sup> med levende lys som udledningskilde. Ej heller her var der en signifikant reduktion af partikler og ingen effekt på partikelstørrelsen.

To forskere fra Newcastle University, som anses for at være eksperter i anvendelsen af kold plasma til røgrensning, deltog i projektets sidste målekampagne. Gruppen har tidligere påvist en signifikant agglomerering af partikler samt reduktion af øvrige emissioner ved hjælp af gruppens plasmaenhed. Efter en målekampagne på fire dage og med to forskellige enheder (mesh- og stangplasma) viste resultaterne dog ingen signifikant reduktion på emissioner og ingen signifikant ændring af partiklernes størrelse (agglomerering).

I projektet er der dermed blevet gennemført målekampaner på tre forskellige plasmaenheder, hvoraf ingen viste hverken en signifikant effekt på partikelstørrelsen eller en reduktion af øvrige emissioner. På baggrund af projektets resultater, konkluderes det, at kold plasma-teknologi, som det er blevet anvendt i nærværende projekt, ikke har anvendelsespotentiale inden for røgrensning i brændeovne. Dette er naturligvis et skuffende men også et overraskende resultat, idet foreløbige resultater fra forsøg foretaget på Newcastle University så særdeles lovende ud. Generelt er måleusikkerheden på brændeovnsmission relativ høj, hvorfor det almindeligvis er nødvendigt med et større antal målinger for at opnå et signifikant resultat. Såfremt der ikke udføres nok gentagne målinger, vil der være større risiko for at fejlkonkludere på grund af måleusikkerheden.

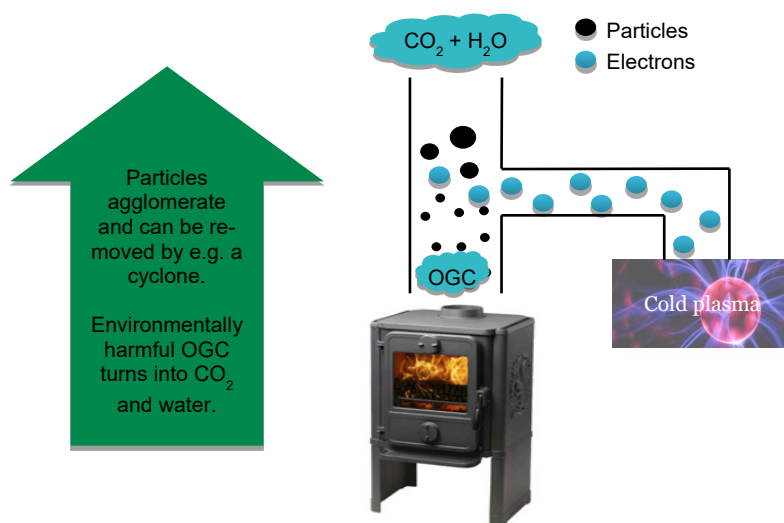


## 4. Summary and conclusion

Data from DCE (Danish Centre for Environment and Energy) document that the air quality in Denmark has become constantly cleaner during the last 30 years. Denmark has not been reported for any breach of EU's limit values for air quality of particles. The limit values for particles are  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  for PM10 and  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  for PM2.5. The average exposure factor for PM2.5 (AEI) calculated over the past three years has fallen by 30% since 2010, so Denmark together with Norway, Sweden and Finland are today the countries in the EU with the best air quality.

The reduction in the domestic emission of PM2.5 documented by DCE is supported by measurements of particle emission from wood stoves during tests at DTI. The measurements were carried out in accordance with the Norwegian standard NS3058 from 2002 to date. During that period, the average emission dropped from approx. 6 g/kg to approx. 2 g/kg firewood. The measured drop in the particle emission is mainly due to the technological development of the Danish wood stoves. The stoves have been equipped with significantly improved air systems and better insulated combustion chambers, i.e. primary measures that continuously improve the combustion quality. As to the combustion, the stoves are today optimised close to what is practically feasible for achieving primary improvements (combustion chamber and air addition). If the industry is going to ensure even lower emissions in the future, it will be necessary to investigate possible secondary reduction solutions such as filters, catalysts and possibly cold plasma, if it is proved to have a positive impact on emissions.

The overall purpose of this project has been to develop, integrate and evaluate cold plasma technology or non-thermal plasma for cleaning of flue gas from wood stoves. Plasma is a high-energy state similar to a gaseous substance and consists of a collection of ionized gas atoms and free electrons. Plasma is also known as the fourth state of matter (the others being solid, liquid and gas). Cold plasma is typically formed under atmospheric pressure or vacuum at a temperature of  $30^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}$ . The objective of this project has been to use cold plasma technology for making the particles in the flue gas agglomerate. When agglomerated, it is possible to remove the particles by e.g. a cyclone, and at the same time break down larger molecules such as OGC into carbon dioxide and water. The concept is outlined in the figure below.



As a subcontractor, Airmanager has been responsible for the development of a plasma unit. Tantec A/S has later made a plasma unit available for the project, and measurements were further performed with plasma units developed at Newcastle University. Pictures of the three plasma units used in the project are shown below with the Airmanager unit on the left, then the Tantec and the Newcastle unit on the right. The stove manufacturers Jøtul, Morsø and Aduro have contributed with knowledge acquisition on plasma technology, expertise in connection with implementation and test design, and development measurements.



Initially, the Airmanager unit was tested in the tertiary air intake and later in the chimney. The measurements showed no significant differences between the tests with and without plasma, and no systematic tendencies could be identified. Subsequently, the Airmanager unit was disassembled and rebuilt to adjust both frequency and voltage, and synthetic flue gas was passed through the unit. Also, this test showed no significant changes in the emission despite the use of different voltage/frequency. Moreover, the measurements showed that the ozone release increases with increasing voltage.

Testing of the Tantec unit included a reference measurement on a stove with the unit turned off, followed by 2 days' test with the unit turned on. The test showed a weak effect of increased particle size (about 10%). In addition, a minor reduction in both CO and OGC was seen. By contrast, the measurements showed an increase in the NO<sub>x</sub> emissions of approx. a factor of 15 on the two test days with the unit turned on. In addition, subsequent tests of the Tantec unit at both Jøtul and Morsø showed no significant reduction in emission. Finally, the power of the unit was tested in a 20 m<sup>3</sup> test chamber with candlelight as emission source. The result showed no significant reduction in particles and no effect on particle size.

Two researchers at Newcastle University, experts within the use of cold plasma for flue gas cleaning, participated in the project's final measurement campaign. They have previously demonstrated a significant agglomeration of particles as well as a reduction of other emissions when testing with the group's plasma unit. However, after a four-day measurement campaign with two different plasma units, the results showed no significant reduction in emissions and no significant change in the particle size (agglomeration).

The project team has thus implemented measurement campaigns on three different plasma units, none of which showed neither a significant effect on the particle size nor a reduction in other emissions. Based on the results of the project, it is concluded that cold plasma technology, as used in the present project, has no potential for use in the field of flue gas cleaning in stoves. Naturally, this is a disappointing but also a surprising result. The preliminary results from experiments performed at Newcastle University were promising. In general, the uncertainty of measurements of stove emissions is relatively high, thus normally many repeated measurements are necessary to obtain a significant result. If the number of measurements is insufficient, the risk of misinterpretations will be higher.

# 5. Introduktion

## 5.1 Emissioner fra brændeovne og deres regulering

Den seneste undersøgelse viser, at der findes ca. 670.000 brændeovne i Danmark.<sup>1</sup> I 2016 blev aldersfordelingen af brændeovne undersøgt, og det blev vurderet at 23 % af ovnene var produceret før 1990, 34 % var produceret mellem 1990 og 2005 og 40 % var produceret efter 2005. 3 % kunne ikke aldersbestemmes.<sup>2</sup> Der er altså stadig flere end 57 % af ovnene, som er produceret før 2005, og som vurderes at have højere partikelemission og lavere virkningsgrad end moderne ovne fra 2005 og frem.

Opgørelser af luftkvalitet fra DCE (Publikation nr. 360, The Danish Air Quality Monitoring Program, Annual Summary for 2018) dokumenterer, at luften over Danmark konstant er blevet renere de sidste 30 år. Danmark har ikke været noteret for nogen overskridelse af EU's grænseværdier for luftkvalitet for partikler. Grænseværdierne for partikler udgør 40 µg/m<sup>3</sup> for PM10 og 25 µg/m<sup>3</sup> for PM2,5. Den gennemsnitlige eksponeringsfaktor for PM2,5 (AEI) opgjort som seneste tre års gennemsnit er siden 2010 faldet med 30 %, så Danmark er sammen med Norge, Sverige og Finland i dag de lande i EU, der har den bedste luftkvalitet.

Reduktionen i indenlandsk udledning af PM2,5 dokumenteret af DCE understøttes af målinger af partikelemission fra brændeovne under prøvning på Teknologisk Institut efter den Norske standard NS3058. Prøvningerne er udført i årene 2002 til dato, og i den periode er middel-emissionen faldet fra ca. 6 g/kg brænde til ca. 2 g/kg brænde. Det målte fald i partikelemission skyldes især den teknologiske udvikling af de danske brændeovne. Ovnene har fået betydeligt bedre luftsystemer og bedre isolerede brændkamre, dvs. primære virkemidler der vedvarende forbedrer forbrændingskvaliteten.

I Danmark reguleres brug og opsætning af brændeovne i henhold til Bekendtgørelse 49 (BEK nr. 49 af 16/01/2018 - Bekendtgørelse om regulering af luftforurening fra fyringsanlæg til fast brændsel under 1 MW). Heri er det beskrevet, at kravene til brændeovne frem til 2022 skal overholde nedenstående krav.

---

<sup>1</sup> [https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater\\_2018/Antal\\_og\\_placering\\_af\\_smaa\\_fyringsanlaeg\\_i\\_Danmark.pdf](https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2018/Antal_og_placering_af_smaa_fyringsanlaeg_i_Danmark.pdf)

<sup>2</sup> [https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Statistik/braende\\_2015.pdf](https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Statistik/braende_2015.pdf)

**TABEL 1.** Krav til brændeovne i forbindelse med opstilling af nye ovne.

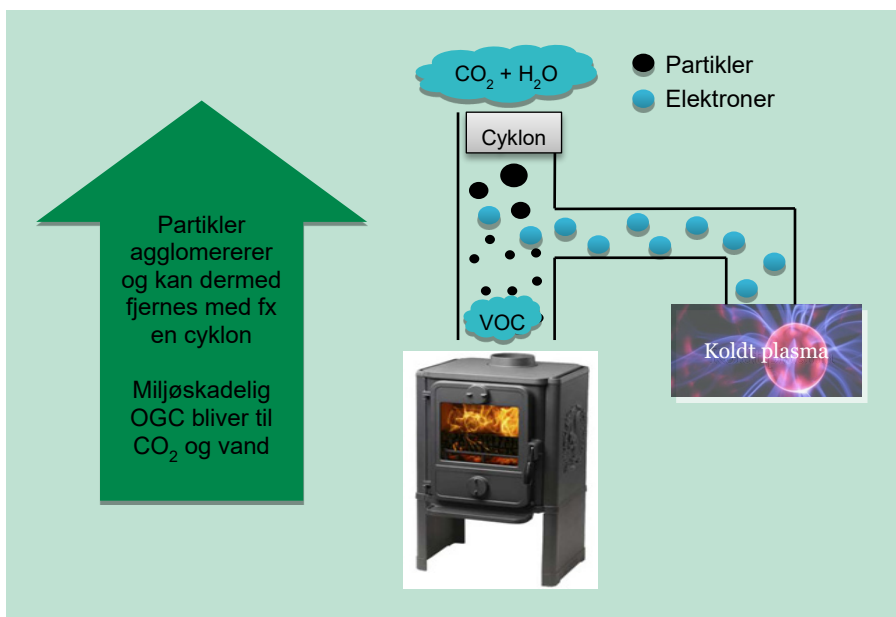
Stof	Grænseværdi	Måleprincip	Prøvningsmetode
Støv	4 g/kg og en maksimal emission på 8 g/kg i de enkelte prøvningsintervaller	Fortyndings-tunnel	NS 3058-1 og NS 3058-2 (udregnet efter NS 3059, klasse 1 eller 2, afhængigt af fyringsanlæggets størrelse) eller en tilsvarende standard for måling af partikelemission fra rumopvarmere, anerkendt i EU, EFTA-lande eller Tyrkiet.
	30 mg/normal m <sup>3</sup> ved 13 % O <sub>2</sub>	Direkte i røggas-kanalen	Relevant harmoniseret produktstandard eller, hvis ikke denne indeholder beskrivelse af emissionsmålemetoder, CEN/TS15883, Annex A. 1 (Apparater til fast brændsel til husholdningsbrug - Metoder til emissionsprøvning) eller tilsvarende standard for måling af partikelemissioner fra rumopvarmere, anerkendt i EU, EFTA-lande eller Tyrkiet.
OGC	120 mg C/normal m <sup>3</sup> ved 13 % O <sub>2</sub>	Direkte i røggas-kanalen	Relevant harmoniseret produktstandard eller, hvis ikke denne indeholder beskrivelse af emissionsmålemetoder, CEN/TS15883, Kapitel 4 (Apparater til fast brændsel til husholdningsbrug - Metoder til emissionsprøvning) eller tilsvarende standard for måling af OGC-emission fra rumopvarmere, anerkendt i EU, EFTA-lande eller Tyrkiet.

Forbrændingsmæssigt er optimeringen af brændeovne tæt på optimal, hvad angår det praktisk mulige for at opnå primære forbedringer (brændkammer og lufttilsætning). Skal branchen i fremtiden sikre endnu lavere emissioner, er der behov for at undersøge de mulige sekundære reduktionsløsninger såsom filtre, katalysatorer og evt. kold plasma, hvis det viser sig, at kold plasma har en positiv effekt over for emissioner.

## 5.2 Projektets formål

Nærværende projekts overordnede formål har været at udvikle, integrere og evaluere kold plasma-teknologi eller ikke-termisk plasma til rensning af brændeovnsrøg. Plasma betegner en energirig tilstand lignende et stof på gasform og består af en samling af ioniserede gasatomer og frie elektroner. Plasma er også kendt som den fjerde tilstandsform (udover fast form, flydende form og gasform). Kold plasma dannes typisk under atmosfærisk tryk eller vakuum ved en temperatur på 30 °C - 60 °C. Ambitionen i projektet har været at anvende kold plasma-teknologi til at få partiklerne i røggassen til at agglomerere, så de kunne fjernes med fx en cyclon, samtidig med at større molekyler som OGC skulle nedbrydes til kuldioxid og vand. Dette koncept er skitseret nedenfor i FIGUR 1.

Airmanager har som underleverandør været ansvarlig for udviklingen af en plasmaenhed. Senere i projektet har Tantec A/S stillet en plasmaenhed til rådighed for projektet, og der er ydermere blevet udført målinger med plasmaenheder udviklet på Newcastle University. Brændeovnsproducenterne Jøtul, Morsø og Aduro har bidraget med input til vidensindsamling om plasmateknologi, faglig viden i forbindelse med implementering og forsøgsdesign samt udviklingsmålinger i det omfang, det har været muligt.



**FIGUR 1.** Principskitse af et røgrenningssystem baseret på koldt plasma.

### 5.3 Projektets udførelse

Projektet løb fra november 2017 til marts 2020 og blev gennemført efter en projektførlængelse på 5 mdr. Den primære årsag til projektførlængelsen var, at der med plasmaenheden fra Airmanager ikke kunne måles en signifikant emissionspåvirkning, hvorefter der blev identificeret og arbejdet videre med plasmaenheder fra Tantec og Newcastle University.

I de følgende kapitler beskrives det udførte arbejde i projektet – fra vidensindsamling gennem et litteraturstudie til udvikling og test af tre forskellige plasmaenheder (se FIGUR 2). Indledningsvist blev enheden fra Airmanager testet i det tertiære luftindtag og senere i skorstenen og på syntetisk røggas med anvendelse af ny styring, der tillod variation af spænding og frekvens. Efterfølgende blev enhederne fra Tantec og Newcastle Universitet testet i en brændeovns-skorsten og i et specialbygget testkammer, hvor levende lys blev anvendt som partikelkilde.



**FIGUR 2.** Billeder af de tre plasmaenheder testet i projektet. Fra venstre mod højre ses enheden fra Airmanager, Tantec og Newcastle Universitet.

# 6. Anvendelsesområder for kold plasma

Resultatet af vidensindsamling fremgår nedenfor af Afsnit 6.1. På baggrund af vidensindsamlingen blev projektets faglige udgangspunkt defineret, hvilket er beskrevet i Afsnit 6.1.7.

## 6.1 Anvendelser af kold plasma som beskrevet i den videnskabelige litteratur

### 6.1.1 Indledning

Nærværende vidensindsamling sammenfatter de væsentligste resultater fra ni videnskabelige artikler publiceret i journaler under peer review (se Afsnit 6.1.7) samt en poster fremlagt ved en international konference om biomasseemissioner i 2015. Hovedkonklusionerne fra artiklerne sammenfattes i Afsnit 6.1.2, mens en mere dybdegående gennemgang præsenteres i Afsnit 6.1.3, 6.1.4 og 6.1.5.

### 6.1.2 Sammenfatning

Det vurderes, at plasma har et stort potentiale inden for forbrændingsteknologi. Det er vigtigt at være opmærksom på, at der findes to overordnede typer plasma; nemlig kold plasma (også kaldet ikke-termisk eller ikke-ligevægtsplasma) og termisk plasma (også kaldet ligevægtsplasma). Under hver kategori findes forskellige plasmatyper med forskellige egenskaber. Her er det vigtigt at vælge en plasmatype, der passer til den anvendelse, der påtænkes.

Brug af plasma i forbrændingsøjemed har vist sig at kunne oxidere NO, SO, hydrocarboner, CO, sod, soluble organic fraction (SOF) og VOC, hvorved mængden af disse mindskes, og tillige kan plasma bidrage til, at små partikler agglomererer, så det er nemmere at fange dem efterfølgende i en filterløsning som fx en cyklon. Disse aspekter er alle relevante i forbindelse med biomasseforbrænding, herunder afbrænding af træ i en brændeovn. Derved er kold plasma-teknologi lovende for projektet, da der i andre anvendelser er set positive effekter.

Igennem litteraturstudiet er der gennemgået en række artikler, der kort er beskrevet i TABEL 2. Se desuden afsnit 6.1.7 for de fulde oplysninger om referencerne.

**TABEL 2.** Oversigt og kort beskrivelse af videnskabelige artikler, som er gransket i nærværende litteraturstudie.

Artikel	Kort beskrivelse
(Fang, Hallam, & Bermúdez, 2016)	Kemiske stoffer med relation til mugdannelse i vin nedbrydes effektivt med kold plasma.
(Ju & Sun, 2015)	Omfattende reviewartikel, der beskriver anvendelserne af såkaldt plasma-assisteret forbrænding, der er en lovende teknologi, hvor plasma fx anvendes til at reducere emissioner fra forbrændingsprocesser.
(Kim, et al., 2017)	Studiet viser, at anvendelsen af kold plasma i gasturbiner reducerer udledningen af NO <sub>x</sub> og CO.
(Ma, et al., 2017)	I kulfyret røggas har kold plasma vist sig nyttig til oxidation af NO <sub>x</sub> samt svovlforbindelser og kviksølv.
(Nehra, Kumar, & Dvivedi, 2008)	Reviewartikel omhandlende egenskaberne af ikke-termisk plasma dannet på forskellige måder.

Artikel	Kort beskrivelse
(Oda, 2003)	Dette studie indikerer, at kold plasma kan benyttes til effektivt at dekomponere VOC.
(Sagás, Maciel, & Lacava, 2016)	Anvendelse af kold plasma i naturgasafbrænding bevirker et anderledes flammemønster med ikke-synlige flammer. Samtidig observeres der højere hydrogenproduktion end ellers, hvilket er positivt.
(Varela, Sagás, & Martins, 2016)	Studiet indikerer, at kold plasma har en positiv effekt på antændelse og flammestabilisering i forbrændingsprocesser.
(Wang, Gu, Lei, Cai, & Li, 2015)	Det konkluderes i dette studie, at sodmængden reduceres gennem kemisk reaktion med oxiderende radikaler produceret af det kolde plasma.
(Zhang, et al., 2015)	Fortrinsvis kvalitativt studie af effekten af kold plasma på brændeovnsrøg. Resultaterne viser, at udledningen af VOC reduceres, partikler agglomererer, og endelig oxideres en del NO til NO <sub>2</sub> .

### 6.1.3 Introduktion til plasma

Plasma kan lidt forsimplet betragtes som en ioniseret gas. Plasma betragtes desuden som værende den fjerde tilstandsform af stof, hvor de tre andre er de mere kendte tilstande: fast, flydende og gasformig. Kold plasma, som dette projekt beskæftiger sig med, er også kendt under betegnelsen ikke-termisk plasma. I TABEL 3 nedenfor er vist forskellige slags plasma, som er frembragt ved forskellig strømstyrke og spænding. Dette giver forskellige egenskaber af den genererede plasma og forskellige undergrupper inden for såvel kold plasma som termisk plasma.

