



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

MiljøKAT

En katalytisk enhed til røggasrensning på
brændeovne og-kedler

Miljøprojekt nr. 1621, 2014

Titel:

MiljøKAT

En katalytisk enhed til
røggasrensning på brændeovne og-kedler

Redaktion:

Anette S. Brønnum (Projektleder), Teknologisk Institut
Max Bjerrum, Teknologisk Institut
Marcin Blazniak Andreassen, Teknologisk Institut
Ole Hansen, Scan A/S
Morten Bach Pedersen, Scan A/S
Brian Brun Hansen, CHEC/DTU
Peter Bøgh Pedersen, Teknologisk Institut
Morten Køcks, Teknologisk Institut

Udgiver:

Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K
www.mst.dk

Foto:

Redaktionen

Illustration:

Redaktionen

År:

2014

ISBN nr.

978-87-93283-16-9

Ansvarsfraskrivelse:

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling. 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

Forord	5
Konklusion og sammenfatning	6
Summary and Conclusion	8
1 Markedsunder-søgelse	10
1.1 Brændeovne – proceskonditioner og udledning	11
1.1.1 Dansk lovgivning.....	11
1.2 Katalytiske rensningsteknologier	12
1.2.1 Katalyseforudsætninger.....	12
1.2.2 Katalytisk konverterdesign.....	12
1.3 Katalysatorer til køretøjer.....	14
1.4 Katalysatorer i brændeovne.....	15
1.4.1 Udvalgte studier af brændeovnskatalysatorer	15
1.4.2 Kommercielle produkter.....	16
1.5 Sammenfatning.....	21
2 Præ-kvalifikation og test	23
2.1 Udvalgelse af katalysatorer.....	23
2.2 Indledende tests af udvalgte katalysatorer	26
2.2.1 Forsøgsopstilling.....	26
2.2.2 Resultater	30
2.3 Regenerering af de katalytiske produkter.....	32
2.3.1 Resultater	33
2.4 Samlet vurdering af de indledende tests.....	34
3 Udvikling af MiljøKAT.....	36
3.1 Markedsmæssig interesseafsøgning for miljøkatalysatorer til brændeovne.....	36
3.1.1 Udførelse	36
3.1.2 Vurdering af markedspotentiale.....	37
3.1.3 Opsummering og anbefalinger	39
3.2 Design af MiljøKAT.....	40
4 Test af katalysatorer på ovne og kedler.....	44
4.1 Forsøgsopstilling.....	44
4.2 Resultaterne for målingerne på brændeovne	46
4.2.1 Indledende målinger uden katalysator	46
4.2.2 Katalysator A	48
4.2.3 Katalysator B	52
4.2.4 Sammenligning af røgtræk	56
4.2.5 Sammenligning af temperaturer	57
4.2.6 Sammenligning af katalysatorer.....	58
4.3 Måling af PAH.....	62
4.4 Måling af partikelstørrelsesfordeling.....	63
4.4.1 DustTrak.....	63
4.4.2 SMPS	64
4.5 Forsøg med simuleret brændekedel.....	65
4.6 Sammenfatning.....	67

5	Diskussion og konklusioner	69
	Bilag A – Monolithic pressure drop calculation	70
	Bilag B – Præ-kvalifikation, katalysatorforsøg	71
	Bilag C – Interviewguide	76
	Bilag D – PAH-målinger	78
	Bilag E – partikelmålinger.....	80
	Bilag F – DustTrak og SMPS data	82
	Bilag G – Resultater fra en 3. katalysator	88
	Referencer	102

Forord

Projektet udføres af en projektgruppe sammensat på tværs af industri og vidensinstitutioner. Medlemmer af projektgruppen er Teknologisk Institut, Division for Energi og Klima (projektkoordinator), SCAN A/S (brændeovnsfabrikant) og DTU, CHEC (forskningsinstitution inden for forbrænding og emissionskontrol). Projektet er medfinansieret af Miljøstyrelsens "Tilskudsordning til miljøeffektiv teknologi" og er udført i perioden 2010 til 2013.

Projektets formål er at udvikle en eftermonterbar enhed til katalytisk rensning af røggas fra eksisterende brændeovne og -kedler. Samme teknologi vil imidlertid også kunne designs ind i nye ovne og kedler. Projektets hensigt er således at bringe efterbehandling af røggas ud af den nuværende eksperimentelle fase til et kommercielt tilgængeligt produkt, en MiljøKAT - der hurtigt kan introduceres som effektive efterbehandlingsenheder til en overkommelig pris. Der findes fortsat et stort antal ældre brændeovne og -kedler, hvis konstruktion og forbrændingsprincip ikke lever op til nutidig standard. De har en lang levetid, og dermed sker en naturlig udskiftning til nyere og mere moderne ovne kun langsomt. Implementering af en eftermonterbar katalytisk enhed kan derfor muliggøre en vigtig reduktion af emissioner fra ældre brændeovne og -kedler.

Rapporten indeholder en beskrivelse af udviklingen af katalysatorenheden i forhold til følgende projektfaser: 1) Undersøgelse af markedet og litteraturstudier for eksisterende katalytiske produkter til brændeovne og -kedler, samt andre katalytiske produkter, der kunne være velegnede til efterbehandling af røggas fra brændefyring, 2) Udvælgelse af lovende katalysatorer og prøvning af disse 3) Udvikling af en katalysatorenhed dedikeret til eftermontering baseret på de to foregående faser og konklusioner fra interviews med udvalgte forhandlere/pejsecentre, 4) Udførelse af test af de udvalgte produkter/teknologier monteret på en ældre brændeovn, sammenholdt med test på en moderne, og simuleret reelle brugsforhold med og uden den eftermonterede enhed.

Rapportens indhold er nødvendigvis ikke et udtryk for Miljøstyrelsens holdninger, men styrelsen har støttet projektet, fordi man finder dets målsætning væsentlig og interessant.

Konklusion og sammenfatning

Forbrænding af biomasse er en vigtig kilde til emissioner. Den største PM_{2,5} emissionskilde kommer ifølge IEA Bioenergy, 2011 fra decentral boligopvarmning, hvor den dominerende kilde er træforbrænding i brændeovne og -kedler.

Det danske miljøministerium udstedte i december 2007 en bekendtgørelse vedrørende brændeovne, kedler og lignende varmeanlæg (Bekendtgørelse om regulering af luftforurening fra brændeovne og brændekedler samt visse andre faste anlæg til energiproduktion, BEK nr. 1432). Bekendtgørelsen omhandler de tilladte emissionsniveauer af partikler, kulilte og kulbrinter fra bl.a. brændeovne og -kedler installeret efter 1. juli 2008. Der er imidlertid et stort antal gamle ovne og kedler i Danmark ud af det totale antal på henholdsvis knap 324.000 og 48.000 enheder ifølge Miljøprojekt Nr. 1324 2010, der ikke lever op til den standard, som findes for produkterne i dag gennem både lovkrav og frivillige ordninger som eksempelvis Svanemærket. Nærværende projekt omhandler muligheden for at reducere emissioner fra disse anlæg.

En lovende teknologi for at opnå en reduktion af emissioner er en eftermonteret katalysatorenhed, der kan monteres i eksisterende brændeovne og -kedler og hvis ønskeligt også i nye produkter. Udviklingen af sådan en enhed er dette projekts endelige mål.

Katalytiske brændeovne er velkendte i lande som USA, Australien, Østrig og Norge, men de er næsten ukendte i Danmark. Derfor er der initielt foretaget studier i relevant litteratur og markedet for eksisterende katalytiske produkter til brændeovne og -kedler samt andre katalytiske produkter, som kan være egnet til behandling af røggas, der kommer fra brændefyring.

På baggrund af studiet er to forskellige katalysatortyper udvalgt og testet. For at afprøve de udvalgte katalysatorer under kontrollerede forhold, udvikles en prøveopstilling, hvor standardiseret røg tilsættes ved forskellige temperaturer. Resultaterne viser, at katalysatorerne alle er meget effektive i reduktion af CO, og mindre grad i fjernelse af OGC. Røggassens temperatur er her meget afgørende og fordrer en placering af katalysatoren, hvor røggastemperaturen vil være høj (>400 °C). Katalysatorens evne til at fjerne CO og OGC er forskellige, men da deres geometri og opbygning også er det, forudses tryktabet at kunne blive en afgørende faktor, hvorfor det er valgt at fortsætte den videre undersøgelse uden yderligere udvælgelse.

Der er udført en markeds-mæssig interesseafsøgning for miljøkatalysatorer til brændeovne for at se, hvorvidt et sådan produkt opfylder behovet på markedet og kan få et kommercielt fundament. Undersøgelsen viser bl.a., at slutbrugerens primære interesseområder er stor brugervenlighed og lav pris, hvilket medfører at designet af katalysatorenheden udføres uden by-pass.

De gennemførte målinger med og uden katalysator monteret på henholdsvis en ældre og en moderne brændeovns røgstud viser særlig emissionsreduktion ved at eftermontere katalysator på den ældre brændeovn. CO reduceres med 80-90 % og OGC med op til 75 %. Niveauet for OGC værdierne for den gamle ovn med katalysator kommer dog ikke under niveauet for moderne ovne uden katalysator. Risiko for tildækning og deraf følgende tryktab i katalysatoren medfører, at projektet kan pege på en af de udvalgte katalysatorer, som er bedst egnet til eftermontering på brændeovne.

Erfaringerne fra de udførte forsøg på en biobrændselskedel indikerer, at katalysatorer ikke er egnet til eftermontering i røgstudsen i underforbrændingskedler, idet tilstopning forårsaget af en lav røggastemperatur vil ske efter relativ få driftstimer. Samtidig vurderes den opnåede emissionsreduktion ikke at være væsentlig.

Summary and Conclusion

Solid biomass combustion is an important source of emissions. The largest PM_{2.5} emission sources in Denmark derive from decentralized residential heating systems, wood combustion in stoves and boilers being the dominating source according to IEA Bioenergy, 2011.

The Danish Ministry of the Environment issued a new Statutory Order in December 2008 concerning wood burning stoves, boilers and similar heating systems (statutory order regarding regulation of air pollution from wood-burning stoves and boilers and certain other fixed units for energy production, BEK no. 1432). The statutory order states the permitted emission levels of particulate matter, carbon monoxide and hydrocarbons from wood burning stoves and boilers installed after 1. Juli 2008. Nevertheless, in Denmark there are still a large number of old stoves and boilers, estimated respectively to be 324,000 and 43,000 units according to Miljøprojekt No. 1324 2010. These older units do not meet the actual emission standards of today in the shape of both statutory and voluntary schemes as the “swan label” (stoves which have passed the test NS2058/59). Therefore, the potential for reducing emissions from older units is high. This project deals with the possibility of reducing emissions in this area.

A promising technology for achieving such reduction is a retrofit catalyst unit that could be installed in old wood stoves and boilers; and eventually also in new products. The development of that kind of unit – named MiljøKAT- is precisely the final objective of this project.

Catalyst wood stoves are well-known in some countries as the US, Austria and Norway. However, they are almost unknown in Denmark. Therefore, for the development of such a unit, initially a comprehensive literature and market study of the existing catalytic products for stoves and boilers, as well as other catalytic products that could be suitable for the treatment of flue gas coming from wood burning has been carried out.

On the basis of these studies two different catalyst types were selected and tested. In order to test the selected catalysts under controlled conditions, a test setup was developed where standardized smoke could be added at different temperatures. The results show that all the catalysts are very effective in the reduction of CO, and less effective when it comes to removal of OGC. Flue gas temperature is very crucial here and requires a location of the catalyst, where the flue gas temperature will be high (> 400 ° C). Catalyst's ability to remove CO and OGC are different, but since their geometry and structure are likewise, the predicted pressure drop is foreseen to be a crucial factor which is why it was decided to continue the research without further selection.

A market interest scanning for environmental catalysts for stoves has been performed to find out whether such a product meets the needs of the market and could reach a commercial foundation. The survey shows that the end-user's primary interest is the ease of use and low price, leading to the design of the catalyst unit being performed without bypass.

The conducted measurements with and without a catalyst mounted respectively on the flue spigot on an older and a modern stove show in particular reduction of emissions by retrofitting catalyst on the older stove. CO is reduced by 80-90% and OGC by up to 75%. The level of OGC values of the old stove with catalytic converters will not come below the level of modern stoves without catalytic converter. Risk of concealment and consequent pressure drop in the catalyst means that the project can point out one of the selected catalysts which is best suited to retrofit stoves.

The experience gained from the experiments conducted on a biofuel boiler indicates that catalysts are not suitable to be installed in the flue spigot of the combustion boilers as blockage caused by a low flue gas temperature will occur after relatively few hours. At the same time the achieved emission reductions are not assessed as being significant.

1 Markedsundersøgelser

Forbrænding af træ i brændeovne og kedler er en billig og pålidelig varmekilde, som er blevet anvendt af mennesket i adskillige tusind år. Restprodukter (CO, uforbrændte kulbrinter og partikler), som efterlades efter forbrænding kan potentielt være kræftfremkaldende (*Houck and Pitzmann, 2011*), (*Ferrandon and Björnbom, 1999*).

De største PM_{2.5} udledningskilder i Danmark stammer fra decentral bolig varmekilder (~72 %) og trafik (~12 %). Den primære kilde ved boligopvarmningen er forbrænding af træ i brændeovne og kedler ifølge IEA Bioenergy, 2011. I transportsektoren er den primære udledning udstødningsgasser. PM_{2.5} emissionen blev i perioden 2000 til 2009 øget med 35 % grundet øget forbrug af brænde i boligsektoren, hvilket toppede i 2007. I 2008 og 2009 reduceredes emissionen grundet en kombination af et mindre brændeforbrug samt en reduceret aggregeret emissionsfaktor forårsaget af den gradvise udskiftning af ældre ovne og kedler med avancerede teknologier med mere effektiv forbrænding. Indfasningen af nye teknologier er initieret af lovgivningen, der regulerer emissioner fra alle nye installationer af træbrændende varmekilder (IEA Bioenergy, 2011).

Partikel- og røggasudledning i og uden for urbane områder har fået megen politisk og offentlig opmærksomhed i de senere år. Dette har bl.a. resulteret i anvendelse af katalysatorer i transportsektoren. På lignende vis arbejdes der med nye potentielle teknikker til at mindske udledning fra forbrænding af træ. Der kan opnås betydelige forbedringer i forhold til udledning fra brændeovne ved valg af passende brændsel, korrekt betjening, optimering af brændkammeret og forbedring af lufttilstrømning. Yderligere forbedringer for reduceret udledning og økonomisering med brændslet kan antageligt opnås ved eksempelvis anvendelse af katalysatorer. Katalytiske brændeovne til træ findes allerede kommercielt i bl.a. USA, Østrig og Norge.

I Danmark er katalytisk efterbehandling af røggas næsten ukendt i brændeovne. I stedet har danske brændeovnsproducenter valgt at reducere brændeovnens udledning ved at optimere forbrændingskammeret. Nye brændeovne er således designet til at opnå et optimalt miljø i forbrændingszonen, så forbrændingen er så fuldstændigt som muligt for bl.a. at forhindre partikeldannelse fra uforbrændte kulbrinter og derved minimere emissionerne. Dette gøres eksempelvis ved at øge brændkammerisolering, recirkulere forbrændingsluft og indføre forvarmet forbrændingsluft i definerede zoner i brændkammeret.

I dette kapitel ses nærmere på den eksisterende viden og erfaring med katalysatorer til brændeovne. Desuden ses på anvendelse af katalysatorer i relaterede områder som f.eks. dieselmotorer. Kapitlet vil begynde med en kort introduktion til brændeovne (proceskonditioner, udledning og lovgivning). Derefter følger et afsnit om katalytiske miljøteknologier med særlig fokus på teknologiernes anvendelighed mht. brændeovne og -kedler. Ligeledes vil der være en kort beskrivelse af de valgte kommercielle katalysatorer for brændeovne.

Denne præ-undersøgelse skal danne grundlag for udvælgelse af en katalytisk rensningsteknologier der er velegnet til brændeovne og -kedler: en MiljøKAT. Målsætningen er at kunne installere rensningsteknologi på eksisterende brændeovne og -kedler.

I Danmark er der stadig et stort antal gamle ovne og kedler ud af det totale antal på hhv. omkring 324.000 og 48.000 enheder, ifølge Miljøprojekt Nr. 1324; 2010, hvis konstruktions- og forbrændingsprincipper ikke møder de aktuelle standarder og krav. Med en årlig udskiftning på omkring 25.- 30.000 ovne og 2.000 kedler vil der gå et betragteligt antal år inden de ældre ovne og kedler er udskiftet. MiljøKAT vil muliggøre en hurtigere emissionsreduktion via katalytisk rensning af røggas fra brændeovne, end det vil kunne ske ved naturlig udskiftning af de ældre ovne.

1.1 Brændeovne – proceskonditioner og udledning

Forbrænding i brændeovne kan deles op i en optændingsfase, en høj temperatur forbrændingsfase og en udbrændingsfase (*Butschbach et al., 2009*). Den initiale optændingsfase sker ved lave temperaturer ($< 600\text{ }^{\circ}\text{C}$) og anvender kun primærluft og tager omkring 20-30 minutter i brændeovn (lidt mindre end i kedler). Sekundær og ofte tertiær luft bliver tilsat under høj temperaturforbrænding ($> 600\text{ }^{\circ}\text{C}$) for at udbrænde CO og uforbrændte kulbrinter. Omdannelsen af brændslet i brændkammeret under fasen med høje temperaturer kan være begrænset af mængden af forbrændingsluft og diffusion omkring flammerne, hvilket gør efterforbrænding med sekundærluft nødvendig for at maksimere varmeeffektiviteten og minimere udledninger (*Butschbach et al., 2009*). Forbrænding under høje temperaturer varer fra ~1 time i brændeovne til op flere timer i kedler. Udbrændingsfasen kan tage op til adskillige timer i en brændekedel.

Forbrændingsprocessen udleder CO, partikler, uforbrændt kulbrinte, NO_x og SO_2 (20-200 ppm). De uforbrændte kulbrinter kan yderligere opdeles i volatile organic compounds (VOC) og condensable organic compounds (COC). VOC danner sekundære organiske aerosoler i atmosfæren, og er det mest relevante forstadium til partikler fra biomasseforbrænding til boligopvarmning. COC skaber primære organiske aerosoler i skorstenen og atmosfæren (*Nussbaumer, 2011*). En del af COC består af polyaromatiske kulbrinter (PAH), en gruppe af kemiske forbindelser, som har fået betydelig opmærksomhed pga. deres potentielt kræftfremkaldende og mutagene natur. Udover COC indeholder partiklerne sod og uorganiske klorider og oxidsalte. Røggassammensætningen, partikelsammensætningen og partikelstørrelsesfordelingen kan variere meget for de forskellige ovne, for forskellige brændsler samt over tid for en bestemt ovn. I forbrændingens første fase genereres damp, CO, uforbrændte kulbrinter og partikler. Koncentrationen af de sidste tre vil blive mindre i fasen med høje temperaturer pga. efterforbrænding med sekundær lufttilførsel (*Carno et al., 96*), (*Schmidl et al., 2008*). CO emissionen vil blive større under udbrændingsfasen (*Carno et al., 96*).

Til forskningsformål anvendes ofte simulerede røggas. CH_4 bliver ofte anvendt som en repræsentant for VOC og naphthalene som en repræsentant for PAH, som udgør ~50 % af PAH'erne i røggasser fra træ (*Ferrandonand Björnbom, 1999*). Sammensætningen af en typisk simuleret røggas kan derfor være som følger (*Ferrandonand Björnbom, 1999*), (*Carno et al., 96*), (*Carno et al., 97*):

- 10 % O_2
- 12 % CO_2
- 0-20 % H_2O
- 50 ppm naphthalene (C_{10}H_8)
- 2500 ppm CO
- 200 ppm CH_4

1.1.1 Dansk lovgivning

Den danske lovgivning, som omhandler emissionsudledning fra bl.a. brændeovne og kedler, beskrives i BEK nr. 1432; Bekendtgørelse om regulering af luftforurening fra brændeovne og brændekedler samt visse andre faste anlæg til energiproduktion. Bekendtgørelsen er udstedt i

december 2007, og dækker ethvert salg, overdragelse eller ny-installation efter 31. juli 2008 med undtagelse af renovering af visse historiske installationer. Brændeovne skal leve op til følgende udledningsgrænser (andre grænser gælder centrale varmeanheder) og have et testcertifikat, som verificerer følgende:

- < 10 g partikler/ kg tørt brændstof
- < 20 g partikler/ kg tørt brændstof i ethvert testinterval
- < 75 mg/ Nm³ (13 % O₂)

Testproceduren for krav 1 og 2 er udført i fortyndingstunnel som beskrevet i NS 3058-1 og NS 5038-2 (som består af 4 intervaller (*Andersen, 2006*)), mens testen for krav 3 er udført direkte i et røggasrør som beskrevet i EN 13240.

Der er mere stringente krav, hvis en brændeovnsproducent ønsker at opnå ”Dansk Standard” eller det nordiske økomærke ”Svanen” (*Ecolabelling, 2011*).

”Dansk standard” (DS)

- En varmeeffektivitet $\geq 70\%$
- CO $\leq 0,3\%$ (13 % O₂)

”Svanen”

- < 5 g partikelformet/ kg tør brændsel
- < 10 g partikelformet/ kg tør brændsel i ethvert testinterval
- Virkningsgrad $\geq 73\%$
- Ustabile kulbrinter $\leq 150\text{mg/m}^3$ (13% O₂)
- CO $\leq 0,2\%$ (13% O₂)

1.2 Katalytiske rensningsteknologier

Heterogene katalytiske rensningsteknologier til rensning af udstødning og røggasser har været anvendt siden 1970’erne, hvor de første kommercielle produkter kom på markedet, som en konsekvens af strammere miljølovgivning inden for transportsektoren, og også som en konsekvens af sikkerhed/helbredshensyn i miner (*Majewski and Khair, 2006*). Siden er en lang række af teknologier og applikationer, mobile så vel som stationære blevet udviklet medhenblik på f.eks. et lavt trykfald og lave krav til vedligeholdelse (simple/passive systemer).

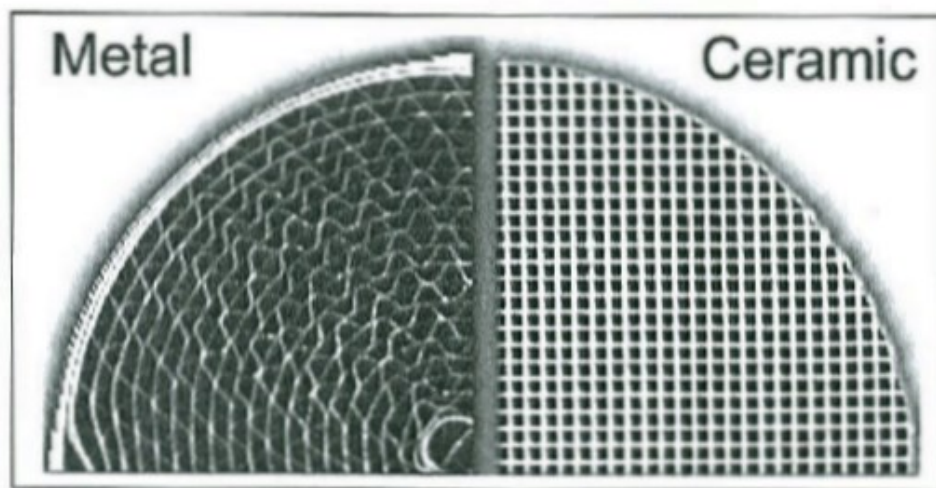
1.2.1 Katalyseforudsætninger

En katalysator fremskynder kemiske reaktioner ved at reducere aktiveringsenergien, men uden selv at blive anvendt af processen og vil på den måde have indflydelse på reaktionens kinetiske energi, mens ligevægten forbliver upåvirket. Katalysators ”light-off temperature” (T₅₀-value) defineres som den temperatur, hvor 50 % konvertering af CO eller tilsvarende er opnået (*Majewski and Khair, 2006*). Processen kan begrænses af både kinetikken og transport til og fra de katalytiske steder. En given katalytisk sammensætning er normalt en afvejning mellem den katalytiske aktivitet og selektion, f.eks. dannelse af specifikke produkter i stedet for uønskede biprodukter. Den katalytiske aktivitet kan mistes over tid på grund af eksempelvis termisk deaktivering eller kontaminering.

1.2.2 Katalytisk konverterdesign

De første katalysatorer til motorer i 1970’erne anvendte ~ 5 mm piller/perler i en stålbeholder, men disse konfigurationer led under store trykfald og tab af katalysatoraktivitet på grund af nedslidning (*Majewski and Khair, 2006*). Inden for transportsektoren benyttes som regel et monolit/honeycomb-design (keramik eller metal), med mange små parallelle kanaler indkapslet af

emballagemåtter og en stålskal. (Majewski& Khair, 2006). Substratmaterialer omfatter cordierit, siliciumcarbid eller alufolie. Substratkonfigurationen (celletæthed, vægtykkelse, tværsnitsareal, længde osv.) har indflydelse på respons/opvarmningstid, trykfald, risiko for forurening og kan påvirke transporten til katalytisk aktive steder ved forhøjede temperaturer. Figur1 viser to monolitiske katalysatorsupport-strukturer: et med sinus-formede kanaler og metalvægge (til venstre) og et med kvadratiske kanaler og keramiske vægge (til højre). Kanaltætheden (for dieselmotorer) varierer fra 12,9-25,8 dm⁻² med vægtykkelse på omkring 0,1 mm (Majewski& Khair, 2006).



FIGUR 1: TO EKSEMPLER PÅ UDFORMNINGEN AF KATALYSATORSUPPORTSTRUKTURER (MAJEWSKI AND KHAIR, 2006)

Et 20-80 µm belægningslager placeres oven på substratet for at opnå et stort overfladeareal, og for at sikre en god vedhæftning imellem substratet og det katalytiske materiale. Typiske belægningsmaterialer inkluderer γ -Al₂O₃, SiO₂ eller TiO₂ kombineret med en række additiver til at forøge overfladearealet og forbedre den termiske stabilitet.

Generelt findes der tre andre hovedtyper af katalysatorsupportstrukturer udover honeycomb, som bl.a. anvendes i brændeovne: trådnæt (metalliske net), piller (granulat) og hård, porøs "skumstruktur" i zirkoniumoxid (figur 2)



FIGUR 2: EKSEMPLER PÅ METALLISK NET, GRANULAT OG SKUMSTRUKTUR (FRA VENSTRE MOD HØJRE)

Honeycomb og metalliske net har den mindste partikeludskilning og granulat og den porøse skumstruktur den største. Partikeludskilningen har indflydelse på katalysatorens degradering og tidsintervallet mellem hver rengøring af katalysatoren.

1.3 Katalysatorer til køretøjer

Indledende bestræbelser på at reducere partikelemissioner fra dieseldrevne køretøjer benyttede motoroptimering. Dernæst blev dieseloxydationskatalysatorer implementeret og endeligt dieselpartikelfiltre i takt med, at lovgivningen blev skærpet. Dieseloxydationskatalysatorer til CO og HC oxidation har været til stede i næsten alle europæiske dieselskøretøjer fra EURO3 (2000) og fremefter (*Majewski and Khair, 2006*).

Katalysatorer i dieslbiler skal være i stand til at være aktive ved relativt lave temperaturer (~ 150 °C), være effektive ved korte opholdstider (spacevelocity¹ på 60.000 til 150.000 hr⁻¹), og desuden forblive aktive i tusindvis af kilometer (*Majewski and Khair, 2006*). Katalytisk aktivitet ved koldstart (lav udstødningstemperatur) kan forbedres ved at placere katalysatoren så tæt på udstødningsmanifolden som muligt.

Dieseloxydationskatalysatorer kan opnå reduktioner af HC og CO på over 90 %, mens PM reduceres med 25 -70% afhængigt af andelen af kondenserbare HC og derved kørecyklus/driftsbetingelser for motoren (*Majewski and Khair, 2006*). Der er almindelig enighed om, at kulstofpartikler ikke oxideres i en konventionel monolit katalysator på grund af deres begrænsede størrelse, lav diffusionsgrad og den korte opholdstid, men en vis partikelfjernelse kan opnås ved at introducere turbulens og ved reaktion med dannet NO₂ (*Majewski and Khair, 2006*). Ikke-selektive Pt/Al₂O₃ materialer kan allerede fremme CO-oxidation omkring 180 °C, mens en forøget selektivitet kan opnås ved tilsætning af sulfat-inhibitorer (V₂O₅ tilsat til alumina-bindelag/washcoat), ikke-sulfaterings-bindelag/washcoats (TiO₂, SiO₂, ZrO₂) eller andre mere selektive ædelmetalkatalysatorer (palladium, rhodium osv.) kan øge denne temperatur (*Majewski and Khair, 2006*).

Kommercielle dieseloxydationskatalysatorer til europæiske personbiler anvender normalt medium til høje doser platin (~353 gPt/m³) optimeret til PM reduktion gennem HC omdannelse allerede ved lave temperaturer (*Majewski and Khair, 2006*). Disse kan også omfatte CeO₂-holdige bindelag/washcoats, som kan delvist nedbryde hydrocarbon-fraktioner af tilbageholdte partikler. Zeolit bindelag/washcoats kan endvidere anvendes til at forbedre den katalytiske aktivitet overfor HC ved lave temperaturer gennem adsorption/opbevaring i mikroporer under 200 °C, efterfulgt af frigivelse og reaktion over 200 - 250 °C, hvilket potentielt også giver en mindre NO_x reduktion (~15%) gennem hydrocarbon SCR. Kommercielle dieseloxydationskatalysatorer til lastbiler benytter lavere platindoser suppleret med mere selektive men mindre aktive katalytiske materialer samt bindelag/washcoat, som modvirker SO₂ oxidation (vil efterfølgende udfælde som små H₂SO₄ partikler) ved de højere temperastuer som er til stede i lastbils udstødninger.

Lukkede dieselpartikelfiltre er yderst effektive mht. partikelfjernelse (~95%), men er mindre effektive i forhold til væskepartikler, som er delvist til stede i gasfasen ved passage af filteret (*Majewski and Khair, 2006*). Det mest almindelige filterlayout er monolitstruktur, hvor hver anden kanal er blokeret, hvormed udstødningen tvinges gennem kanalvæggene, medens partiklerne tilbageholdes. Trykfaldet er højere end ved det simple flow gennem dieseloxydationskatalysatoren, grundet filterkage og vægmodstand. Filterregeneration (sodoxydation vha. O₂ og NO₂) udføres enten kontinuerligt eller periodisk for at undgå for stort modtryk, mens tilbageholdt aske vil akkumulere, og derfor må det fjernes ved vask eller trykluft én gang om året (*Majewski and Khair,*

¹ Space velocity betegner kvotienten af det indkommende volumenflow af reaktanter divideret med reaktionsvolumen.

2006). Filterregenerering kan finde sted ved medium til høj motorbelastning under normale kørecykluser (passiv regenerering) eller kræve yderligere foranstaltninger (aktiv regenerering) såsom støttebrændere, tilførsel af diesel før oxidationskatalysator osv. (Majewski and Khair, 2006). Den temperatur, hvor der opnås en rimelig filterregenerering afhænger af sodbelastning, PM-sammensætning (reaktivitet) og tilstedeværelsen af katalysatorer (enten tilsat brændsel eller indbygget i filteret) (Majewski and Khair, 2006).

Regenereringstemperaturen kan være så lav som 300 - 400 °C, når katalysatorer er til stede sammenlignet med 550 - 650 °C, som kræves for at oxidere soden i standard ikke-katalytiske filtre (Majewski and Khair, 2006). Katalysatorer består ofte af en kombination af metallerne platin, palladium eller rhodium og sjældne jord metaller (såsom Cerium) (Majewski and Khair, 2006), (Neef et al., 1996).

1.4 Katalysatorer i brændeovne

En katalytisk brændeovn afbrænder CO og uforbrændte kulbrinter, hvoraf nogle ellers ville danne partikler ved kondensation før og efter udledning. Derved genereres ekstra varme og forurenende stoffer fjernes. Katalysatorer har i nogle lande været en integreret del af brændeovne siden 80'erne. Kommercielle produkter er således tilgængelige i USA, Østrig og Norge (Ferrandon og Björnbom, 1999). Den største effekt ved brug af katalysatorer i brændeovne ses ved lav til middel belastning, hvor brændeovnene også har en væsentlig del af deres driftstid (Houckand og Pitzman, 2011), (Neufeld, 2010). Systemet består normalt af et manuelt by-pass spjæld, et termometer (for at bestemme, hvornår katalysatoren er varm/klar) og selve katalysatoren. Opstarten sker i by-pass indtil en passende temperatur er nået - fra 260 til 370 °C (keramiksubstrater) eller 204 til 316 °C (stålsubstrater) (Condar, 2013). For tidligt flow igennem katalysatoren kan forårsage opbygning af creosot, og dermed gøre katalysatoren mindre effektiv pga. tildækning. Som et alternativ til et by-pass spjæld kan katalysatoren opvarmes elektrisk (Butschbach et al., 2009). Den katalytiske enhed skal placeres, så den er beskyttet mod direkte flammer og for høje temperaturer, men røggastemperaturen skal stadig være høj nok til at muliggøre katalytisk drift og en hurtig opvarmning under opstart. Leverandører af katalysatorer omfatter eksempelvis: Condar Company Sud Chemie Inc og Applied Ceramics Inc.

Den katalytiske enhed består af en keramisk/metallisk honeycomb-support (39-98 kanaler pr cm²) beklædt med enten platin eller palladium baserede katalytiske materialer (Condar, 2013), (Neufeld, 2010). Eksempler på keramiske materialer omfatter mullit(3Al₂O₃2SiO₂) eller cordierit(Mg₂Fe₂Al₃Si₅AlO₁₈), men kalium kan forårsage strukturelle fejl for sidstnævntes vedkommende (Neufeld, 2010). Metalliske substrater såsom rustfrit stål har den fordel, at de har tyndere vægge og dermed en hurtigere temperaturrespons, men generelt er de dyrere. Metaloxide katalysatorer har også fået betydelig opmærksomhed fra forskere og industrien på grund af lavere omkostninger og højere modstandsdygtighed overfor katalytisk deaktivering, men aktiviteten er normalt lavere.

1.4.1 Udvalgte studier af brændeovnskatalysatorer

Det følgende afsnit vil præsentere de vigtigste resultater af nogle udvalgte undersøgelser af brændeovnskatalysatorer.

Carnoet al.1996 studerede aktiviteten af to kommercielle katalytiske pillematerialer, 0,12 wt%Pt på Al₂O₃og 2,25 wt% MnO/CuO på Al₂O₃, både i lab skalaer og i en 15 kW rumopvarmer. Platin-katalysatoren viste en højere aktivitet for CO-oxidation (T₅₀ = 195 °C i forhold til. 261 °C) en lignende naphthalene aktivitet (T₅₀ = 204 °C i forhold til 207 °C) og en lavere CH₄ aktivitet (T₅₀ = 582 °C i forhold til. 530 °C), for forsøg uden tilstedeværende vand ved en spacehastighed på 20000 hr

¹. Når der var 3% vand tilstede øgede dette Pt aktiviteten for CO og naphthalene oxidation ($T_{50} = 174$ °C og 182 °C), mens CH_4 aktiviteten blev reduceret ($T_{50} = 611$ °C). MnO/CuO katalysatoren gav også en lidt bedre CO aktivitet ($T_{50} = 258$ °C), når der var vand tilstede, mens methan og naphthalene aktiviteterne blev reduceret ($T_{50} = 590$ °C og 223 °C). Under forsøg med en 15 kW rumopvarmer blev der sommetider observeret højere CH_4 koncentrationer efter katalysatoren end før, hvilket forfatterne tilskrev delvis nedbrydning/opsplitning af tungere HC forbindelser.

I et efterfølgende stykke arbejde (Carno et al.1997) blev en blandet MnO/Pt katalysator testet i laboratorieskala ved en space velocity på 23,000 h⁻¹. Pt belastninger ned til 0,05 mol% gavnede CO ($\Delta T_{50} = 90$ °C) og naphthalen ($\Delta T_{50} = 25$ °C) oxidation, mens methan oxidation forblev upåvirket ved lave Pt- koncentrationer. Saracco og Specchia, 2000 rapporterede om naphthalen light off temperature”(T₅₀) så lave som 159 °C for en 5 wt%Pt/Al₂O₃katalysator i en monolit med en begrænset porestørrelse (~ 10 µm) ved $\tau^{-1} = 15000$ h⁻¹

Både kemisk og termisk deaktivering af det katalytiske materiale kan forekomme, og katalysatorens levetid vil afhænge af driftstid, temperatur, benyttet brændstof, design af katalytisk enhed osv. En forventet levetid på 12.000 timer er dog blevet rapporteret, svarende til en 25 % reduktion i aktivitet (Neufeld, 2010). Regelmæssig rengøring af katalysatoren vil ofte være nødvendig, herudover kan by-pass af røggas i forbindelse med indfyring, være nødvendigt for at undgå kondensation/tilstopning, termiske spændinger og strukturelle fejl.

Butschbach et al.2009 rapporterer om en hurtigt stigende CO light-off temperatur (T₅₀, CO) under de første 6 serieforsøg fra ~100 °C til180 °C), efterfulgt af en stabilisering for de resterende 10 indfyringer. Den observerede deaktivering kan være forårsaget af fraværet af by-pass under opstart (elektrisk opvarmning af katalysator blev dog benyttet). Ferrandon og Björnbom, 1999 demonstrerede, at udvikling/deaktivering af katalysatorens aktivitet over for CO, PAH og VO ikke nødvendigvis vil udvikle sig ens over tid. Fire katalytiske materialer (MnO-Pt, CuO-Pt, MnO-Pd, CuO-Pd) blev testet i 912 timer i en 350 °C røggas fra tørv, savsmuld og skovaffald ved en space velocity på 23.000 hr⁻¹. De katalytiske materialer indeholdt 10 mol % MeO og 0.1 mol % ædel metaller (% af mol bindelag/washcoat. En signifikant deaktivering, udtrykt som temperaturstigning(ΔT) krævet for at opnå light-off, blev observeret for CO ($T_{CO,50,initial} = 224-264$ °C; $\Delta T = 110-214$ °C) og naphthalene oxidation ($T_{nap,50,initial} = 246-284$ °C; $\Delta T = 74-192$ °C), mens der kun blev oplevet en begrænset ændring for CH_4 oxidation. ($T_{CH_4,50,initial} = 608-658$ °C; $\Delta T = 2-62$ °C). Den relativt lave driftstemperatur gør termisk deaktivering usandsynlig, hvorimod forurening vha. enten svovl eller uorganiske salte fra flyveaske anses som sandsynligt (Ferrandon og Björnbom, 1999). Carno et al., 1996 undersøgte stabiliteten af to katalysatorer, indeholdende 0.12 wt%Pt på Al₂O₃ og 2.25 wt % MnO/CuO på Al₂O₃, ved at udsætte dem for 800 °C fugtig luft (10 % H₂O) i 17 timer og røggas fra en 15 kW brændekedel i 15 timer (der blev ikke anvendt by-pass ved opstart). Metaloxid katalysatoren viste en højere temperatur- stabilitet ($\Delta T_{50, MeO, CO} = 32$ °C vs $\Delta T_{50, Pt, CO} = 82$ °C), mens anvendelse i kedlen resulterede i et stort tab af aktivitet ($\Delta T_{50, MeO, CO} = 187$ °C vs $\Delta T_{50, Pt, CO} = 28$ °C), som følge af enten kemisk deaktivering eller tilstopning.

Det er desuden blevet påvist, at et betydeligt potentiale for at reducere emissionerne (≤ 50 % CO/HC reduktion) kan realiseres ved at optimere forbrændingsprocessen ved styring af det primære og sekundære luftflow baseret på temperatur O₂, CO og HC sensorer (Butschbach et al., 2009).

1.4.2 Kommercielle produkter

Kommercielle katalytiske brændeovne findes blandt andet i USA, Australien, Norge og Østrig. The United States Environmental Protection Agency (EPA) har publiceret en liste af brændeovne på det amerikanske marked, som inkluderer både amerikanske og europæiske mærker. Listen indeholder

mere end 900 certificerede brændeovne fra omkring 250 producenter. Omkring 270 af disse har en katalysator.

EPA certificerede brændeovne har en emissionsbegrænsning på $7,5 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ for ikke-katalytiske ovne ($4,5 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ i staten Washington) og $4,1 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ for katalytiske ovne ($2,5 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ i staten Washington). Det typiske niveau for emission for forskellige modeller ligger mellem $2 - 4 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ for katalytiske ovne og mellem $3-6 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ for ikke-katalytiske ovne. Brændeovne med katalytisk forbrændingskammer tildeles en standardvirkningsgrad på 72 %, mens ikke-katalytiske brændeovne tildeles 63 %.

Amerikanske katalytiske brændeovne er hovedsageligt integrerede katalysatorovne (katalysatoren er i post-brændkammer) og har ingen eftermonterede enheder, omend der er enkelte eksempler. Typiske amerikanske katalytiske brændeovne er for eksempel Vermont Encore og Buckstove model20. Katalysatorerne er for det meste inspireret af oxidationskatalysatorer fra biler og flow gennem honeycomb-struktur med Pt eller Pd som aktive forbindelser. Den godkendte EPA- liste kan downloades fra EPA's hjemmeside (EPA, 2013).

I Norge er emissionskravet også forskellige for katalytiske og ikke-katalytiske brændeovne. Krav til brændeovne med indbygget katalysatorer har en maks. tilladt støvemission for en test 10 g/kg og en maks.middelværdi på 5 g/kg max. For brændeovne uden katalysator er kravet 20 g/kg og 10 g/kg respektivt (Norsk Standard, 1994).

I Australien er der omkring 400 certificerede brændeovne. Den australske standard for røggasemissioner er 4 g/kg af brændt træ. Australske certificerede brændeovne har emissioner mellem $2-4 \text{ g/kg}$ tørt brændsel. Den australske liste over certificerede brændeovne kan findes på websiden Australian Home Heating Association (AHHA, 2013).

Efterfølgende beskrives kort forskellige slags kommercielle katalytiske løsninger.

Ingen af de fire eftermonterbare løsninger (ChimCat®, Morecat®, Climacat® og NVIVed katalysator) har fundet vej til det danske marked, selv om Morecat tidligere er blevet testet i Danmark som en del af et filtertestprojekt af ForceTechnology

– **ChimCat®** fra Dr PleyEnvironmental GmbH (Germany), (www.chimcat.com):

ChimCat®RETRO systems er designet til eftermontering på allerede installerede eller nye brændeovne. I huset på ChimCat®RETRO (Figur3) indsættes op til tre lag af ChimCat®CAN katalysatorer.



FIGUR3: FORSKELLIGE CHIMCAT®RETRO HOUSING DESIGNS (CHIMCAT®RETRO, 2013)

Ifølge producenten ChimCat®RETRO reducerer katalysatorer de forurenende emissioner op til 80 % og partikler op til 70 % (ChimCat®RETRO, 2013).

Driftsprincipper er vist i figur 4. Gasserne strømmer gennem de forskellige katalysatorpatroner, som indeholder forskelligt uemballeret granulat. Patronerne i katalysatorerne holder normalt i to år, og de kan nemt udskiftes (ChimCat®RETRO, 2013).



FIGUR 4: CHIMCAT®RETRO DRIFTSPRINCIPPER OG PATRONER MED FORSKELLIGE UEMBALLERET GRANULAT (CHIMCAT®RETRO, 2013)

Katalysatoren har en keramisk support og de aktive bestanddele er ædelmetaller. Der findes ikke detaljerede oplysninger (Binding et al.2012).

– **MoreCat®** fra Morecat GmbH (Germany), (www.morecat.de):

Ovnkatalysatoren (moreCat GmbH) består af ædelmetaller (Pd, Pt) fordelt på en metalspånplade (Figur 5). De katalytisk aktive elementer er Ni, Pd, Pt, Ru og Al/Ni/Cu. Det basale katalytiske materiale er metal, som er mere resistent mod substans, som er gift for normale keramiske katalysatorer som f.eks. sulfur, bly og natrium (MoreCat, 2013).

Katalysatoren er integreret i en standard, kommerciel tilgængelig ovn. Systemet kan installeres i et rørgør med en længde på 500 mm, og diameter på 150,180 eller 200 mm. Katalysatorenhed skubbes ind i en åbning i det monterede røggasrør, hvor det kan vendes til lodret stilling (by-pass) eller til vandret stilling, så røggassen skal passere gennem den. Systemet kan suppleres med forvarmning og et integreret partikelfilter for at separere sod og fint støv (MoreCat, 2013), (Schleicher et al., 2011).



FIGUR 5: MORECAT® KATALYSATOR

Test af katalysator viser at sod/partikler fjernes med 62 til 94 % med integreret filter og med cirka 50 % for katalysatoren alene. Op til 80 % lugtreduktion er mulig. MoreCat hævder at for at oxidere sodpartikler kræves en starttemperatur på mindst 350 °C. For at begynde CO og OGC oxideringen er en temperatur på omkring 270 til 300 °C nødvendig (Schleicher et al., 2011).

Katalysatorens levetid er påvirket af mange faktorer, men under normale omstændigheder kan den være omkring 2 år (16,000 timer) (MoreCat, 2013). Katalysatoren skal jævnlige rengøres af brugeren - ca. hver 8 time. Rengøringen foretages ved at fjerne katalysatoren fra røgrøret og skylle med postevand (Schleicher et al., 2011). Alkaliske rengøringsmidler, syrer eller lud kan tilsættes vandet. Katalysatoren kan også bankes på, renses ved hjælp af trykluft eller rengøres i et ultralydsbad (MoreCat, 2013).

– **KlimaKat®** fra Caminos GmbH (Germany) (www.caminos.de):

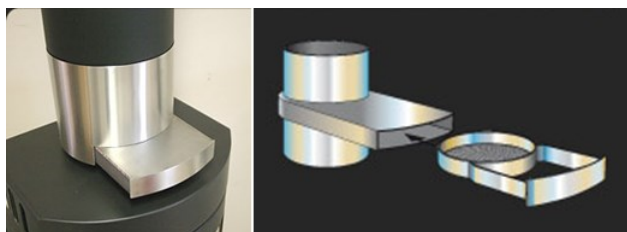
Caminos har udviklet et filter med adsorberende og katalytisk NANOlapi® til forbrænding af organiske partikler for at omdanne CO til CO₂

Det er en eftermonteringsløsning, som er egnet til stort set alle de forbrændingskamre, som anvendes i Caminos brændeovne. Yderligere plads er ikke nødvendig, idet løsningen monteres direkte i brændeovnens øvre del af forbrændingskammeret (IEA Bioenergy, 2011).

Fabrikanten garanterer (baseret på laboratorie-skala tests) en total partikelreduktion (total suspended particulate -TSP) på omkring 85 % (fra 108 mg.m⁻³ i normal drift til 9 mg.m⁻³ med KlimaKat) og en CO-reduktion på næsten 50 % (KlimaKat, 2013). Der findes ikke testresultater fra uafhængige institutioner (IEA Bioenergy, 2011).

– **NVI Wire Mesh Vedkatalysator** fra Näländens Värmeindustri AB (www.nvi.se) og Catator AB (www.catator.se), (Sweden):

NVI har sammen med Catator siden slutningen af 90'erne deltaget i et svensk nationalt program med fokus på reduktion af emissioner og partikler fra brændeovne. De har udviklet et eftermonteringssystem, hvor Catators patenterede katalysatorer er integreret med en katalysatorholder, som er designet af NVI, også patenteret. Systemet renser røggasserne hovedsagelig for CO (NVI, 2013). Systemet har en fleksibel struktur og kan nemt skubbes ind og ud af røret (Figur 6).



FIGUR 6: NVI CATALYST SYSTEM (NVI, 2013)

Ifølge producenten viser testresultaterne en reduktion af CO-emissionen med 60-80 %, under normalaktivering og røggastemperatur på 200-450 °C. For at opnå en høj grad af oprensning af HC er højere katalysatortemperatur påkrævet. Ved røggastemperaturer på 350-500°C reduceres emissioner af HC 20 – 40 % (NVI, 2013).

Catators trådnetskatalysator har en aktiv belægning af ædel-baserede Pt/Pd. Et porøst keramisk materiale afsættes på det metalliske trådnæt i en patenteret termisk sprøjteproces (Catator, 2013), (Vedkatalysator, 2013).

Katalysatorens aktivitet aftager med tiden på grund af udfældning af partikler. Katalysatoren skal renses efter ca. 40-60 timer ved normal brug. Aktiviteten genvindes 100 % ved at vaske katalysatoren med en svag sur opløsning, såsom eddike eller citronsyre (Vedkatalysator, 2013).

- **Condar Catalyst** fra Condar® USA (USA), (www.condar.com):

Condar laver udskiftningskatalysatorer til efterforbrændingskamre til de fleste mærker og modeller af EPA certificerede katalytiske brændeovne, f.eks. Vermont, DutchWest, Englander, osv. Condar katalysatorer godkendt af EPA (Condar, 2013).

Condar katalysatorer består af platin/palladiumbelagt honeycomb lavet af keramik eller stål med light-off temperaturer på 260 til 370 °C (keramik) eller 204 til 316 °C (stål). Anvendelse af by-pass er valgfri. Katalysatorerne har en levetid på cirka 12.000 timer, hvilket svarer til omkring 5 år i de fleste huse (Condar, 2013).



FIGUR 7: CONDARKERAMIK OG METALLISKE HONEYCOMB TIL KATALYTISKE FORBRÆNDINGSKAMRE (CONDAR, 2013)

En korrekt vedligeholdelse anbefales ved regelmæssigt at børste eller støvsuge, så katalysatoren bliver fri af aske og rester. Desuden bør man foretage en større rengøring hvert andet år (eller hvert år, hvis katalysatoren anvendes meget) med en opløsning af destilleret vand og eddike (Condar, 2013).

- **FireCat** fra Applied Ceramics (USA), (www.appliedceramics.com):

Applied Ceramics tilbyder en række katalysatorer, som hedder FireCat og som består af ædelmetaller (Pt, Pd, Rh) på en keramisk cellestruktur. Light-off temperatur er ca. 260 til 300 °C (Binding et al., 2012).

Producenten hævder, at enheden reducerer forureningen med 90 % og udleder 90 % mindre creosot, men angiver, at resultaterne kan variere afhængigt af ovns design, drift og brændkammerets alder (FireCat, 2013).

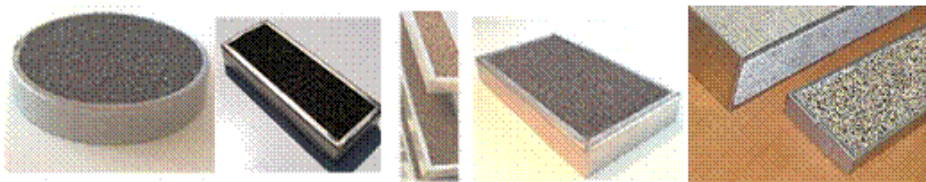
Ligesom Condars katalysator er FireCat en udskiftningskatalysatorer til efterforbrænding i forskellige brændeovne med katalysatorer. Den forventede levealder er omkring 6 år og rengøring skal foretages en gang om året med en børste eller en støvsuger for at fjerne flyveaske. Hvis katalysatoren bliver tildækket med sod eller creosot er det muligt at brænde den ren ud ved at åbne by-pass og opbygge en varm ild (FireCat, 2013).

- **Clear Skies Catalytic Combustor and HearthCAT™** from Clean Skies Unlimited Inc. (USA), (www.clearskiesunlimited.com):

Clean Skies Unlimited Inc. tilbyder en kommercialiseret CS-200 katalysatorserie til brændeovne, der er godkendt af EPA for brug og erstatning i efterforbrændingskamre i katalytiske brændeovne. Der findes forskellige modeller (Figur 8) på deres hjemmeside (Clear Skies, 2013).

Brændkamrene består af aluminiumoxid keramisk skum med cellestrukturer fra 5- 10 porer pr. 2,5 cm, tykkelse op til ca. 10 cm. Clear Skies hævder, at katalysatorens light-off temperatur er under 205 °C (Clear Skies, 2013).

Forbrændingskammeret rengøres i en opløsning af hvid eddike og destilleret vand i omkring 30 minutter og derefter skylles derefter i destilleret vand (Clear Skies, 2013).



FIGUR 8: FORSKELLIGE MODELLER AF CS-200 SERIEN (CLEAR SKIES, 2013)

Clear Skies Unlimited har også udviklet Hearth Cat Fireplate Technology. Dette er en add-on katalytisk enhed, der ifølge producenten reducerer udledningen fra pejse med gennemsnitligt 70 %. Alle testresultater er konsekvent under EPA fase II kvalifikationsgrænsen på 5,1g/kg. Katalysatoren består af et keramisk materialekonstrueret til at fungere i den direkte flamme fra en pejs. HearthCAT™ er udstyret med monterings beslag til fastgørelse. The HearthCAT™ behøver ikke vedligehold (HearthCat, 2013).

De danske Isokern pejse i serien Magnu og Standard Wood Burning tilbydes sammen med HearthCAT™ System.



FIGUR 9: HEARTHCATENHED BRÆNDKAMMER (HEARTHCAT, 2013)

I lighed medHearthCatFireplate har det franske selskab Fondis patenteret Zero CO pejsenhed. Dette system er kommercialiseret for kun at blive installeret i Ulys®pejse (Zero CO,2013).

1.5 Sammenfatning

Brændeovne er en billig og pålidelig varmekilde, som er blevet anvendt i tusinder af år. Imidlertid udleder brændeovne CO, uforbrændte kulbrinter og partikler. Disse emissioner kan minimeres ved bl.a. optimering af brændkammer og lufttilsætning, valg af korrekt brændsel og hensigtsmæssigt fyringsmønster. Yderligere forbedringer og en forbedret brændstoføkonomi kan antageligt opnås med initiativer såsom anvendelse af katalysator.

Forbrændingsprocessen består af en fase med tørring og forgasning ved relativ lav temperatur (<600 °C), en højtemperaturgas og kulstofforbrændingsfase. Efterforbrænding af CO og uforbrændte kulbrinter sikres ved sekundær lufttilførsel underfaserne med høje forbrændingstemperaturer. Som følge af de forskellige faser varierer røggassammensætningen over tid.

Gældende dansk lovgivning om emissioner fra nye brændeovne og træfyrede kedler (BEK nr. 1432) kræver besiddelse af en prøvningsattest, som verificerer at emissionsgrænserne er overholdt.

Katalytiske brændeovne er kommercielt tilgængelige i nogle lande (USA, Australien, Østrig og Norge). Disse katalysatorer ligner første generation af dieseloxydationskatalysatorer til rensning af biludstødning – en keramisk/metallisk monolitisk honeycomb-konstruktion: omkring 40-100 celler pr cm², platin eller palladiumbaseret katalytisk belægning med hurtig temperaturrespons og lave temperaturaktiviteter (~ 200 °C)

Sodfraktionen forbliver upåvirket af katalysatoren som følge af kort opholdstid (~ 0,1 s), mens CO, gasformige kulbrinter og de partikel dannende kondenserbare organiske forbindelse (herunder PAH'er) er effektivt reduceret.

I modsætning til bilindustriens udstødningssystemer kan brændeovnskatalysatorer by-passes indtil en røggastemperatur på 200 til 350 °C er opnået.

Der er blevet rapporteret om en forventet levetid på 12.000 timer for eksisterende kommercielle brændeovnskatalysatorer ved en accepteret effektivitets reduktion på 25 % på grund af kemisk og termisk deaktivering. Undersøgelser med simuleret røggas bestående af udvalgte repræsentative forbindelser (CO, CH₄ (VOC), naphthalen (PAH)), kan anvendes til at opnå en bedre forståelse af katalysatorens ydeevne.

Nogle katalysatorer er designet til specifikke brændeovns-og pejsemærker, andre kan tilpasses og eftermonteres på forskellige mærker, eller producenten tilbyder et stort udvalg af geometrier. Katalysatorerne er keramiske eller metalliske med forskellige strukturer såsom granulat, trådnat eller honeycomb. Ifølge producenterne har katalysatorer generelt en god effekt på CO-emissioner og til en vis grad også på partikelemissionen.

Yderligere forbedring af brændeovnskatalysatorer kan opnås ved at forbedre effekten ved lave temperaturer samt reducere behovet for manuel rensning/rengøring. Fjernelse af behovet for by-pass vil forenkle driften betydeligt og desuden give mulighed for yderligere emissionsreduktion. En interessant option, som anvendes i dieselmotors udstødningssystemer er brugen af zeolit washcoats, som adsorberer HC under 200 °C, efterfulgt af desorption og reaktion over 200 til 250 °C.

2 Præ-kvalifikation og test

2.1 Udvalgelse af katalysatorer

I markedsundersøgelserne i kapitel 1 er det eksisterende marked undersøgt for teknologier og anvendelsesområder, der tilsammen sandsynliggør, at der via projektet vil kunne tilvejebringes et produkt – en MiljøKAT, der er egnet til introduktion på det danske marked. Det er væsentligt at bemærke, at projektet primært har til formål at eftermontere katalysatorer på eksisterende brændeovne- og kedler. Dermed er det alene muligt at placere katalysatoren efter røgstudsen. Årsagen hertil skal findes i produktets typegodkendelse, der vil blive ugyldig, hvis konstruktionen på det typegodkendte produkt ændres. Placering af en katalysator i selve brændeovnen eller – kedlen vil være en konstruktionsændring.

Herunder belyses de kriterier, der anses for væsentlige for at et MiljøKAT-produkt til eftermontering teknisk set vil have den ønskede effekt og nyhedsværdi

Kriterier som er vigtige for katalysatorens tekniske succes:

- Det er af afgørende betydning, at katalysatoren hurtig opnår reaktionstemperatur. Hvis katalysatoren har en kort opvarmningstid og er effektiv ved lave temperaturer, såsom under opstartsfasen hvor emissioner er højest, bliver emissionerne mindst mulige, og der er umiddelbart ikke behov for by-pass.

Katalytisk aktivitet ved lave temperaturer og under opstart vil afhænge af katalysatorvalget samt den katalytiske enheds masse og materiale (metal opvarmes hurtigere end keramik). Katalysatoren vil kunne opvarmes elektrisk (ved hjælp af eksempelvis varmetråd), hvilket også vil give mulighed for termisk regenerering i tilfælde af akkumulering af kondens/sod på det katalytiske materiale, men det er ikke umiddelbart en løsning, der anses for at være salgbar.