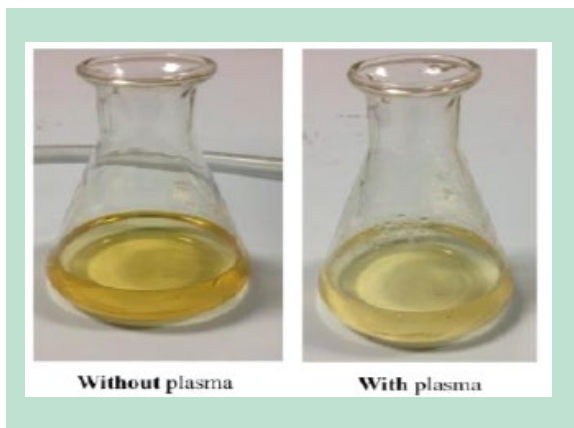
**TABEL 3.** Oversigt over forskellige slags plasma frembragt ved forskellig strømstyrke og spænding.

	Arc	NSD	RF	DBD	Corona	Streamer	Spark, arc	MW
Pressure (atm)	Up to 10 <sup>-20</sup>	Up to 2	10 <sup>-3</sup> -1	10 <sup>-3</sup> -1	0.1-10	0.1-1	Up to 10 <sup>-20</sup>	0.1-1
Current (A)	1-10 <sup>5</sup>	50-200	10 <sup>-4</sup> -2	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-3</sup>	0.01-50	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-3</sup>	1-10 <sup>5</sup>	0.1-1
Voltage (kV)	0.01-0.2	1-100	0.5-2	1-10	0.1-50	10-100	10-100	0.1-100
E/N (Td)	0.5-2	100-1000	10-100	10-100	50-200	10-100	10-100	10-50
T <sub>e</sub> (K)	3000-10,000	300-600	300-1000	300-500	500-1000	300-500	500-20,000	300-6000
T <sub>e</sub> (eV)	0.5-2	5-30	1-5	1-5	1-5	1-3	1-5	1-5
n <sub>e</sub> (m <sup>-3</sup> )	10 <sup>21</sup> -10 <sup>22</sup>	10 <sup>17</sup> -10 <sup>19</sup>	10 <sup>17</sup> -10 <sup>19</sup>	10 <sup>17</sup> -10 <sup>19</sup>	10 <sup>12</sup> -10 <sup>15</sup>	10 <sup>17</sup> -10 <sup>18</sup>	10 <sup>17</sup> -10 <sup>23</sup>	10 <sup>15</sup> -10 <sup>23</sup>
Refs.	[110]	[37,112]	[113]	[37]	[110,114,115]	[110]	[110]	[37]

Det har vist sig, at plasma har gavnlige effekter på forbrændingsreaktioner, hvilket vil blive uddybet i det nedenstående. Imidlertid mangler der stadig kvantitative data af høj eksperimentel kvalitet for at kunne redegøre detaljeret for processerne. Derudover findes der en større undergruppe af kold plasma-typer, hvilket bidrager til at øge kompleksiteten. Dette har betydet, at plasma til en vis grad er blevet betragtet som "en magisk sort boks", som øger forbrændingen signifikant, men hvor koblingerne mellem flow, forbrænding og plasma er kompliceret. Dette uddybes i næste afsnit.

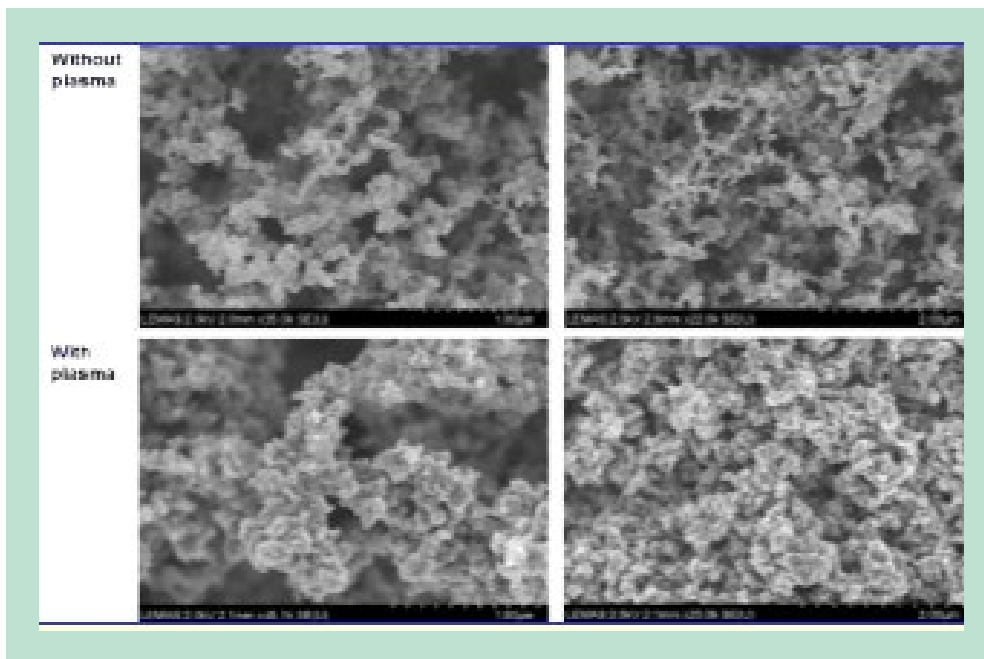
### 6.1.4 Kold plasma til rensning af brændeovnsrøg

Litteraturstudiet har vist, at der kun er foretaget få undersøgelser af rensning af brændeovnsrøg med kold plasma. Samtidig er det kun begrænsede, indledningsvise studier af kold plasma i forhold til emissionsreduktion ved biomasseforbrænding, der er udført ved universiteterne i Leeds og Newcastle. Resultaterne er ikke publiceret i peer reviewed-tidsskrifter, men en poster præsenteret på en konference (Zhang, et al., 2015) er tilgængelig med en række informationer. Her er effekten af kold plasma i forbindelse med røgrensning fra brændeovne præsenteret i et meget grundlæggende og primært kvalitativt studie. De præsenterede resultater viser, at der frigives mindre VOC, når plasmaenheden er tilsluttet brændeovnen, som vist i FIGUR 3.



**FIGUR 3.** Billede af opsamlet VOC fra brændeovn, uden og med plasmarensning (Zhang et al., 2015). Den lysere farve af væsken til højre 'With plasma' viser, at der ikke er opsamlet så meget VOC i denne væske. Dette indikerer, at der er nedbrudt VOC'er inden opsamlingen, altså at kold plasma har haft en positiv effekt.

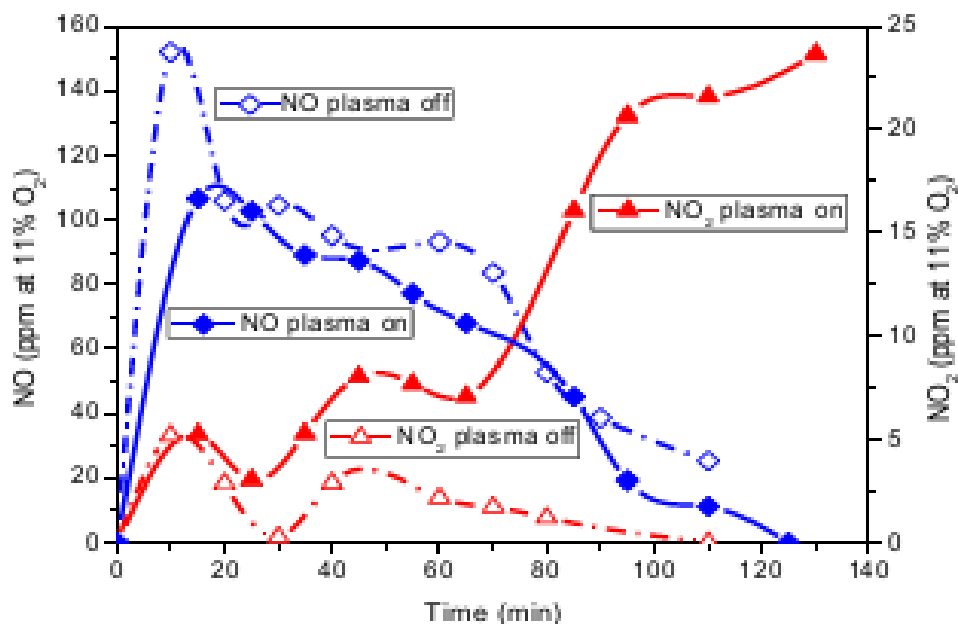
Partiklerne i brændeovnsrøgen viser tendens til at agglomerere ved brug af kold plasma som illustreret i SEM-billeder vist i FIGUR 4.



**FIGUR 4.** SEM-billeder af partikler fra brændeovn - øverst uden brug af plasmarensning og nederst med brug (Zhang et al., 2015). De nederste 'With plasma'-billeder viser, at der er større agglomerater af partikler. Effekten tilskrives kold plasma.

Endelig sker der en ændring i forhold til  $\text{NO}_x$ , i og med, at plasmaet bevirker oxidation, så mængden af  $\text{NO}_2$  øges, og  $\text{NO}$  mindskes ved brug af plasmaenheden, som det ses i FIGUR 5.





**FIGUR 5.** Påvirkning af NO og NO<sub>2</sub> ved brug af plasma. De blå kurver viser koncentrationerne af NO med hhv. tændt og slukket plasma, og ligeledes viser de røde kurver koncentrationen af NO<sub>2</sub> med tændt/slukket plasma. Graferne indikerer, at plasma faciliterer omdannelsen af NO til NO<sub>2</sub> (Zhang et al., 2015).

I FIGUR 5 viser de fulde linjer (ikke-stiplede) korrelationen mellem NO<sub>2</sub> og NO. Med kold plasma tændt ses det, at NO<sub>2</sub>-niveauet stiger kraftigt, samtidig med, at der er et fald i NO. Dette fald i NO ses til dels også uden brug af kold plasma, men der ses ikke samtidig den store stigning i NO<sub>2</sub>. Det vil i dette projekt blive undersøgt, om denne korrelation kan eftervises. Det vil i løbet af projektet blive undersøgt, hvorledes det forholder sig i NO<sub>x</sub>-emissionen fra brændeovnene.

Dette løser i sagens natur ikke problemet med NO<sub>x</sub>-emission som sådan, men er dog et vigtigt trin i renseprocessen, da man undgår frigivelse af det mere reaktive NO, ved at plasmaet har bevirket en oxidation af denne.

Yderligere information angående disse studier er som før nævnt i øjeblikket ikke tilgængelig for offentligheden. Teknologisk Institut har derfor haft personlig kontakt med begge universiteter for at indhente så mange oplysninger som muligt.

### 6.1.5 Plasma til rensning af røggas fra diverse typer forbrændinger

Kold plasma benyttes til røggasrensning i andre forbrændingssituationer, hvoraf de vigtigste situationer tillige med de vigtigste resultater vil blive sammenfattet her, da generel information vedrørende forbrændingsteknologi forventes at kunne bidrage med nyttig information til nærværende projekt. Når der anvendes plasma i en forbrændingssituation kaldes det også plasma-assisteret forbrænding, hvilken er en lovende teknologi til at kontrollere en forbrænding og dermed forhåbentlig forbedre den og samtidig reducere emissionerne (Ju & Sun, 2015).

Effekten af kold plasma kan ud fra en kemisk vinkel beskrives på følgende måde: Kold plasma bevirker, at der åbnes nye reaktionsveje for nedbrydning af de forbindelser, der findes i røggassen, fx VOC. Dette sker ved, at den store elektriske spænding, som sendes ind i systemet, initierer sammenstød mellem iltmolekyler og elektroner med høj energi, som dermed danner

plasmaet. Plasmaet, som er en ioniseret gas, indeholder desuden forskellige radikaler, fx hydroxyl-radikaler, som er ekstremt reaktive. Herved bliver NO, SO, uforbrændte carbonhydrater og sod oxideret. Det diskuteres i litteraturen, hvilken type plasma der er den bedste til at forbedre forbrændingsreaktioner, men da der endnu ikke er et kendt, definitivt svar, vil det i dette projekt blive tilstræbt at vælge en plasmatype, der dels er kendt som reaktiv i forhold til luftrensning, og dels dannes ved spændinger og strømstyrker, der ikke udgør en sikkerhedsrisiko.

En oversigt over en række forskningsprojekter inden for plasma- og forbrændingsteknologi er vist i Bilag 1. Oversigten viser, at plasma i forbrændingsprocesser primært er blevet anvendt til at optimere antændelse og kun i mindre grad til at reducere emissioner af partikler og gasser.

Effekten af kold plasma er blevet undersøgt i gasturbiner i forhold til NO<sub>x</sub> og CO, og et studie har vist, at det inden for denne anvendelse er muligt at reducere begge ved anvendelse af en kold plasma-rensningsteknologi (Kim, et al., 2017).

I kulfyret røggas har kold plasma vist sig nyttig til at reducere mængden af NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> og Hg<sup>0</sup> (Ma, et al., 2017). Selve omdannelsen af henholdsvis SO<sub>2</sub>, NO og frit kviksølv er illustreret i FIGUR 6 og sker ved reaktionsmekanismer, hvilket ikke vil blive uddybet i detalje her.

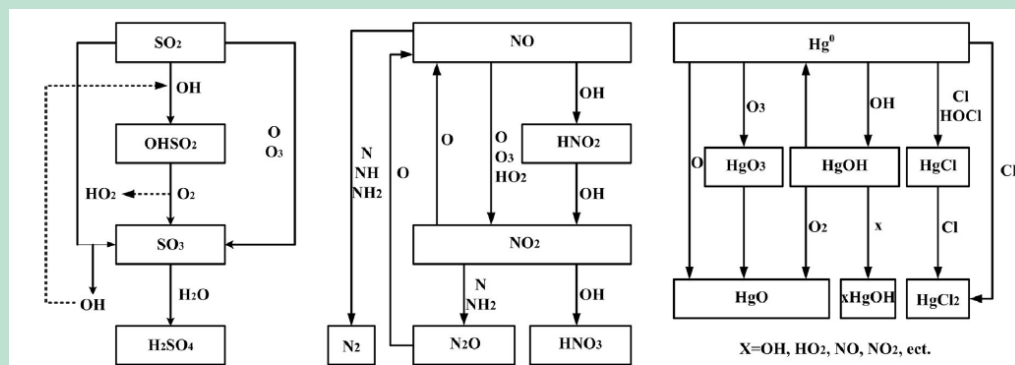


Fig. 2. SO<sub>2</sub>, NO, and Hg<sup>0</sup> removal pathways under the action of different free radicals [25,26].

**FIGUR 6.** De kemiske reaktioner i omsætning af svovloxider, nitrogenoxider og frit kviksølv (Ma et al., 2017).

I forhold til nærværende projekt må det forventes, at især NO-omdannelsen til NO<sub>2</sub> er af relevans. Svovlindholdet i biomasse er generelt så lavt, at SO<sub>x</sub> ikke forventes at være et problem, ligesom kviksølv ikke er et reelt problem i forhold til brændsel i brændeovne, såfremt der fyres med træ af en fornuftig kvalitet.

I et andet studie er kold plasma blevet anvendt til at dekomponere flygtige, organiske forbindelser (VOC) i kombination med en katalysator (Oda, 2003). Som modelstof blev triklorætylen studeret i detalje, men resultaterne vurderes at være mere almenlydige og dække en række flygtige, organiske forbindelser.

Sod og SOF fra dieselmotorer og mulig omdannelse af disse ved brug af kold plasma er også blevet undersøgt (Wang, Gu, Lei, Cai, & Li, 2015). Det konkluderes i dette studie, at sodmængden reduceres gennem kemisk reaktion med oxiderende radikaler produceret af det kolde plasma. Den detekterede partikelmasse af SOF blev reduceret fra 31 % til 24 % ved anvendelse af plasma. Ydermere blev det observeret, at middelpartikeldiameteren faldt, og graden

af agglomeration aftog. Dette er imidlertid modstridende med observerede resultater i forbindelse med biomasseforbrænding, hvor en stigende grad af agglomeration blev fundet, som det fx var tilfældet i studiet af Zhang et al., 2015.

I flere studier er der benyttet plasma i forbindelse med undersøgelse af antændelse, flammestabilisering og flammemønster (Varella, Sagás, & Martins, 2016), (Sagás, Maciel, & Lacava, 2016), hvor det viser sig, at plasmaet har nogle ønskværdige egenskaber. Effekten af dette i forhold til flammer i brændeovnen er ukendt, men i dette projekt vil en evt. effekt på flammerne ved plasmatilførsel i brændeovnenes luftindtag blive vurderet.

### 6.1.6 Kold plasma til helt andre anvendelser

Slutteligt skal det nævnes, at kold plasma har været anvendt til en lang række anvendelser, og langt fra udelukkende indenfor forbrændingsteknologi. For at illustrere bredden vil et par enkelte eksempler blive nævnt her:

Haloanisoler nedbrydes effektivt med kold plasma og løser derved et stort problem med dannelse af mug i vin, der ellers resulterer i stort tab (Fang, Hallam, & Bermúdez, 2016).

Plasmateknologi har været anvendt i forbindelse med pakning af kød i et EU-projekt, som Teknologisk Institut har deltaget i.<sup>3</sup>

### 6.1.7 Referencer

Nedenstående referencer er blevet anvendt i nærværende litteraturstudie.

- Fang, L., Hallam, D., & Bermúdez, R. (2016). Experimental studies on removal of airborne haloanisoles by non-thermal plasma air purifiers. *Energy and Buildings*, 130, 238-243.
- Ju, Y., & Sun, W. (2015). Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry. *Progress in Energy and Combustion Science*, 48, 21-83.
- Kim, G., Seo, B., Lee, W., Park, J., Kim, M., & Lee, S. (2017). Effects of applying non-thermal plasma on combustion stability and emissions of NO<sub>x</sub> and CO in a model gas turbine combustor. *Fuel*, 194, 321-328.
- Ma, S., Zhao, Y., Yang, J., Zhang, S., Zhang, J., & Zheng, C. (2017). Research progress of pollutants removal from coal-fired flue gas using non-thermal plasma. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 791-810.
- Nehra, V., Kumar, A., & Dvivedi, H. (2008). Atmospheric Non-Thermal Plasma Sources. *International Journal of Engineering*, 2, 53-68.
- Oda, T. (2003). Non-thermal plasma processing for environmental protection: Decomposition of dilute VOCs in air. *Journal of Electrostatics*, 57(3-4), 293-311.
- Sagás, J., Maciel, H., & Lacava, P. (2016). Effects on non-steady state discharge plasma on natural gas combustion: Flammability limits, flame behavior and hydrogen production. *Fuel*, 182, 118-123.
- Varella, R., Sagás, J., & Martins, C. (2016). Effects of plasma assisted combustion on pollutant emissions of a premixed flame of natural gas and air. *Fuel*, 184, 269-276.

---

<sup>3</sup> <https://www.teknologisk.dk/ydelse/kold-plasma-skal-reducere-bakterie-indholdet-i-faerdigpakket-koed/34363>

Wang, P., Gu, W., Lei, L., Cai, Y., & Li, Z. (2015). Micro-structural and components evolution mechanism of particular matter from diesel engines with non-thermal plasma technology. *Applied Thermal Engineering*, 91, 1-10.

Zhang, K., Mitchell, E., Lea-Langton, A., Harvey, A., Jones, J., & Williams, A. (2015). Abatement of Smoke Emissions from Domestic Stove Combustion. *1st International Biomass Emissions Conference, University of Leeds, UK*.

## 6.2 Fagligt udgangspunkt til start af udviklingsarbejdet

### 6.2.1 Udvikling af plasmaenhed til rensning af røg fra brændeovne

Som set i Afsnit 6.1, findes der mange typer plasma, hvoraf flere har positive egenskaber i forbindelse med røgrensning. I dette projekt er det valgt at arbejde med et kold plasma-system baseret på Airmanagers produkter til rensning af luft<sup>4</sup>. Dette skyldes, at Airmanagers plasma-teknologi allerede i dag anvendes indenfor er række forskellige områder såsom reduktion af skimmelsvampesporer i vinproduktion, luftrensning på krydstogtskibe samt luftrensning i en karantænestation for importerede dyr i Chester Zoo, UK.

For at opnå bedre kendskab til brændeovnsproducenternes tekniske udfordringer i forbindelse med implementering af en kold plasma-enhed og for at tage højde for deres input til udviklingsfasen af plasmaenheden har Airmanager i december 2017 besøgt de tre brændeovnsproducenter Jøtul, Morsø og Aduro.

Plasmaenheden, som skal videreudvikles, forventes at kunne implementeres forskellige steder i ovnen: enten ved et af de tre luftindtag (primær, sekundær eller tertiær) eller i skorstenen. Implementering ved et af de tre luftindtag betyder, at der sendes plasmabehandlet luft ind i brændeovnen. Dermed vil røgen fra brændeovnen altså ikke komme i direkte kontakt med kold plasma. Implementeres plasmaenheden derimod i skorstenen, vil der blive dannet plasma i direkte forbindelse med røggassen.