- Det er af afgørende betydning, at katalysatoren ikke introducerer så stort et tryktab, at skorstenens naturlige træk ikke længere vil være tilstrækkelig for forbrændingsprocessen. Krav om en røgsuger ved montering af katalysator anses ikke umiddelbart for at være fremmende for katalysatorens udbredelse).
- Der er vigtigt, at der er sikkerhed mod tilstopning. Ved tilstopning af røgvejene vil røggas tvinges ud i det omgivende rum, hvori brændeovnen er placeret.
- En fordelagtig katalysatorholdbarhed/-levetid. Placeringen af katalysatoren uden for selve brændeovnen kan være medvirkende til at forlænge katalysatorens levetid, idet den skånes for udfældning af salt- og mineralforbindelser, der findes på gasform i brændkammeret. Disse forbindelser kan ellers afsættes på katalysatorens overflade, hvorved den katalytiske effekt forringes og levetiden nedsættes.
- Eftermontering skal kunne ske på et realistisk økonomisk grundlag, så produktet har et konkurrencedygtigt prisleje sammenlignet med køb af en ny katalytisk brændeovn.

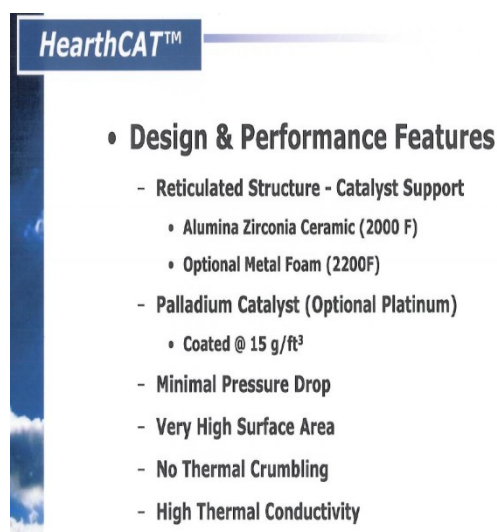
- Nem brugerhåndtering

To katalysatorer med forskellige strukturer og basismaterialer blev udvalgt til prækvalifikation og test på basis af ovenstående overvejelser.

- HearthCAT™; keramisk skumstrukturkatalysator i zirkoniumoxid fra Clear Skies Unlimited (Chapter 1.4.2). Udviklet til at reducere emissioner fra ildsteder (USA)
- Catator; ståltrådnæt coated med porous ceramic substance (Sverige)

Katalysator A: HearthCAT

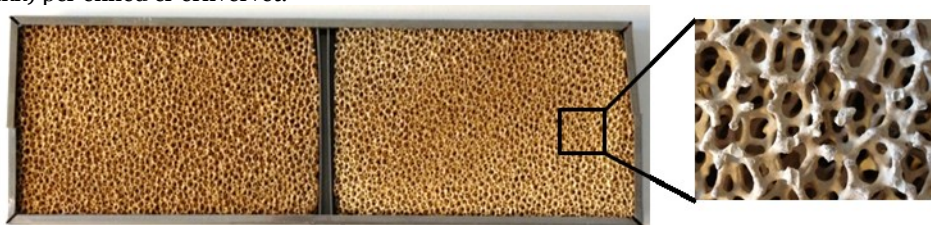
HearthCAT Systemer blev testet ved OmniTest Laboratory i Portland, OR. HearthCAT Fireplace Technology reducerede partikelemissionerne i en åben murværkspejs til 3,2 g/kg.



FIGUR10: DESIGN AND PERFORMANCE MED HEATHCAT IFØLGE PRODUCENTEN (CLEAR SKIES PRESENTATION, 2013)

HearthCAT systemets emissionsreduktion i et muret ildsted er testet ved Omni Test Laboratory i Portland OR. Resultaterne viser i henhold til rapporten en emissionsreduktion på 70 % (fra 10,2 g/kg til et gennemsnit af tre test på 3,13 g/kg (*Clear Skies, 2009*)).

Ti standardenheder af katalytiske blokke 6 "x 9" x 1 " (15,24 x 22,86 x 2,54 cm) til en pris på 100 \$ (~ 600 dkk) per enhed er erhvervet.



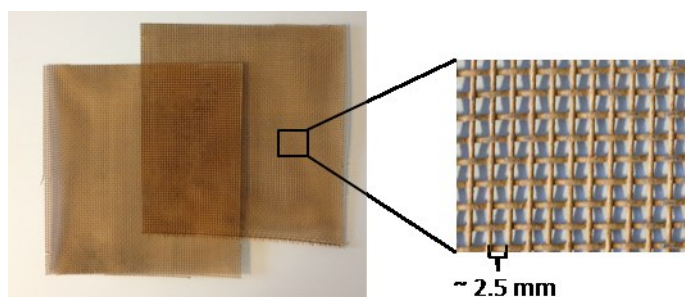
FIGUR 11: HEARTHCAT™ KATALYSATORBLOKKE, BILLEDE FRA EGET ARKIV

Katalysator B: Catator

Catator AB udfører katalytisk belægning af trådnæt og andre fleksible materialer. Catator har udviklet en stålnetbærer belagt med porøs keramisk stof i en patenteret proces. Bæreren er tilgængelig i forskellige trådnætantal og diameter og kan leveres i forskellige former. Den aktive fase af katalysatoren er baseret på platin og palladium

Den katalytiske overflade er i besiddelse af den ønskværdige 'zeolitewashcoats' effekt, som gavner effektiviteten under optænding. 'Zeolitewashcoats' effekten betyder, at gasformige HC forbindelser fra optændingsfasen overvejende vil kunne oplagres, indtil en reaktionstemperatur opnås, og effektiv omsætning kan finde sted. Udvikling af et foranliggende dråbefang til adskillelse af kondenserende HC partikler kan vise sig nødvendig, således at deponering og deaktivering af katalysatoroverfladen under opstart kan minimeres. Hurtig opnåelse af den fornødne reaktionstemperatur begunstiges af materialets ringe masse (wire mesh), hvorved det hurtigt opvarmes af røggassen. Fabrikanten anbefaler, at temperaturen i katalysatoren forbliver under 600 °C, ellers vil aerosolpartikler (kalsium, magnesium, etc.) fastgøre sig til katalysatoroverfladen, og kunne deaktivere den på kort tid, oplyses det.

16 stykker Catatorkatalysator 250x250mm blev indkøbt, hvilket giver en total på 1 m²net. Katalysatoren havde meshtal 8 (Figur 12). Prisen var omkring 600 kr. pr. stykke, men der kan opnås bedre priser ved at købe større mængder, oplyses det.



FIGUR 12: CATATORTRÅDNET

Catator trådnæt katalysatoren anvendes i et eftermonteringssystem (NVI), der forhandles af Nældens Värmeindustri AB (se også kapitel 1.4.2).

Ifølge Hargitai, 2006, er der gennemført test af NVI systemet ved to forskellige lejligheder og med to forskellige katalysatortyper i en brændeovnsmodel Contura520T.

I begge test var katalysatoren 145 mm i diameter og havde en tykkelse på omkring 1 mm. Placeringen var omkring 0,5 m over røgstudsens.

I første test bestod katalysatoren af 6 lag net med meshtal 12 (åbning 1,45 mm). Resultaterne viste, at katalysatoren reducerede emissioner af CO og HC med 50-90 %, men der blev observeret problemer med tryktab. Senere blev en katalysator med 1 til 3 lag net med meshtal 8 (åbning 2,47 mm) testet. Dette net var specielt udviklet til reduktion af emissioner fra brændeovne. Resultaterne af denne afprøvning er anført i Tabel 1 (Hargitai, 2006). I dette tilfælde var tryktabet ikke for højt.

TABEL 1: REDUKTION AF CO OG HC I RELATION TIL ANTALLET AF KATALYSATORLAG (HARGITAI, 2006)

Antal lag	Fjernelse af CO (%)	Fjernelse af HC (%)
1	30 - 50	25 - 30
2	50 - 65	20 - 30
3	60 - 65	20 - 60

Under forsøgene blev der konstateret problemer med ophobning af partikler på katalysatoroverfladen, men der findes ikke nøjagtig information. Partikeludfældning afhænger af røggastemperatur og katalysatormateriale.

Katalysatorens effekt kan genskabes ved at vaske katalysatoren i en svagt sur opløsning (eddike eller citronsyre). I denne undersøgelse blev levetiden af katalysatoren ikke undersøgt (Hargitai, 2006).

Som beskrevet i kapitel 1.4.2, hævder Nälðens Värmeindustri AB, at NVI-systemet kan reducere CO-emissioner med 60–80 % ved en røggastemperatur på 200–450 °C. Reduktion af kulbrinter kræver højere temperaturer. Ved en røggastemperatur på 350–500 °C kan HC reduktioner på 20–40 % opnås (NVI, 2013).

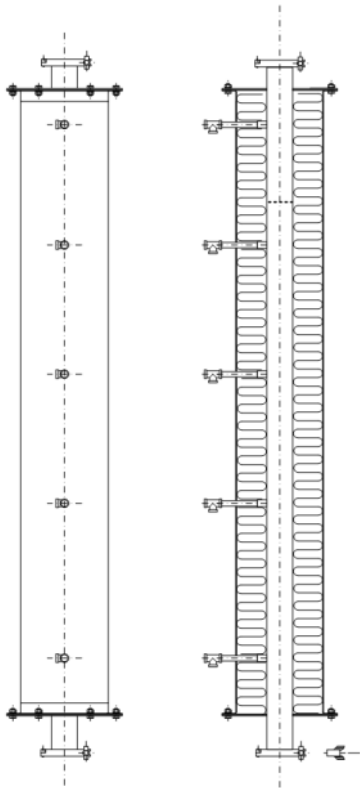
2.2 Indledende tests af udvalgte katalysatorer

For at kunne afprøve de udvalgte katalysatorer under kontrollerede forhold, udvikles en prøveopstilling beregnet for tilsætning af en standardiseret røg, således at der kan gennemføres test under ensartede forhold.

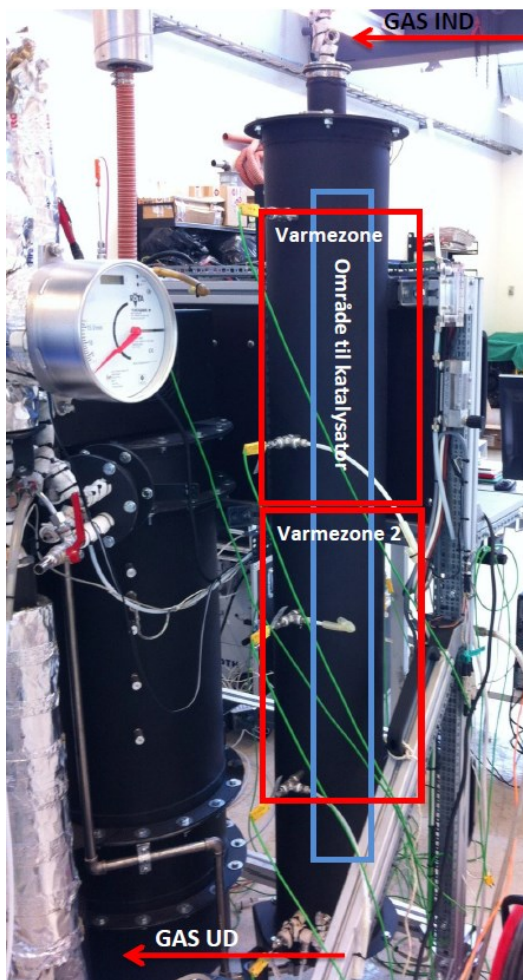
2.2.1 Forsøgsopstilling

Formålet med forsøgsopstillingen er at bestemme, i hvilket temperaturområde de udvalgte katalysatorer har bedst effekt på CO og OGC. Det er afgørende, at katalysatoren er virksom ved så lav en temperatur som mulig, da det er ønskeligt, at den er aktiv i opstartsperioden. Brændeovne, som er højtydende, har lave røgtemperaturer, når de er i drift. Det samme er i endnu større grad gældende for brændekedler. Det er samtidig ønskeligt, at katalysatorerne også skal være aktive i hele det temperaturområde, hvor brændeovnene opererer.

Forsøgsopstillingen fremgår af figurerne nedenfor. Figuren til venstre viser en skitse af selve varmenheden med 60 mm røret, hvori det tilpassede katalysatormateriale kan monteres og gennemstrømmes af en opvarmet gasblanding. Katalysatormaterialet placeres nederst i 60 mm røret lige før det nederste gasudtag.



FIGUR 14 SKITSE VARMEENHED



FIGUR 13 FORSØGSOPSTILLING

For at få katalysatormaterialet tilpasset til den mindre diameter for forsøgsopstillingen blev Kat A (HearthCAT) skåret med en stiksav. Katalysatoren har en tykkelse på 25 mm. Kat B (Catator) blev klippet med en skævbider, som i modsætning til Kat A, var nemmere at tilpasse. Kat B har en tykkelse på 1,5 mm og blev indsat i 3 lag.

Den simulerede røggas fås ved hjælp af en gasblanding tilsat vanddamp. Gasblandingen erhverves ved en gasleverandør. Det er ikke muligt at få den ønskede sammensætning som beskrevet i afsnit 1.1, og der findes derfor frem til følgende to sammensætninger, baseret på laboratorieerfaringer med typeprøvning af brændeovne.

Den ene gasblanding skal simulere en dårlig forbrænding hos slutbrugeren, og er derfor en fed blandingsgas bestående af:

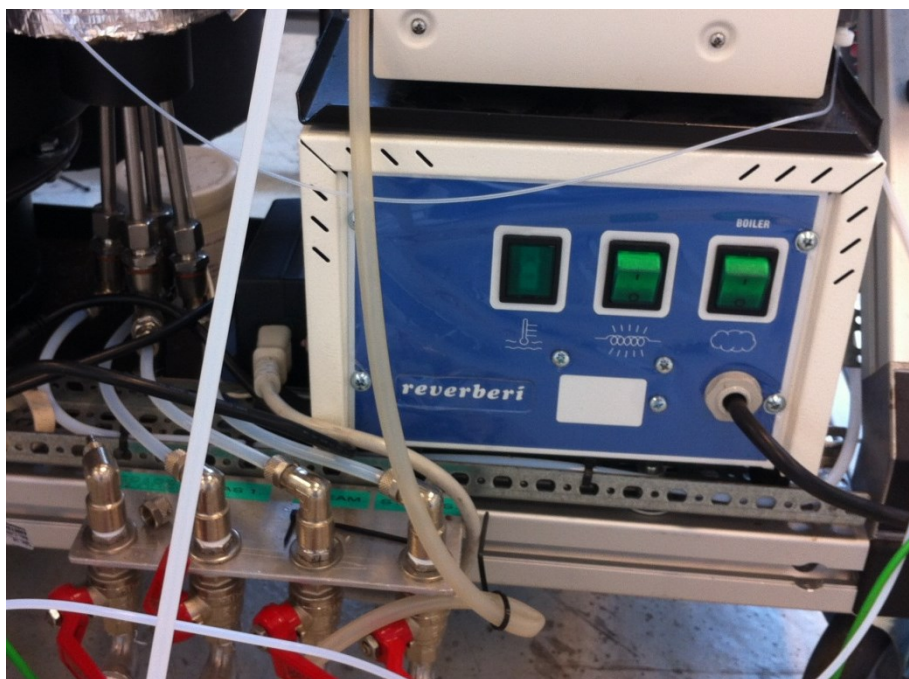
- Methan: 600 ppm
- Napthalene: 150 ppm
- CO₂: 9.2 %
- CO: 7500 ppm → 0.75 %
- O₂: 9.1 %

Gasblandingen, der skal simulere en god forbrændingsgas, indeholder følgende koncentrationer:

- Methan: 200 ppm
- Napthalene: 50 ppm
- CO: 2500 ppm

Koncentrationerne for CO₂ og O₂ er uændret i de to gasser.

Da gasblandingerne ikke indeholder vand, er der på forsøgsopstillingen monteret udstyr, som blander vanddamp i gassen svarende til cirka 10 %. Til produktion af vanddamp indsættes et dampanlæg bestående af en lille el-kedel på to liter vand. Kedlen anvendes normalt til produktion af damp til strygejern, men finder også god anvendelse i nærværende forsøg.



FIGUR 15: REVERBERI DAMPANLÆG

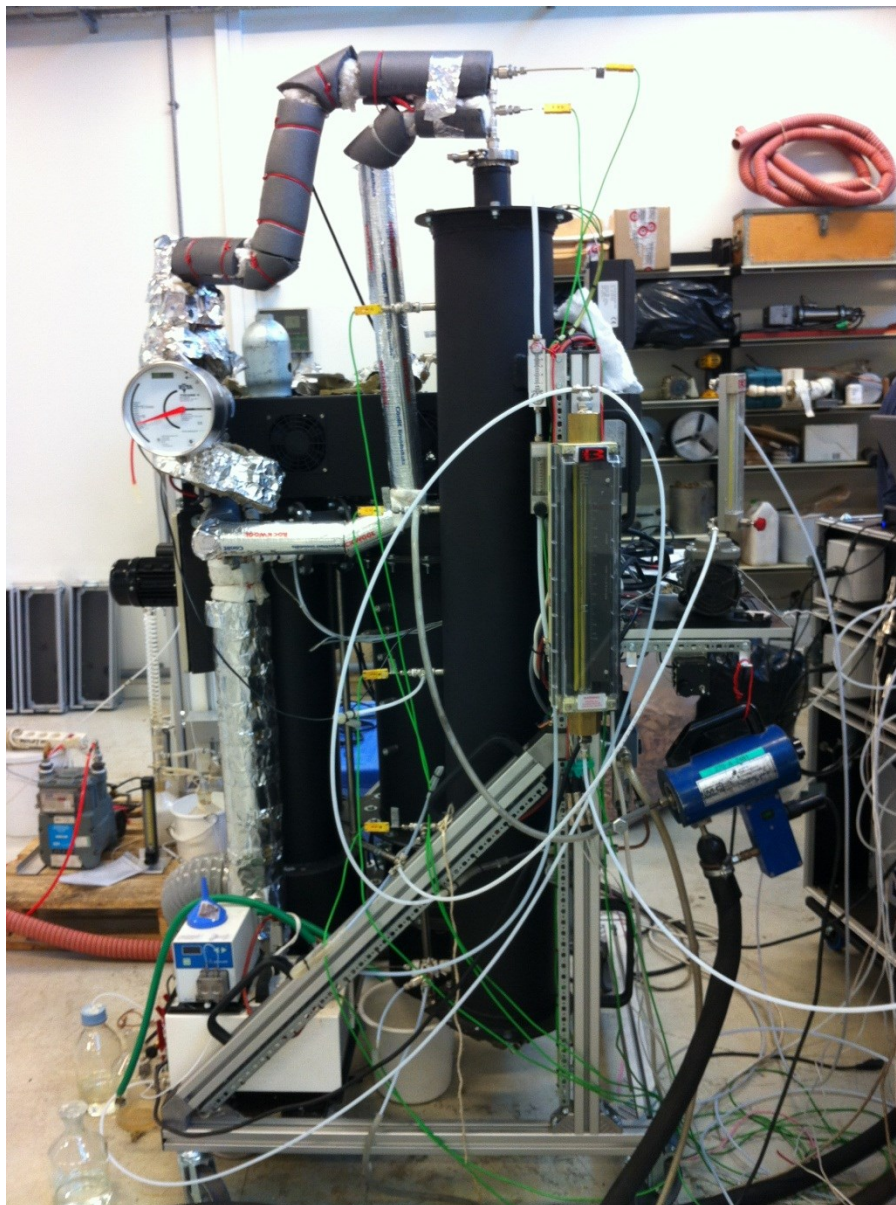
Dampen bliver efterfølgende blandet med gassen via smartline pump 100, som ses på billedet. Pumpen kan meget præcist levere den nødvendige mængde som behøves, hvilket gør den velegnet til brug i dette forsøg.



FIGUR 16: SMARTLINE PUMP 100 (KNAUER, 2013)

Gasblandingen forvarmes af varmeelementerne monteret under isoleringskappen, som det ses på efterfølgende billede af forsøgsopstillingen, og blandes med dampen. Yderligere temperaturregulering sker i selve varmeeenheden. Temperaturen af gassen indstilles i forsøget til et interval fra 120 °C til 490 °C, hvorved katalysatoren gennemstrømmes af den varme gas, indtil der forekommer en stabil visning for hvert temperaturset. Temperaturene måles med termoelementer fem steder ned gennem katalysatorrøret i forsøgsopstillingen, som det ses på efterfølgende billede.

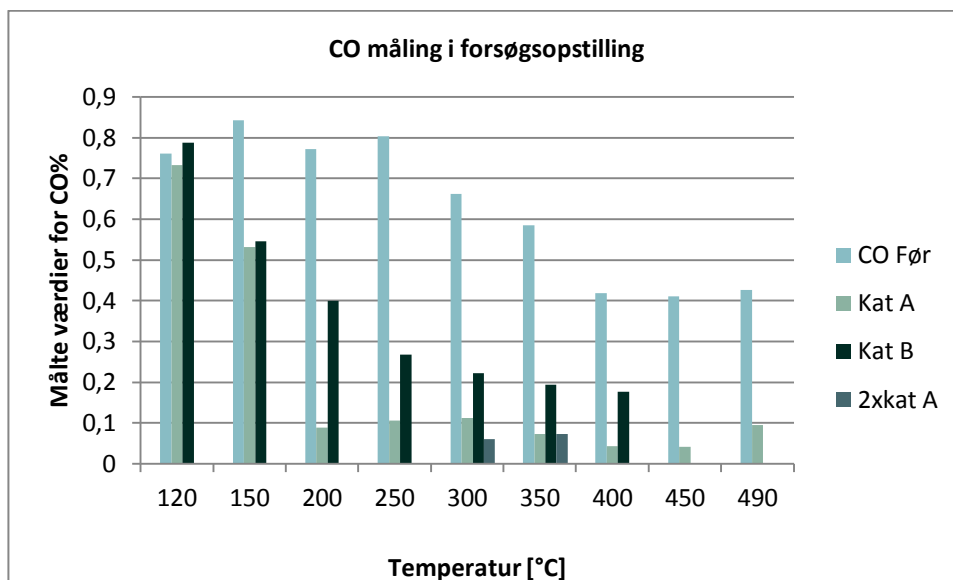
Under forsøgene foretages måling af CO-indholdet før, midt og efter katalysatoren. Derudover foretages måling af OGC efter katalysatoren. På nedenstående billede ses forsøgsopstillingen i laboratoriet med følere m.m. monteret.



FIGUR 16: BILLEDE AF FORSØGSOPSTILLINGEN

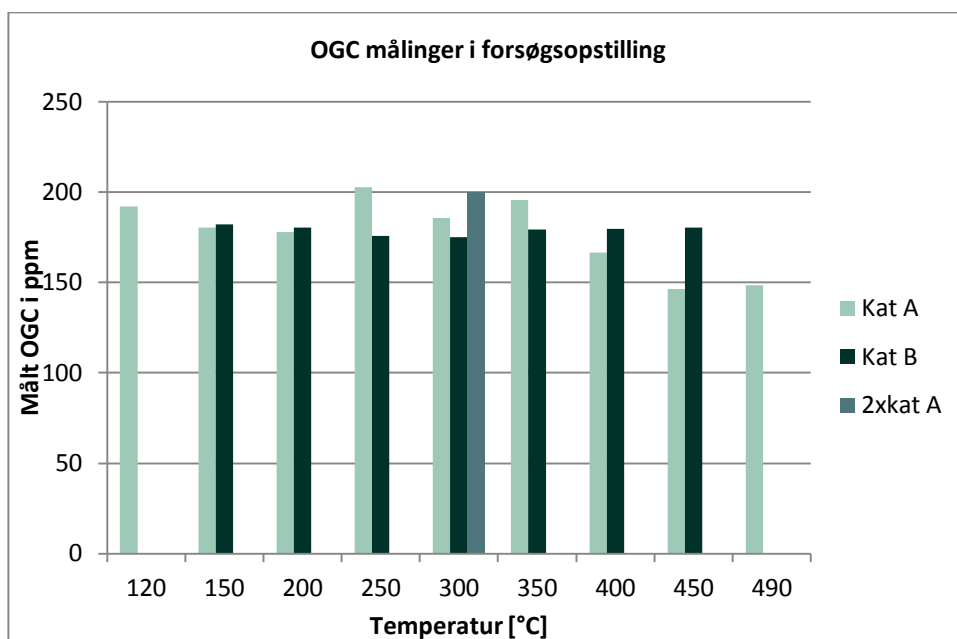
2.2.2 Resultater

Resultaterne fra de gennemførte forsøg er samlet i de to nedenstående grafer, hvoraf den første graf viser reduktionen af CO % i temperaturområdet 120 – 490 °C, og den efterfølgende graf viser OGC i ppm i samme temperaturområde. Målingerne for OGC er alene foretaget efter gassen har gennemstrømmet katalysatormaterialet, mens CO som kontrol dels er målt uden katalysator og dels både før og efter en af de udvalgte katalysatorer (Kat A). Den anvendte gas til forsøgene er den fede blanding til simulering af en dårlig forbrænding.



FIGUR 17: SØJLEDIAGRAM AF GENNEMSNITLIGE VÆRDIER FOR CO MÅLINGERNE

På figuren ses, at CO koncentrationen på den simulerede røggas på 0,75 % og CO målt før Kat A afviger fra hinanden. Det vurderes, at afvigelsen skyldes, at katalysatoren forårsager recirkulation af røggassen i volumenet lige før dens indløbet. Ved høje temperaturer hvor katalysatoren er aktiv, medfører det en fortynding af CO koncentrationen. Overordnet set viser resultaterne, at de valgte katalysatorer har en positiv effekt på den gennemstrømmende gas i forhold til referencen og målingen før katalysatoren blev monteret (CO Før).



FIGUR 18: SØJLEDIAGRAM AF GENNEMSNITLIGE VÆRDIER FOR OGC MÅLINGERNE

Resultaterne for OGC viser, at katalysatorerne har en positivvirkning på OGC niveauet ved høje temperaturer. Som forventet kræves generelt temperaturer på omkring 400 °C for at se en entydig effekt.

I Bilag B – Præ-kvalifikation, katalysatorforsøg, er udvalgte individuelle grafer af de gennemførte målinger præsenteret.

Katalysator A, som består af det svampelignende keramiske element, har ved det initialiserende forsøg ved 150 °C en gennemsnitlig effekt på cirka 80 % i redueringen af CO %, hvilket er et tilfredsstillende resultat i forsøgssammenhæng. OGC indholdet reduceres dog først omkring 400 °C. Der ses ingen tydelig variation af OGC-indholdet for denne katalysator i de lave temperaturområder.

TABEL 2: TABEL FOR KATALYSATOR A, SOM BESKRIVER FORSØGSRESULTATERNE

Hearthcat katalysator A		
CO	OGC	
~80 % v. 150 °C	15 % v. 400 °C	
~85 % v. 200 °C	25 % v. 450 °C	
-	-	

Katalysator B, som består af trådnæt, reducerer CO % med ~30 % ved 200 °C og ved højere temperaturer (>350 °C) reducerer trådnettet CO % med 75 %. Katalysatoren har ikke nogen synlig indvirkning på OGC niveauet, som forbliver konstant.

TABEL 3. TABEL FOR KATALYSATOR B (CATATOR KATALYSATOR B), SOM BESKRIVER FORSØGSRESULTATERNE

Catator katalysator B		
CO	OGC	
~30 % v. 200 °C	Ingen effekt	
50 % v. 250 °C	Ingen effekt	
75 % v. 350 °C	Ingen effekt	

2.3 Regenerering af de katalytiske produkter

Parallelt med OCO og OGC forsøgene udføres TGA lab skala test, (Termogravimetrisk analyse) af katalysatorer, kondens og sod interaktion. Formålet med testerne er at afklare mulighederne for regenerering af den katalytiske enhed i tilfælde af tildækning af katalysatoroverfladen med sod eller kondens under opstart/ ved en dårlig forbrænding. Dette potentiale for regenerering er af stor betydning for den katalytiske enheds forventede levetid.

Forsøgene udføres ved opvarmning af blandinger af det katalytiske materiale, organiske forbindelser med højt kogepunkt (naftalen og glycerin - disse er valgt for at simulere kondens) og sodholdige partikler fra en dieselmotor (NIST SRM 2975) i en iltholdig atmosfære (10 %) samt i enkelte tilfælde rent N₂. De benyttede katalytiske elementer fra henholdsvis Kat A og Kat B, består ikke af rent katalytisk materiale men inkluderer en væsentlig procentdel bæremateriale (den præcise sammensætning kendes ikke). Katalysatormaterialet neddeles til en 2-3 mm. Under forsøget følges vægten af prøven som funktion af temperaturen.

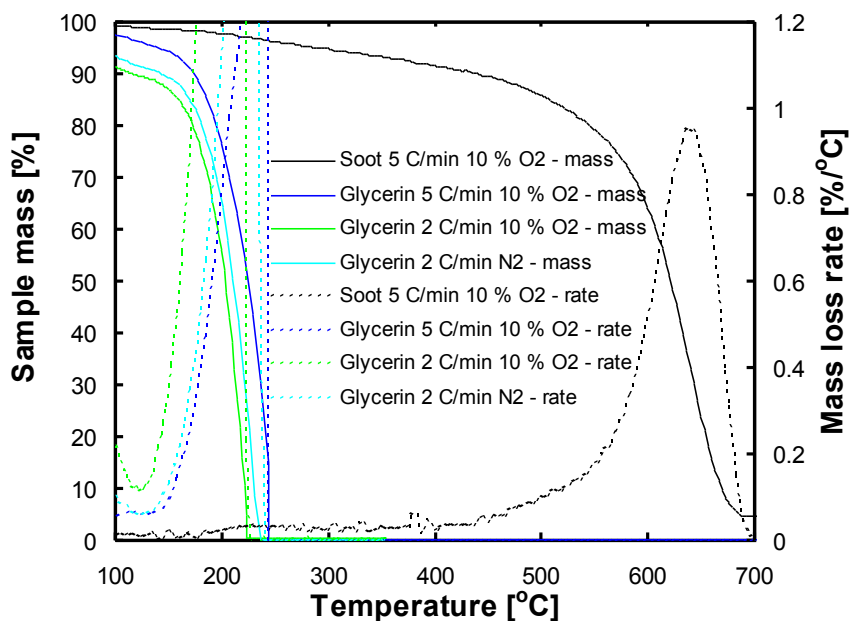
Testene blev udført ved anvendelse af et Netzch STA 449 F1 Jupiter apparatur.