Der er fordele og ulemper ved begge typer implementeringssteder (luftindtag eller skorsten). Fordelen ved implementering i luftindtagene er, at simpelt plasmaudstyr kan bruges (som liges meget tæt på det allerede kommercielle kold plasma-produkt fra Airmanager), da det kun vil blive udsat for temperaturer omkring stuetemperatur. Ulempen skønnes at være, at plasmaet ikke kommer i direkte kontakt med røgen, men at der derimod indsendes plasmabehandlet luft. Dette vil formentlig betyde en reduceret effekt af kold plasma, sammenlignet med at plasmaet er i direkte kontakt med røgen.

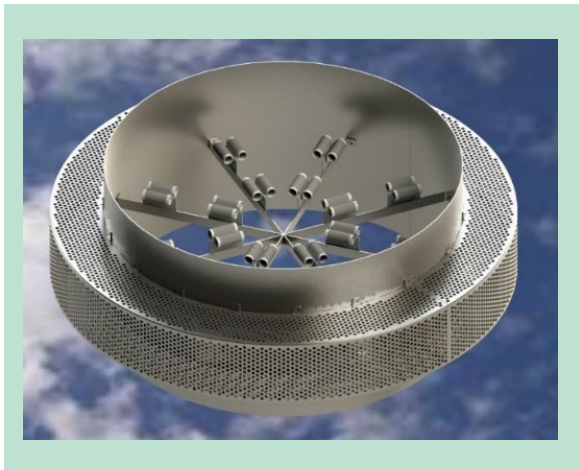
Fordelen ved implementering af kold plasma-enheden i skorstenen er, at røgen kommer i direkte kontakt med plasmaet, hvilket forventes at give den største effekt. Ulempen er, at røggastemperaturen i skorstenen kan komme op på 300 °C - 400 °C. Dette stiller store krav til varmebestandigheden af plasmaenhedens komponenter. Det tilstræbes at udvikle en eller flere plasmaenheder, hvilket giver mulighed for at teste effekten af kold plasma i luftindtagene såvel som i skorstenen.

For at imødekomme et krav om, at plasmaenheden skal kunne holde til temperaturer op til 300-400 °C ved røgstudsens (hvor plasmaenheden ville kunne integreres fysisk og relativt simpelt i de fleste brændeovne), er Airmanager i gang med at arbejde på forskellige løsningsmodeller. En af de største udfordringer for Airmanager bliver at identificere og anvende en lim, der kan holde til de høje temperaturer. I stedet for at anvende en lim, kan glas, der smeltes, evt. komme på tale. Ydermere undersøger Airmanager muligheden for at erstatte selve kernen

---

<sup>4</sup> Mere info om Airmanagers produkter findes kan findes her: <http://amscan.dk/luftreenser/>

med et keramisk materiale, som fx aluminiumoxid,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , der udmærker sig ved at have et særdeles højt smeltepunkt på over 2000 °C. Andre materialetyper end keramik kan også komme på tale. FIGUR 7 viser en illustration af, hvordan en mulig plasmaløsning til implementering i skorstenen kan se ud. Den illustrerede løsning vil reducere skorstenens tværsnitsareal med ca. en fjerdedel og vil dermed give anledning til et øget modtryk i skorstenen. Det er uvist, hvor stor en indflydelse dette måtte have på ovnsens emissioner.



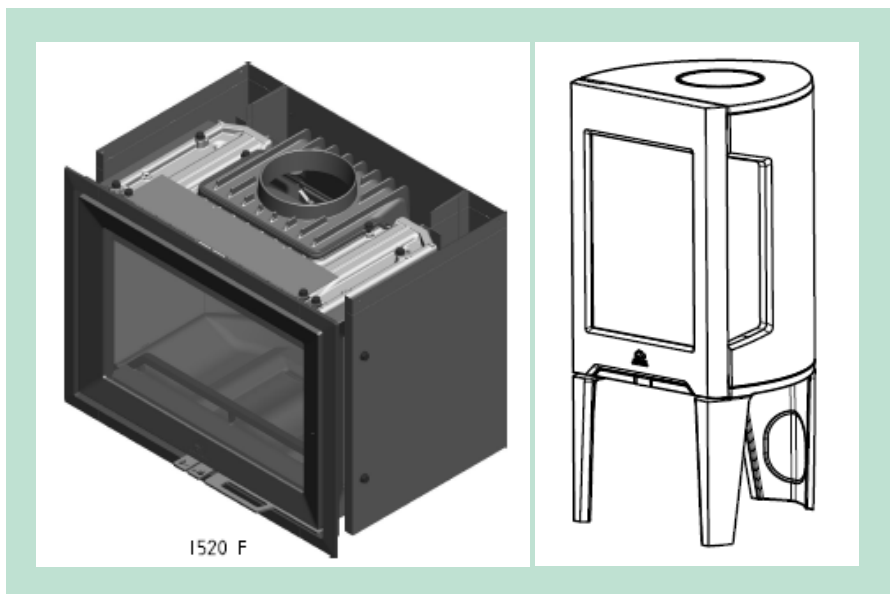
**FIGUR 7.** Illustration af en mulig plasmaløsning til implementering direkte i skorstenen.

## **6.2.2 Klargøring af ovne til implementering af plasmaløsning**

Plasmaløsningen vil blive implementeret på tre forskellige brændeovne, og der udvælges én ovn fra hver af de tre brændeovnsproducenter (Jøtul, Morsø og Aduro). Ovnene har forskellige lufttilførselssystemer, luftkanaler, brandkammerstørrelse etc. Dette giver variation i mulighederne for, hvor plasmaenheden kan og skal monteres. Ved at vælge ovne med forskellige emissionsprofiler og dermed forskellige miljømæssige udfordringer sikres det, at det gennem projektet bliver muligt at vurdere effekten af plasmateknologi i et bredere perspektiv, ligesom det giver mulighed for at udbrede teknologien til brændeovne mere generelt efter projektets afslutning.

### **6.2.2.1 Jøtul**

Jøtul påtænker at anvende en ovn fra enten virksomhedens 1520-serie eller 160-serie i projektet (se FIGUR 8). Førstnævnte er en indbygningsovn og sidstnævnte er en fritstående ovn.



**FIGUR 8.** Arbejdstegninger af Jøtuls 1520-serie (venstre) og 160-serie (højre).

### 6.2.2.2 Morsø

Morsø planlægger at implementere kold plasma-teknologien i en af ovnene fra virksomhedens 6100-serie, fra hvilken der er vist en 6140-ovn i FIGUR 9.



**FIGUR 9.** Morsø 6140, der indgår i Morsøs 6100-serie.

### 6.2.2.3 Aduro

På nuværende tidspunkt er Aduro ikke kommet nærmere en beslutning om, hvilke(n) af virksomhedens ovne, der har størst potentiale for at udnytte teknologien. Aduro er i dialog med Airmanager om dimensionerne af plasmaenheden, hvilket har betydning for Aduros valg af ovntype.

## 6.3 Strukturering og planlægning af projektet

Arbejdsplan 1 anses med dette notat for afsluttet. Der vil blive arbejdet videre i AP2 og AP3, som omhandler henholdsvis udviklingen af kold plasma-enhed og implementering i brænde-ovnen.

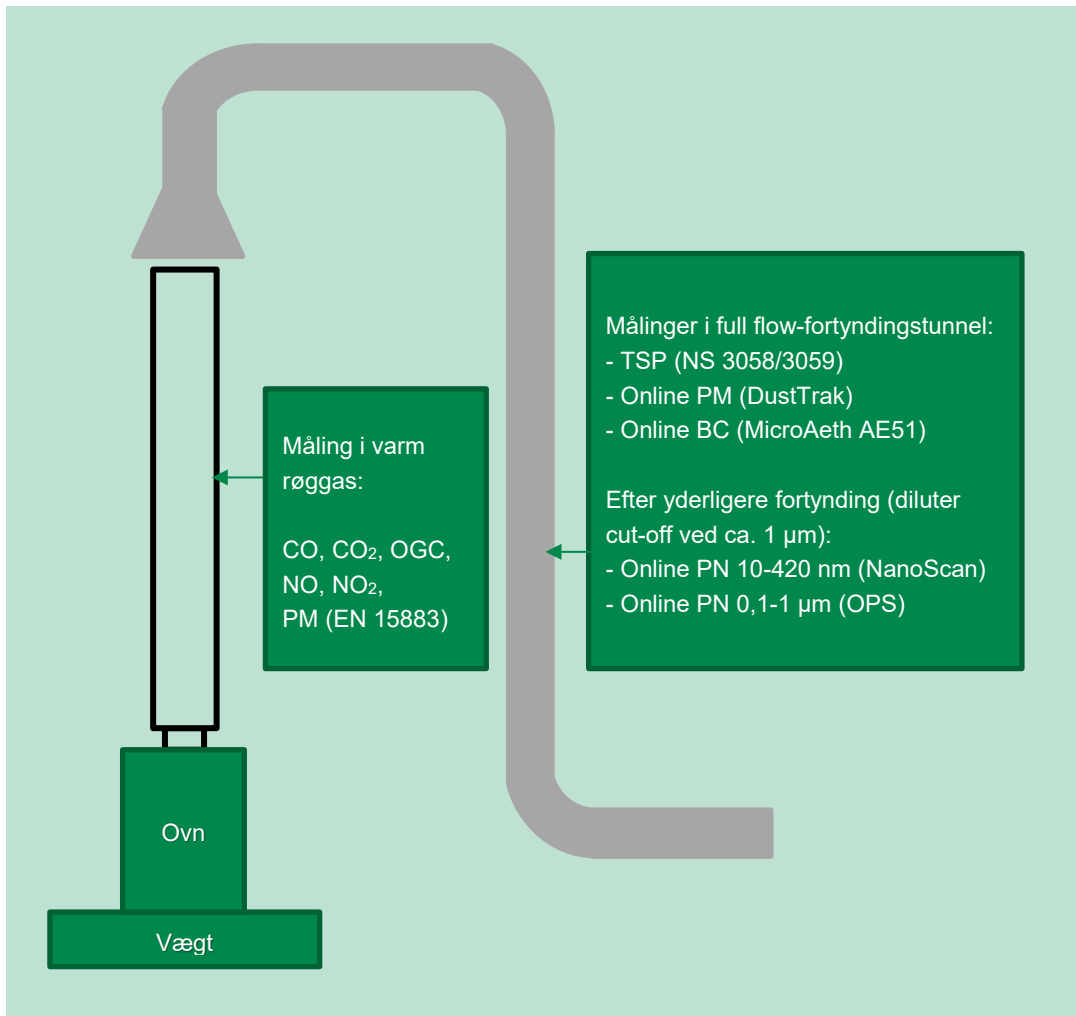
Det vurderes på nuværende tidspunkt, at plasmateknologien har størst potentiale ved implementering i skorstenen fremfor i en af ovns lufttilførsler (på baggrund af projektets indledende undersøgelse af effekten af kold plasma i det tertiære luftindtag). Derfor vil der for nuværende blive arbejdet på at udvikle en løsning til implementering i skorstenen.

I arbejdsplan 2, hvor plasmateknologien udvikles og klargøres til implementering i brændeovne, vil fokus være på udvikling af nye og mere varmebestandige komponenter, i forhold til hvad Airmanager tidligere har anvendt. En vigtig parameter for projektet er at udvikle en kosteffektiv løsning for at øge potentialet for plasmateknologiens anvendelse til røgrønsning i brændeovne fremadrettet. Udviklingsprocessen er indledt ved faglige møder mellem Teknologisk Institut og Airmanager.

I Arbejdsplan 3, hvor plasmateknologien implementeres i brændeovnene, vil der i det indledende arbejde være særligt fokus på en implementering i skorstenen. Forskellige placeringer i skorstenen vil blive overvejet og testet med fokus på 1) optimering af placering i røgstuds, 2) graden af monteringsbesvær i de fleste ovne, og 3) temperaturfaktoren. En placering højere i skorstenen har den fordel, at temperaturen her er lavere, hvilket muligvis gør det teknisk lettere at udvikle plasmaenheden, idet temperaturkravene til komponenterne vil være lavere.

# 7. Analysemetoder

I projektet er anvendt en række analysemetoder, som er nærmere beskrevet i dette kapitel. En skitse af den generelle forsøgsopstilling, der er anvendt i målekampagnerne, er vist i FIGUR 10.



**FIGUR 10.** Skitse af den generelle forsøgsopstilling, der er anvendt i projektets målekampagner.

## 7.1 Partikelmåling

### 7.1.1 Partikelantal med NanoScan SMPS

Der er til de direkte emissionsmålinger anvendt TSI NanoScan SMPS Nanoparticle Sizer 3910 til karakterisering af partikelantalskoncentration og partikelstørrelsesfordeling for partikler i størrelsen 10–420 nm i 13 størrelsesfraktioner med en tidsopløsning på 60 sekunder. Udstyret har været tilkøbtet brændeovnsopstillingen igennem en fortynder (Diluter Testo MD19-3E) og en katalytisk stripper (Catalytic Instruments CS015), som kan håndtere en flowmængde på op til 1,5 L/min.



### 7.1.2 Partikelantal med OPS

Partikelantalskoncentrationen for større partikler er målt med en Optical Particle Sizer (OPS) model 3330 fra TSI Inc. Dette instrument måler partikelantalskoncentration op til 3000 partikler/cm<sup>3</sup> for partikler i størrelsesordenen 0,3 µm til 10 µm i 16 størrelsesfraktioner med en tidsopløsning på 30 sekunder.

### 7.1.3 Partikelmasse med DustTrak DRX

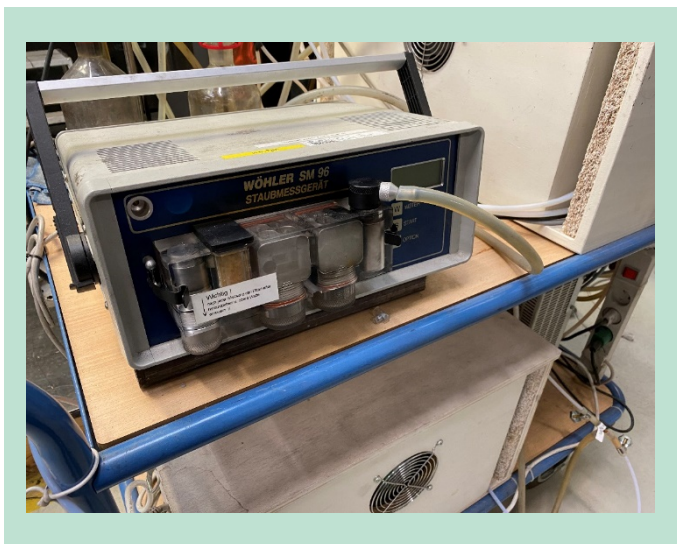
Partikelmassekoncentration blev målt kontinuerligt med en DustTrak DRX (model 8533, TSI Inc.). Instrumentet måler partikelmasse i størrelsesområdet ~0,1-15 µm og i koncentrationsområdet 0,001–150 mg/m<sup>3</sup>. Apparatet måler i størrelsesfraktionerne PM1, PM2.5, PM4, PM10 og PMtotal med en tidsopløsning på 10 sekunder. Massebestemmelsen er baseret på laser-diffraktion.

### 7.1.4 Black carbon

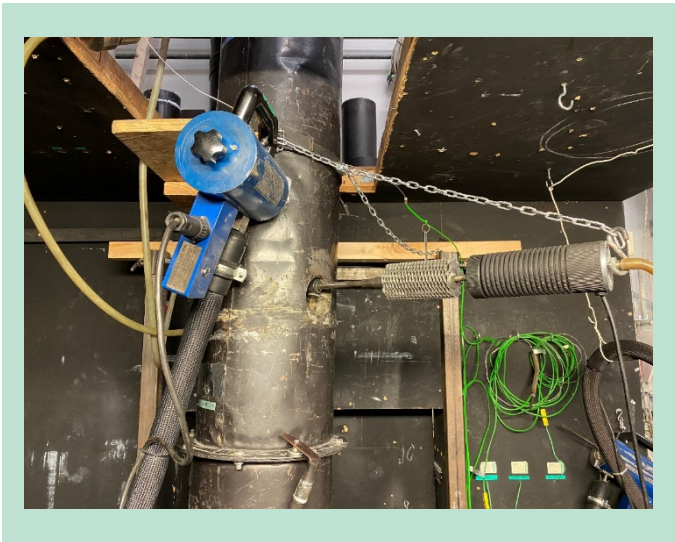
Black carbon blev målt i fortyndingskanalen med en MicroAeth AE51 fra AethLabs med en tidsopløsning på 30 sekunder.

### 7.1.5 Gravimetrisk støvmåling

Gravimetrisk støvmåling er foretaget i både varm røggas som Particulate Mass/partikulær masse, også kendt som PM, og i fortyndingstunnel som Total Suspended Particles kendt som TSP. PM er målt efter CEN/TS 15883, og der er benyttet en Wöhler SM 96 (se FIGUR 11 og FIGUR 12) det er også dette udstyr, som benyttes i den tyske DIN+ metode.



**FIGUR 11.** Billede af Wöhler SM 96 anvendt til gravimetrisk støvmåling i varm røggas efter CEN/TS 15883.



**FIGUR 12.** Billede af sonden fra Wöhler SM 96 (højre side af billedet) - en opvarmet sonde som indsættes direkte i den varme røggas.

TSP er målt efter den norske støvmålemetode beskrevet i NS 3058, hvor der måles i full flow-fortyndingstunnel. Her sker en fortynding på ca. 20 gange, og temperaturen er maksimalt 35 °C ved filteret. Røgen suges gennem det primære filter (100 mm planfilter) og ledes derefter til backupfilteret (100 mm planfilter). Billeder af målesektionen og et eksponeret filter er vist i FIGUR 13 og FIGUR 14.



**FIGUR 13.** Målesektion til måling af TSP via NS 3058-metoden.



**FIGUR 14.** Billede af eksponeret 100 mm primært planfilter.

## 7.2 Gasser

I forsøgene måles følgende gasser

- CO
- CO<sub>2</sub>
- OGC (Organic Gaseous Compounds)
- NO<sub>x</sub>.

Gasemissioner måles som CO/CO<sub>2</sub> i en ABB IR-analyser, NO<sub>x</sub> måles med en Eco Physics CLD, og OGC måles via et FID-meter fra M&A Thermo.



FIGUR 15. Målerack med CO/CO<sub>2</sub>-, OGC- og NO<sub>x</sub>-måleapparater.

# 8. Airmanager plasmaenhed

## 8.1 Introduktion til Airmanager<sup>5</sup>

Airmanager er en mindre, rådgivende ingeniørvirksomhed i Kalundborg, der sælger og distribuerer en patenteret luftrensningsteknologi, som effektivt og energibesparende renser luft. Virksomheden startede op i 2011 og har en årlig omsætning på 1,5 mio. kr. (2015).

Airmanager har en teknologi med et formodet stort markedspotentiale. Teknologien renser effektivt luft, fungerer både som stand alone-enhed og integreret i eksisterende ventilationssystemer. Dette giver mulighed for anvendelse indenfor en række brancher. Teknologien ses blandt andet implementeret indenfor flyindustrien, landbruget og på det private marked.

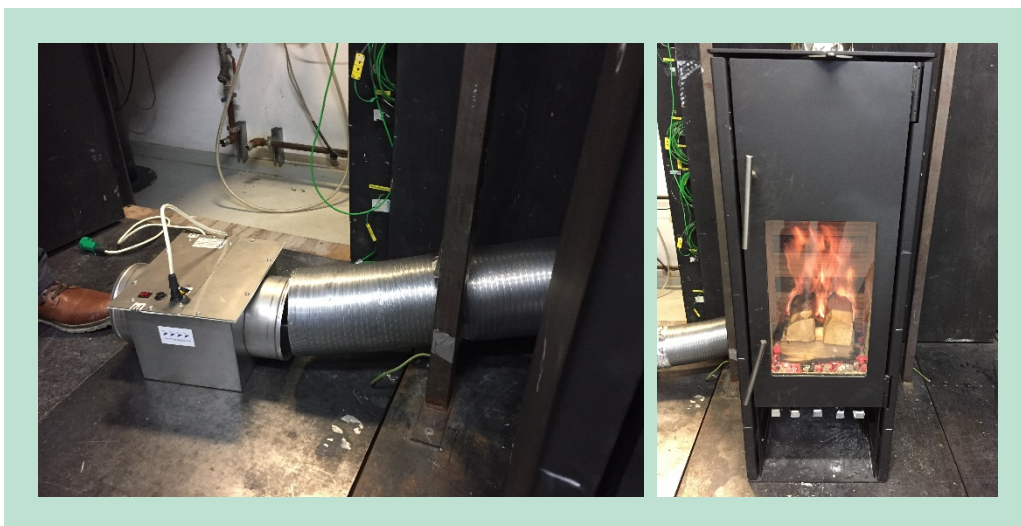
Airmanager-teknologien fungerer i udgangspunktet ved, at ventilatorer trækker luften ind gennem et HAF-filter, der filtrerer partikler helt ned til 0,03 µm. Herefter passerer luften gennem et kraftfelt, der er frembragt af en patenteret CCFT-teknologi. Dette kraftfelt består af elektroner, der eliminerer den forurening, der er i luften, hvad enten det er kemiske dampe (VOC'er), lugte, vira, skimmelsvampe eller bakterier.

## 8.2 Plasmaenhed koblet på det tertiære luftindtag

Formålet med målekampagnen var at analysere effekten af kold plasma tilført ved det tertiære luftindtag.

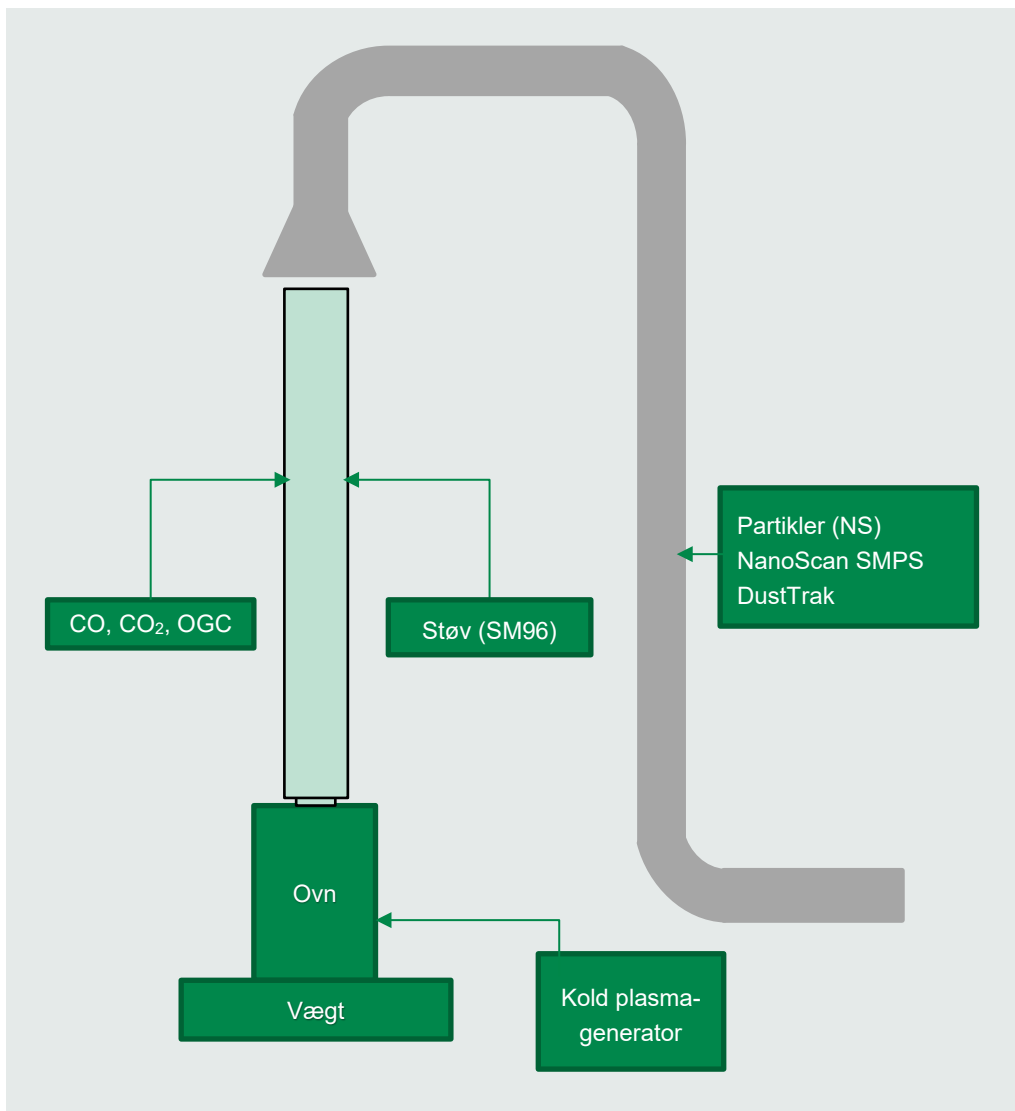
### 8.2.1 Forsøgsopstilling og fremgangsmåde

Målingerne blev udført på en såkaldt LowCarbon-brændeovn (LCB-ovn) udviklet i Miljøprojekt nr. 1946, 2017, og placeringen af plasmaenheden er vist i FIGUR 16. Der blev udført en baselinetest på dag 1 og en effektivitetstest på dag 2. Der blev udført forsøg ved henholdsvis 50 % lufttilførsel og 100 % lufttilførsel og med træmængder på henholdsvis 1,4 kg (nominel) og 2,8 kg (2 gange nominel). En skitse af forsøgsopstillingen er vist i FIGUR 17.



**FIGUR 16.** Billeder af forsøgsopstillingen med plasmaenhed koblet på tertiært luftindtag.

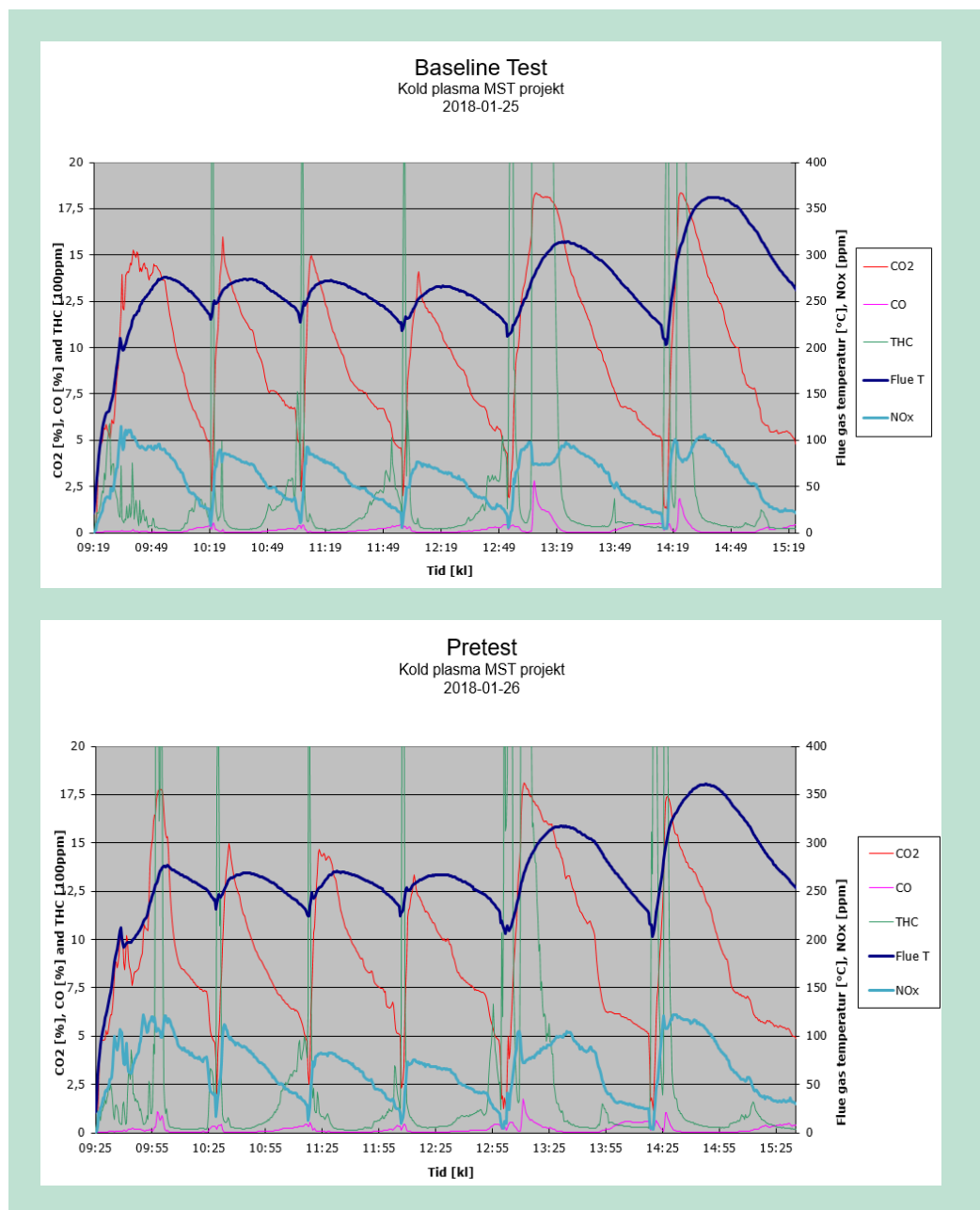
<sup>5</sup> Airmanagers egen virksomhedsbeskrivelse.



**FIGUR 17.** Skitse af forsøgsopstillingen anvendt ved test af plasma tilført i tertiært luftindtag.

## 8.2.2 Resultater og diskussion

Måleforløbet på de to dage er vist i FIGUR 18, og den samlede emissionspåvirkning for CO, OGC, NO<sub>x</sub> og DIN+ støvpartikler er vist i TABEL 4.



FIGUR 18. Måleforløb på de to måledage, hvor der blev udført henholdsvis en baselinetest og en effektivitetstest.

TABEL 4. Samlet emissionspåvirkning ved plasmatilførsel ved tertiært luftindtag.

Parameter	Samlet emissionspåvirkning
CO	-3 % (reduktion)
OGC	-13 % (reduktion)
NO <sub>x</sub>	15 % (øgning)
DIN+ støvpartikler	18 % (øgning)

Nedenfor i TABEL 5 er vist resultater fra den kontinuerte måling af partikelantal og partikelmasse i fortyndingstunnellen.

**TABEL 5.** Oversigt over målt partikelantalskoncentration og total partikelmassekonzentration.

		2 x nominal 50 % luft	2 x nominal 100 % luft
Partikelantal (#/cm <sup>3</sup> )	Baseline	90 mio.	36 mio.
	Kold Plasma	117 mio.	98 mio.
Total PM (mg/m <sup>3</sup> )	Baseline	297	253
	Kold Plasma	250	180

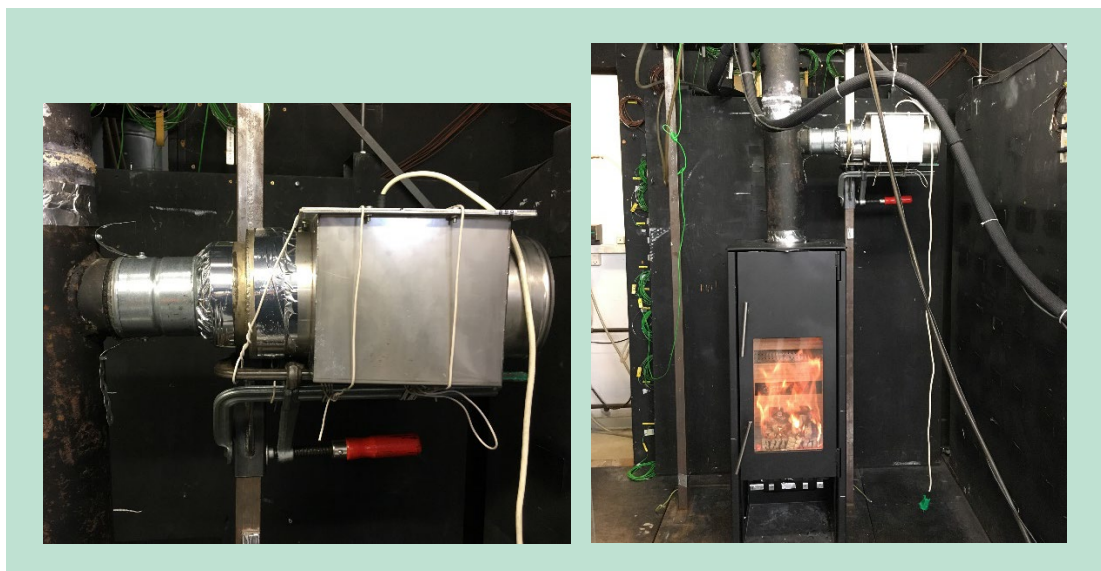
På baggrund af ovenstående målinger kan det ikke konkluderes, konkret hvad effekten af kold plasma har været, da resultaterne er inden for måleusikkerheden for denne type målinger. Det største bidrag til usikkerheder til kvantificering af effekter findes ikke i selve måleudstyret, men i variansen/spredningen imellem to eller flere på hinanden følgende brændeovnsprøvninger.

### 8.3 Plasmaenhed koblet på skorstenen

Formålet med målekampagnen var at analysere effekten af kold plasma tilført i skorstenen umiddelbart efter røgstudsens.

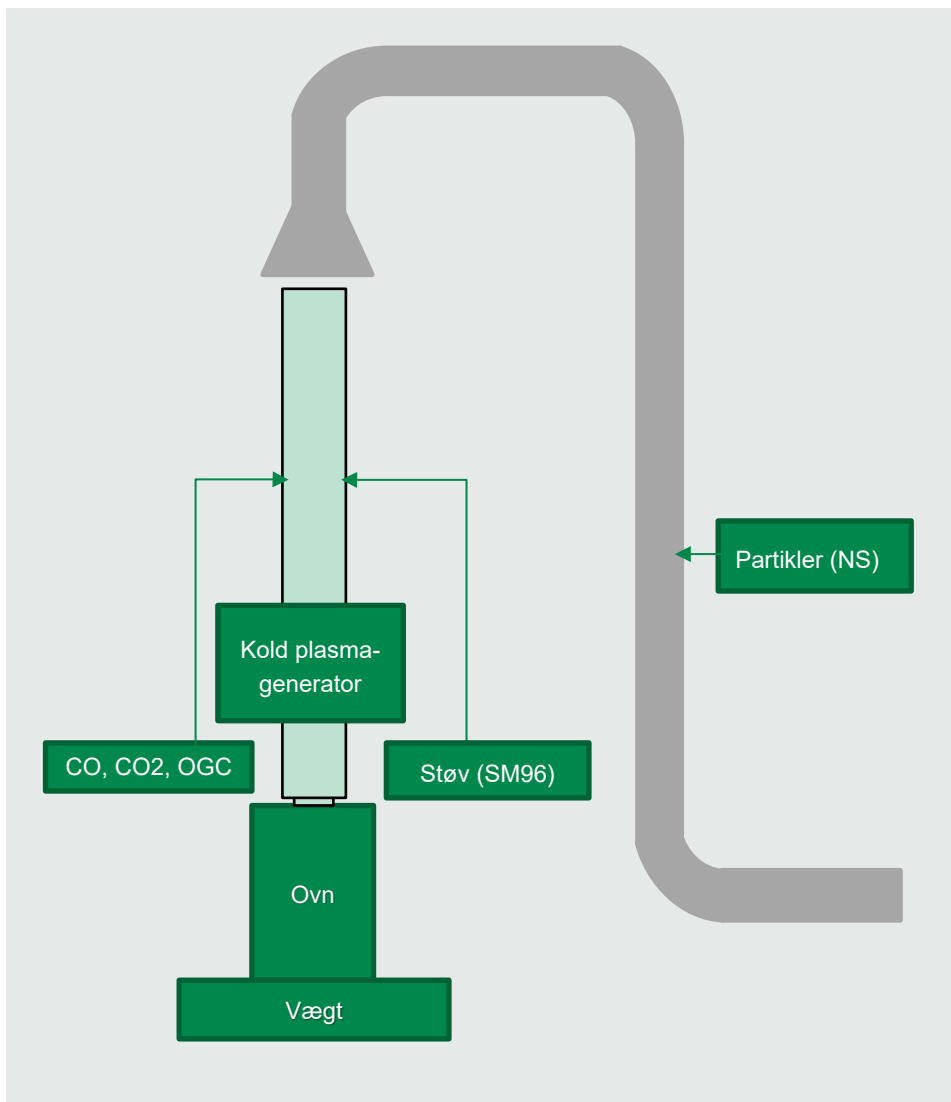
#### 8.3.1 Forsøgsopstilling og fremgangsmåde

Målingerne blev udført på en LCB-ovn, og billeder af placeringen af plasmaenheden er vist i FIGUR 19. Der blev udført en baselinetest på dag 1 og en effektivitetstest på dag 2. En skitse af forsøgsopstillingen er vist i FIGUR 20. Indfyringsmængder, luftindstillinger, træets placering mv. er sammenligneligt med målekampagnen for tertiær luft beskrevet i afsnit 8.2.



**FIGUR 19.** Billeder, der viser placeringen af plasmaenheden ved røgstudsens.

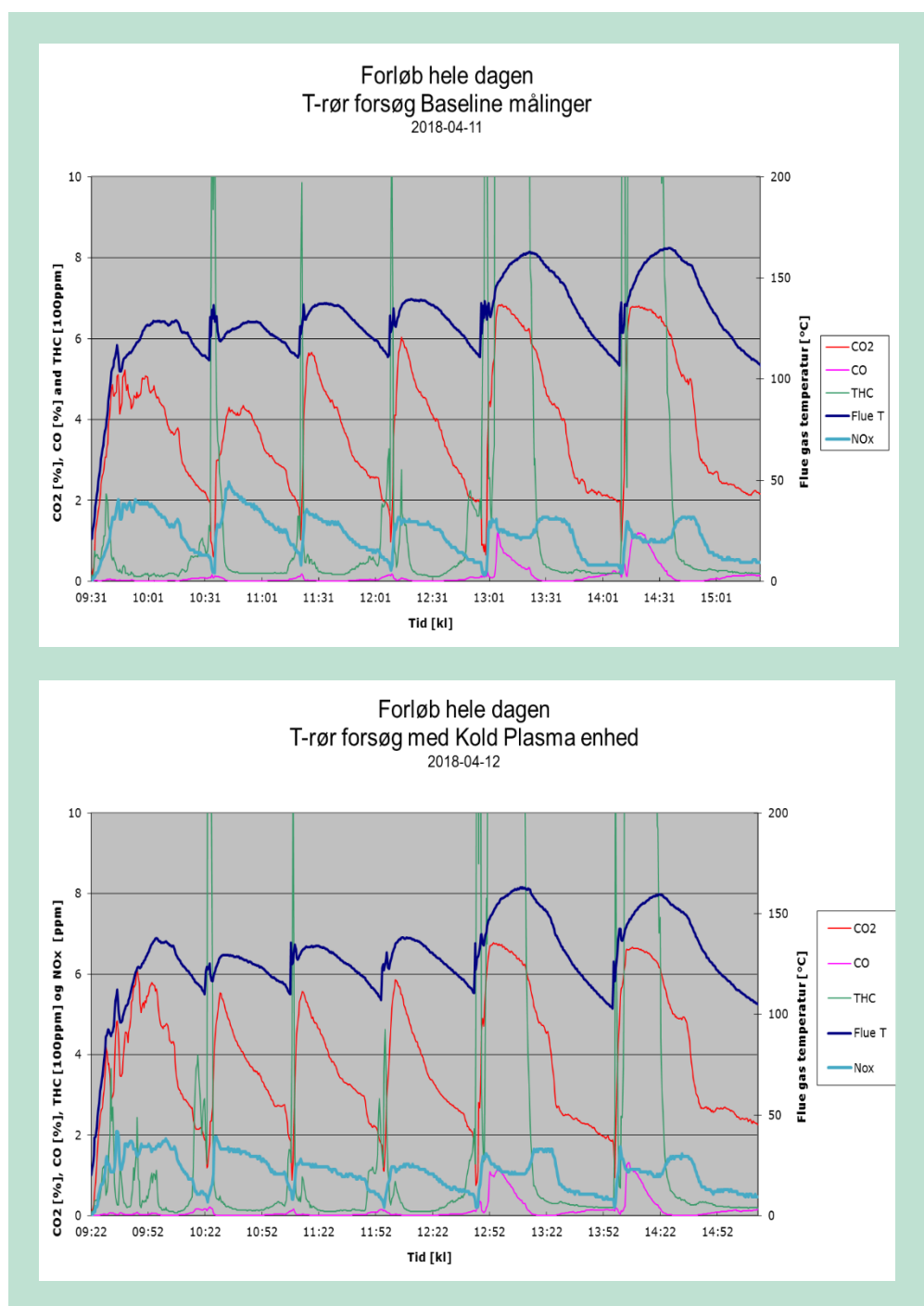




**FIGUR 20.** Forsøgsopstilling ved tilførsel af plasma umiddelbart efter røgstudsen.

### 8.3.2 Resultater og diskussion

Måleforløbet for de to måledage er vist i FIGUR 21.



FIGUR 21. Måleforløb for de to måledage.

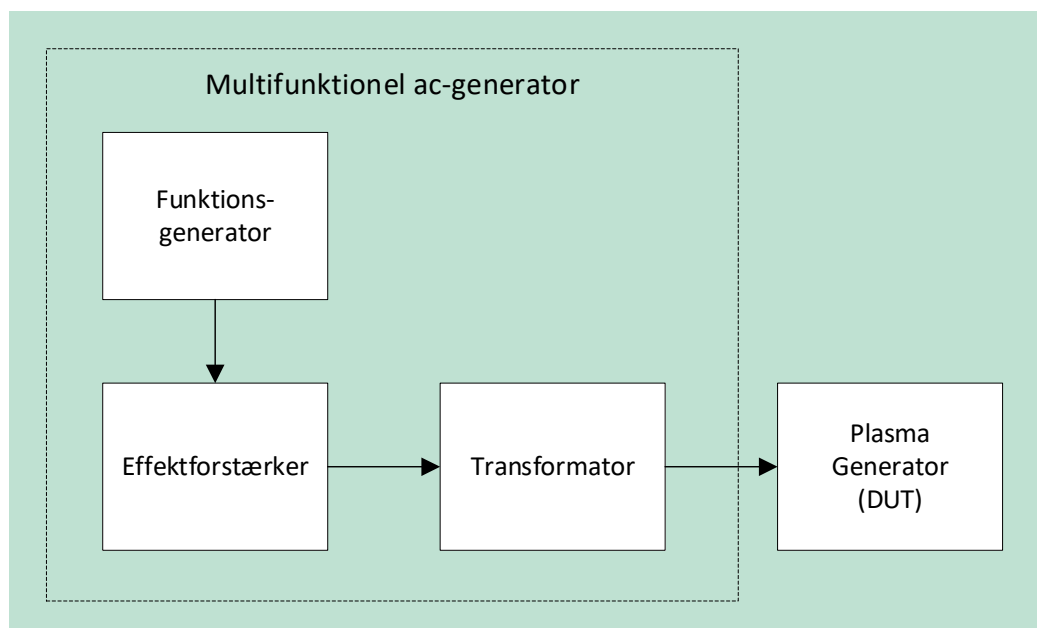
**TABEL 6.** Samlet emissionspåvirkning ved plasmatilførsel ved røgstuds.