FIGUR19: NETZCH STA 449 F1 JUPITER (NETZSCH, 2013)

2.3.1 Resultater

Opvarmning af rene organiske forbindelser og sod

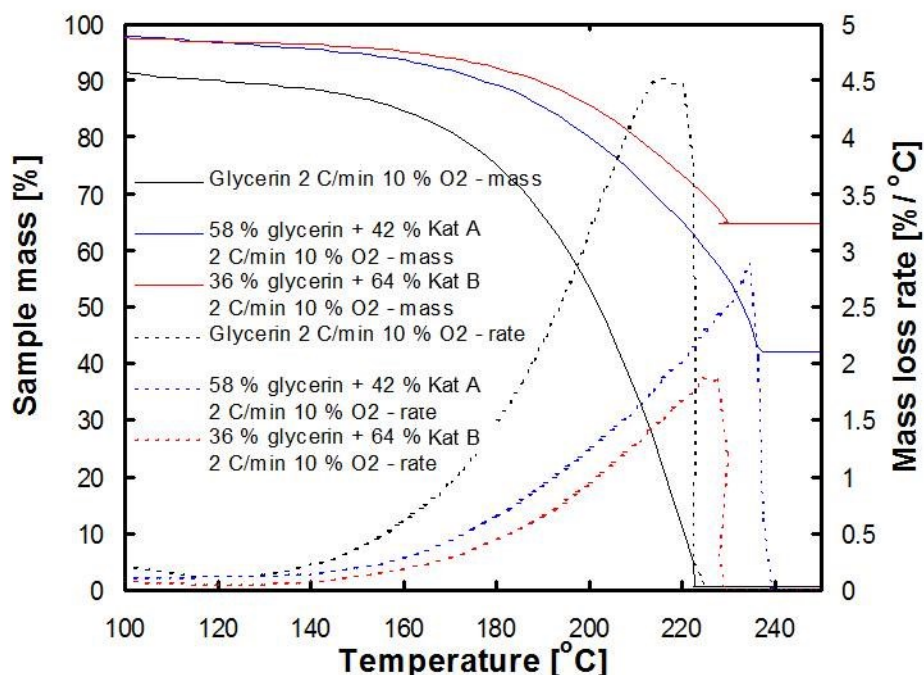


FIGUR 20: UDVIKLING I MASSE OG OMSÆTNINGSGRAD SOM FUNKTION AF TEMPERATUREN FOR SOD OG GLYCERINPRØVER

Figur 20 viser udviklingen i prøvemasse og omsætningsgrad for sod og glycerin. Sod begynder langsomt at omsættes i tilstedeværelse af ilt over 400 °C og kulminerer ved 640 °C. Glycerin begynder at omdannes/fordampe ved 130 - 140 °C og kulminerer kort efter (200 - 210 °C) – den meget begrænsede forskel på opvarmning i ilt og ren nitrogen indikerer, at der er tale om fordampning.

Naftalen fordamper ved en endnu lavere temperatur end glycerin (< 100 °C, ikke vist) og er derfor ikke interessant i studiet af fysisk deaktivering/tildækning af katalysatorer og dennes evne til at regenerere.

Opvarmning af katalysatorblandinger



FIGUR 21: UDVIKLING I MASSE OG OMSÆTNINGSGRAD SOM FUNKTION AF TEMPERATUREN FOR BLANDINGER AF KATALYTISK MATERIALE OG GLYCERIN.

Figur 21 viser udviklingen i prøvemasse og omsætningsgrad for blandinger af 2 kommercielle katalytiske materialer (Hearthcat (Kat A) og Catator (Kat B)) og glycerin i tilstedeværelse af 10 % O₂. Tilstedeværelsen af katalytisk materiale havde ingen gavnlig effekt på temperaturen, hvorved glycerin fjernes via fordampning/omdannelse ved de undersøgte betingelser. Dette stemmer godt overens med den stærkt begrænsede OGC aktivitet observeret i forsøgs- opstillingen (Figur 18).

Regenerering af katalysator/fjernelse af kondenserede forbindelser kræver altså enten, at røggastemperaturen kan bringes højt nok op til, at fordampning kan finde sted eller, at en passende katalytisk aktivitet opnås, således at kondenslaget kan omsættes. En overkommelig fordampningstemperatur blev observeret for glycerin, men kondens bestående af mindre flygtige forbindelser må forventes med dertilhørende problemer for de undersøgte katalysatorer. Herudover blev der heller ikke opnået nogen gavnlig effekt af katalytiske materialer på omsætning af sod, hvilket i kombination med kondens kan danne et lag, som er svært at fjerne igen fra katalysatoroverflader.

2.4 Samlet vurdering af de indledende tests

Den første udvalgte katalysator, katalysator A, viser udmærkede resultater i forhold til reduktion af CO % ved temperaturer fra 200 °C. OGC-niveauet reduceres med 15 - 25 % ved temperaturer på over 400 °C. Strukturen af katalysatoren vurderes til at have risiko for tilstopning pga. dens tæthed. Katalysatoren vil reduktionsmæssigt være velegnet til brændeovne, men ikke til brændekedler, da røggastemperaturen vurderes til typisk at ligge omkring eller under 200 °C grader. Sammenlignes resultaterne fra forsøget med dette kommercielle produkts datablad ses det, at de foreskriver en 70 % reduktion af CO ved montering i en pejs. Forudsætningerne er anderledes ved montering i en pejs, hvor lavere røggastemperatur er forventelig. Databladet er således i god overensstemmelse med de foretagende forundersøgelser, idet der blev opnået 85 % reduktion ved 200 °C.

Katalysator B har ikke nogen synlig effekt på OGC-niveau men i hele temperaturspændet reduceres CO % indholdet i nogen grad. Til sammenligning med tidligere beskrevet NVI tests, vises det i disse forsøg ved at reducere indholdet af CO % i samme grad som ved NVI testen. NVI testen beskriver OGC reduktion ved højtemperaturer, hvilket ikke gjorde sig gældende ved denne test med blandingsgassen. Årsagen til, at OGC niveauet ikke blev påvirket ved forsøget er ikke kendt.

I relation til undersøgelsen vedrørende mulighed for regenerering af katalysatoren i tilfælde af tildækning med sod og forekomst af kondens, har laboratorieforsøg vist, at der ikke er fundet nogen gavnlig effekt på hverken kondens eller sod tilsætning for katalysator A og B.

3 Udvikling af MiljøKAT

3.1 Markedsmæssig interesseafsøgning for miljøkatalysatorer til brændeovne

Ved udvikling af et nyt produkt som miljøKAT er også de markedsmæssige overvejelser vigtige. Det er afgørende allerede tidligt i et produktudviklingsforløb at forholde sig til, hvorvidt produktet opfylder behovet på markedet og kan få et kommercielt fundament. I projektet er der derfor blevet udført kvalitative interviews med syv pejsecentre i Danmark og det nordlige Tyskland, for at danne et overordnet billede af det mulighedsrum en ny miljøkatalysator vil have på det eksisterende marked. Undersøgelsen er bygget op med udgangspunkt i følgende:

- Et ønske om at nærme sig markedet gennem en interesseafsøgning i pejsecentre
- Et ønske om at afsøge en bred viden om slutbrugerne, dvs. de potentielle købere af produktet for at vurdere evt. markedsadressering
- Et ønske om at opnå specifik viden om slutbrugerne i forhold til deres ”imødekommethed” over for et miljøadresserende produkt
- Et ønske om at imødekomme Miljøstyrelsens anmodning om fokus på, at eftermontering skal kunne ske på et ”realistisk økonomisk grundlag” – gennem undersøgelse af, hvad dette vil sige for kunden
- Et ønske om at imødekomme Miljøstyrelsens anmodning om fokus på nem brugerhåndtering
- Et ønske om konkrete slutbruger- og markedsorienterede input til den videre produktudvikling

Det fulde spørgeskema findes i bilag D.

Formålet med undersøgelsen har ikke været at udføre en decideret komparativ markedsanalyse i Danmark og Tyskland – dertil er datagrundlaget for spinkelt. Formålet er, som beskrevet ovenfor at foretage en indledende markedsmæssig interesseafsøgning og at opnå et indtryk af de muligheder og barrierer, der er for markedsintroduktion. Det anbefales, at der senere i processen foretages en egentlig markedsanalyse for at skabe det bedste udgangspunkt for produktet. Afslutningsvist i denne afrapportering fremhæves, hvilke emner man i en sådan større analyse bør lægge vægt på.

3.1.1 Udførelse

Dataindsamlingen er foretaget alene gennem pejsecentre i Danmark og det nordlige Tyskland. Disse er en solid kilde til information, da de har stor viden om markedsforhold og deres kunder – slutbrugerne. På den måde kan de bidrage med centrale perspektiver for arbejdet med produktet. I forhold til slutbrugernes motivationer, er der dog tale om en sekundær kilde. I en senere markedsanalyse bør der udføres et målrettet brugerstudie ude hos selve slutbrugerne.

Der har ikke vist sig store forskelle i besvarelsene mellem de tre danske og fire tyske pejsecentre, hvorfor denne afrapportering giver én samlet vurdering. Den største forskel er, at man i Tyskland ikke opererer med Svanemærket. I Danmark kender flertallet af kunderne dette mærke. I Tyskland er kunderne til gengæld meget orienterede mod ”Stufekravene”, som de kender og forholder sig til i købssituationer. I begge lande er der således en generel viden om miljøkrav/mærkninger.

3.1.2 Vurdering af markedspotentiale

Pejsecentrenes overordnede vurdering

Flertallet af pejsecentrene har svært ved at få øje på fordelene ved produktet. Især i forhold til tanken om at lade katalysatoren være et tilkøbsprodukt til eksisterende brændeovne for at hæve deres standard og forøge deres levetid. De mener ikke, at deres kunder selv vil opsøge en eftermontering af et sådan produkt, men snarere vil udskifte deres gamle ovn til en ny og forbedret model. Knyttet hertil er naturligvis pejsecentrenes egne interesser. Deres forretningsgrundlag er netop salg af nye ovne, så hvis katalysatoren skal sælges som et tilkøbsprodukt, bliver det vanskeligt at have pejsecentrene som salgskanal.

Hvis produktet skal kunne sælges, skal det efter pejsecentrenes mening ske gennem en integration i nye ovne og være en del af en samlet pakke uden meromkostning og merarbejde for kunden. Det skal være let at formidle information om produktet, og der skal medfølge tydelig markedsføringsmateriale samt dokumentation for effekt.

Der er enighed blandt pejsecentrene om, at det kun er et fåtal af deres kunder, der direkte efterspørger viden om partikeludledning og de mere klimamæssige spørgsmål, men tendensen er alligevel stigende. Der er nogle, der selv tager det op – og de fleste kunder er interesseret i emnet, hvis sælgeren vælger at tage det op. Nogle af pejsecentrene pointerer, at der evt. kan være basis for, at producenter kan bruge produktet som en måde at differentiere sig fra de øvrige mærker. Selvom miljøområdet ikke er en dominerende faktor for pejsecentrenes kunder i dag, er der en stigende interesse herfor og eftersom mange produkter i dag har meget stor lighed med hinanden, kunne en brand-differentiering på miljø potentielt have en salgsmæssig effekt.

Slutbrugernes primære købsvurderinger i dag

Undersøgelsen peger på, at slutbrugernes primære interesseområder er:

- Pris (lav)
- Brugervenlighed
- Virkningsgrad
- Design

I denne opstilling er det svært at finde plads til en miljøkatalysator, der måske vil fordyre produktet, være synlig i det designmæssige udtryk og forøge kompleksiteten i forbindelse med brug. De eksisterende salgsmønstre taler således umiddelbart imod en succesfuld markedsintroduktion. Det vil være vanskeligt at indføre produktet uden meromkostninger, og uden at slutbrugerne skal forholde sig til rengøring. Det er muligt at tage hensyn til design i udviklingen – hvilket klart må anbefales – men det kan ikke stå alene som et salgsargument, da katalysatoren må betragtes som en funktionsdel af en ovn – ikke et æstetisk supplement.

Blandt de primære købsvurderinger er brændeovnens virkningsgrad det mest oplagte, som man kunne fokusere på og evt. tænke med i forbindelse med produktudviklingen. Det er ikke altid noget kunderne efterspørger i første omgang, men når det tages op, er det ifølge pejsecentrene noget, der fylder i købernes overvejelser. Hvis det er muligt at arbejde videre med et produkt, der ud over miljø skaber merværdi i forhold til brændeovne, vil produktet således stå væsentligt stærkere på markedet, da det imødekommer noget af det, der optager kunderne i pejsecentrene i dag.

Ud over ovenstående interesseområder er der elementer i salgssituationerne, der vidner om nye mønstre og forbrugstendenser. Den øgede opmærksomhed der i dag er rettet mod klima og miljøhensyn påvirker ifølge flertallet af pejsecentrene også et stigende antal af deres kunder. Det er kun få, der selv spørger ind til miljø, men mange er interesserede, hvis pejsecentrets personale selv vælger at tage emnet op. De fleste i Danmark har hørt om Svanemærket og er interesserede i at

snakke om miljø og fremtidsscenarier for afgifter og lovgivning. I Tyskland kender kunderne ”Stufekravene” og spørger ind til disse. Miljøkrav debatteres også i Tyskland. Selvom der tilsyneladende er en øget interesse fremhæver pejsecentre dog, at miljøhensynet ”hurtigt glemmes” igen, når andre emner såsom pris, design og kvalitet bringes på banen.

Markedets generelle udfordringer i dag

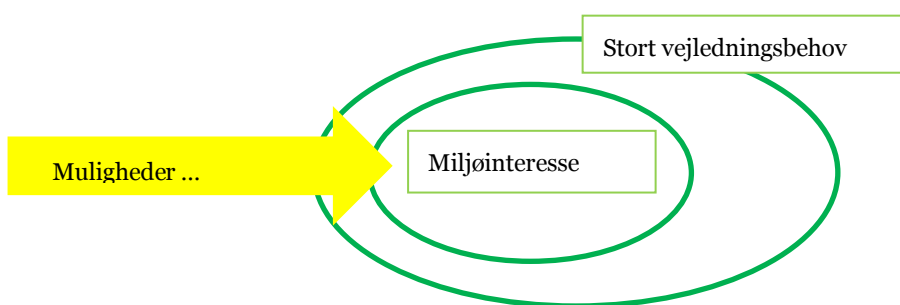
Pejsecentre har gennem en årrække oplevet et svigtende salg. Det er der mange forskellige årsager til, men flere fremhæver, at mediebilledet generelt er negativt, og særligt et af de danske pejsecentre fremhæver, hvordan den seneste tids debat om partikeludledning har direkte indflydelse på salget af brændeovne i Danmark. Opgaven med undersøgelsen her er ikke at betvivle eller bekræfte dette billede, men det er tendenser, som bør afsøges nærmere i en egentlig markedsanalyse. Samtidig er det mekanismer, som det er relevant at forholde sig til i den overordnede vurdering af miljøkatalysatorens eventuelle plads på markedet. Et udfordret marked er ikke kun en begrænsning for et produkt. Et udfordret marked indeholder også muligheder for, at nye produkter kan finde en plads og imødekomme ikke-opfyldte behov. Miljøkatalysatoren kan netop tilbyde et modsvar i en kritisk debat om brændeovne og miljø.

Pejsecentrenes målgruppevurdering

Som i alle andre forbrugssammenhænge er der forskellige typer købere af brændeovne. Ifølge pejsecentre er der i særdeleshed en opdeling mellem:

- 1) Kunder som mener, at de kan det hele selv og efterspørger den billigste løsning
- 2) Kunder som er nybegyndere og efterspørger vejledning eller kunder, som gerne vil være sikre på at træffe det helt rette valg og kommer tilbage mange gange (de danske pejsecentre refererer til dem som ”ingeniør/skolelærer-typen”)

Som et af de danske pejsecentre siger: ”Ingeniøren og skolelæreren måler og spørger på alt. De kommer 10 gange i butikken og spørger om det samme igen og igen.” Disse vejledningstunge kunder er lettere at nå med et produkt som miljøkatalysatoren, da den vil kræve en introduktion. Dette kan vise sig at være ”mulighedsrummet” for den første markedsintroduktion – der hvor den vejledningstunge kundegruppe møder den miljøbeviste (Figur 22).



FIGUR 22: ”MULIGHEDSRUMMET” FOR DEN FØRSTE MARKEDSINTRODUKTION

Det er dog langt fra sikkert, at det er denne målgruppe, der bedst kan overskue at tilføje dette ekstra element i deres oven, da det formentlig kræver vedligehold i et vist omfang. Spørgsmålet er så ”hos hvem” katalysatoren hører bedst hjemme? Denne interesseafsøgning giver ikke grundlag for en præcis målgruppevurdering, men dette bør være en del af en egentlig markedsanalyse senere i produktudviklingsprocessen. Ud over ovenstående karakteristik bør en sådan undersøgelse tage højde for sociokulturelle forskelle både nationalt og internationalt. Alene de danske pejsecentre viser f.eks. store udsving i interessen for miljø – hvor et pejsecenter i et landområde oplever en markant mindre interesse for de miljømæssige hensyn. Her har brændeovnen i mere udtalt grad en

funktionel rolle som varmekilde. Som pejsecentret påpeger: ”Her på landet er det bønder, og de har brug for varme – ikke kun et møbel.”

Prisvurdering

Eftersom pris er en vigtig parameter for de fleste kunder i salgssituationen, vurderer pejsecentrene, at produktet helst skal være omkostningsneutralt. At det skal være en måde for et brand at differentiere sig på. På den måde bliver MiljøKAT mere en investering i at vinde markedsandele frem for et tilkøbsprodukt, som kunderne skal betale ekstra for. Ved spørgsmål omkring prissætning, snakker pejsecentrene dog om alt lige fra 800 kr. plus montering til 2000 kr.

3.1.3 Opsummering og anbefalinger

Opsummerende kan man sige, at de vigtigste barrierer og muligheder ser ud som herunder:

TABEL 4: VIGTIGSTE BARRIERER OG MULIGHEDER

Barrierer	Muligheder
• Prisen må ikke forøges • Slutbrugerens arbejdsindsats må ikke forøges • Det designmæssige udtryk må ikke forringes • Store krav til brugervenlighed/let forståelighed • Miljøhensyn er ikke et afgørende krav for slutbrugerne i dag • Virkningen skal kunne dokumenteres	• Modsvaret til den kritiske mediedækning (mulighed for at vise miljømæssigt initiativ) • Mulighed for produkt og brand-differentiering på et ensartet marked • ”Den rene samvittighed” – imødekommer en stigende interesse for miljø • ”Fremtidssikring” i forhold til miljøkrav • En markedsudvidelse i forhold til at ”miljørenovere” gamle ovne • Sammenkobling med ”øget virkningsgrad”, som de fleste kunder er opmærksomme på

Miljø og virkningsgrad som vindende koncept?

Et generelt svigtende salg af brændeovne på markedet og en generelt stigende miljøinteresse indikerer, at det kunne være relevant at introducere miljøkatalysatoren på markedet. Der er mange barrierer, hvoraf det primært handler om ikke at gøre hverken anskaffelse eller vedligeholdelse mere kompliceret. Produktet skal være let at forstå, og det skal være let at bruge. Prisen er også meget vigtig for flertallet af kunderne i dag, men i en salgssituation, hvor et produkt eller et brand får mulighed for at differentiere sig tydeligt fra andre produkter, vurderes en evt. merpris på 800-1500 som rimeligt af pejsecentrene.

Interesseafsøgningen blandt pejsecentre peger således på, at produktet synes at kunne finde en plads på markedet som et brand-differentierende produkt på et ensartet marked – et produkt, der viser klare miljøhensyn i en tid, hvor brændeovne har oplevet en kritisk mediedækning i en grad, der mere eller mindre direkte giver negative udslag i salgstal. Produktet kan ses som et ”fremtidssikrende” tiltag, der forsøger at imødekomme de stigende miljøhensyn og den stigende interesse herfor blandt kunderne – både hvad angår nye ovne og en miljømæssig opdatering af eksisterende ovne. Det er bestemt ikke alle, der kan nås med et sådan produkt. Som særligt ét af de danske pejsecentre bemærker, ligger miljøhensyn meget fjernt for nogle kunder. Hvis man derfor kan skabe merværdi i produktet og samtidig dokumentere en øget virkningsgrad, vil det gøre produktet interessant for flere og styrke dets markeds-mæssige positionering væsentligt.

Opmærksomhed mod pejsecentrenes store rolle i forbindelse med markedsudrulning

Det fremgår tydeligt af materialet, at pejsecentrene har meget ”magt” i salgssituationer og dermed i forhold til salgsfordelingen af ovne. Pejsecentrene vælger ofte selv at tage emner op, som kunderne ikke i udgangspunktet var opmærksomme på. Det kan f.eks. være miljøemner såsom miljøkrav eller hvordan man fyrer korrekt. Eller det kan være emner, der fremhæver særlige produkter, som pejsecentrene har interesse i at sælge af forskellige årsager. Mange produkter ligner hinanden, og de emner, som medarbejderne i pejsecentrene vælger at tage op har meget stor indflydelse på kundernes valg. En af de tyske forhandlere fremhæver, at han har en interesse i at sælge ovne med mindst mulig reklamation. Og en af de danske forhandlere siger direkte at nogle af hans kunder mere eller mindre lader den endelige beslutning være op til ham, da de har svært ved at træffe det endelige valg. Hvis noget er for komplekst at beskrive, bliver det nogle gange frasorteret fra sælgers side, for som flere af pejsecentrene fremhæver, kan for meget og for kompliceret information tage modet fra kunden og direkte forhindre et salg.

Det er vigtigt, at være sig disse strukturer bevidst, da evt. salg af miljøkatalysatorer gennem pejsecentrene i stor udstrækning påvirkes af pejsecentrenes vilje og evne til at informere de vejledningstunge kunder. Det er derfor afgørende, at der udarbejdes et lettilgængeligt materiale til pejsecentrene, der beskriver produktets fordele på en måde, så det let kan indgå i en salgssituation.

Den samfundsmæssige debat og mulige tilskudsordninger som springbræt for udrulning

Kunderne i både Danmark og Tyskland er optagede af miljøkrav og afgifter. Nogle spørger direkte ind til eventuelle fremtidige afgifter, som der skal tages højde for ved evt. køb. Fortsat øget samfundsmæssig debat om emissioner vil øge potentialet for et produkt som miljøkatalysatoren. Og hvis en dokumenteret effekt ved brug af miljøkatalysatoren kunne give anledning til en støtteordning, hvor brændeovnsejere kan ”miljørenovere” deres eksisterende ovn med tilskud eller måske helt udskifte deres eksisterende ovn med en ovn med en godkendt miljøkatalysator, kan katalysatoren indgå i en større kampagne og et modsvar til den igangværende overvejende negative omtale.

Fremadrettet: Produktmæssig præcisering gennem udvidet markedsundersøgelse

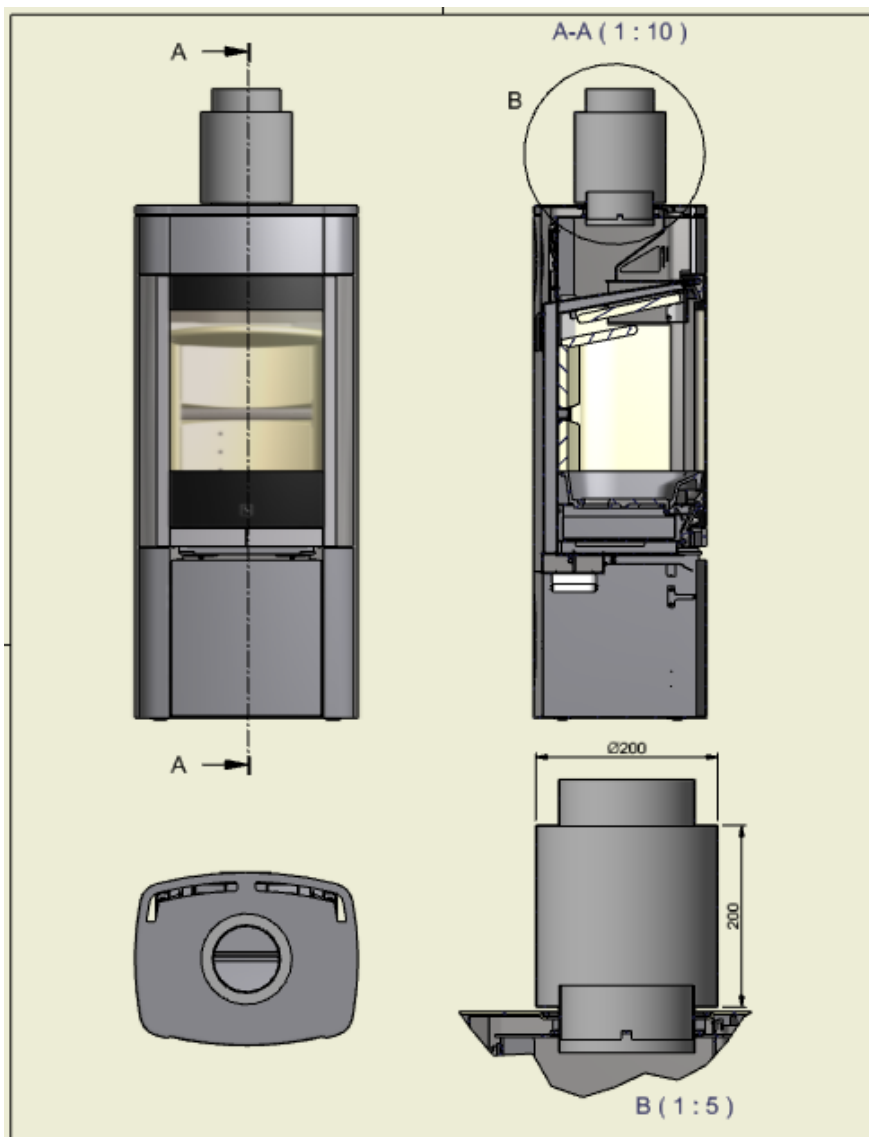
Det anbefales, at der i en senere fase af produktudviklingen udføres en egentlig markedsanalyse, der afdækker følgende:

- Hvad er kundernes primære drivkræfter i købsituationen?
- Hvem er de primære målgrupper for produktet?
- Hvor meget må produktet kræve af slutbrugerne i forhold til vedligeholdelse?
- Er produktets potentiale størst som tilkøb til eksisterende ovne eller som del af en ny produktlinje?
- Hvilke salgskanaler er mest optimale?
- Hvad er det egentlige omfang af den stigende miljøinteresse, der kan spores blandt pejsecentrenes kunder

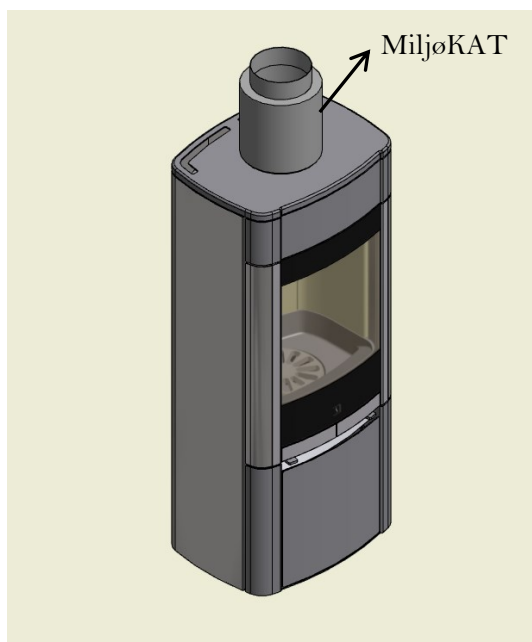
Denne undersøgelse bør foretages direkte hos slutbrugerne og analysen heraf bør relateres til overordnede købsstatistikker på brændeovnsområdet, til generelle forbrugertendenser i forhold til miljødebatter samt forholde sig til konkurrerende produkter og tiltag på markedet.

3.2 Design af MiljøKAT

Med udgangspunkt i de tekniske krav, som er beskrevet i kapitel 2.1, og de markeds-mæssige studier i nærværende kapitel, kunne MiljøKAT systemet se ud som vist i efterfølgende figurer.



FIGUR 23: TODIMENSIONEL TEGNING OG TVÆRSNITSBILLEDE (A-A) AF EN BRÆNDEOVN MED EN MILJØKAT ENHED (B)



FIGUR 24: TREDIMENSIONEL TEGNING AF BRÆNDEOVN MED MILJØKATENHED

Vigtige aspekter at overveje i udviklingen af MiljøKAT-enheden er som følger:

Katalysatoren skal **indbygges i røgrør** af standarddiameter. Røgrøret skal være beregnet til placering i direkte forlængelse af røgstuds (Figur 23). Yderligere skal systemet være let/billigt at installere. Muligheden for at placere katalysatoren i brændkammeret er ikke brugbar, da det kan have indflydelse på forbrændingsprocessen, og hvis der er tale om godkendte ovne eller kedler ville de derfor miste deres godkendelse. Som allerede beskrevet i afsnit 2.1 kan placeringen af katalysatoren uden for selve brændeovnen imidlertid også være medvirkende til at forlænge katalysatorens levetid, idet den skånes for udfældning af salt- og mineralforbindelser, der findes på gasform i brændkammeret og kan afsættes på katalysatorens overflade.