Parameter	Samlet emissionspåvirkning
CO	3 % (øgning)
OGC	11 % (øgning)
NOx	-7 % (reduktion)
DIN+ støvpartikler	-10 % (reduktion)
PM (norsk opsamlingsmetode)	-5 % (reduktion)

Målingerne i denne målekampagne viste ingen signifikante forskelle på forsøg med og uden plasma, og der er ingen systematisk trend i ændringer mellem nærværende målekampagne og målekampagnen, hvor effekten ved det tertiære luftindtag blev undersøgt.

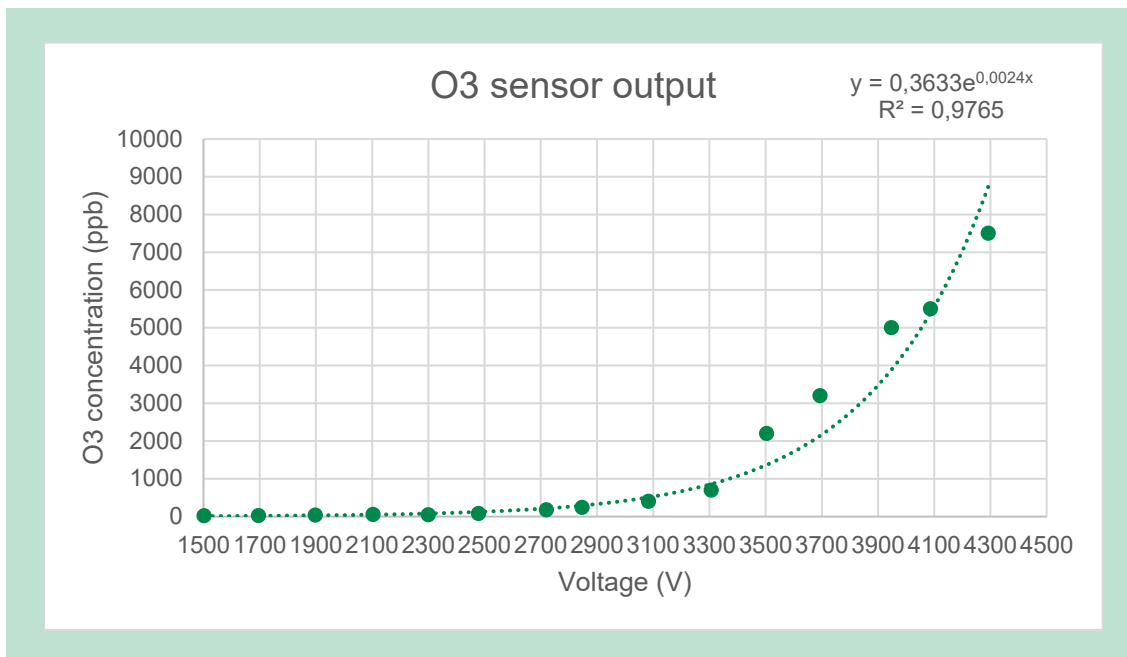
#### 8.4 Udvikling af ny styring til Airmanager-plasmagenerator

Der ønskes en testopstilling, som muliggør forsyning af plasmageneratoren fra en kilde med variabel spænding og frekvens. Til dette formål er opbygget en multifunktionel ac-generator bestående af en funktionsgenerator, en effektforstærker og en step-up-transformator. Se nedenstående blokdiagram i FIGUR 22. Dette system muliggør variation af frekvens, spænding og kurveform (fx sinus, firkant og trekant).



**FIGUR 22.** Skitse over ny styreenhed til Airmanager-plasmagenerator.

Ozonudviklingen af Airmanager-enheden er blevet undersøgt. Enheden blev sammen med en ozonsensor placeret i et testkammer med kontrolleret luftskifte, og målingerne viste, at der ved spændinger over 3 kV produceres anseelige mængder ozon (se FIGUR 23).

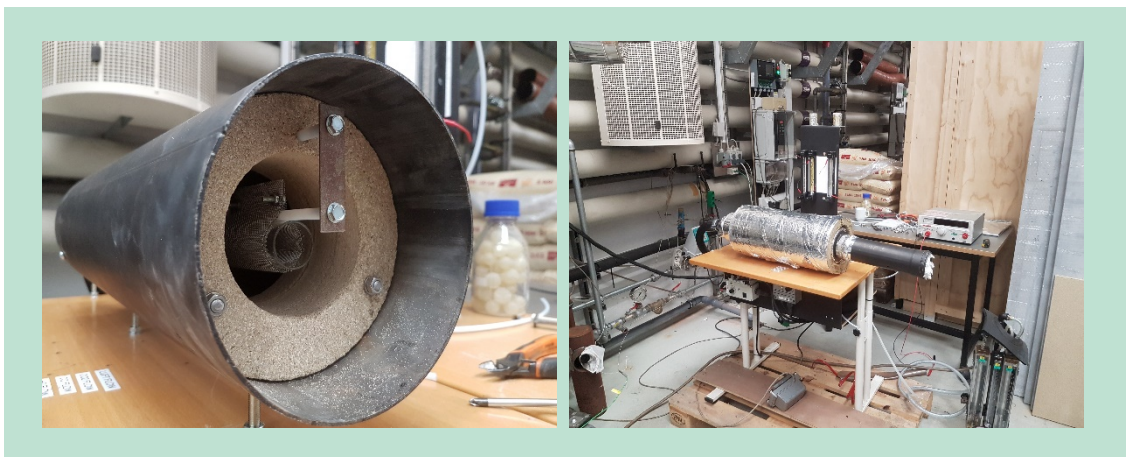


**FIGUR 23.** Ozonkoncentration som funktion af spænding på Airmanager-enheden.

## 8.5 Testmåling på syntetisk røggas

Formålet med disse målinger var at undersøge virkningsgraden af plasmaenheden som funktion af spænding og frekvens med henblik på at bestemme de optimale indstillinger af plasmaenheden. Målingerne blev foretaget på en syntetisk røggas for at opnå et større antal og mere reproducerbare målinger, end det ville have været muligt ved en mere omfattende brændeovnstest. Se forsøgsopstilling i FIGUR 24.

Den syntetisk gas bestod af 150 ppm metan, 7500 ppm kulmonoxid, 9 % ilt, 9 % kuldioxid, 150 ppm alpha-pinene, 200 ppm nitrogenoxid og 200 ppm nitrogendioxid. Gassen var balanceret med nitrogen.



**FIGUR 24.** Billeder af forsøgsopstillingen med syntetisk røggas.

Der blev indledningsvist testet med en standardlaboratoriegas for at sikre optimal udnyttelse af den specialfremstillede gas.

Gassen havde følgende indhold: CO<sub>2</sub> = 14,0, CO = 1800 ppm, NO = 250 ppm.

Der blev testet ved forskellige spændinger og frekvenser. Se måleværdier i TABEL 7. Der ses ingen signifikant ændring af emissionerne, uanset hvilken spænding/frekvens plasmaenheden påtrykkes.

**TABEL 7.** Måleresultater ved forskellige spændinger og frekvenser.

Frekvens	Spænding (V)	Temp	CO <sub>2</sub>	CO	NOx	NO
Hz	ønsket	°C	%	ppm	ppm	ppm
0	0	103	14,1	1.803	235	235
50	1500	103	14,1	1.804	236	236
	3000	103	14,1	1.804	235	234
	4500	103	14,0	1.803	228	227
0	0	103	14,0	1.799	235	234
100	1500	103	14,0	1.796	234	234
	3000	103	14,0	1.800	233	233
	4500	103	14,0	1.804	230	230
0	0	103	14,0	1.800	234	234
200	1500	103	14,0	1.797	233	233
	3000	103	14,1	1.806	234	234
	4500	103	14,1	1.815	228	228
0	0	102	14,1	1.805	235	235

# 9. Tantec-plasmaenhed

## 9.1 Introduktion til Tantec

Tantec A/S er en dansk virksomhed i Lunderskov, der er specialiseret i plasma- og korona-overfladebehandling. Virksomheden arbejder ikke på nuværende tidspunkt med brændeovne, men har vist interesse i at få undersøgt effekten af plasma på brændeovnsrøg. Tantec har derfor stillet en plasmaenhed (PlasmaTEC-X OEM) til rådighed for projektet (se FIGUR 25).

Tantecs PlasmaTEC-X atmosfærisk plasmabehandlingsystem er bygget op omkring konceptet med en højspændings-DC-plasmaudladning i atmosfærisk luft. Enheden tilsluttes en trykluftforsyning, og systemet regulerer selv på denne for at sikre korrekt plasmaudladning fra udtømningsdysen.



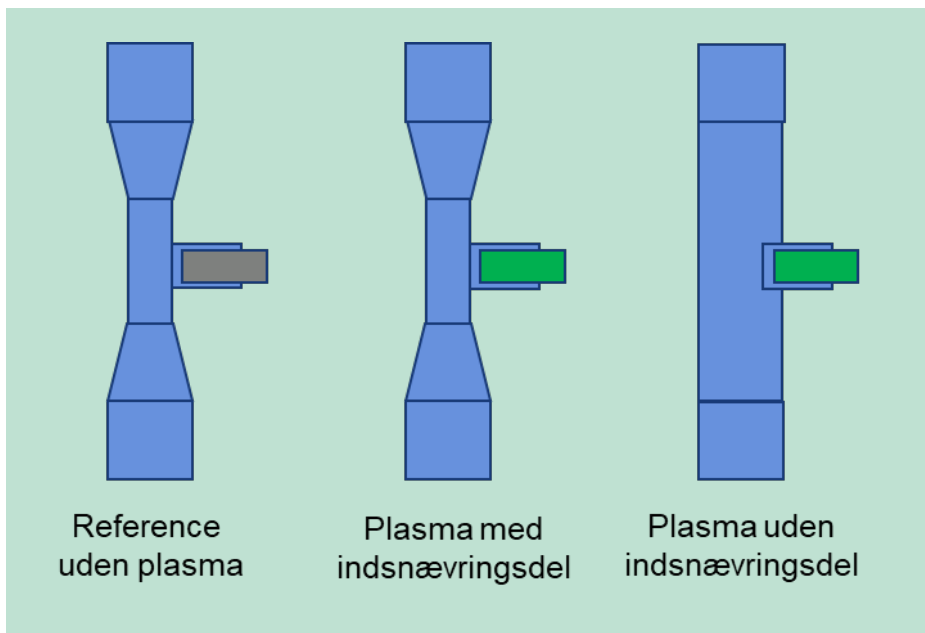
FIGUR 25. Billede af Tantecs PlasmaTEC-X atmosfærisk plasmabehandlingsystem.

## 9.2 Måling i skorsten på Teknologisk Institut

Der blev udført en målekampagne med Tantecs PlasmaTEC-X OEM-enhed på Teknologisk Institut med det formål at bestemme plasmaenhedens påvirkning på emissionen fra en brændeovn.

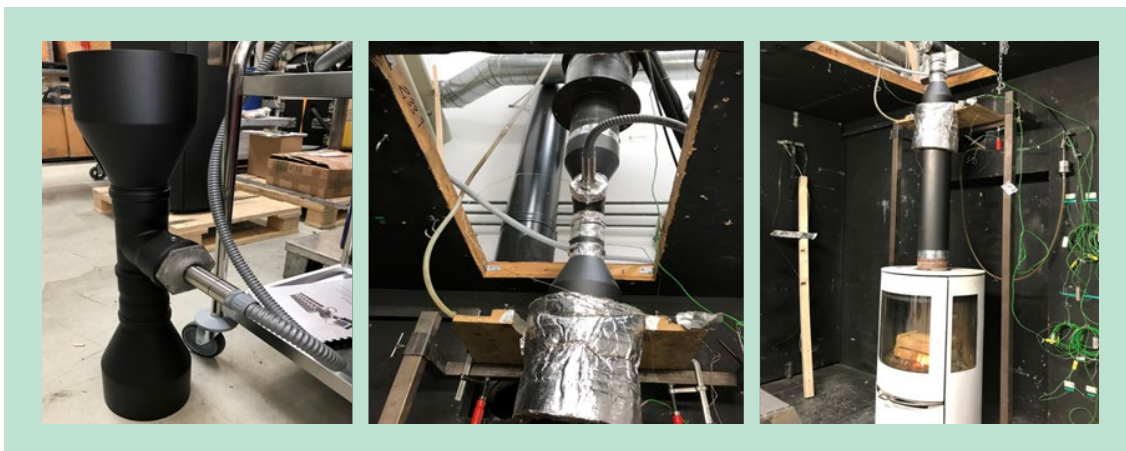
### 9.2.1 Forsøgsopstilling og fremgangsmåde

Der blev anvendt tre opstillinger. Formålet var at teste effekterne af tændt hhv. slukket plasma, og også mulige effekter af inkludering af en indsnævringsdel til at erstatte en del af skorstenen for at maksimere kontakten mellem plasma og emissioner fra skorstenen. En baselinemåling blev udført som reference, hvor der blev anvendt en indsnævringsdel uden plasma tændt. Målinger med plasma tændt blev udført med og uden indsnævringsdel. Plasmadysen blev anbragt i indsnævringsdelen eller i skorstenen som illustreret i FIGUR 26.



**FIGUR 26.** Skitse, der viser placeringen af plasmadysen i skorstenen.

FIGUR 27 viser billeder af plasmadysen, indsnævringsdel og skorsten under målekampagnen. Emissioner fra skorstenen af brændeovne blev fortyndet ca. 20 gange i en fortyndingstunnel. Røggassen i fortyndingstunnelen blev yderligere fortyndet ca. 30 gange med en Diluter (Testo MD19-3E), hvorefter partikelantalskoncentration samt partikelstørrelsesfordeling fra 10-400 nm blev målt med en TSI NanoScan. Der blev anvendt mindst tre charges til beregning af de gennemsnitlige resultater.

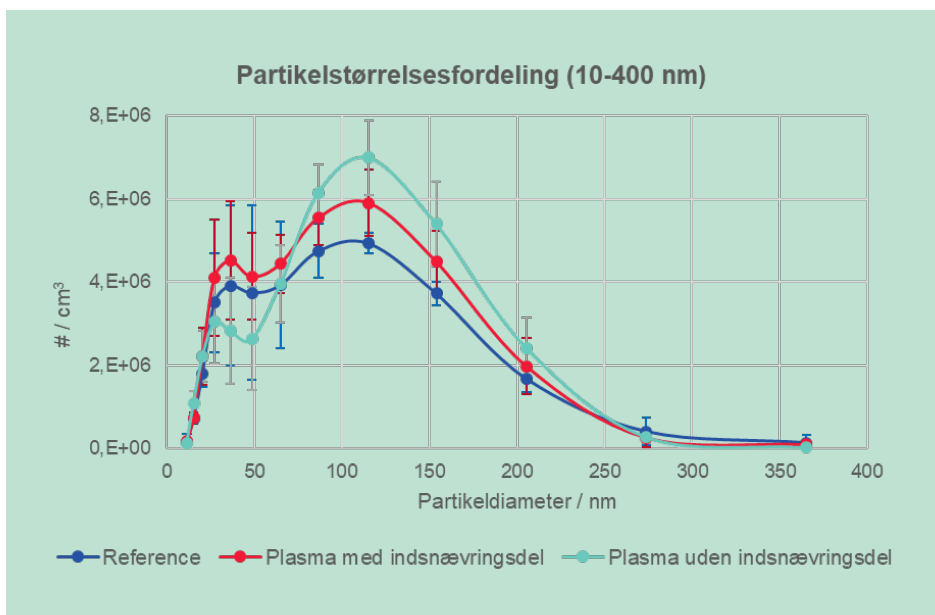


**FIGUR 27.** Billeder af plasmadysen monteret på indsnævringsdel på skorstenen.

## 9.2.2 Resultater og diskussion

Synligt blå plasma blev observeret da Tantecs plasmaenhed blev tændt. Generelt blev der observeret en ikke-signifikant virkning på partikelstørrelsesfordelingen, OGC og CO fra målekampagnen på Teknologisk Institut. På den anden side genererede plasmaenheden meget høj  $\text{NO}_x$  under drift. Plasma uden indsnævringsdel viste faktisk bedre resultater end plasma med indsnævringsdel.

Partikelmålingerne viste en øgning af partikler omkring 110-120 nm og en reduktion af partikler omkring 40-50 nm, især uden indsnævringsdel (se FIGUR 28). Detaljer om ændringer af midpartikeldiameteren er vist i TABEL 8 samt med andre parametre som CO, OGC og  $\text{NO}_x$ .



FIGUR 28. Partikelstørrelsesfordeling fra målingerne foretaget på Teknologisk Institut.

TABEL 8. Oversigt over middelpartikeldiameter, CO, OGC og NOx fra målekampagne for Tantec-plasmaenheden på Teknologisk Institut.

Forsøg	Middelpartikeldiameter (nm)	CO (mg/MJ)	OGC (mg/MJ)	NOx (mg/MJ)
Reference	77 ± 7	2205	66	26
Plasma med indsnævringsdel	82 ± 10	2058	53	369
Plasma uden indsnævringsdel	85 ± 8	1683	39	374

Den gennemsnitlige partikeldiameter var 5 nm hhv. 8 nm højere sammenlignet med reference (slukket plasmaenhed) med hhv. uden indsnævringsdel på skorstenen. Denne ændring i partikeldiameter er imidlertid ikke signifikant på grund af den naturlige, store variation mellem charges, og det kan dermed ikke konkluderes, om plasmaet fik partiklerne til at agglomerere eller ej. En reduktion af CO og OGC blev også observeret både med tændt plasma og indsnævringsdel (7 % mindre CO og 20 % mindre OGC) og med tændt plasma uden indsnævringsdel (24 % mindre CO og 41 % mindre OGC) (TABEL 8). Derudover var NOx-niveauer betydeligt højere (>10 gange) end referencemålinger med tændt plasma.

Da der ifølge resultaterne fra målekampagnen på Teknologisk Institut ikke var nogen vist effekt af indsnævringsdel, blev indsnævringsdel ikke inkluderet i målekampagnerne hos hverken Jøtul eller Morsø.

### 9.3 Test af enhed i testkammer hos Teknologisk Institut

Der blev endvidere udført en målekampagne med Tantecs plasmaenhed under kontrollerede forhold på Teknologisk Institut med det formål at dokumentere plasmaets eventuelle effekter på partikelstørrelsesfordelingen.

#### 9.3.1 Forsøgsopstilling og fremgangsmåde

Tantecs plasmaenhed blev testet i et tillukket, ikke-ventileret 20 m<sup>3</sup> testkammer (FIGUR 29) ved brug af stearinlys til at generere partikler, der efterligner forbrændingsprocessen. Kammervæggene er dækket med teflon for at reducere adsorption af partikler og molekyler på



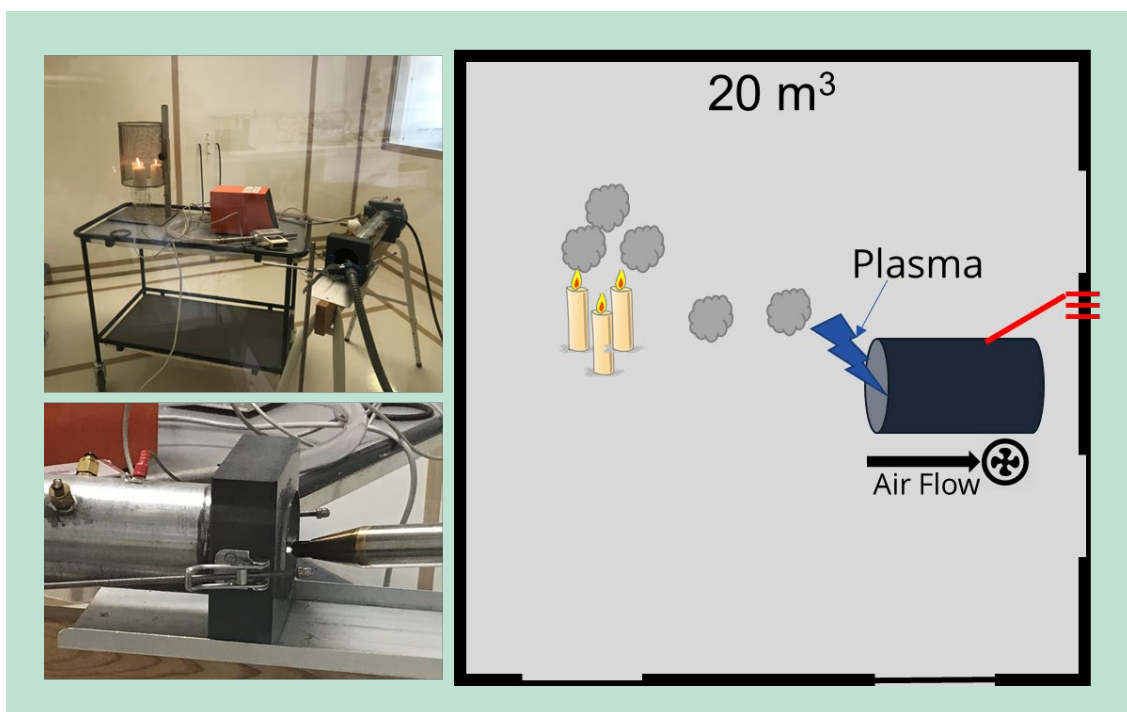
kammervæggene. Der blev genereret plasma med enhedens studs rettet mod et rør med en kontrolleret luftstrøm.

Til karakteriseringen af plasmaenhedens effekt blev der målt partikelfordeling og partikelantalskoncentration med NanoScan SMPS (afsnit 7.1.1). Desuden blev der målt gasser (ozon, NO<sub>x</sub>, CO).

Målingerne af CO, NO<sub>x</sub> og O<sub>3</sub> blev udført med en dedikeret gasmåleboks med indbyggede sensorer. Alle sensorenheder er leveret af Alphasense (England), som også har kalibreret sensorerne. Til målingerne er der brugt følgende sensorer:

- Ozon (O<sub>3</sub>), sensor model OX B431
- Carbonmonoxid (CO), sensor model CO B4
- Nitrogenoxid (NO), sensor model NO B4
- Nitrogendioxid (NO<sub>2</sub>), sensor model NO2 B43F.

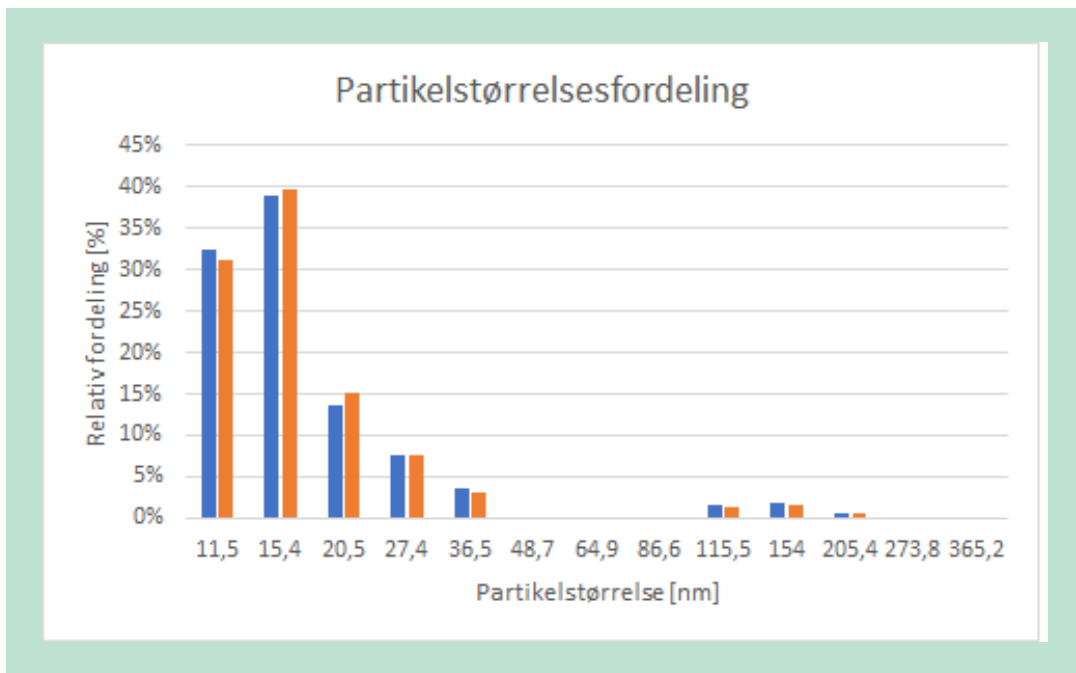
Signalerne fra hver sensor overføres til en computer vha. en mikroprocessor og et dataopsamlingsystem, hvor data logges hvert 5. sekund.



**FIGUR 29.** Billeder fra testen af Tantecs plasmaenhed i testkammeret på Teknologisk Institut.

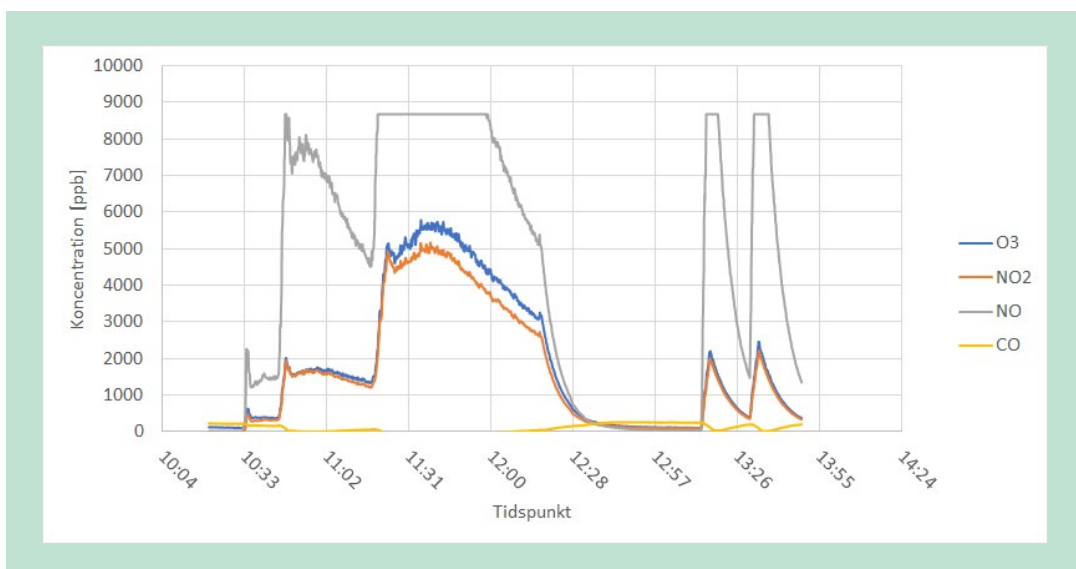
### 9.3.2 Resultater og diskussion

Der blev ikke set nogen signifikante effekter på partikelstørrelsesfordelingen uanset tændt eller slukket Tantec-plasmaenhed (gennemsnitlig 16,8 nm hhv. 17,1 nm) (FIGUR 30).



**FIGUR 30.** Partikelstørrelsesfordeling målt med Tantec-plasmaenheden (blå) og uden plasma (orange).

Der blev under testen målt meget høje rumkoncentrationer af NO og NO<sub>2</sub> i testkammeret, når plasmaenheden var tændt, hvilket også var tilfældet i målekampagnen på brændeovnen (afsnit 9.2.2). Der var ligeledes også en markant ozonproduktion under testen med tændt plasma (FIGUR 31). Det har ikke været muligt at bestemme den eksakte gaskoncentration, da NO-koncentration blev så høj, at sensoren gik i mætning. Desuden var der interferens fra NO<sub>2</sub> i ozonsensoren.

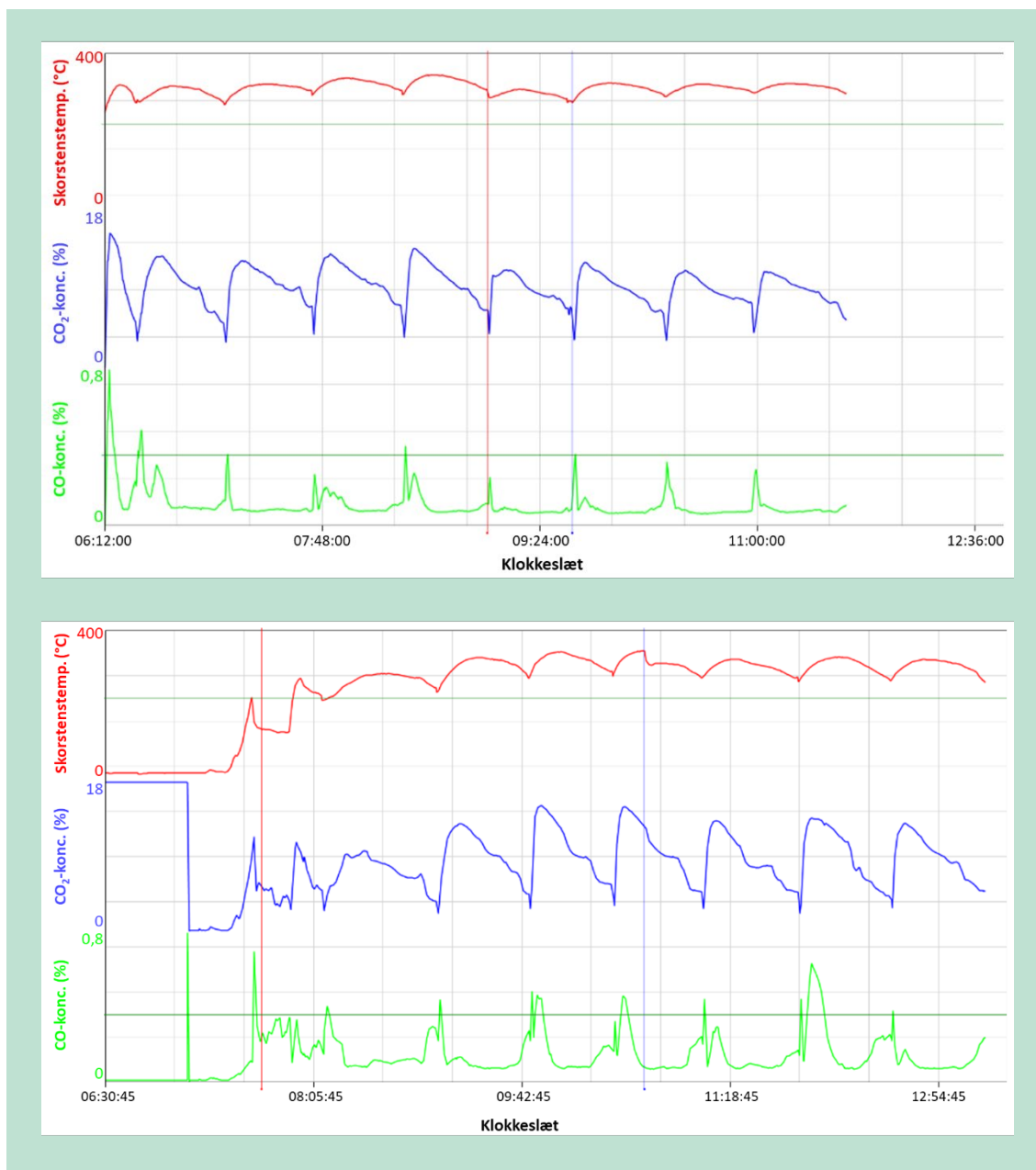


**FIGUR 31.** Gaskoncentration målt i testkammeret i løbet af test med Tantec-plasmaenheden.

## 9.4 Måling i skorsten hos Jøtul

I perioden fra 1. juli til 12. juli 2019 blev plasmaenheden fra Tantec testet hos Jøtul. Der blev testet efter standarden EN 13240 med plasmaenheden henholdsvis tændt og slukket. Der blev i alt udført 10 dages målinger.

Graferne nedenfor er fra to dages målinger. Den røde kurve viser temperaturen i skorstenen, den blå kurve viser CO<sub>2</sub>-koncentrationen, den grønne kurve viser CO-koncentrationen og den blå lodrette streg viser tidspunktet, hvor plasmaenheden blev tændt.



**FIGUR 32.** Grafer fra to måledage af skorstenstemperatur (rød), CO<sub>2</sub>-koncentration (blå) og CO-koncentration (grøn).

Som det fremgår af ovenstående grafer, kunne der ikke ses en signifikant forskel i de målte koncentrationer, uanset om plasmaenheden var tændt eller slukket.

Det konkluderes på baggrund af 80 forsøg (40 med enheden tændt og 40 med enheden slukket), at plasmaenheden ikke har nogen indvirkning på emissionerne, når der udføres test efter EN 13240.

## 9.5 Måling i skorsten hos Morsø

### 9.5.1 Formål

Et Tantec-plasmaapparat (PlasmaTEC-X system) benyttes til at plasmabehandle røggasserne fra en brændeovn. Der udføres en forsøgsrække med måling af røggasserne fra en Morsø 6143-brændeovn, dels med plasmabehandlede røggasser, dels uden behandling som reference. Testene udføres i henhold til brændeovnsstandard EN 13 240.

### 9.5.2 Procedure

En Morsø 6143-brændeovn sættes på teststandens vægt. På ovnens toprørgang monteres en skorsten i henhold EN 13 240. Skorstenen er knap to meter høj og består af først et uisoleret røgrør, dernæst et isoleret røgrørsstykke. I dette forsøg isættes et mellemstykke mellem det uisolerede røgrør og det isolerede røgrør. I mellemstykket sidder Tantec-plasmaapparatet og afgiver plasma ud til røggassen (se et billede af opstillingen i FIGUR 33). Optænding, forfyring og tre charges afbrændes i forlængelse af hinanden.



FIGUR 33. Morsø 6134 på teststand. Tilsætning af plasma til røggasser.

### 9.5.3 Udtryk og definitioner

Morsø 6143	Støbejernsbrændeovn i mellemstørrelse. Et brændkammer, der nominelt yder cirka 6 kW. Ovnens har regulerbar, sekundær forbrændingsluft (rudeskyl). Desuden fast tertiær forbrændingsluft til at efterbrænde gasserne.
Forsøgsrække	Forsøgsrækken består af en optænding, forfyring og tre efterfølgende indfyringer a nominel last (charges).
Optænding	Optændingen består af cirka 1,350 kg birk; halvdelen større stykker på cirka 100 gr., resten mindre stykker på 30-50 gr. De større stykker placeres lagvis med 3-4 stykker i hvert lag, Hvert lag placeres vinkelret på underliggende lag. Øverst placeres de mindre stykker hulter til bulter med god luft imellem stykkerne. Allerøverst placeres to optændingsposer af paraffin. Længde 25 cm Brændes ned til et grundglødelag på 300 °C, hvorefter forfyring påbegyndes.
Forfyring	To afbarkede birkekævler med en totalvægt omkring 1,000 kg. Fugtindhold omkring 15-18 %. "Øksemarker" på overfladen af kævlerne for hurtig og ensartet antænding. Længde 25 cm Brændes ned til et grundglødelag på 600 °C, hvorefter en charge indfyres.
Charge	To afbarkede birkekævler med en totalvægt omkring 1,350 kg. Det svarer til en nominel last på 6 kW. Fugtindhold omkring 15-18 %. "Øksemarker" på overfladen af kævlerne for hurtig og ensartet antænding. Længde 25 cm.
Målepunkt for røggasser	Målepunktet i skorstenen for røggasserne er 1850 mm over ovnens røgafgang
Målepunkt for tilsætning Af plasma	Målepunktet i skorstenen for tilsætning af plasma til røggasserne er 560 mm over ovnens røgafgang
Skorstenstræk	Skorstenstrækket reguleres med mekanisk røgsuger. Nominelt sættes skorstenstrækket til 10-12 pa.
Måling	Der måles CO, CO <sub>2</sub> samt OGC i røggasserne. Desuden måles røggastemperatur og rumtemperatur.



**FIGUR 34.** Venstre mod højre: Optænding, forfyring, charge 1, charge 2 og charge 3.

## 9.5.4 Resultater

Forsøgsrækkerne blev kørt over to dage, målinger med plasmabehandling 21/8 2019 og referencemålinger 22/8 2019. Forinden var der brugt to dage med indkøring og udarbejdelse af optimal testprocedure. Testresultaterne er sammenfattet i de to tabeller nedenfor.

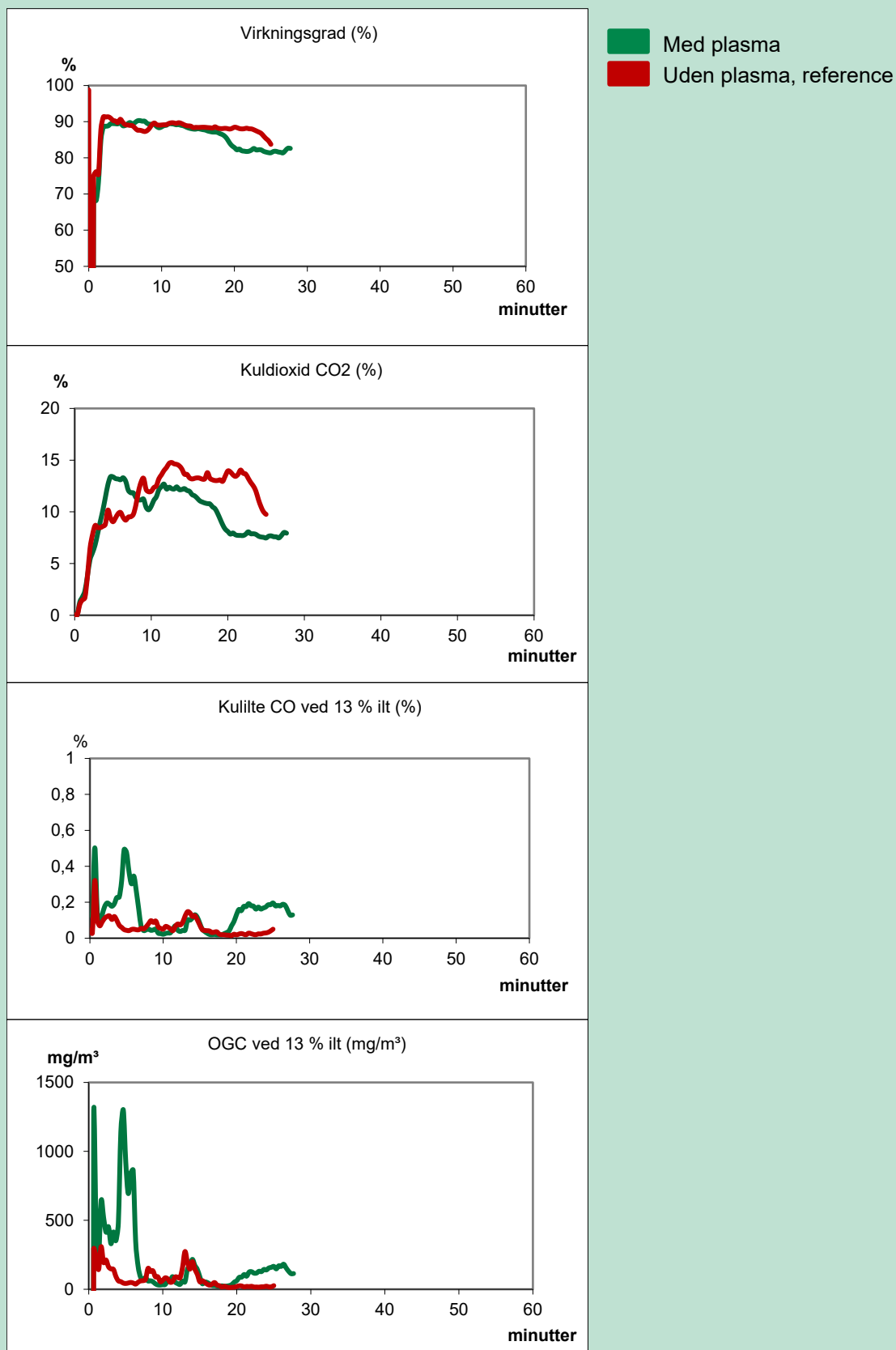
**TABEL 9.** Forsøgsresultater med plasmabehandling.