Der er vigtigt, at der er **sikkerhed mod tilstopning** og derved udsendelse af røggas til omgivelser.

Ifølge markedsundersøgelsen er en af slutbrugerens primære interesseområder **brugervenlighed**. Fra en teknisk vinkel betyder dette primært, at by-pass optionen bør undgås og at ingen eller et minimum af vedligehold må være påkrævet.

By-pass kan undgås, hvis katalysatoren har en kort opvarmningstid og er effektiv ved lave temperaturer. Dette var et af kriterierne, da katalysatoren blev valgt ud til præ-testen. Desværre rækker resultaterne fra præ-testen ikke til at kunne kassere by-pass optionen. En anden mulighed er at tilføje el-varme (varmetråd), hvilket også vil give muligheder for termisk regenerering i tilfælde af akkumulering af kondens/sod ovenpå det katalytiske materiale.

Hvis by-pass er nødvendig, skulle drejefunktionen gøres automatisk. På den måde ville systemet være lettere at bruge og derudover ville fejlbetjening blive elimineret. Designet af by-pass løsningen er især afhængig af katalysatorens dimensioner. Katalysatoren kunne drejes i lodret stilling til brug under optænding (bypass) og tilbage i vandret stilling som i MoreCat Catalyst eller kunne blive trukket ud af røggaskanalen som i NVI katalysator systemet. Det vil være at foretrække, hvis katalysator og drejemekanisme kunne udtages af røgrøret i forbindelse med skorstensfejlning, eksempelvis gennem et aftageligt dæksel i rørets side.

Generelt kræver kommercielle katalysatorer et minimum af vedligehold for at sikre optimal performance. Clear Skies Unlimited hævder, at dets HearthCat system til brændeovne ikke behøver vedligehold, men i dette tilfælde er katalysatoren direkte i kontakt med ilden. Vedligeholdelse består i at børste eller støvsuge katalysatorens overflade, når den er dækket af et synligt lag af aske og restprodukter; og hver år/hvert andet år fjerne og vaske katalysatoren i en mindre sur opløsning som fx eddike. Et automatisk rengøringsystem kunne implementeres, men så vil prisen øges. Derfor bør systemet være designet på en sådan måde, at katalysatoren let og hurtig kan ekstraheres fra eftermonteringsenheden. Samme funktion er ønskværdig af hensyn til udskiftning af katalysatoren, når den efter års anvendelse er 'brugt op'.

Markedsundersøgelsen viser også, at effektivitet er et vigtigt emne for kunderne. Kunderne er faktisk mere interesserede i effektivitet end miljø. Derfor bør der også foretages undersøgelser af, hvordan MiljøKAT kan have indflydelse på ovne eller kedlers effektivitet.

Ifølge interviewresultaterne er design også relevant. Ikke blot skal katalysatoren være let at installere, bruge og vedligeholde, den må ikke ligne en ekstra del, men bør harmonere med resten af ovnen. Forskellige modeller (farver, former o. lign.) kan præ-designes og testes i en markedsundersøgelse.

MiljøKAT enheden bør have et konkurrencedygtigt prisniveau. Hvis det bliver for dyrt at indsætte en katalysator i en eksisterende ovn vil det ikke ske uden lovkrav. Markedsundersøgelsen viser, at en acceptabel pris vil være fra 800 til 1500 kr.

Det endelige design af MiljøKAT enheden er i høj grad betinget af katalysatoren, som vælges. Det kan ikke sidestilles at anvende en keramisk struktur af 25 mm tykkelse som HearthCAT med at anvende en trådnets-katalysator på 1,5 mm tykkelse som Catator. Efter den udførte præ-test besluttes imidlertid at fortsætte det videre arbejde med de oprindeligt udvalgte katalysatorer, idet det dels ønskes undersøgt, om der kan observeres nogen effektivitetsforbedring og dels, ud over emissionsreduktionen, også ønskes undersøgt, i hvor høj grad der sker alvorlig tildækning med trykfaldsproblemer til følge. Begge dele vurderes at være afgørende for slutkundernes interesse for produktet.

4 Test af katalysatorer på ovne og kedler

4.1 Forsøgsopstilling

Der udføres forsøg på en moderne svanemærket brændeovn som kendetegnes ved lave emissioner, og en gammel brændeovn der vurderes at være fra 1980'erne. Ovnene er i anledning af projektet afinstalleret hos en slutbruger, hvor den har været anvendt indtil nedtagningstidspunktet. Begge ovne er først prøvet uden og derefter med katalysatorenhederne installeret.



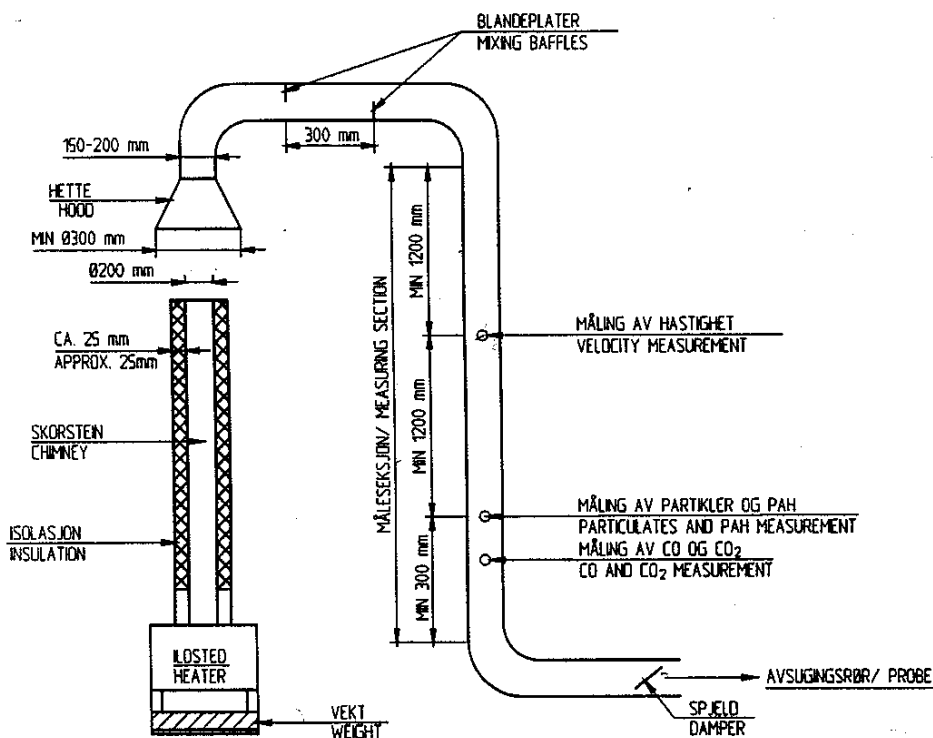
FIGUR 25 SVANEMÆRKET OVN SCAN 64



FIGUR 26 OVN AF ÆLDRE DATO

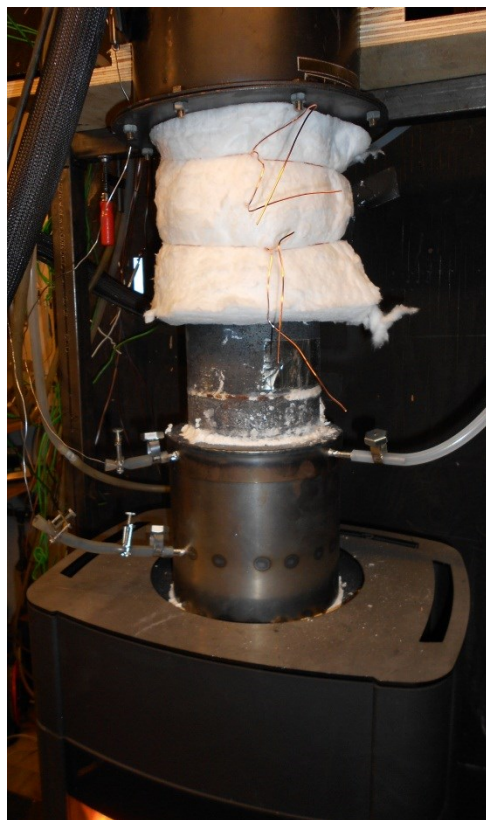
Den primære forskel på de to ovne findes i lufttilsætningen i brændkammeret. I den moderne ovn findes tre tilsætninger med primær, sekundær og tertiær luft. Den sekundære forbrændingsluft bliver blæst ned over ruden og ind over brændet til det bliver mødt af tertiær luft, der kommer fra brændkammerets bagside, og som virker som en efterforbrænding. Herefter ledes røgen igennem flere røgvenderplader som sikre opblanding af røggassen. I den gamle ovn bliver luften tilsat i 3 rossetter. Dels som primærluft via askeskuffen på samme vis som på den nye ovn, og dels også som primærluft på ovnens sider. Ovnene er desuden ikke tæt i lågen. Røgen passerer uhindret til røgstuds.

Der foretages emissionsmålinger i henhold til brændeovnsstandarder. Målingerne omfatter de traditionelle målinger efter DS/EN13240, og der måles således CO, CO₂, TOC (OGC) og gravimetrisk partikelmåling. Støv måles endvidere gravimetrisk efter NS3058 i fortyndingstunnel °C (se nedenstående figur). Støv måles over hele nedbrændingen.



FIGUR 27: FORTYNDINGSTUNNEL EFTER NS3058.

Katalysatorenheden monteres på ovnene som vist på nedenstående figur.



FIGUR 28 KATALYSATORENHED MONTERET PÅ SCAN 64.

Enheden er cylindrisk med en diameter på $\varnothing 200$ mm med en reduktion før og efter røgrørstilslutning ($\varnothing 150$ mm). Der er udtag til træk før og efter katalysatoren samt til temperatur. Katalysatorenheden har indvendig påsvejst en metal ring, der fungerer som hylde for placering af de forskellige katalysatorer, som således kan udskiftes undervejs i forsøgsrækken. Ved prøvning med Kat B isættes afstandsstykker af 3 mm mellem de enkelte katalysatornet (i alt 3 katalysatornet).

Der gennemføres test ved nominel last i en cyklus bestående af en optænding (opt.), en forfyring (FF), samt 1. og 2. nominel charges. En nominel charge er her defineret som den indfyring, hvor ovnen har den bedste forbrænding. På den moderne ovn laves desuden en lavlast fyring. Lavlast er den forbrænding der vurderes at være den mest almindelige forbrændingssituation hos forbrugerne. Det er ikke muligt at gennemføre en lavlastfyring på den gamle ovn af konstruktionsmæssige årsager, idet der er ringe mulighed for luftregulering.

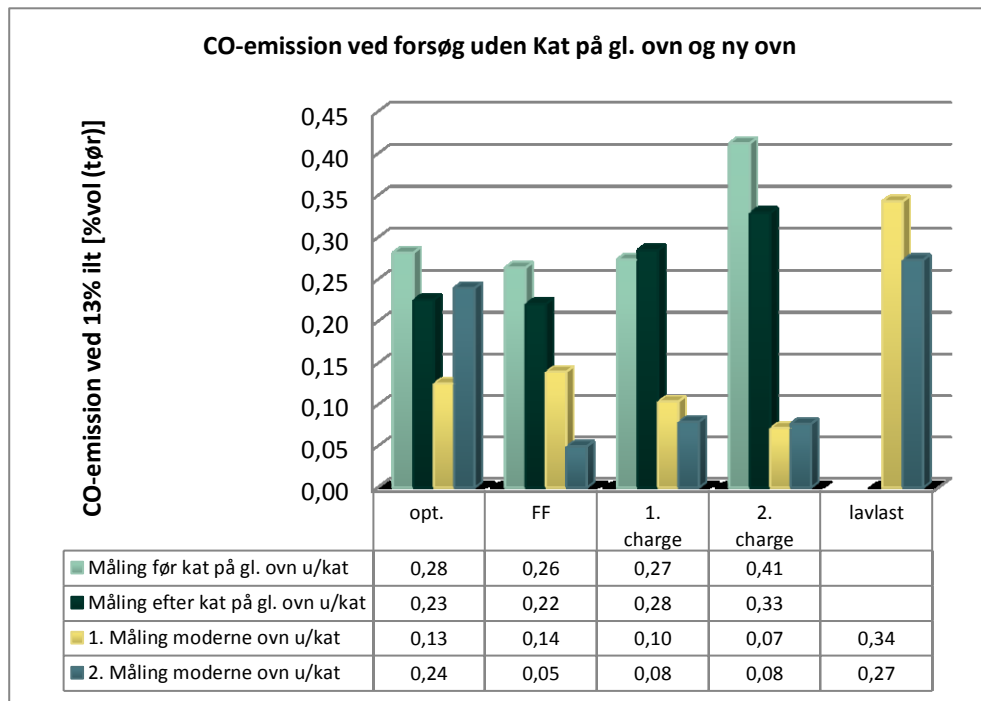
Måling af CO, CO₂ og OGC blev den ældre brændeovn målt både før og efter katalysatorenheden, mens det for den moderne ovn alene blev målt efter katalysatorenheden.

4.2 Resultaterne for målingerne på brændeovne

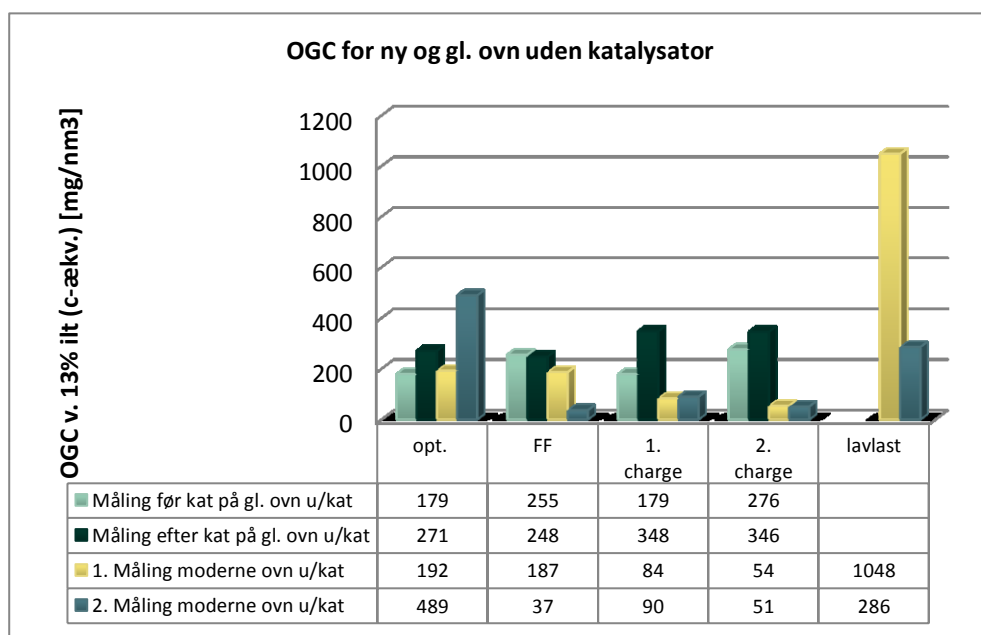
4.2.1 Indledende målinger uden katalysator

I de indledende målinger er katalysatorenheden monteret på røgstudsens, men uden isat katalysatormateriale.

På den gamle ovn er der foretaget måling af CO, CO₂ og OGC både før og efter den tomme katalysatorenhed. På den nye ovn er der kun målt CO, CO₂ og OGC efter den tomme katalysatorenhed. På den moderne ovn er der foretaget to fyringscykluser. Resultaterne fra de indledende forsøg ses i nedenstående figurer.



FIGUR 29: CO-MÅLINGER UDEN KATALYSATOR



FIGUR 30: OGC-MÅLINGER UDEN KATALYSATOR

Figurene viser forskellen mellem emissioner på henholdsvis den moderne og den gamle ovn. Der er foretaget to fyringscykler på den moderne ovn uden katalysator og det ses, at der er en vis variation mellem målingerne 1. måling og 2. måling, trods den samme opstilling, brændemængde og spjældindstilling. På den gamle ovn uden katalysator er der foretaget målinger før og efter enheden. En u hensigtsmæssig placering af målesonderne før katalysatorenheden vurderes at være årsag til, at der ikke fås mere sammenstemmende resultater med målingerne efter katalysatorenheden. Placeringen er tæt ved røgrørets side og ikke i røgrørets midte, i en zone hvor der vurderes at være risiko for recirkulation af røggas.

I de efterfølgende sammenligninger af resultater med og uden katalysator, er det til sammenligning valgt at anvende 2. målecyklus for den nye ovn, og målinger efter katalysatorenhed i sammenligningerne på den gamle ovn.

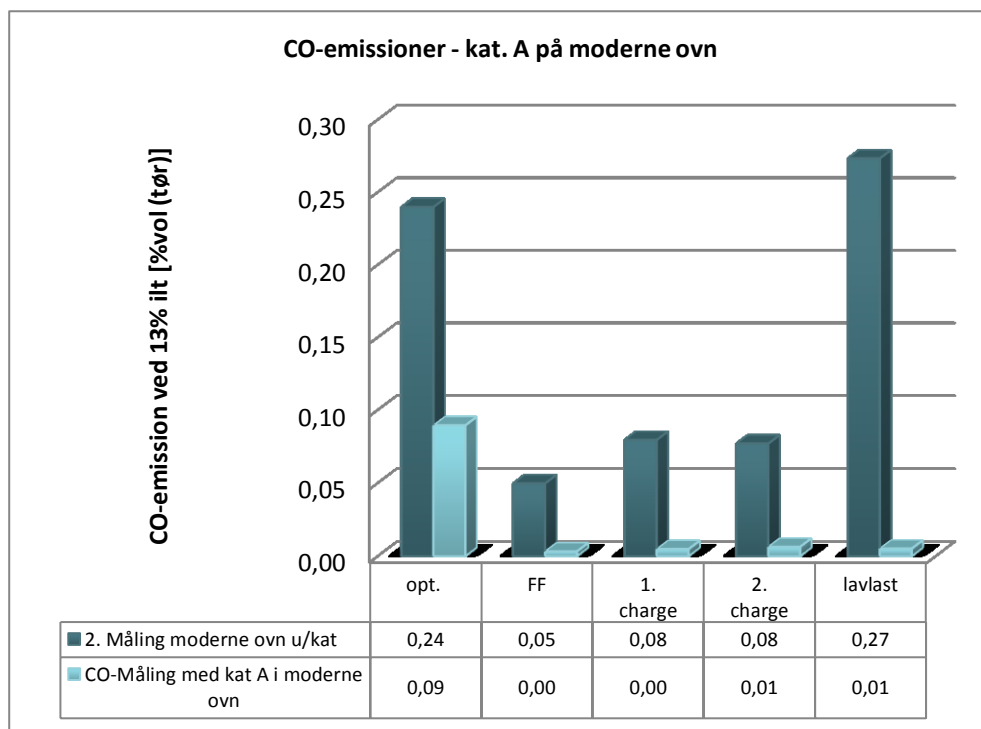
4.2.2 Katalysator A

4.2.2.1 Den moderne ovn med katalysator A

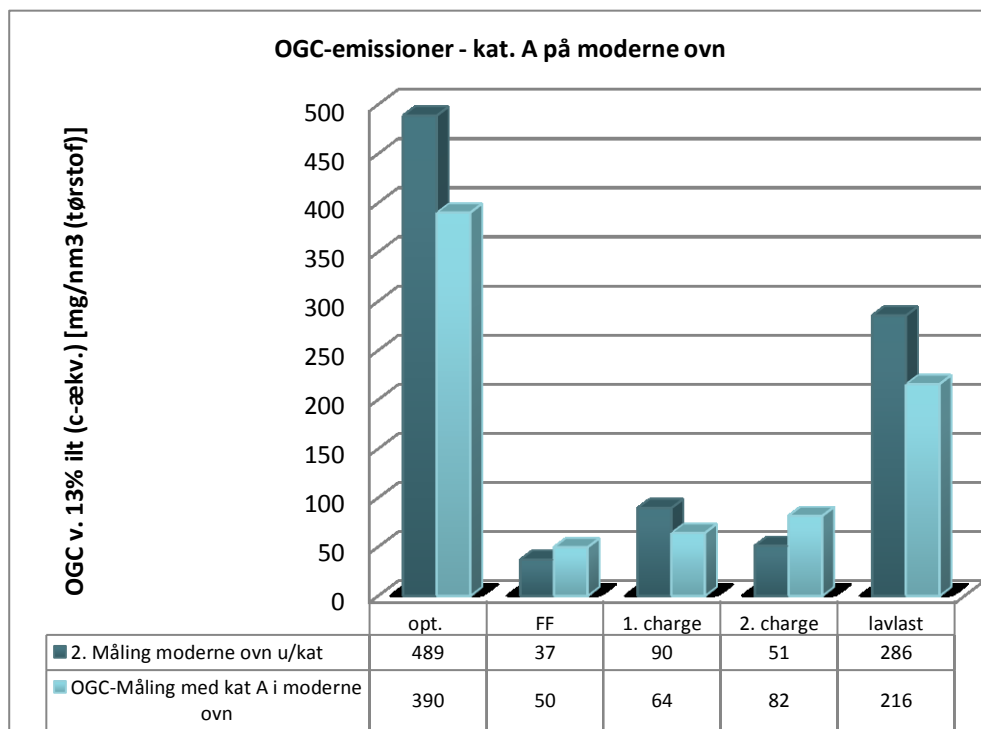


FIGUR 31: KATALYSATOR A EFTER FYRING I DEN MODERNE BRÆNDEOVN. DER SES EN MINDRE SOD DANNELSE PÅ ELEMENTET

Katalysator A af svampelignende struktur viste tegn på en god forbrænding ved forsøg på den moderne ovn, som det ses af billederne.



FIGUR 32: CO-MÅLING PÅ MODERNE OVN MED OG UDEN KATALYSATOR A



FIGUR 33: OGC-MÅLING PÅ MODERNE OVN HENHOLDSVIS MED OG UDEN KATALYSATOR A

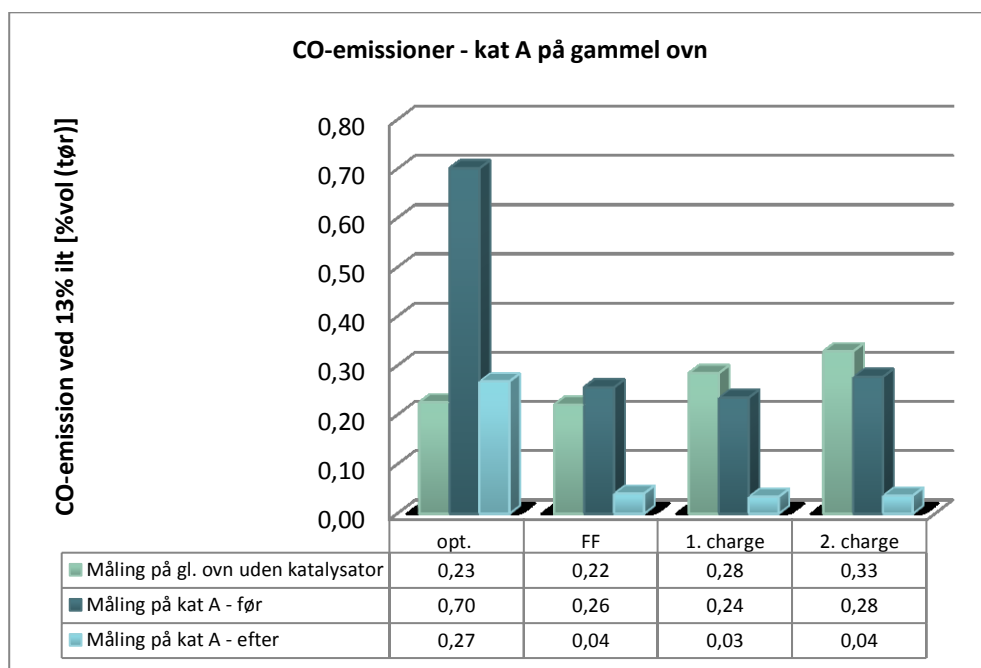
Ovenstående figurer viser CO og OGC niveauet med og uden katalysator A. Det ses, at der sker en reduktion af CO på over 90 % i lavlast med katalysator, og at CO generelt er meget lav. For OGC ses en reduktion på omkring 25 % efter forfyringen.

4.2.2.2 Den gamle ovn med katalysator A

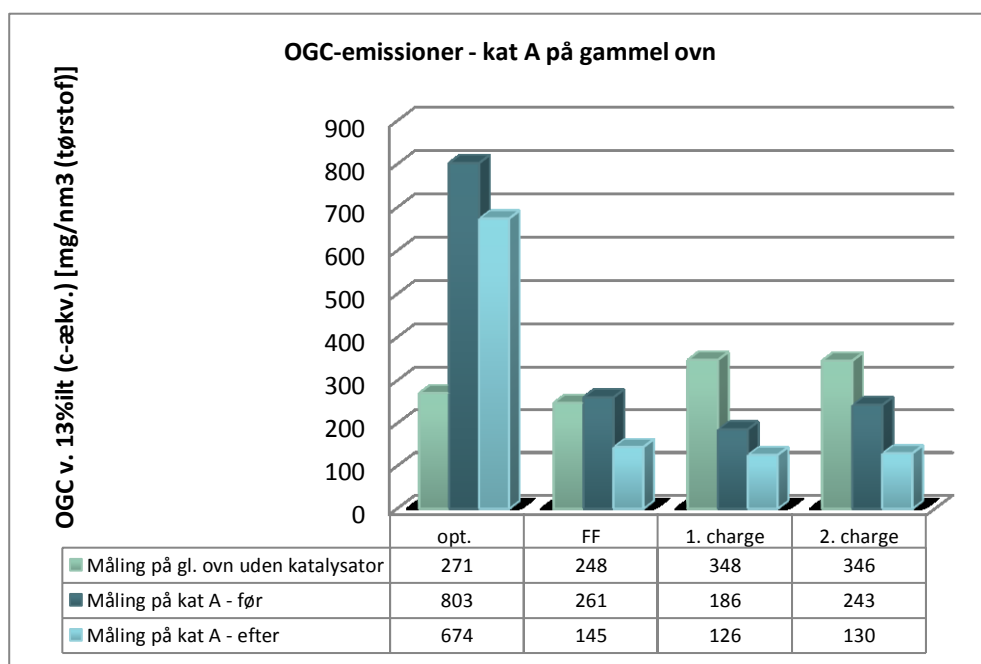


FIGUR 34: KATALYSATOR A EFTER FYRING I DEN GAMLE OVN SAMT BILLEDET NEDERST TIL HØJRE FØR FYRING

Billeder nederst til højre viser til sammenligning katalysator A før fyring i den gamle ovn. De to andre billeder viser katalysatoren efter fyring. Her ses en større belægning end med den moderne ovn. Det vurderes at det vil være nødvendigt at rense katalysatoren efter få optændinger grundet tilstopning.



FIGUR 35: CO-MÅLING PÅ GAMMEL OVN HENHOLDSVIS MED OG UDEN KATALYSATOR A



FIGUR 36: OGC-MÅLING PÅ GAMMEL OVN HENHOLDSVIS MED OG UDEN KATALYSATOR A

Der ses reduktion af både CO og OGC (målepunkt efter katalysator) på henholdsvis ca. 90 % samt godt og vel 60 % ved montering af katalysator A under almindelig påfyring (1. charge og 2. charge). Det observeres dog også, at der under optænding er ca. 250 % højere koncentration af OGC med katalysator end uden katalysator. Årsagen tilskrives en langsommere optænding grundet manglende træk og deraf for lille ilttilførsel.