Fyring	Optænding	Forfyring	Charge 1	Charge 2	Charge 3
Luftspjæld, indstilling	40 % åben	40 % åben	40 % åben	40 % åben	40 % åben
Test, varighed (hh:mm:ss)	00:27:43	00:18:20	00:40:59	00:46:00	00:55:20
Brændsel	Birk	Birk	Birk	Birk	Birk
Antal trækævlér	-	2	2	2	2
Vægt af brændsel (kg)	1,090	0,700	1,344	1,360	1,354
Fugtinhold (%)	14,5	15	17,5	17	15,5
Forbrændingshastighed, tør (kg/h)	2,01	1,95	1,62	1,47	1,24
Ydelse (kW)	8,10	8,24	6,99	6,22	5,15
Skorstenstræk (Pa)	11,0	11,3	10,5	10,3	10,8
Røggastemperatur (°C)	186,4	236,1	250,1	247,2	244,0
Rumtemperatur (°C)	24,0	24,8	25,6	26,6	27,3
Virkningsgrad (%)	79,68	83,54	82,57	81,43	81,41
CO <sub>2</sub> -indhold (%)	9,60	10,07	10,26	9,46	9,09
CO-indhold (@13 % O <sub>2</sub> )(%)	0,130	0,066	0,078	0,082	0,092
OGC-indhold (@13 % O <sub>2</sub> )(mg/nm <sup>3</sup> )	21,2	99,8	92,5	111,6	88,8

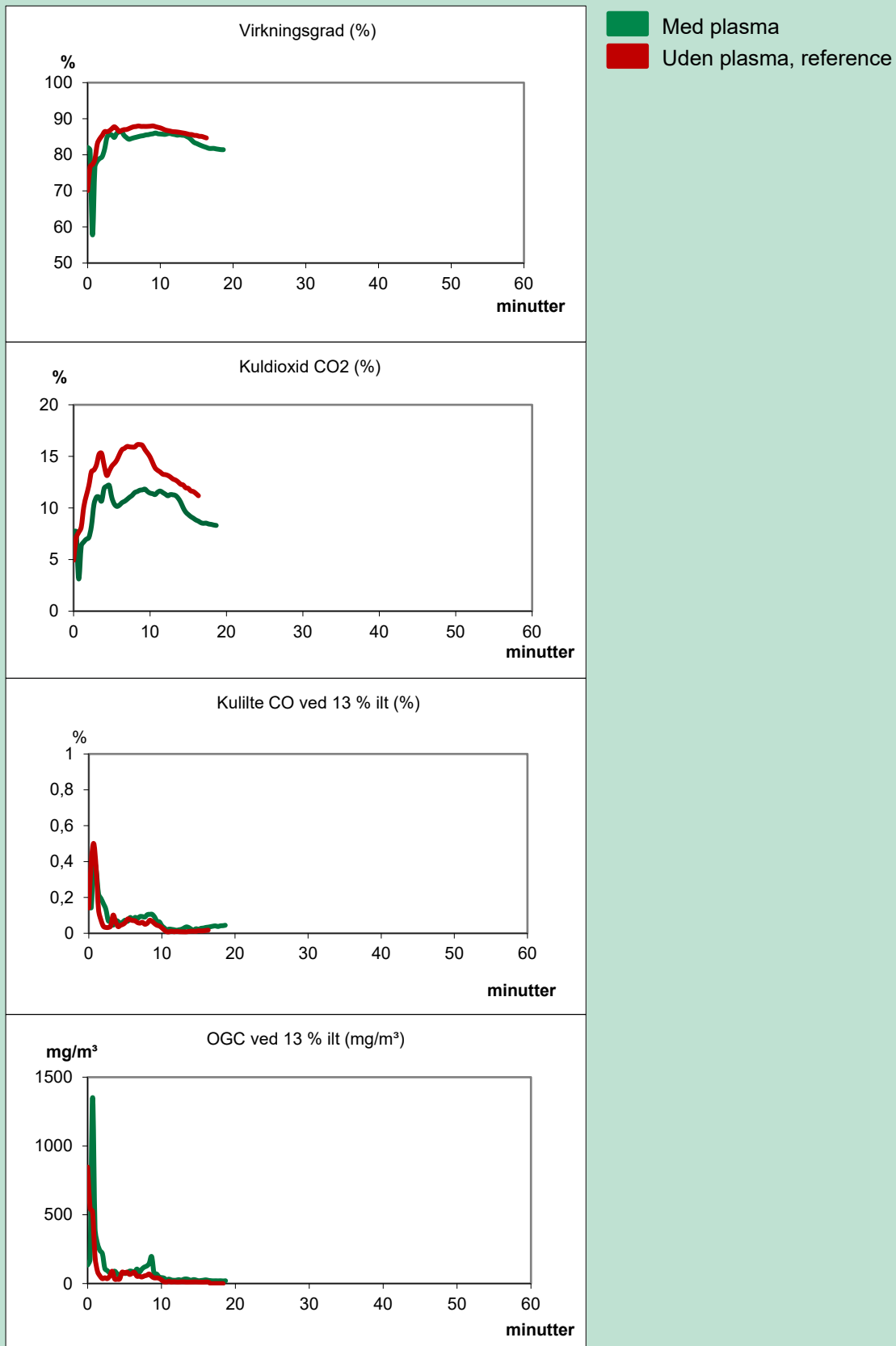
**TABEL 10.** Forsøgsresultater uden plasma behandling (reference).

Fyring	Optænding	Forfyring	Charge 1	Charge 2	Charge 3
Luftspjæld, indstilling	40 % åben	40 % åben	40 % åben	40 % åben	40 % åben
Test, varighed (hh:mm:ss)	00:23:20	00:16:20	00:41:20	00:51:27	00:55:51
Brændsel	Birk	Birk	Birk	Birk	Birk
Antal trækævlér	-	2	2	2	2
Vægt af brændsel (kg)	1,043	0,701	1,343	1,360	1,358
Fugtinhold (%)	15	17	18	18	17
Forbrændingshastighed (kg/h)	2,28	2,14	1,60	1,30	1,21
Ydelse (kW)	10,18	9,54	7,00	5,65	5,17
Skorstenstræk (Pa)	10,9	10,8	11,0	11,1	10,9
Røggastemperatur (°C)	192,5	254,6	257,6	255,9	250,4
Rumtemperatur (°C)	23,9	24,7	25,6	26,6	27,2
Virkningsgrad (%)	88,16	86,03	83,40	82,78	82,38
CO <sub>2</sub> -indhold (%)	11,53	13,41	11,11	10,51	10,20
CO-indhold (@13 % O <sub>2</sub> )(%)	0,058	0,055	0,051	0,073	0,127
OGC-indhold (@13 % O <sub>2</sub> )(mg/nm <sup>3</sup> )	80,0	60,9	80,6	56,7	99,1

Nedenfor er vist grafer, der viser udvikling i virkningsgraden samt koncentration af kuldiioxid, kulilte ved 13 % ilt og OGC ved 13 % ilt hhv. med og uden plasma ved optænding, forfyring, charge 1, charge 2 og charge 3.

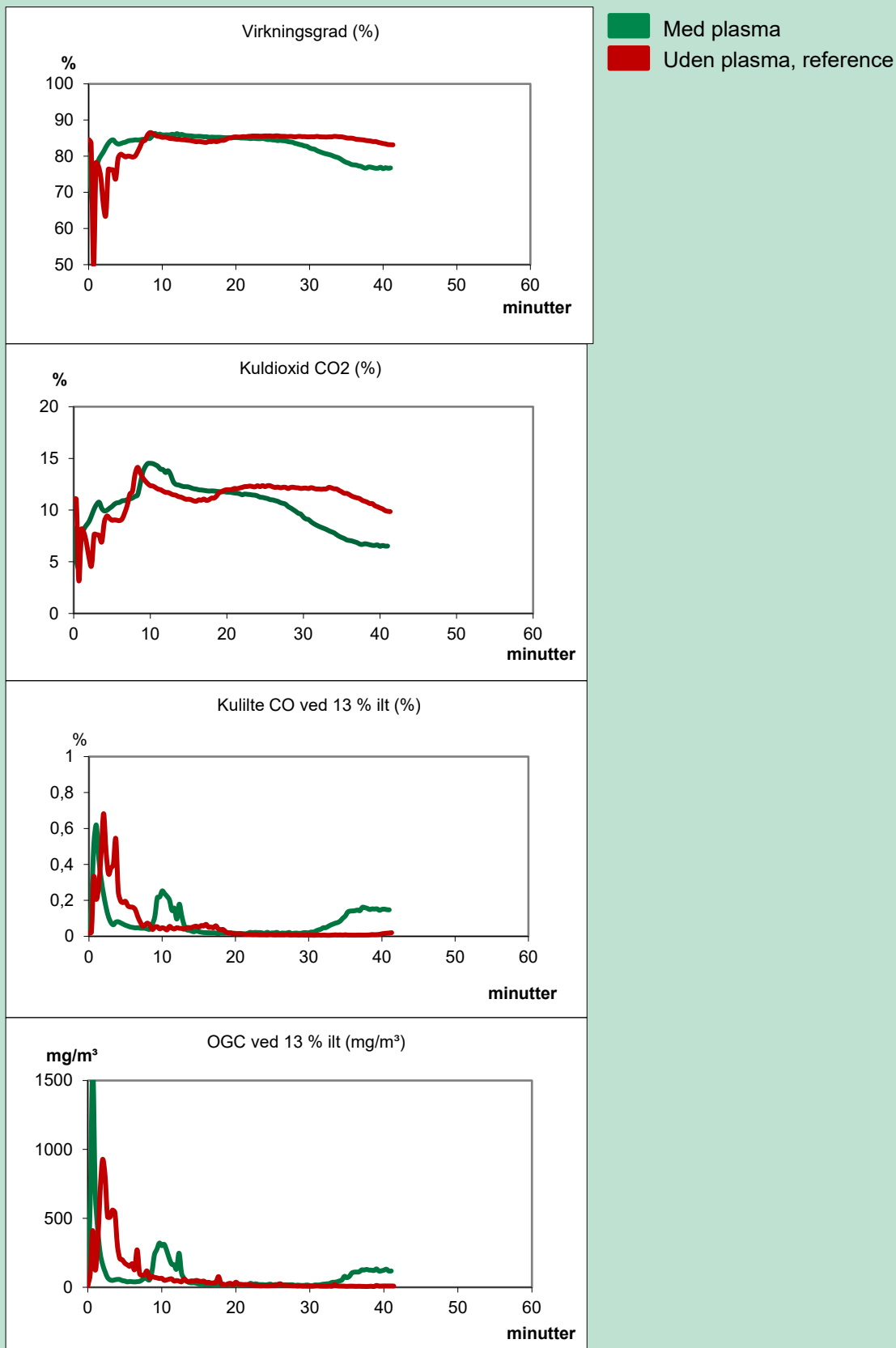


**FIGUR 35.** Grafer over virkningsgrad samt koncentration af kuldioxid, kulilte ved 13 % ilt og OGC ved 13 % ilt henholdsvis med og uden plasma ved optænding.

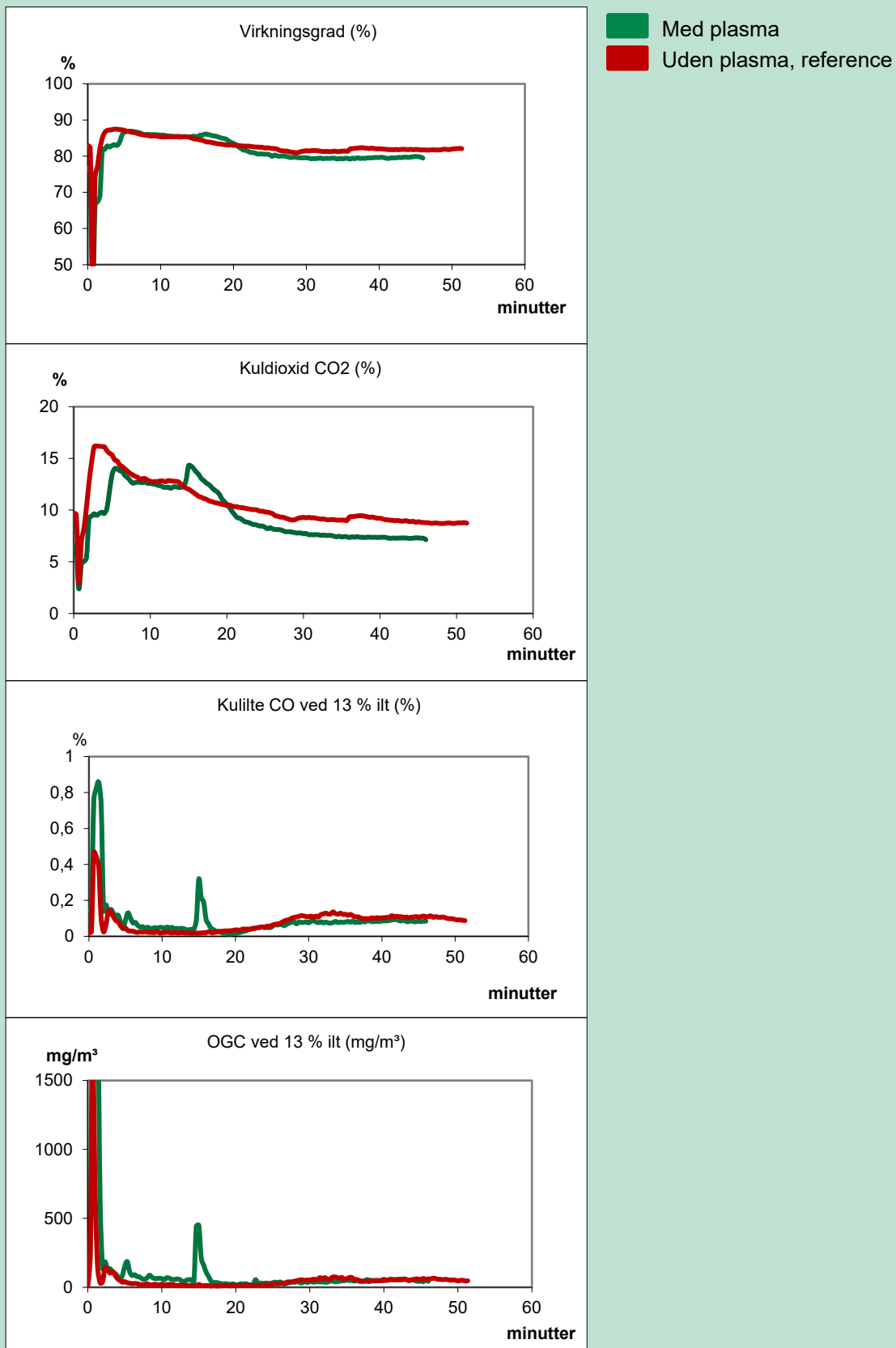


**FIGUR 36.** Grafer over virkningsgrad samt koncentration af kuldioxid, kulilte ved 13 % ilt og OGC ved 13 % ilt henholdsvis med og uden plasma ved forfyring.

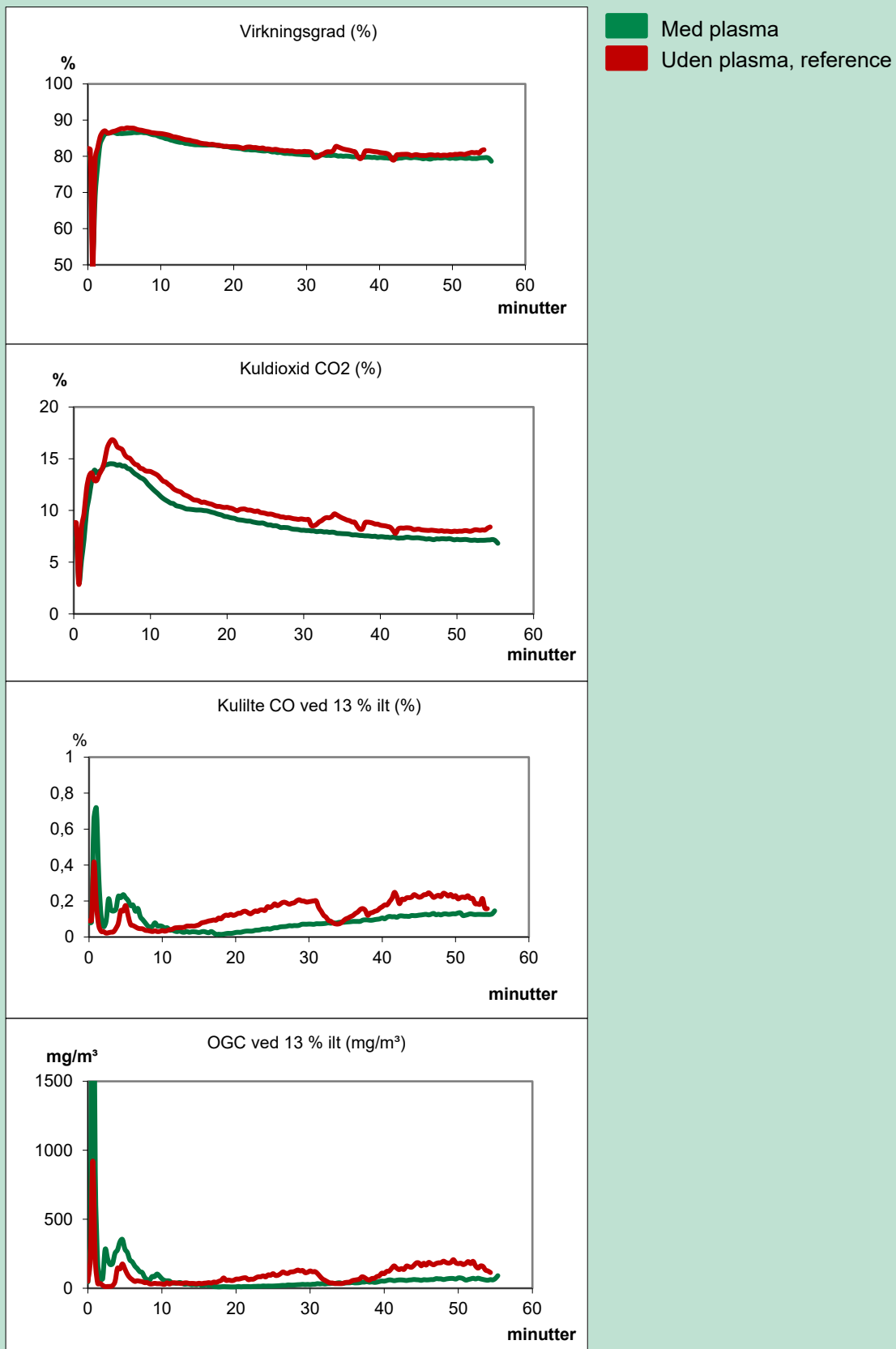




**FIGUR 37.** Grafer over virkningsgrad samt koncentration af kuldioxid, kulilte ved 13 % ilt og OGC ved 13 % ilt henholdsvis med og uden plasma ved charge 1.



**FIGUR 38.** Grafer over virkningsgrad samt koncentration af kuldioxid, kulilte ved 13 % ilt og OGC ved 13 % ilt henholdsvis med og uden plasma ved charge 2.



**FIGUR 39.** Grafer over virkningsgrad samt koncentration af kuldioxid, kulilte ved 13 % ilt og OGC ved 13 % ilt henholdsvis med og uden plasma ved charge 3.

### **9.5.5 Konklusion**

For denne forsøgsrække har plasmabehandling af røggassen ikke nogen emissionsreducerende effekt. Plasmabehandlingen ser ud til at have den sideeffekt, at den fortynder røggassen med ilt. Dermed falder CO<sub>2</sub>-andelen i røggassen. Det påvirker resultaterne på de beregnede emissioner og virkningsgraden. CO og OGC stiger, og virkningsgraden falder. Denne tendens ses tydeligst på graferne.

Forbrændingen i brændkammeret for de to forsøgsrækker vurderes visuelt til at være identiske. Det er således i røgrøret ved plasmatilsætningen, at forskellene mellem de to forsøg opstår.

# 10. Plasmaenhed fra Newcastle University

## 10.1 Introduktion til gruppen på Newcastle University

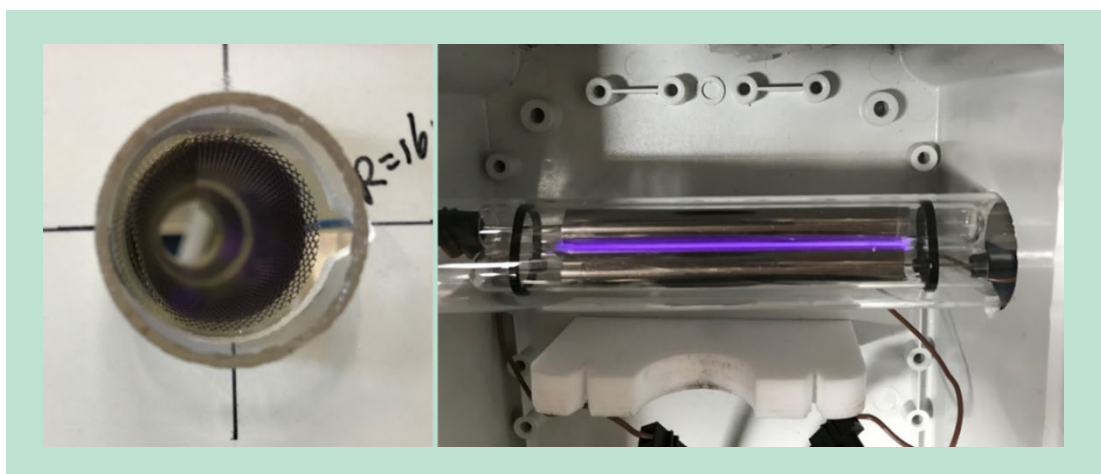
Forskergruppen ved Newcastle University, ledet af professor Adam Harvey, er så vidt vides den første gruppe i verden, som begyndte at arbejde med kold plasma-teknologi til at reducere udledningen af partikler og gasser fra brændeovne. Forskergruppen udvikler deres egne plasmaenheder og har præsenteret deres indledende arbejde i 2014 på *Annual Assembly of the Supergen Bioenergy Hub* i Birmingham, England<sup>6</sup> og i 2015 på *International Biomass Emissions Conference* i Leeds, England<sup>7</sup>. Posteren fra sidstnævnte konference er vist i Bilag 2.