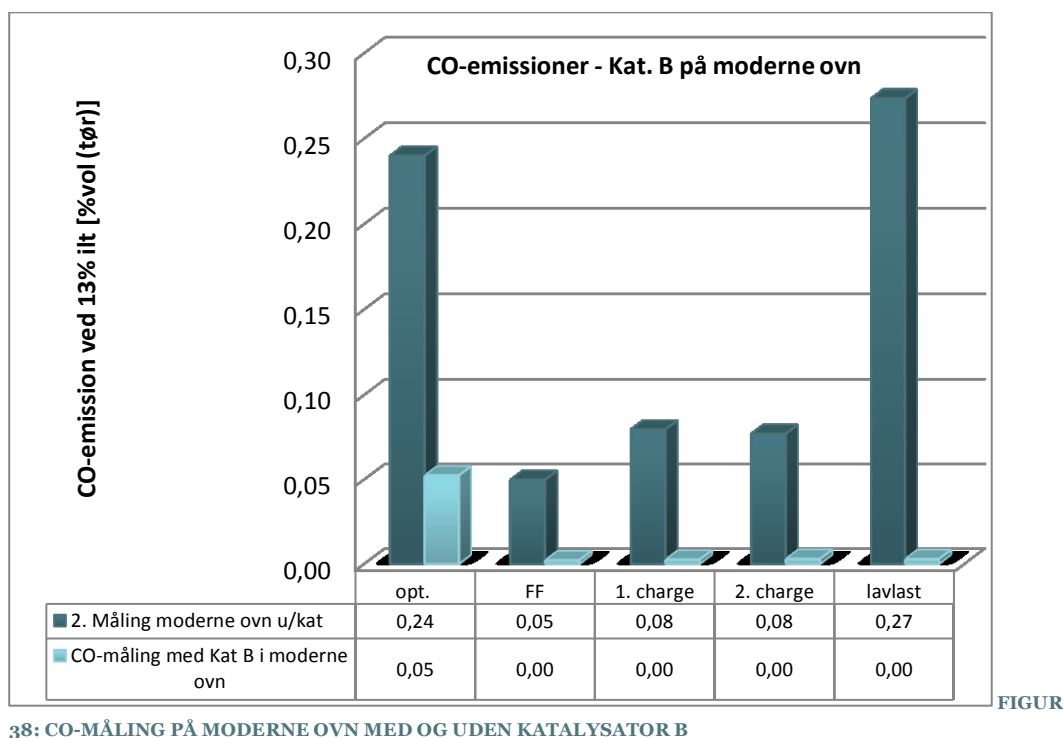
4.2.3 Katalysator B

4.2.3.1 Den moderne ovn med katalysator B

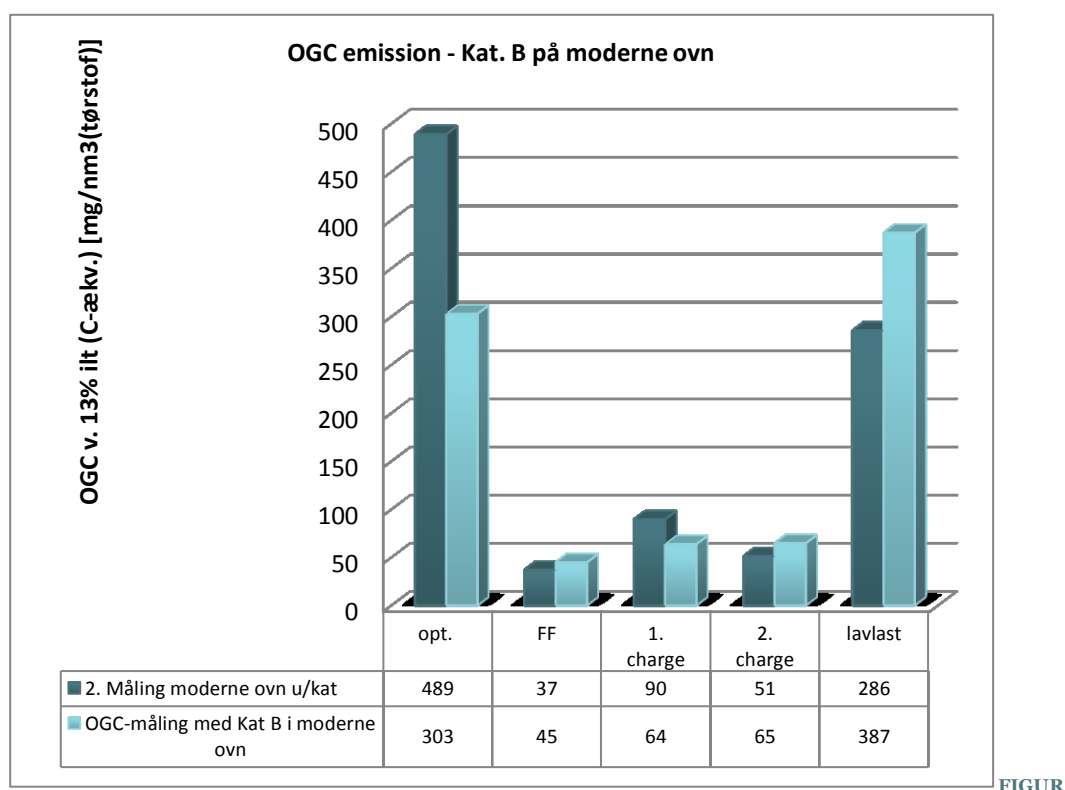


FIGUR 37: KATALYSATOR B EFTER FYRING I MODERNE OVN

Katalysator B, som er metalliske trådnet, ses på ovenstående figur. Billederne viser, at katalysatoren er forholdsvis ren og ikke blokkeret i nogen særlig grad efter forsøget. Det skal bemærkes, at billederne viser katalysatoren efter hele forbrændingscyklussen, det vil sige efter en optænding, for fyring, 1. charge og 2. charge samt en lavlast.



38: CO-MÅLING PÅ MODERNE OVN MED OG UDEN KATALYSATOR B



39: OGC-MÅLING PÅ MODERNE OVN MED OG UDEN KATALYSATOR B

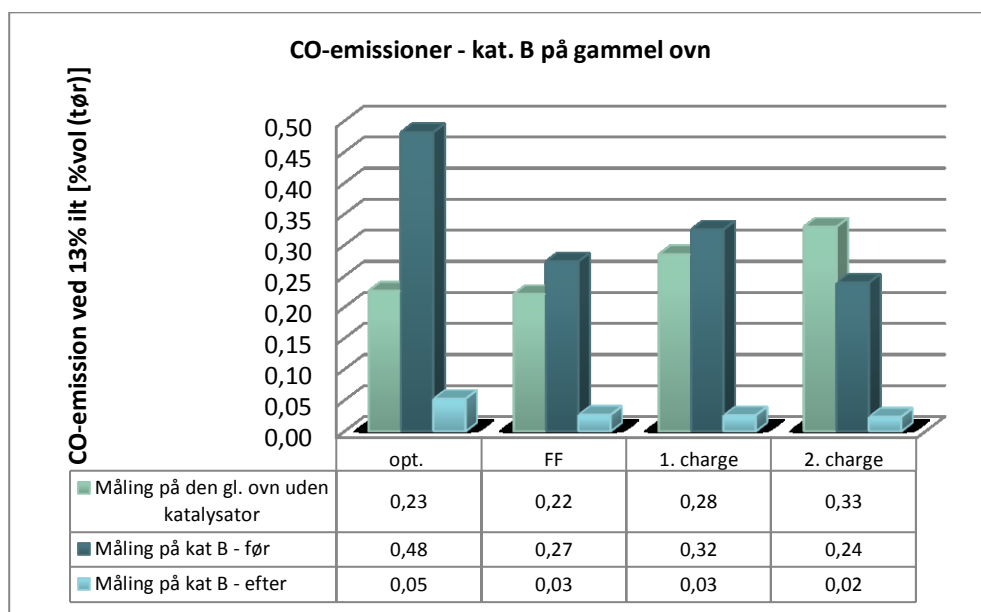
Det ses på figuren for OGC målingen, at der ved for små koncentrationer ikke sker en reduktion af OGC-niveauet. Ved lavlast er målingen højere end ved forsøget uden katalysator. Det skal bemærkes, at der er tale om to individuelle forsøg, og der derfor kan forekomme variationer i testene som tidligere omtalt. CO emissionen er reduceret i alle belastningssituationer og er fra og med FF under 50 ppm ved montering af katalysator.

4.2.3.2 Den gamle ovn med katalysator B

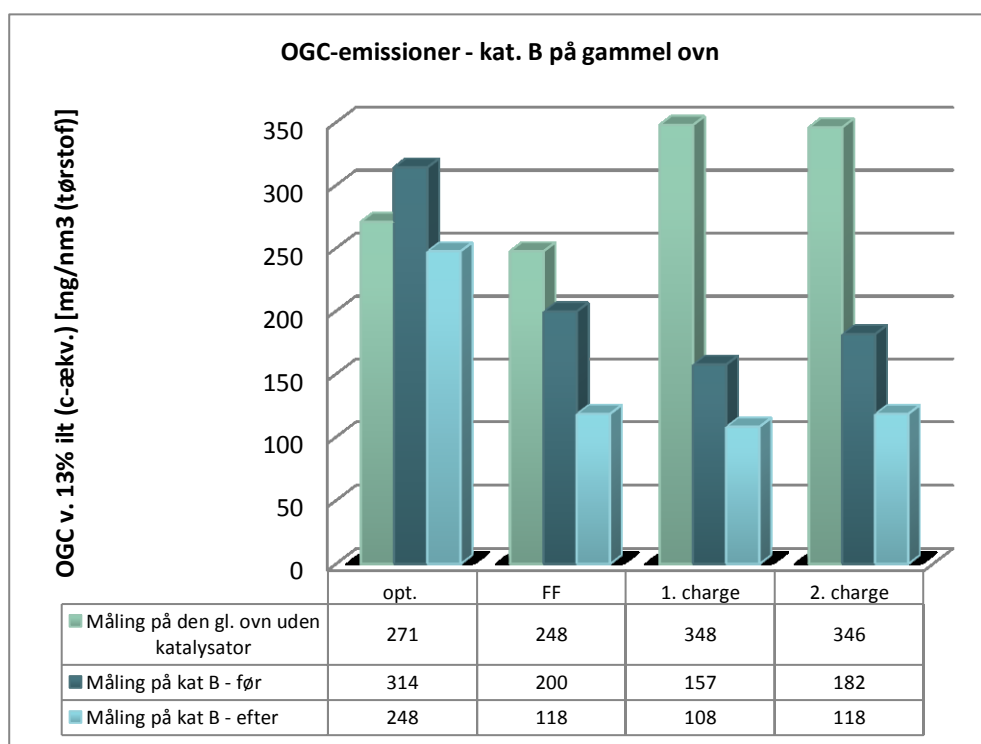


FIGUR 4o: KATALYSATOR B EFTER FYRING I GAMMEL OVN

Ovenstående figur viser katalysator B efter fyringer i gammel ovn. Det ses, baseret på katalysatorens udseende, at forbrændingen er betydelig dårligere end i den moderne ovn sammenlignet med katalysator A.



FIGUR 41: CO-MÅLINGER PÅ GAMMEL OVN HENHOLDSVIS MED OG UDEN KATALYSATOR B

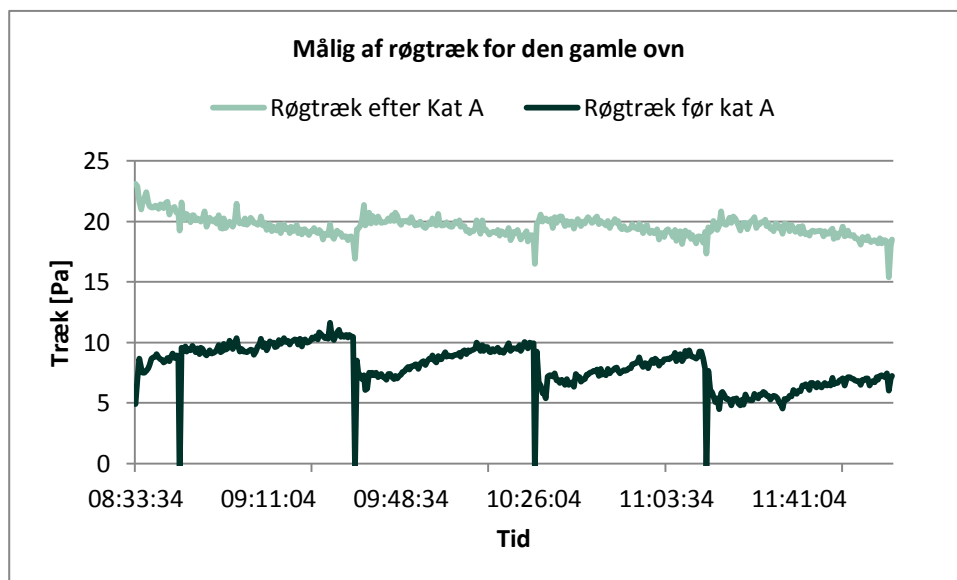


FIGUR 42: OGC-MÅLINGER PÅ GAMMEL OVN HENHOLDSVIS MED OG UDEN KATALYSATOR B

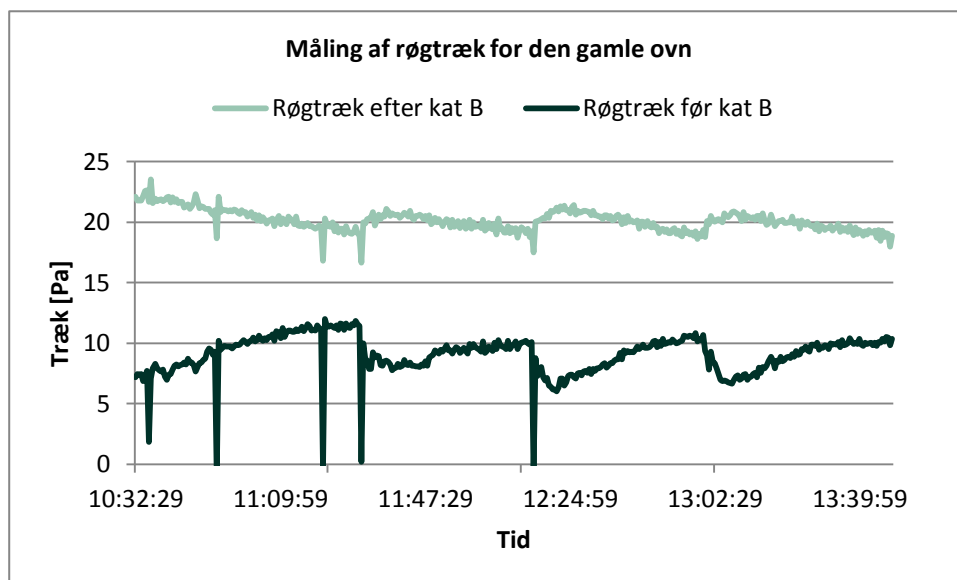
Katalysatoren har reduceret OGC med 60-70 % efter endt optænding og forfyring, hvilket er betydelig bedre end det blev observeret i præ-kvalifikationen i kapitel 2. Katalysator B er også i stand til at reducere CO med ca. 90 % og må anses som værende effektiv til reduktion af emissioner fra en gammel ovn.

4.2.4 Sammenligning af røgtræk

I forbindelse med de gennemførte miljømålinger er der målt røgtræk før og efter katalysatoren. Af nedenstående figurer fremgår røgtrækket under forsøgene fra optænding, FF samt 1. og 2. charge på den gamle ovn med katalysatorer. Hvis der sker en tildækning af katalysatoren, vil der ses en tendens til faldende røgtræk på kurven, der viser røgtræk før katalysatoren.



FIGUR 43: MÅLING AF RØGTRÆK VED FORSØG MED KAT A PÅ GAMMEL OVN



FIGUR 44: MÅLING AF RØGTRÆK VED FORSØG MED KAT B PÅ GAMMEL OVN

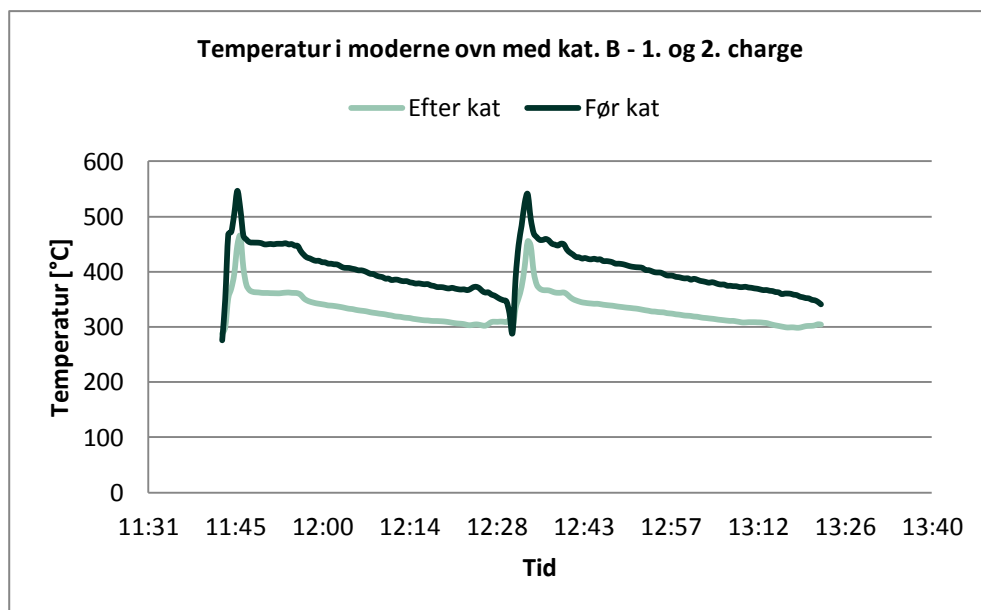
Generelt ses det, at trækket før katalysatorerne er lavest lige efter indfyring hvorefter det øges indtil næste indfyring. Forklaringen hertil findes i at afgasningen efter indfyringen er for voldsom til at røggassen fortløbende kan passere gennem katalysatoren. Der opbygges derfor et overtryk før katalysatoren, der aftager gennem nedbrændingsperioden indtil næste indfyring.

Røgtrækket er på katalysator A og B justeret ind til ca. 20 Pa. Der ses at være et tryktab på omtrentlig 10 Pa over katalysatoren. Det ses at tryktabet øges på katalysator A, således at det målte træk før katalysatoren sættes på bliver mindre og mindre i løbet af fyringscyklus.

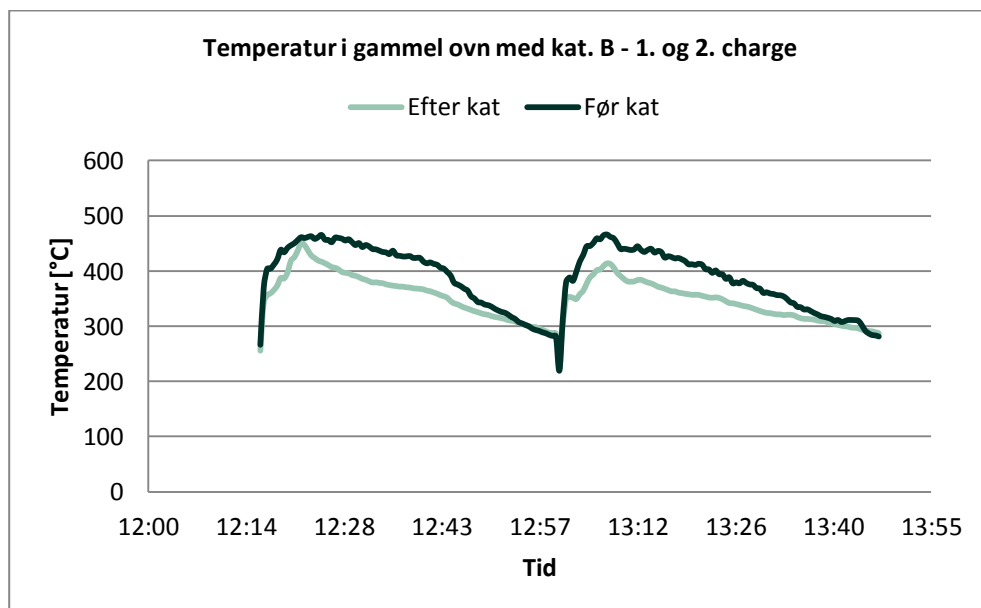
På katalysator B har det været nødvendigt at øge skorstenstrækket til 25 Pa. Røgtrækket før katalysatoren er på trods heraf kun omkring 5-7 Pa.

4.2.5 Sammenligning af temperaturer

I de udførte forsøg er der målt røggastemperatur før og efter katalysatoren sættes på. Som eksempel vises i nedenstående figurer temperaturerne ved afprøvning af katalysator B i henholdsvis ny og gammel ovn. Der er medtaget grafer for 1. og 2. charges.



FIGUR 45 TEMPERATURFORLØB I MODERNE OVN FØR OG EFTER KATALYSATOR B



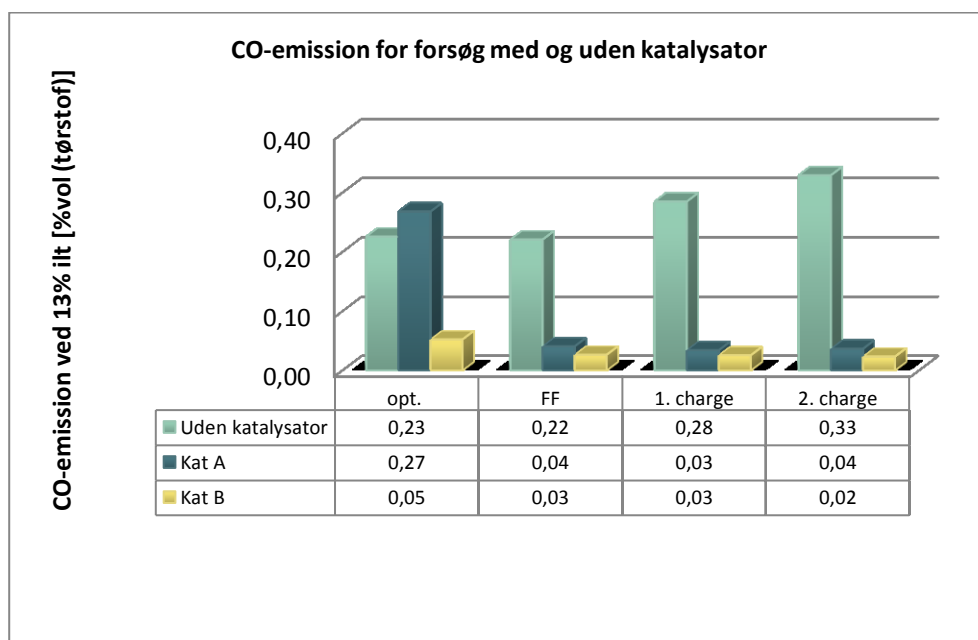
FIGUR 46 TEMPERATURFORLØB I GAMMEL OVN FØR OG EFTER KATALYSATOR B

Det ses af ovenstående figurer, at temperaturforløbet ved 1. og 2. charge er forskelligt for den moderne og den gamle ovn, mens middeltemperaturen over de to charges er omtrentlig den samme. At temperaturen i den gamle ovn ikke er højere, og heller ikke "peaker" som i den moderne ovn skyldes, at den gamle ovn ikke er tæt i pakningerne, og at der derfor trækker falsk luft ind i ovnen, så der sker en fortynding af røggassen. Det kan yderligere konstateres, at røggastemperaturen lige før katalysatoren når op på 450 °C eller derover i 10 til 15 min, hvilket er ønskværdigt i forhold til at opnå reduktion af OGC.

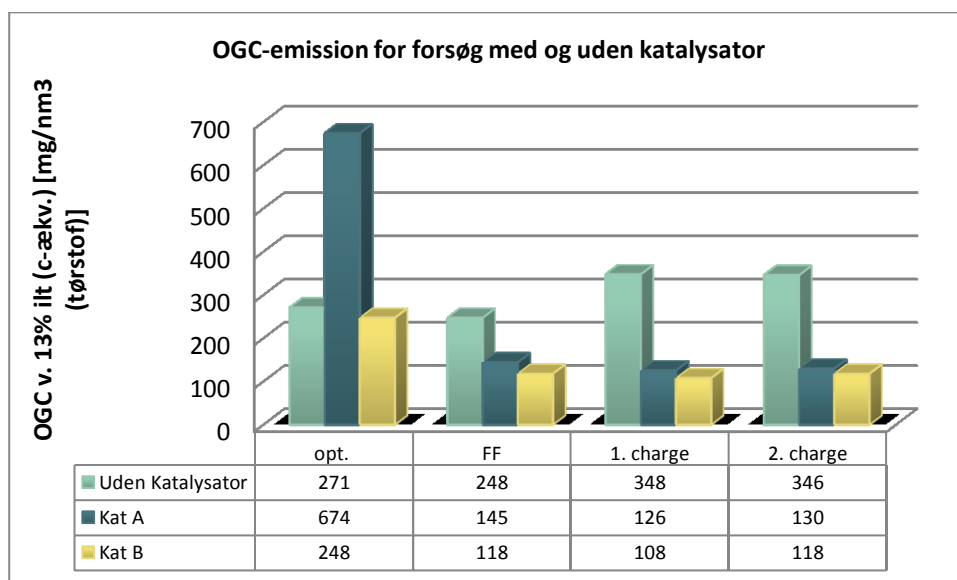
Temperaturen i røggassen efter katalysatoren er lavere end før og dermed er det ikke tydeligt, at en efterforbrænding i katalysatoren forårsager en temperaturstigning. Imidlertid er katalysatorenheden ikke isoleret under forsøget, og der sker derfor en betydelig varmeafgivelse til omgivelserne under røggassens passage mellem de to temperaturmålepunkter.

4.2.6 Sammenligning af katalysatorer

Herunder ses de samlede resultater for forsøgene for den gamle ovns CO- og OGC-målinger under henholdsvis optænding, forfyring, 1. charge og 2. charge.



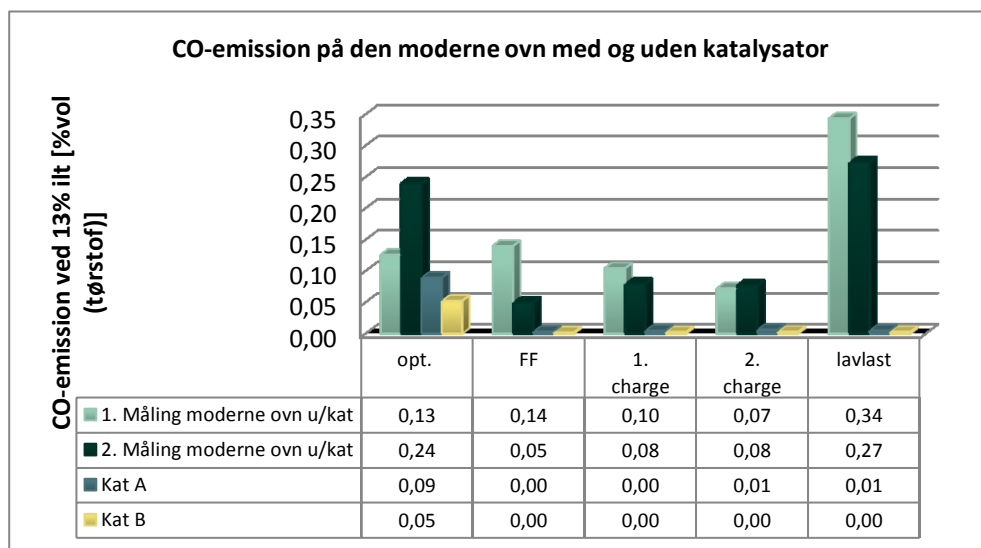
FIGUR 47: SAMLET CO MÅLINGER MED OG UDEN KATALYSATORER FOR DEN GAMLE OVN



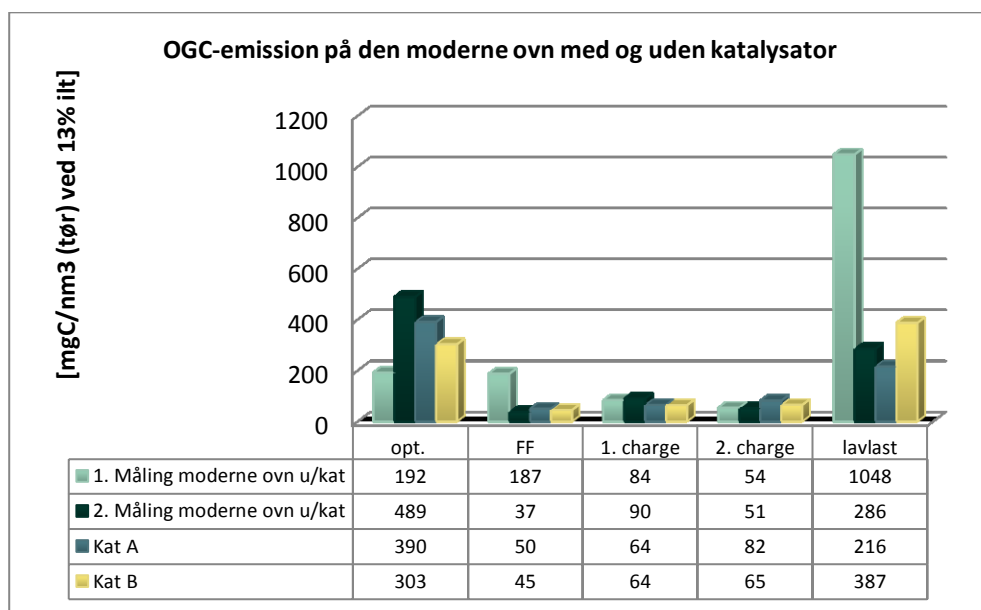
FIGUR 48: SAMLET OGC-MÅLINGER MED OG UDEN KATALYSATORER FOR DEN GAMLE OVN

De gennemførte forsøg på den gamle ovn viser en generel reduktion af CO på 80-90 % med katalysator. Kun i forbindelse med katalysator A under optænding ses der en uændret CO, hvilket tilskrives lavt træk og deraf manglende ilt. For alle katalysatorer gælder det, at reduktionen af OGC er størst i 1. og 2. charge. Temperaturen i røggassen er da ca. 450 °C. Der ses imidlertid også en reduktion under FF (mindst for katalysator C) og under optænding, dog igen med undtagelse af katalysator A. Reduktion af OGC er omkring 75% og under FF ca. 10-50 %, når forholdene er mest optimale.