## 10.2 Målekampagne hos Teknologisk Institut med Newcastle-plasmaenhed

En målekampagne blev udført på Teknologisk Institut med deltagelse af postdoc Kui Zhang og professor Adam Harvey fra Newcastle University.

### 10.2.1 Forsøgsopstilling og fremgangsmåde

To forskellige plasmaenheder udviklet på Newcastle University blev testet, herunder et mesh-plasma og et stangplasma (FIGUR 40). Tre forskellige målinger, der omfattede referencemålinger, målinger med meshplasma og målinger med stangplasma, blev udført. Den sidste dag i målekampagnen blev brugt til at teste virkningen af to plasmaenheder med kortere tænd/sluk-intervaller.



**FIGUR 40.** Newcastle-meshplasmaenhed (venstre) og -stangplasmaenhed (højre), der genererer blå plasma.

Emissioner fra skorstenen af brændeovne blev fortyndet 20 gange med en fortyndingskanal. Emissioner fra fortyndingskanalen blev yderligere fortyndet 30 gange med en Dilutor (Testo

<sup>6</sup> Mitchell, E.J.S., Jones, J., Lea-Langton, A., Williams, A., Harvey, A., Zhang, K. (2014) Emissions Control from Domestic Biomass Combustion. Annual Assembly of the Supergen Bioenergy Hub. European Bioenergy Research Institute (EBRI), Aston University, Birmingham, UK. 5th November 2014.

<sup>7</sup> Zhang, K., Mitchell, E.J.S., Lea-Langton, A., Harvey, A., Jones, J. and Williams, A. (2015) Abatement of Smoke Emissions from Domestic Stove Combustion using Novel Plasma Device. 1st International Biomass Emissions Conference. 14-15 September 2015. University of Leeds, UK.

MD19-3E), hvorefter der blev målt black carbon (microAeth AE51, Aethlabs), partikelmassekoncentration (DustTrak, TSI), partikeldiameter fra 300 nm-10 µm med Optical Partikel Sizer (TSI)samt partikelantalkoncentration og partikelstørrelsesfordeling (partikler fra 10-400 nm med Nanoscan (TSI). Se desuden afsnit 7.1 for yderligere information om analysemetoderne. Der blev anvendt mindst tre charges til beregning af de gennemsnitlige resultater.

## 10.2.2 Resultater og diskussion

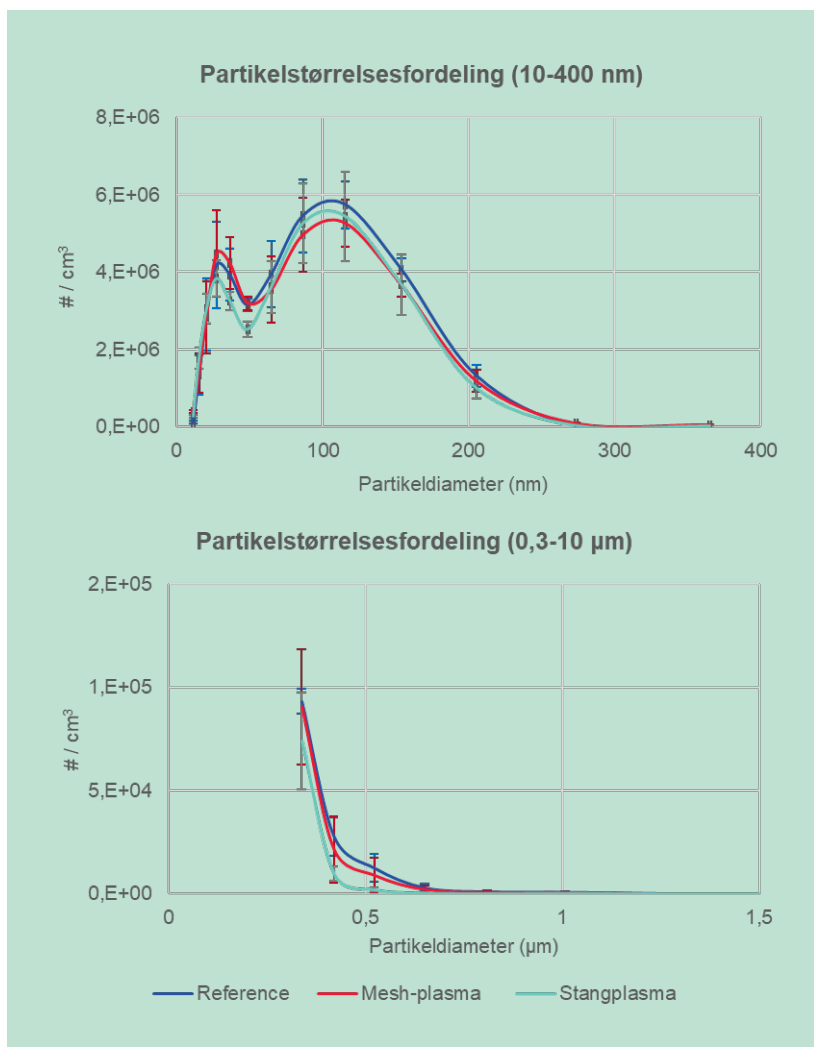
Synligt blå plasma blev observeret ved anvendelse af både mesh- og stangplasma fra Newcastle University (FIGUR 40). Anvendelse af plasmaenhederne til brændeovnsmissioner førte dog ikke til nogen signifikant påvirkning, hverken på partikelmassekoncentration, partikelantalskoncentration, partikelstørrelsesfordeling eller black carbon-koncentration.

TABEL 11 viser måledata for brændeovnen under målingerne med reference, mesh- og stangplasma. Disse resultater viser, at ovnen er kørt ensartet på de tre forskellige dage, og at målinger kan bruges til at sammenligne effekten af plasma mellem de forskellige testdage. Resultaterne viser, at der ikke er nogen signifikant forskel mellem massen af partikler før og efter cyklonen, og dermed at partiklerne ikke er blevet agglomereret i sådan en grad, at de kan opfanges i cyklonen. I forhold til NO<sub>x</sub> vurderes der ikke at være en signifikant forskel mellem målinger med eller uden plasma.

**TABEL 11.** Måledata for brændeovnen under målingerne med reference, mesh- og stangplasma.

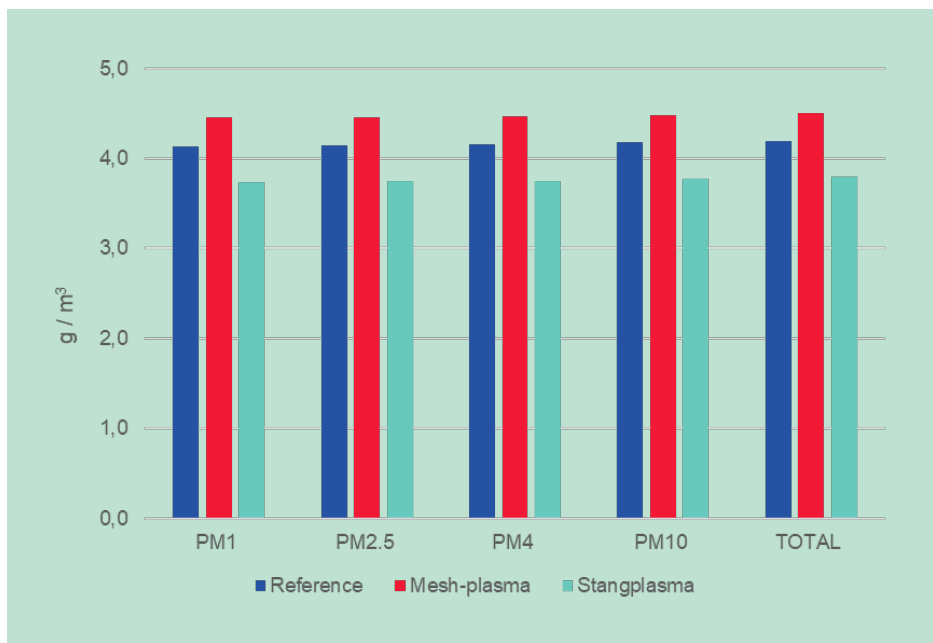
	Referencemåling				Meshplasma					Stangplasma				
Charge nummer	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4		
Røggastemperatur [°C]	241	229	228	231	242	237	235	235	250	243	243	240		
Røggasmasseløb [g/s]	7,3	6,7	7,6	7,4	7,2	6,9	7,2	6,9	7,1	7,2	7,3	7,6		
Virkningsgrad [%]	81	81			81	82	81	81	81	81	80	80	80	81
Nominel varmeudydelse [kW]	8,5	7,5			8,7	8,7	8,3	8,0	8,4	8,0	8,3	8,3	8,3	8,7
CO <sub>2</sub> , middelværdi [%]	9,6	9,3			9,4	9,8	9,7	9,6	9,6	9,6	9,8	9,6	9,5	9,5
CO [%] tør gas ved 13 % O <sub>2</sub>	0,14	0,19			0,17	0,15	0,15	0,18	0,17	0,16	0,15	0,18	0,17	0,17
Org. kulstof [mg/m <sup>3</sup> n] tør gas v 13 % O <sub>2</sub>	100	108			129	134	103	136	129	88	101	118	133	132
NO <sub>x</sub> (Som NO <sub>2</sub> ) [mg/m <sup>3</sup> n] tør gas ved 13 % O <sub>2</sub>	62	50			50	50	56	48	47	49	58	49	45	49
Partikler før cyklon [mg/m <sup>3</sup> n]	3,9	3,6			4,3	4,2	4,3	5,8	4,9	3,7	3,3	4,0	4,3	3,7
Partikler efter cyklon [mg/m <sup>3</sup> n]	4,2	3,5			4,8	4,8	4,8	6,3	4,9	3,6	3,1	4,2	4,9	3,8

Et andet eksempel er vist i FIGUR 41, hvor partikelstørrelsesfordelingen for referencemålinger med slukket plasma og målinger med tændt mesh- eller stangplasma ikke adskiller sig signifikant fra hinanden. Størrelsen og fordelingen af partiklerne fra Tantec målekampagnen og Newcastle-målekampagnen er sammenlignelige.



**FIGUR 41.** Partikelstørrelsesfordeling målt med NanoScan og Optical Particle Sizer.

FIGUR 42 viser partikelmassekoncentration (PM1, PM2,5, PM4, PM10 og PMtotal) af referencemålinger med slukket plasma, målinger med tændt meshplasma og målinger med tændt stangplasma. Det meste af røggassen fra brændeovnsmissioner var PM<sub>1</sub>. Højere partikelmasse blev målt med tændt meshplasma i forhold til referencemålinger, mens lavere partikelmasse blev målt med tændt stangplasma i forhold til referencemålinger. Ingen signifikante effekter blev observeret.



FIGUR 42. Partikelmasse målt med DustTrak.



# Bilag 1. Oversigt over forskningsprojekter inden for plasma- og forbrændingsteknologi

Plasma	Engine, burner	Objective	Merits	Problems	Institution, company	Refs.
MW + spark	Gasoline engine Small IC engine	Ignition	Stable leaner combustion & improved stability	Not reported	Imagineering, Inc., Princeton University	[172,69]
Radio-frequency plasma	Small IC engine	Ignition	Stable leaner combustion, improved stability, lower emissions	Increased NO <sub>x</sub> emission	Michigan State University	[173]
MW + spark	Constant volume combustion chamber	Ignition and flame propagation	Extended lean and rich ignition limits	No effect on flame propagation	Imagineering, Inc., UC Berkeley	[70]
Transient plasma igniter	Gasoline engine	Ignition	Shorter ignition delays, stable leaner combustion	Not reported	University of Southern California, Nissan Motor Co., Ltd.	[79,81]
Transient plasma igniter	Constant volume combustion chamber, counterflow burners	Ignition	Low temperature ignition	Electrode geometry dependence of results	University of Southern California	[174]
Transient plasma igniter	Constant volume combustion chamber	Ignition and flame propagation	Shorter ignition delays, increased flame speeds due to flame wrinkling	Not reported	University of Southern California	[175]
Laser igniter	Constant volume combustion chamber, IC engine	Ignition	Effective ignition, remote ignition	misalignment problems, optics contaminations, high cost	King Saud University	[77]
Nanosecond pulsed discharge	Swirl-stabilized gas turbine burner	Flame stabilization, lean blowout limits	Improved stability, leaner combustion	Plasma can also cause instability	Technical University of Berlin, CNRS and Ecole Central Paris	[163,176,177]
Transient plasma igniter	Pulsed detonation engine	Ignition	Effective ignition, shortened ignition delays	Not reported	University of Southern California, Naval Postgraduate School, Stanford University, U.S. Air Force Research Laboratory Princeton University, U.S. Air Force Research Laboratory	[178]
Nanosecond pulsed discharge	Pulsed detonation engine	Ignition	Effective ignition, leaner and richer ignition	Not reported	Princeton University, U.S. Air Force Research Laboratory	[62]
Ozone from DBD	Diesel engine	Ignition	Decreased ignition timing	Not reported	University of Orléans, CNRS	[179]
Plasma torch	Scramjet	Ignition	Successful ignition	Huge power consumption	Tohoku University	[180]
DBD + plasma torch	Scramjet	Ignition	Successful ignition with lower power consumption	Not reported	Tohoku University	[181]
Nanosecond pulsed discharge	Scramjet	Ignition and flame holding	Shorter ignition delays, effective ignition and flame holding	Not reported	Stanford University	[56,182]
Quasi DC multi-electrode discharge	Scramjet	Ignition and flame holding	Effective ignition and flame holding	Not reported	Russian Academy of Science, U.S. Air Force Research Laboratory	[183–185]
MW	Scramjet	Ignition and flame holding	Effective ignition and flame holding	Not reported	Moscow Radiotechnical Institute RAS, Central Institute of Aviation Motors, John Hopkins University	[186]
Laser induced plasma	Scramjet	Ignition	Effective OH production	Not reported	University of Queensland, University of New South Wales	[187]
DBD	Coflow burner	Soot formation	Effective soot reduction	Not reported	Seoul National University	[96]
DBD	Diesel engine exhaust	Emissions	Simultaneous soot, unburned HC, NO <sub>x</sub> , and PAHs reduction	High E/N may cause NO <sub>x</sub> formation from the plasma	Tianjin University	[188]
Gliding arc	Industrial burner	NO <sub>x</sub>	Reduction NO <sub>x</sub> production rate	Increased CO production rate with increased access air ratio	Korea Institute of Machinery and Materials, Sookook Corporation	[189]

# Bilag 2. Poster fra Leeds og Newcastle University

## Abatement of Smoke Emissions from Domestic Stove Combustion using Novel Plasma Device

Kui Zhang<sup>1</sup>, Edward Mitchell<sup>2</sup>, Amanda Lea-Langton<sup>2</sup>, Adam Harvey<sup>1\*</sup>, Jenny Jones<sup>2</sup> and Alan Williams<sup>2</sup>  
 School of Chemical Engineering and Advanced Materials, Newcastle University<sup>1</sup> and Energy Research Institute, University of Leeds<sup>2</sup>  
 E-mail: adam.harvey@newcastle.ac.uk

### Introduction

Biomass combustion in domestic scale appliances is often inefficient and uncontrolled leading to high emissions of gaseous pollutants and particulate matter [1]. These emissions are largely unabated, leading to high emission factors compared with larger combustion systems which often feature complex flue gas clean-up technologies. Non-thermal plasmas can generate positive and negative ions, ozone, and plasma activated species at low temperatures and ambient pressure [2]. The positive and negative ions can charge the fine combustion emission particulates in the flue. Those charged particulates will stick together increasing their size allowing them to be easily removed from the effluent. At the same time, those ions, ozone, and plasma activated species in the flue can initiate a series of chemical reactions which can convert the hazardous volatile organic compounds (VOCs) into benign species (e.g. CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) which can be safely vented to atmosphere. A novel plasma-based abatement device has been developed and tested on a 6 kW domestic wood burning stove. The influence of the integration of the plasma air ionizer and biomass combustion stove on the particulate matter, NO<sub>x</sub> and VOCs emissions of biomass combustion was evaluated. The mechanism of the plasma initiated chemical reactions for VOC and NO<sub>x</sub> remediation in the flue is discussed.

**Fig. 2** Effect of plasma air ionizer on PM (Power = 25%, sampling rate = avg 19.6 U/min, fuel-pine)

**Fig. 3** SEM pictures of particulates collected on particulate filter (Power = 25%, sampling rate = avg 19.6 U/min, fuel-pine)

The ionizer can influence the concentration of NO, NO<sub>2</sub> in effluent. As depicted in Fig. 4, the plasma activated species can convert NO into NO<sub>2</sub> in the flue

**Fig. 4** Effect of plasma air ionizer on NO<sub>x</sub> (NO + NO<sub>2</sub>) (Power, air flow rate, fuel)

**Fig. 5** Effect of plasma air ionizer on VOCs (Power, air flow rate, fuel)

Fig. 5 shows that VOCs produced by the biomass combustion and collected in a water trap can be oxidized by the activated species produced by the plasma air ionizer. A possible reaction scheme of the treatment of combustion effluent with plasma air ionizer is as follows:

**Fig. 6** A possible reaction scheme of the treatment of the combustion effluent with plasma air ionizer

### Method

Fig. 1 shows a schematic of the experimental setup.

**Figure 1.** A schematic of the experimental setup

The plasma air ionizer consists of one quartz tube and two stainless steel mesh electrodes. One electrode was positioned on the internal surface of the quartz tube, and the other one on the external surface of it. The two electrodes were connected to a plasma power source unit that could supply 0-15W to the ionizer by adjusting the amplitude of the applied voltage. The plasma was generated on the two surfaces of the quartz tube. The outlet of the ionizer were connected to the flue of the stove, and the ionized air was sucked into the flue through the plasma air ionizer. Logs of European Ash (*fraxinus excelsior*) and kiln-dried dimensioned pine (*pinus strobus*) were tested in the experiment. The total suspended particulate matter was determined gravimetrically with glass fibre filters, which were then analysed by scanning electron microscopy (SEM). Particle size distribution was determined using a Dekati PM 10 impactor. Gaseous emissions were analysed by using an online FTIR gas analyser.

### Results and Discussion

Fig. 2 shows the effect of plasma air ionizer on PM. More PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> were collected with the help of the plasma ionizer. Further SEM study reveals that the plasma ionizer assisted the particulate agglomeration in the flue as shown in fig. 3.

### Conclusions

The application of plasma air ionization to biomass combustion can increase emission particulate size, influence NO and NO<sub>2</sub> concentrations in the flue. The plasma initiates a series of chemical reactions to convert the hazardous particulates and VOCs into benign species (e.g. CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O). It has the advantage of lower maintenance, quiet operation, and low energy consumption.

### References

- [1] M. T. Lim, A. Phan, D. Roddy, A. Harvey, Technologies for measurement and mitigation of particulate emissions from domestic combustion of biomass: A review, Renewable and sustainable reviews, 49 (2015) 574-584.
- [2] U. Kogelschatz, B. Eliasson, W. Egli, Dielectric-barrier discharges. Principle and applications, Journal De Physique Iv 7 (1997) 47-66.

### Acknowledgement

SUPERGEN Bioenergy Hub

## Rensning af brændeovnsrøg med plasmateknologi

Opgørelser af luftkvalitet fra DCE dokumenterer, at luftkvaliteten i Danmark konstant er blevet renere de sidste 30 år. Reduktionen i indenlandsk udledning af PM<sub>2,5</sub> dokumenteret af DCE understøttes af målinger af partikelemission fra brændeovne under prøver på Teknologisk Institut, hvor middelemmissioner fra 2002 til dato er faldet fra ca. 6 g/kg brænde til ca. 2 g/kg brænde. Forbrændingsmæssigt er optimeringen af brændeovne tæt på optimal, hvad angår det praktisk mulige i forhold til de primære forbedringer (brændkammer og lufttilsætning). Skal branchen i fremtiden sikre endnu lavere emissioner, er der behov for at undersøge de mulige sekundære reduktionsløsninger såsom kold plasma.

Nærværende projekts overordnede formål har været at udvikle, integrere og evaluere kold plasma-teknologi eller ikke-termisk plasma til rensning af brændeovnsrøg.

Plasma betegner en energirig tilstand lignende et stof på gasform og består af en samling af ioniserede gasatomer og frie elektroner. Ambitionen i projektet har været at anvende kold plasma-teknologi til at få partiklerne i røggassen til at agglomerere, så de kunne fjernes med fx en cyklon, samtidig med at større molekyler som OGC skulle nedbrydes til kuldioxid og vand.

I projektet er der blevet gennemført målekampagner på tre forskellige plasmaenheder, hvoraf ingen viste hverken en signifikant effekt på partikelstørrelsen eller en reduktion af øvrige emissioner. På baggrund af projektets resultater, konkluderes det, at kold plasma-teknologi, som det er blevet anvendt i nærværende projekt, ikke har anvendelsespotentialer inden for røgrensning i brændeovne.



Miljøstyrelsen  
Tolderlundsvej 5  
5000 Odense C

[www.mst](http://www.mst)