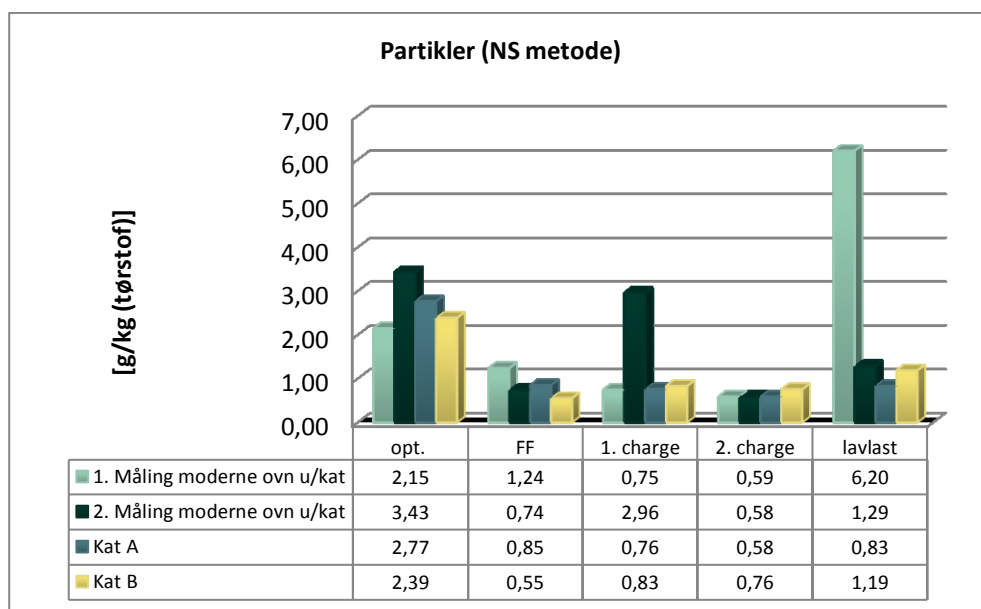
Efterfølgende grafer viser de samlede målinger af OGC, CO og partikler for den moderne ovn.



FIGUR 49: SAMLEDE CO-MÅLINGER MED OG UDEN KATALYSATORER FOR DEN MODERNE OVN



FIGUR 50: SAMLEDE OGC-MÅLINGER MED OG UDEN KATALYSATORER FOR DEN MODERNE OVN

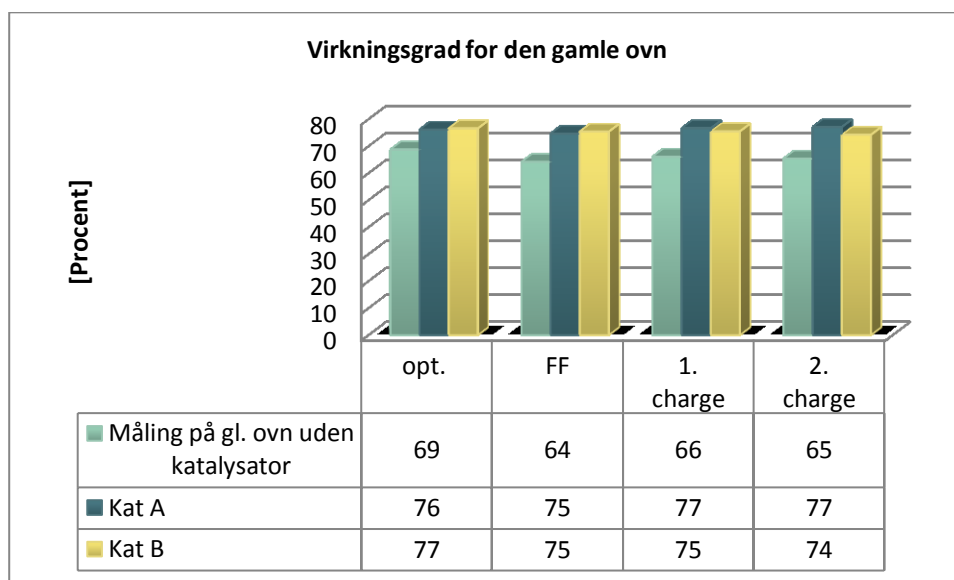


FIGUR 51: SAMLEDE OGC-MÅLINGER MED OG UDEN KATALYSATORER FOR DEN MODERNE OVN

Det ses på figurene, at der sker en reduktion af CO til under 100 ppm og under 50 ppm for samtlige af katalysatorerne. OGC og partikelniveauet forbliver tilnærmelsesvis uændret, hvis der sammenlignes med den bedste måling uden katalysator i hver enkelt charge.

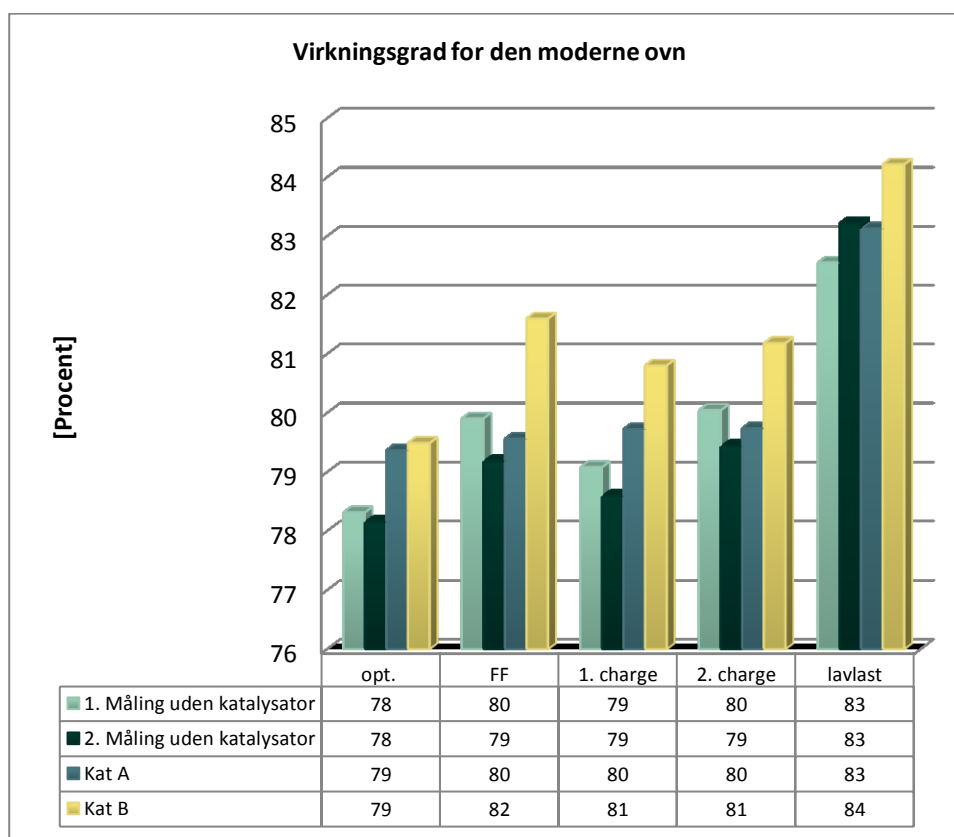
4.2.6.1 Virkningsgrad

På nedenstående figurer ses virkningsgraderne før og efter montering af katalysatorer.



FIGUR 52: VIRKNINGSGRADER FOR DEN GAMLE OVN MED OG UDEN KATALYSATORER

Der ses en øget virkningsgrad med katalysator. En af grundene hertil er, at trykdifferencen over katalysatoren forøger opholdstiden for røggassen i ovnen. Når opholdstiden for røggassen øges betyder det, at mere energi afsættes i ovnen og ikke skorstenen. Katalysatoren har også en indvirkning på bålet i ovnen som bliver mindre fordi der ikke er så stort et træk i skorstenen. Når bålet bliver mindre vil røgtemperaturen i skorstenen også blive lavere, hvilket har positiv indflydelse på virkningsgraden



FIGUR 53: VIRKNINGSGRADER FOR MODERNE OVN MED OG UDEN KATALYSATORER

Katalysatorerne viser en svagt forøget virkningsgrad for den moderne ovn ved montering af katalysator men med betydeligt mindre forskel end det ses for den gamle ovn.

4.3 Måling af PAH

I forbindelse med emissionsmålinger er der gennemført en serie undersøgelser med henblik på at bestemme PAH-emissionen fra den gamle brændeovn med katalysator, sammenlignet med målinger uden katalysator.

Polycykliske aromatiske hydrocarboner (PAH) er en gruppe tjærestofforbindelser, der emitteres som partikler og gasser til luften i forbindelse med forbrænding af f.eks. brænde. PAH er mistænkt for at være kræftfremkaldende, og brændeovne bliver peget på som en af synderne for et øget totaludslip af PAH i Danmark i perioden 2000-2006.

Målingerne er foretaget over en hel fyringscyklus, og er udført iht. metodeblad nr. MEL-10. GC/MS-analyse af ekstrakt/fortynding, "Bestemmelse af koncentrationer af PolycyclicAromaticHydrocarbons (PAH)", i strømmende gas. Polyuretanskum og filtre er ekstraheret ved en Soxhlet ekstraktion med henholdsvis 500 og 200 ml toluen i 16 timer. Det anvendte udstyr er beskrevet i Bilag D.

Følgende enkeltkomponenter er målt:

PAH-komponent	Ækvivalensfaktor
Naphthalen	0,001
Acenaphthylen	0,001
Acenaphthen	0,001
Fluoren	0,0005
Phenanthren	0,0005
Anthracen	0,0005
Fluoranthren	0,05
Pyren	0,001
Benz[a]anthracen	0,005
Chrysen	0,03
Benz[b,k]fluoranthener	0,1
Benz[e]pyren	0,002
Benz[a]pyren	1
Indeno[1,2,3]pyren	0,1
Benz[ghi]perylene	0,01
Dibenz[ah]anthracen	1,1

De enkelte komponenters ækvivalensfaktor er udtryk for stoffernes toksicitet. De enkelte komponenters toksicitet vægtes i forhold til Benz[a]pyren (BaP), som er et stof, der er mistænkt for at være kræftfremkaldende. Ved at vægte de målte emissionsværdier med de ovenfor anførte ækvivalensfaktorer kan værdierne adderes, hvorved emissionen udtrykkes ved et enkelt tal, som er et objektivi udsagn om emissionens skadepotentiale. Den samlede PAH-emission udtrykkes således i BaP-ækvivalenter.

	Uden kat BaP ækv. [µg/m ³ _n] ved 13 % O ₂	Kat B BaP ækv. [µg/m ³ _n] ved 13 % O ₂
Naphthalen	2,22	2,14
Acenaphthylen	0,83	1,16
Acenaphthen	0,02	0,06
Fluoren	0,06	0,15
Phenanthren	0,26	0,31
Anthracen	0,05	0,05
Fluoranthren	13,09	13,88
Pyren	0,15	0,16
Benz-a-anthracen	0,13	0,20
Chrysen	0,85	1,79
Benz-(b,K)- fluoranthener	10,24	14,30
Benz-e-pyren	0,05	0,06
Benz(a)pyren	33,57	22,71
Indeno-123-pyren	3,93	4,54
Benz-ghi-perylen	0,00	0,00
Dibenz-ah-anthracen	35,05	39,79
SUM	100	101

TABEL 5: PAH-EMISSION UDTRYKT IBAP ÆKVIVALENTER

Ud fra ovenstående ses, at katalysator B ingen synlig effekt har på PAH-niveauet gennem forsøgscyklus i forhold til cyklus uden katalysator.

Ved forsøget blev der også målt på katalysator A, men resultaterne for dette forsøg måtte forkastes grundet fejl.

4.4 Måling af partikelstørrelsesfordeling

Ud over de gravimetriske partikelmålinger i henhold til standarderne er der anvendt en Sanning MobilityParticleSizer (SMPS), som tæller antallet af partikler, og DustTrak DRX Aerosol monitor, som laver massebaseret partikelmålinger. Udstyret er nærmere beskrevet i Bilag E.

4.4.1 DustTrak

Massekoncentrationen er bestemt ved hjælp af måling med DustTrack. Målingerne er udført kontinuerligt over en hel fyringsdag.

I nedenstående figur er middelværdien af massen angivet for samme periode som norsk filter opsamling, dvs. hele perioden af hver enkelt fyring.

		Fyring	Optænding	Forfyring	1. charge	2. charge	3. charge(lav)
modern ovn	U/kat	Middelmasse [mg/m ³]	166,1	45,7	11,5	13,3	897,9
	U/kat		482,1	7,0	102,2	14,5	6,3
	Kat A		357,2	11,5	23,4	18,1	27,4
	Kat B		390,1	8,8	15,3	10,3	8,4
gammel ovn	Kat A	Middelmasse [mg/m ³]	ikke målt	62,7	107,7	68,7	
	Kat B		ikke målt	41,4	66,2	58,1	

FIGUR 54 MIDDELMASSEN MÅLT MED DUSTTRAK I FORTYNDERTUNNEL. MIDDELVÆRDIEN AF MASSEN ER ANGIVET FOR HVER ENKELT FYRINGSPERIODE. VED FYRINGER, SOM ER UNDERLAGT MED GRÅ FARVE, ER VÆRDIEN FOR LAV, DA DETEKTOREN VAR GÅET I MÆTNING I KORTE PERIODER

Det generelle billede viser, at den gamle ovn har en tendens til høj massekoncentration under forfyring såvel som under charges. Der ses ikke nogen forskel for de forskellige katalysatorer, hverken på den nye eller den gamle ovn. Der ses heller ikke nogen forskel på massekoncentrationen med og uden katalysator på den moderne ovn. Lavlast charge på den moderne ovn viser heller ingen forskel. Der er ikke målt massekoncentration uden katalysator på den gamle ovn.

4.4.2 SMPS

Antalskoncentrationen er målt med SMPS. Målingerne er udført kontinuerligt over en hel fyringsdag.

I nedenstående to figurer vises henholdsvis antalskoncentrationen og middelpartikelstørrelsen over hver enkelt fyringsperiode. De samlede målinger findes i Bilag F. Perioden er den samme som norsk filteropsamling af partikler.

		Fyring	Optænding	Forfyring	1. charge	2. charge	3. charge(lav)
modern ovn	U/kat	Middelantalskoncentration [# /cm ³]	4,23+E07	2,39+E08	4,65+E07	5,86+E07	9,02+E07
	U/kat		6,29+E07	4,84+E07	6,14+E07	8,03+E07	4,91+E07
	Kat A		4,59+E07	3,51+E07	6,52+E07	3,30+E07	6,66+E07
	Kat B		1,02+E07	7,51+E06	5,56+E06	3,70+E06	3,97+E06
gammel ovn	Kat A	Middelantalskoncentration [# /cm ³]	ikke målt	1,60+E07	2,25+E06	1,36+E06	
	Kat B		ikke målt	2,87+E07	3,49+E07	2,44+E07	

FIGUR 55 MIDDEL ANTALSKONCENTRATION FOR OVN MED OG UDEN KATALYTISK INDSATS. ANTALSKONCENTRATIONEN AF PARTIKLER ER MIDLET OVER HVER ENKELT FYRINGSPERIODE

	Fyring	Optænding	Forfyring	1. charge	2. charge	3. charge(lav)
U/kat	Middelpartikelstørrelse [nm]	84	53	47	56	72
U/kat		98	40	58	63	40
Kat A		88	44	56	44	59
Kat B		66	65	62	63	66
Kat A		ikke målt	105	114	99	
Kat B		ikke målt	72	94	94	

FIGUR 56 MIDDEL PARTIKELDIAMETER FOR OVN MED OG UDEN KATALYTISK INDSATS. PARTIKELSTØRRELSEN ER MIDLET OVER HVER ENKELT FYRINGSPERIODE

I lighed med observationerne fra massekoncentrationerne fra DustTrack'en er det generelle billede, at der ikke kan konstateres nogen tydelig forskel på fyringer med og uden katalysator for den moderne ovn. Ingen forskel kan heller konstateres på de anvendte katalysatorer, hverken når de anvendes på den gamle ovn eller på den moderne ovn. Dog er middel antalskoncentrationen for katalysator A på den moderne ovn knap faktor 10 lavere i hele fyringscyklussen end det ses ved de andre katalysatorer. Lignende forskel ses ikke med katalysator A på den gamle ovn, og grundlaget er for spinkelt til at drage nogen konklusion. Denne eneste tydelige forskel der kan observeres er forskellen mellem den gamle og den moderne ovn, når det gælder middelmassen målt med DustTrack, og middeldiameteren målt med SMPS. Her er det tydeligt, at den gamle ovn har partiker med større middelmasse og middeldiameter. Middelantallet afviger ikke mellem de to ovne.

4.5 Forsøg med simuleret brændekedel

Udover de gennemførte forsøg med en gammel og en moderne ovn, gennemføres forsøg på en simuleret brændekedel. Kedelforsøget har til formål at undersøge effekten ved eftermontering af en katalysatorenhed i røgstudsen i lighed med forsøgene på brændeovne, men skal i lige så høj grad undersøge effekten af katalysator ved langtidsdrift.

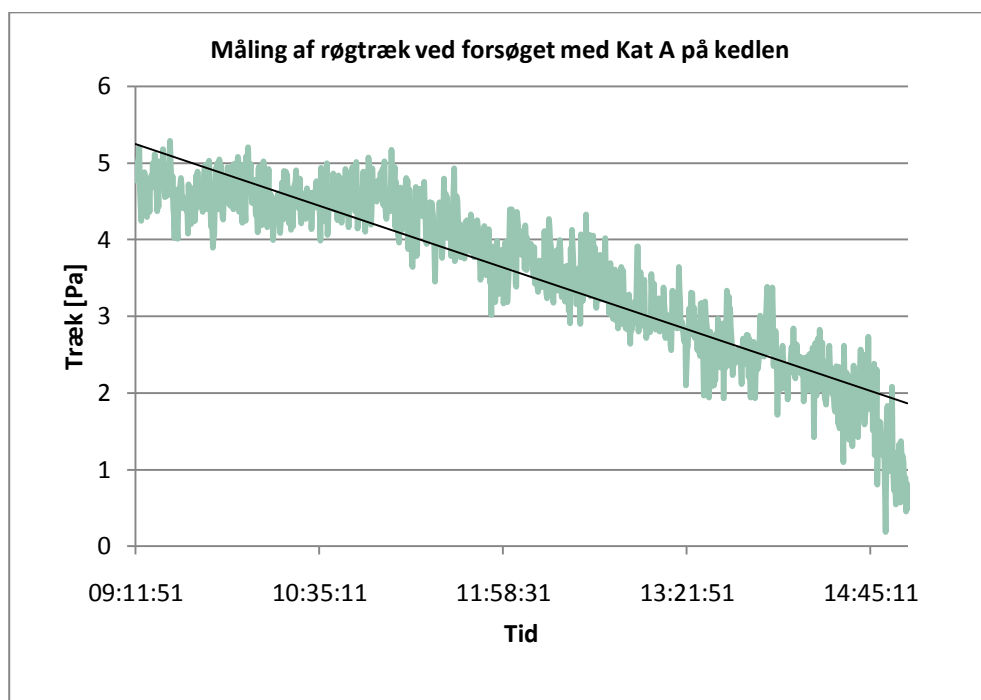
På baggrund af forsøgene i kapitel 2 er det besluttet ikke at anvende katalysator B idet røggastemperaturen fra kedlen vurderes at være for lav til at se nogen tydelig effekt på emissionerne. Røggastemperaturen i en brændekedel ligger typisk under 200 °C uden væsentlige forandringer i forbindelse med indfyring.

Forsøgene blev foretaget med en løspille brænder og en standard kedel idet pillebrænderen indreguleres til at have værdier svarende til en gennemsnitlig brændekedel. Værdier for den gennemsnitlige brændekedel er baseret på Teknologisk Instituts liste over godkendte biobrændselskedler typetestet efter DS/EN303-5. Anvendelse af en automatisk kedel frem for en manuel fyret kedel betyder, at der kan laves forceret forsøg med langtidsdrift.

I forsøget med katalysator A vistes tendens til tilstopning og efter blot 6 timer afbrydes forsøget.

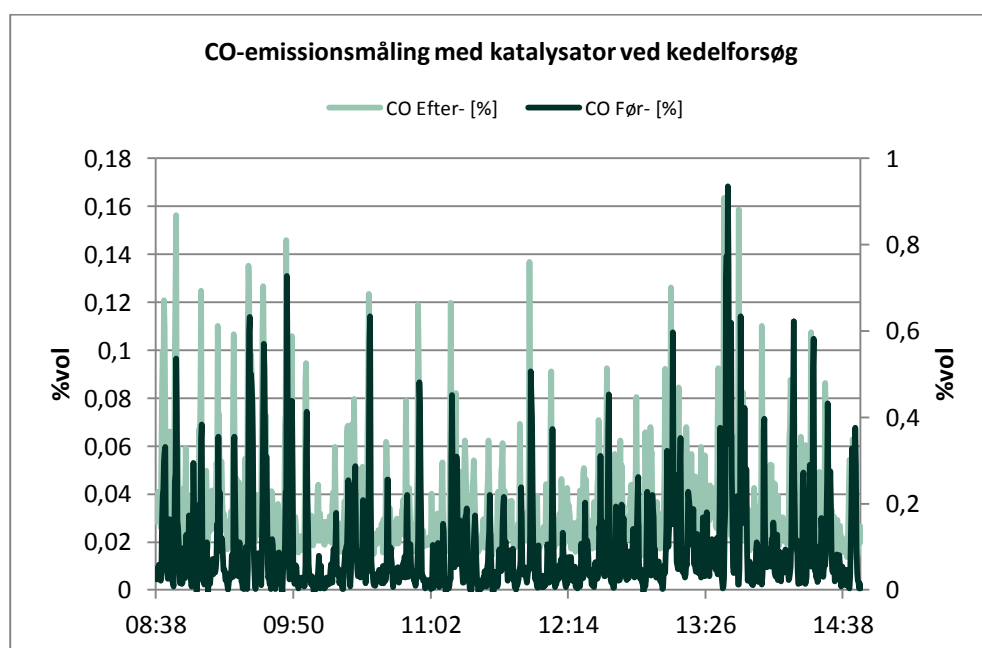


FIGUR 57 KATALYSATOR A TILSTOPPET EFTER 6 TIMERS FYRING I KEDLEN

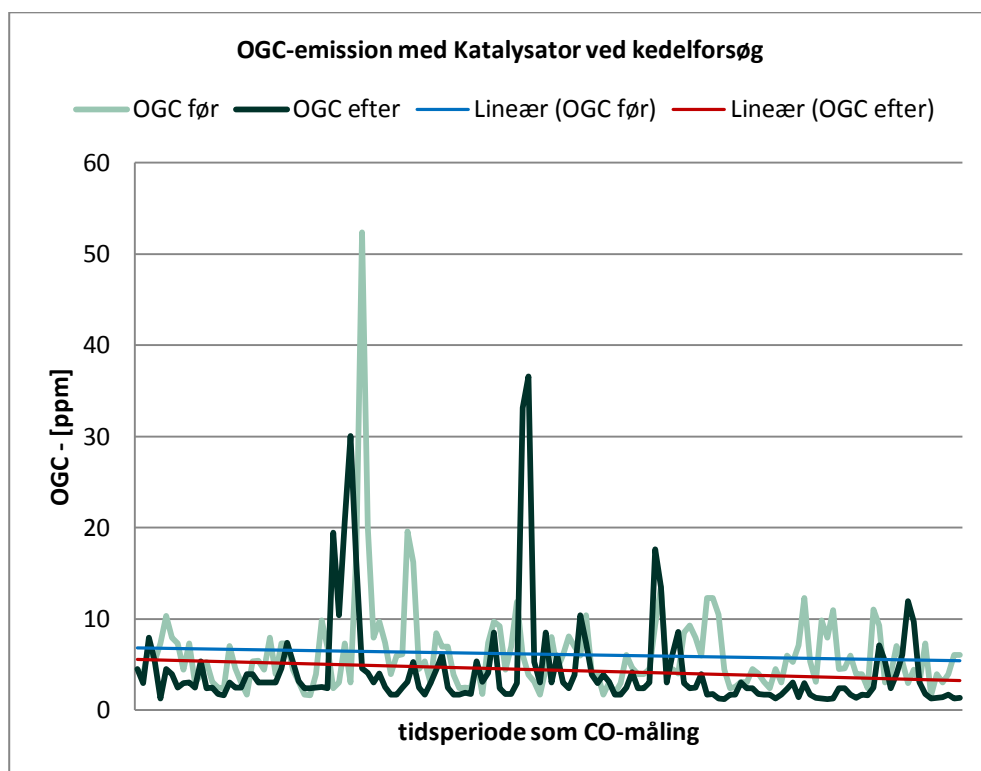


FIGUR 58: FALDENDE RØGTRÆK VED FORSØGET MED KATALYSATOR A PÅ KEDLEN

Der foretages målinger både før og efter katalysator. Resultaterne fra CO- og OGC-måling fremgår af nedenstående figurer.



FIGUR 59 CO-MÅLING VED FORSØG MED KATALYSATOR PÅ KEDLEN UNDER KONTINUERLIG DRIFT



FIGUR 60 OGC- MÅLING VED FORSØG MED KATALYSATOR PÅ KEDLEN UNDER KONTINUERLIG DRIFT

Det vurderes på baggrund af de udførte forsøg, at de undersøgte katalysatorer ikke er egnet til eftermontering i røgstudsene i underforbrændingskedler, idet tilstopning antageligt vil ske efter relativt få driftstimer. Tilstopningen er forårsaget af en lav røggastemperatur. Samtidig vurderes den opnåede emissionsreduktionen ikke at være væsentlig.

På samme vis som det gælder brændeovne, vil typegodkendte kedler ikke kunne få eftermonteret en katalysator i røgvejen i kedlen, da typegodkendelsen dermed ikke længere vil være gyldig. Montering af katalysator i brændeovne med placering, hvor røggastemperaturen er højere kunne eventuelt være af interesse, men skal i så fald ske forud for typegodkendelsen.

4.6 Sammenfatning

Katalysator monteret på den moderne brændeovn reducerer CO-emissionerne betydeligt med over 90 % både ved almindelig fyring og ved lavlast. Der ses ikke en entydig reduktion af OGC.

På den gamle ovn reduceres CO-emissionerne til et niveau, som er under niveauet for den moderne ovn uden katalysator. Også OGC niveauet reduceres betragteligt, omkring 50-75 % ved 1. og 2. charge. Der er ingen reduktion af OGC i optænding og kun en mindre antydning af reduktion ved forfyring. For den gamle ovn gør det sig gældende, at en fyringscyklus ikke indeholder en lavlast fyring, da det ikke var reguleringsteknisk muligt. Derfor kan de udførte charges betragtes som tilsvarende lavlast i den moderne ovn, altså antageligt den måde forbrugeren almindeligvis vil fyre på.

Virkningsgraden er svagt øget efter montering af katalysatorer på den moderne ovn. Resultat heraf tillægges ikke større vægt, da ændringen er svag og idet der vil være en naturlig variation i indfyringerne.

For den gamle ovn gælder det, at virkningsgraden hæves op til 10 % point ved at montere en katalysatorenhed. Virkningsgraden øges blandt andet på grund af længere opholdstid for røggassen og en reduceret forbrænding grundet reduceret røgtræk.

Det vurderes på baggrund af de udførte kedelforsøg med to katalysatorer, at de undersøgte katalysatorer ikke er egnet til eftermontering i røgstudsen i underforbrændingskedler, idet tilstopning antageligt vil ske efter relativt få driftstimer. Tildækningen er forårsaget af en lav røggastemperatur. Samtidig vurderes den opnåede emissionsreduktionen ikke at være væsentlig.

Tildækning af katalysatoren monteret på brændeovne ses især at være et problem ved den ældre ovn. Tildækningen er muligvis skyld i, at katalysatoren med de bedste resultater ved prækvalifikationen ikke har samme overbevisende resultater i test på den gamle brændeovn. På baggrund af risikoen for tildækning og de opnåede resultater ved forsøgene, vurderes det, at katalysator B fra Catator AB er den bedst egnede katalysator til eftermontering.

5 Diskussion og konklusioner

I projektet er der udvalgt 2 katalysatorer, som er testet først i en præ-kvalifikationstest og dernæst ved montering af katalysatorerne i en katalysatorenhed placeret på røgstudsens på henholdsvis en gammel og en moderne brændeovn. Placering af en katalysator i selve brændeovnen vil betyde en konstruktionsændring, hvorved en eventuel typegodkendelse vil falde bort. Da projektet omhandler eftermontering på eksisterende brændeovne, er det derfor alene relevant at undersøge katalysatorenheder placeret på røgstudsene.

Målinger viser, at eftermontering af katalysator på en gammel brændeovn kan reducere CO-emissionerne med 80-90 % til et niveau som er under CO-emissionen for en moderne ovn uden katalysator. Også OGC niveauet kan reduceres betragteligt. Mellem 50-75 % ved fyringer efter optændingen og forfyringen. Sammenlignes de målte OGC-værdier for en gammel ovn med katalysator med værdierne i en moderne ovn uden katalysator, vil der dog kunne opnås en større OGC reduktion ved at udskifte den gamle brændeovn med en moderne brændeovn. Virkningsgraden øges i projektet op til 10 % point ved at montere en katalysatorenhed på en gammel ovn. Virkningsgraden øges blandt andet på grund af længere opholdstid for røggassen og reduceret forbrænding, grundet reduceret røgtræk.

I projektet har montering af katalysator på røgstudsens af en moderne brændeovn reduceret CO-emissionerne med over 90 %, mens OGC næsten ikke er reduceret. Der er kun observeret en svag forøgelse af virkningsgraden. Ved "live-test", der er undersøgt som en lavlast situation, viser den moderne ovn samme billede.

Katalysatorer vurderes, på baggrund af de udførte forsøg i projektet, ikke at være egnet til eftermontering i røgstudsens i underforbrændingskedler, idet tilstopning antageligt vil ske efter relativt få driftstimer. Tilstopningen er forårsaget af en lav røggastemperatur. Samtidig vurderes den opnåede emissionsreduktionen ikke at være væsentlig.

En markeds-mæssig interesseafsøgning for katalysatorer til brændeovne viser bl.a. at slutbrugerens primære interesseområder er stor brugervenlighed og lav pris (kr. 800-1500). I projektet er der derfor udviklet en katalysatorenhed uden by-pass. De gennemførte forsøg viser, at mulighed for let adgang til rengøring og udskiftning vil være nødvendig. En videreudvikling af designet af MiljøKAT skal derfor indeholde en brugervenlig mulighed for at udtage katalysatoren.

De gennemførte forsøg viser endvidere, at katalysatoren fra CatatorAB er bedst egnet til eftermontering i ældre brændeovne, under hensyn til tryktab og emissionsreduktion. I de udførte forsøg på brændeovne er der anvendt 3 lag net af meshtal 8 med 3 mm afstand mellem hvert net. Der er ikke foretaget forsøg med hverken flere eller færre net, men det vurderes, at flere net vil medføre et øget tryktab, der kan resultere i røgtræksproblemer.

Bilag A – Monolithic pressure drop calculation

The pressure drop across a catalytic converter is for automotive purposes usually dominated by the pressure drop in the channels – with less than 10 % of the total pressure drop originating from gas contraction and expansion at inlet/exit (terms K_{in} and K_{out}) respectively (Majewski&Khair, 2006).

$$\Delta P_{ch} [Pa] = \left(4 \cdot f \cdot \left(\frac{L}{d_h} \right) + K_{in} + K_{out} \right) \cdot 0.5 \cdot \rho \cdot v^2$$

(A1)

$$\Rightarrow \Delta P_{ch} = \left(4 \cdot f \cdot \left(\frac{L}{d_h} \right) + \left(-0.415 \cdot \frac{A_f}{A} + 1.08 \right) + \left(1 - \frac{A_f}{A} \right)^2 \right) \cdot 0.5 \cdot \rho \cdot v^2$$

The friction factor can be expressed by A2 for the laminar flow regime.

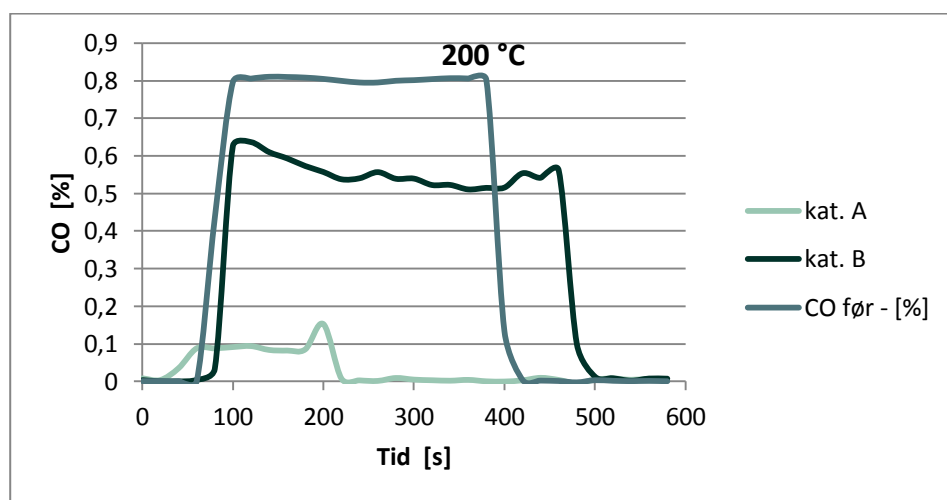
$$f = \frac{K}{Re} = \frac{K}{v \cdot d_h \cdot \rho / \mu}$$

Laminar i.e. $Re < 2100$ (A2)

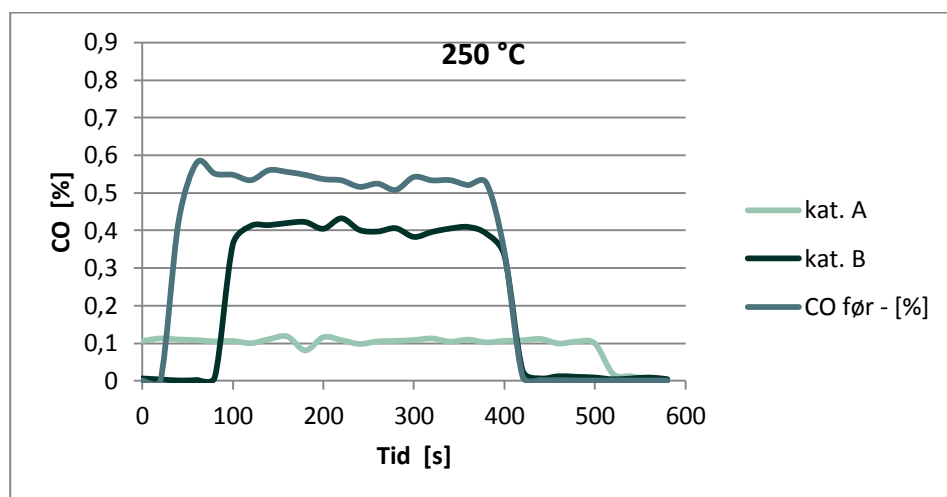
A_f/A :	Ratio of open area to total cross sectional area
d_h :	Hydraulic diameter [m]
f :	Fanning friction factor
K :	16 (round channel)
	14.23 (square chanel)
	13.33 (equilateral triangle)
L :	Substrate length [m]
P	Pressure drop [Pa]
v :	Gas velocity [m/s]
ρ :	Gas density [kg/m ³]
μ :	Dynamic gas viscosity [kg/m/s]

Bilag B – Prækvalifikation, katalysatorforsøg

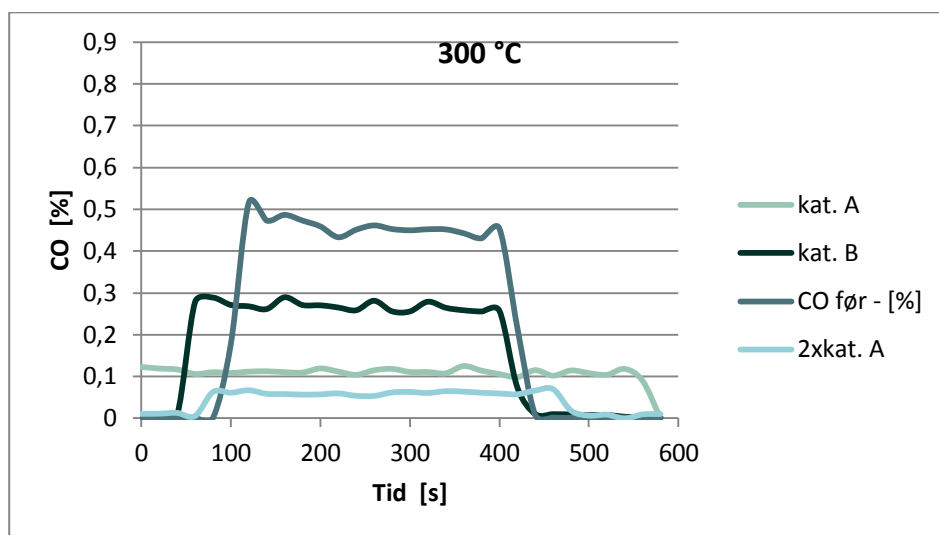
Udvalgte grafer fra prækvalifikation er vist nedenfor.



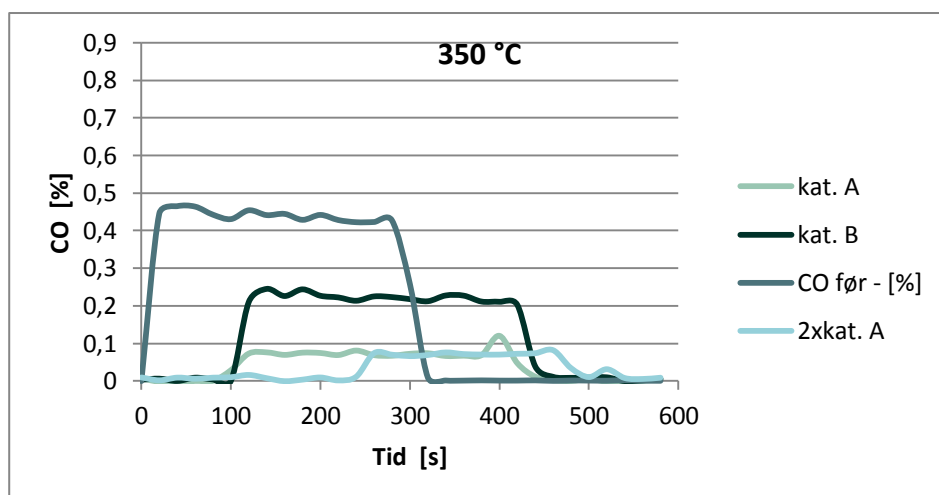
FIGUR 61: CO-MÅLINGERNE VED 200 °C



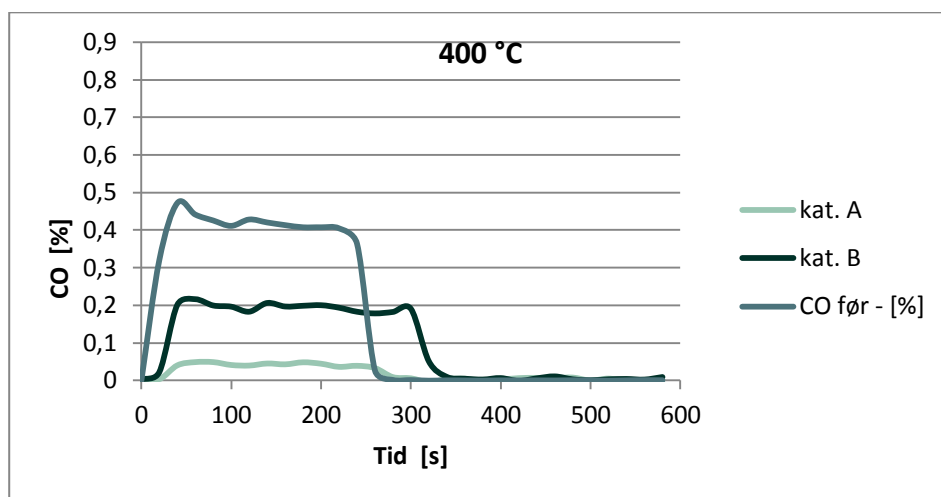
FIGUR 62: CO-MÅLINGERNE VED 250 °C



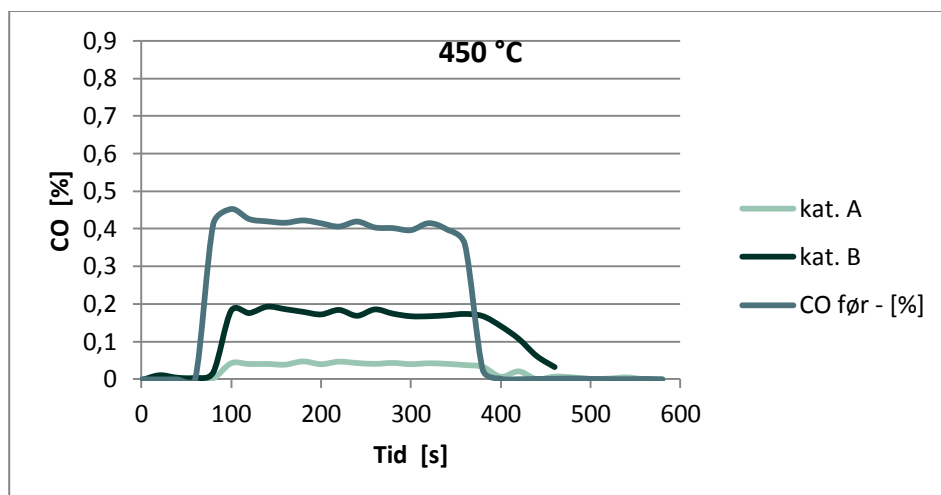
FIGUR 63: CO-MÅLINGERNE VED 300 °C



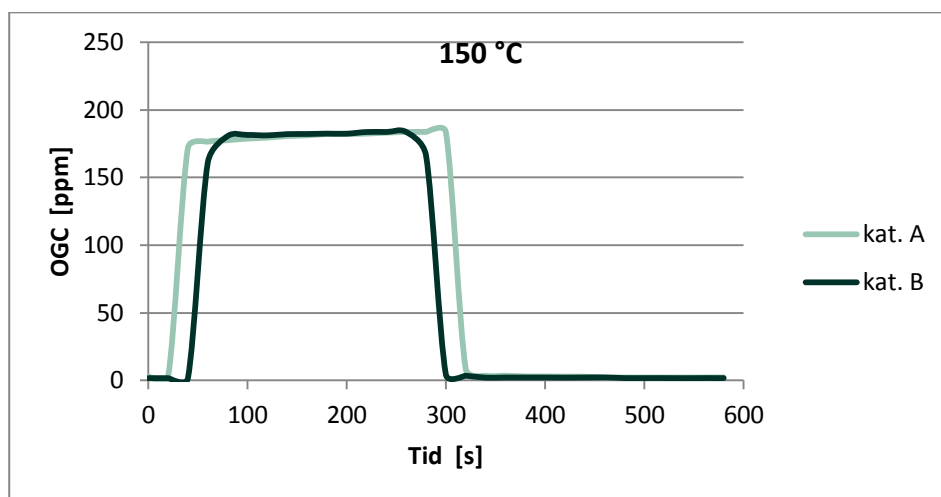
FIGUR 64: VISER FORSØGET FORETAGET VED 350 °C



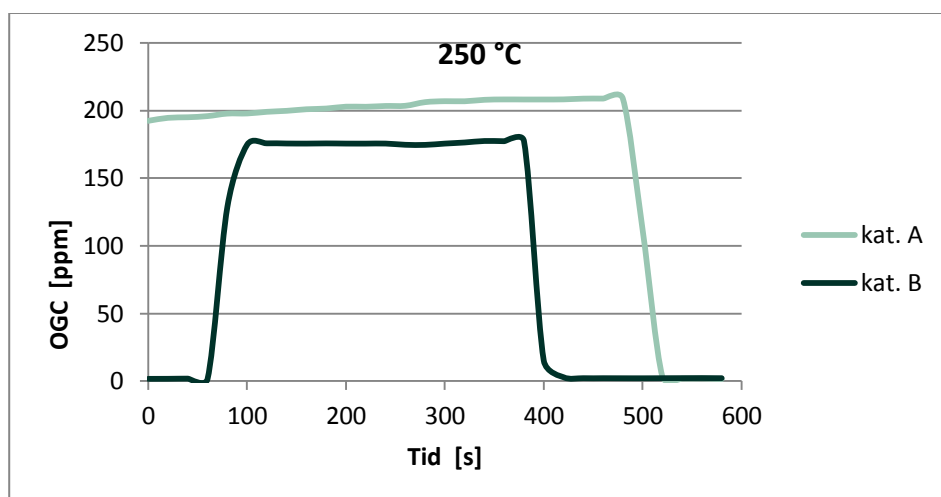
FIGUR 65: CO-MÅLINGERNE VED 400 °C



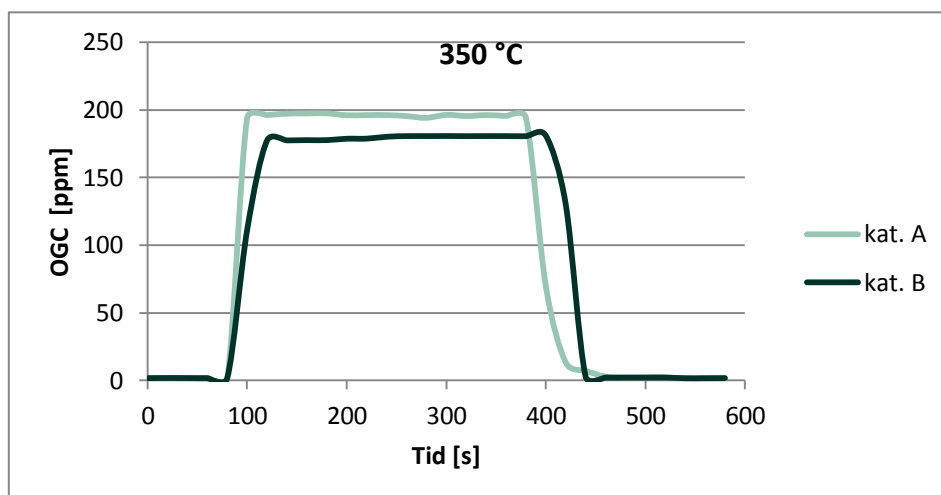
FIGUR 66: CO-MÅLINGERNE VED 450 °C



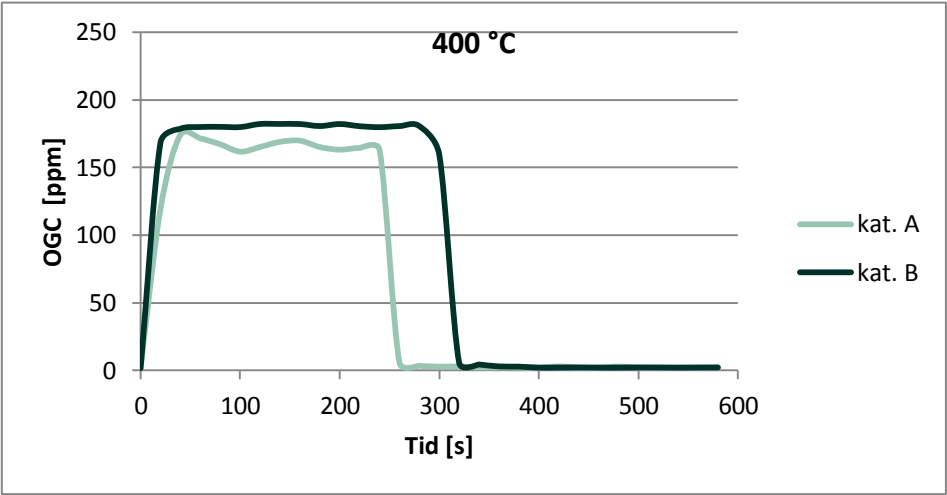
FIGUR 67: OGC-MÅLING VED 150 °C



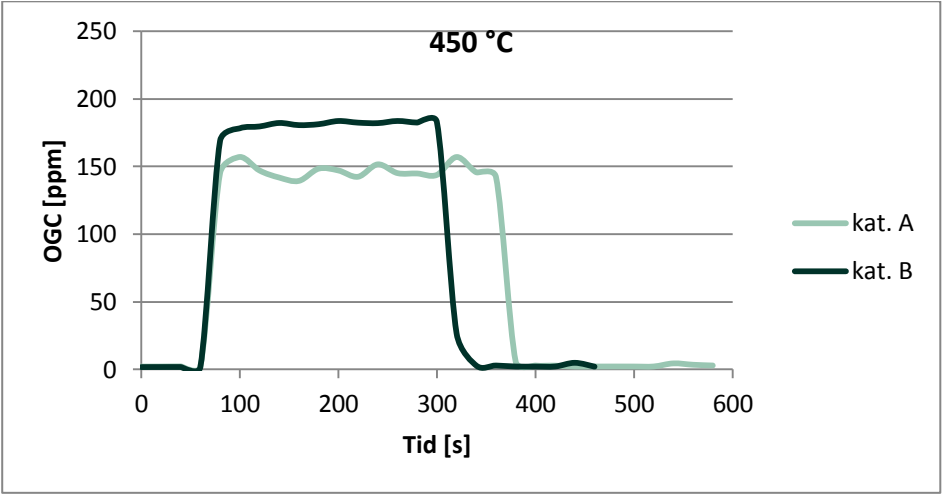
FIGUR 68: OGC-MÅLING VED 250 °C



FIGUR 69: OGC-MÅLING VED 350 °C



FIGUR 70: OGC-MÅLING VED 400 °C



FIGUR 71: OGC-MÅLING VED 450 °C

Bilag C – Interviewguide

Del 1. Det brede perspektiv / viden om slutbrugerne og markedet

Begynd denne del uden introduktion af produktet – med henblik på en bred og åben dataindsamling

1.1. Slutbrugernes behov og primære ”drivers” ved køb af brændeovne / ekstraudstyr

- a. Hvad er typisk det første en kunde tager op ved køb af brændeovn?
- b. Beskriv de emner, der fylder mest hos kunderne.
- c. Hvad er dit indtryk af kundernes viden om brug/håndtering af brændeovne?
 - Har de brug for vejledning?
 - Hvis ja, hvilken form for vejledning?
- d. Prøv at beskriv dine kunder i forskellige ”typer” – i forhold til deres vidensniveau, behov og efterspørgsler?
- e. I hvilket omfang diskuteres miljømæssige emner i en salgssituation?
 - Hvad er dit indtryk af dine kunders tanker omkring emissionsudledning?
 - Hvor miljøbevidste er dine kunder?
 - Hvordan er interessen for at have en mere ”grøn profil”
- f. Hvordan tror du den umiddelbare reaktion vil være fra dine kunder, hvis du foreslår dem ekstraudstyr til deres brændeovn?
- g. Hvorvidt tror du, at det kan have indflydelse på brugeradfærden, hvis der eftermonteres en miljøforbedrende løsning til eksisterende brændeovne?

1.2 Generelle markedsmæssige input (trends og salgstendenser)

- a. Hvad karakteriserer de mest populære typer brændeovne?
- b. Hvad er typisk det bedste salgsargument?
- c. Introducerer du emner for kunden, som kunden ikke i udgangspunktet var opmærksom på?
 - Hvis ja, hvilke og hvorfor?
- d. I hvilket omfang beskriver du miljømæssige egenskaber ved brændeovnene?
- e. Hvordan er efterspørgslen efter Svanemærkede brændeovne?
 - Spørger dine kunder direkte efter dem?
 - Introducerer du kunderne for mærket?
 - Hvordan oplever du dine kunders generelle viden om Svanemærkede brændeovne?

Del 2. Det snævre perspektiv / det konkrete produkt

Begynd denne del med at fortælle lidt om produktets primære egenskaber/produktets formål samt vise prototypen frem.

2.1. Input til katalysatoren som produkt

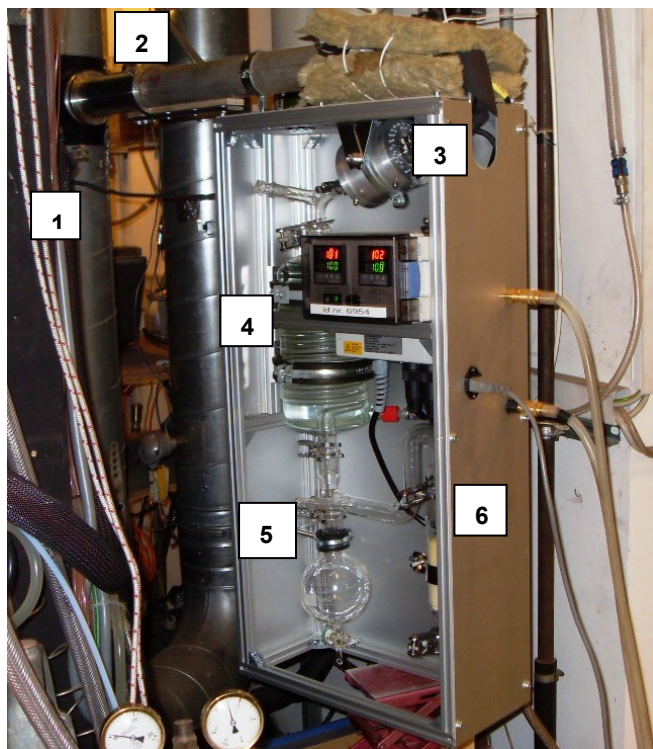
- a. Katalysatoren vil kræve instruktion, og der vil være behov for rengøring og udskiftning – hvordan forestiller du dig, at det vil blive modtaget?
- b. Hvad betyder katalysatorens udseende?
- c. Der ønskes så vidt muligt en ”nem brugerhåndtering” – hvilke krav stiller det til produktet?
- d. Hvordan vurderer du modellen, som den står i dag?
 - Hvad ser du som produktets største udfordring?
(vil kunder f.eks. betragte den som ”besværlig”/”farlig”/”æstetisk forstyrrende”?)
 - Hvad ser du som produktets største fordele?
- e. Vil det betyde noget for produktet, hvis der fulgte en kuliltealarm med?
- f. Hvordan ser du skorstensfejerens rolle i forhold til dette produkt?
 - F.eks. i forhold til montering, kontrol, rengøring osv.
- g. Vil et manuelt betjent bypass være realistisk i den daglige brug af brændeovnen?
- h. Hvilken form for vejledning vil dette produkt kræve?

2.2. Input om markedsmuligheder (prisestimer, salgbarhed)

- a. Hvordan vurderer du salgbarheden af dette produkt? (vil kunderne betale for det?)
 - Er der efter din mening noget, der kan forbedre salgbarheden?
 - Hvilke argumenter ville du bruge for at sælge en katalysator?
 - Hvilken ”type” kunde vil et produkt som dette tiltale mest?
- b. I hvilket omfang vil et vedligeholdelseskrao have indflydelse på salg?
- c. Vil du kunne sælge en katalysator til eftermontering til slutbrugere, der allerede har brændeovn?
- d. Vil kunden købe en ovn, hvis den fra starten var udstyret med katalysator?
- e. Hvad vil være et realistisk prisniveau (med/uden montering)?

Bilag D – PAH-målinger

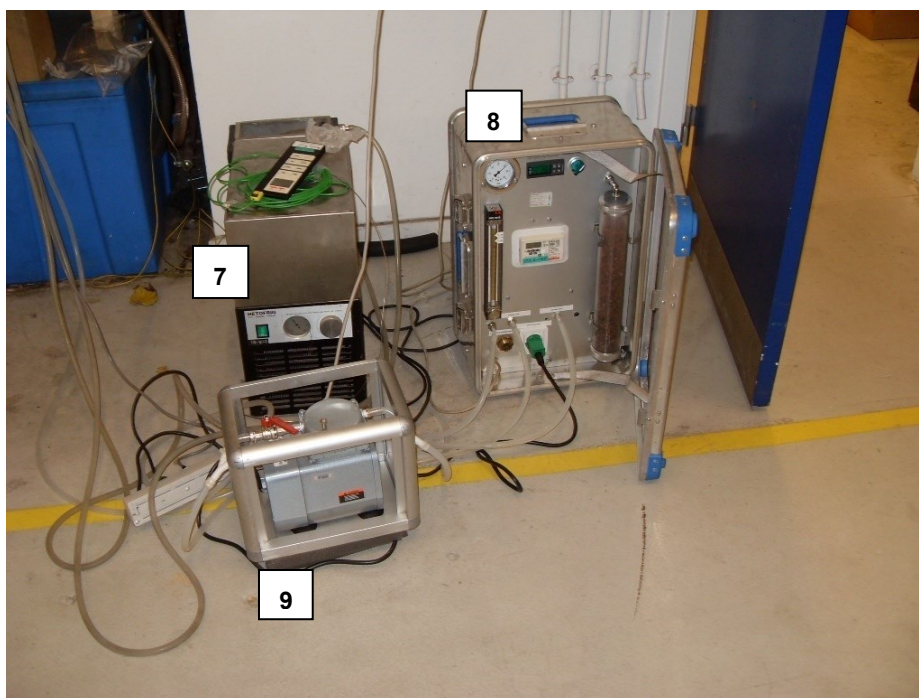
Beskrivelse af det anvendte udstyr til PAH-måling.



FIGUR 72. PAH MÅLEUDSTYR.

Pos.	
1	Røggaskanal
2	Opvarmet prøvetagningssonde (glas)
3	Ovn med partikelfilter
4	Vandkølet glasrørssvaler
5	Kondensbeholder
6	Adsorption af VOC (PUF)

Fra røggaskanalen (1) udsuges en delmængde via en opvarmet glassonde, som er anbragt i et varmeisoleret stålør (2). Den udsugede røggas passerer et opvarmet kvartsuldfilter, som er anbragt i en ovn (3). Her udskilles partikler og organiske substanser, som måtte være hæftet til partiklerne. Gasformige stoffer passerer filteret, hvorefter de bliver afkølet i en glasrørssvaler (4). Vand- og tjæredampe kondenserer i svaleren, hvorefter kondensatet løber ned i glaskolben (5). Røggassen, som stadig indeholder flygtige bestanddele (VOC), passerer en glaskolbe (6), som er fyldt med polyuretanskum (PUF). Her udskilles de sidste flygtige organiske komponenter. Efter hver måling skylles prøvetagningsudstyret med acetone og toluen. Udsugning, køling og konditionering af røggasprøven sker vha. udstyr, som er vist i Figur 73. På laboratoriet ekstraheres filter og PUF, hvorefter ekstrakterne, kondensatet og skyllevæsken analyseres for PAH ved hjælp af GC/MS.



FIGUR 73: TILBEHØR TIL PAH-MÅLEUDSTYR.

Pos.	
7	Køleaggregat for vand
8	Gasvolumen – konditionerings- og målemodul
9	Vacuumpumpe

Målingerne af PAH på den gamle ovn, som tidligere nævnt viste en reduktion i PAH niveauet ved indsættelse af katalysatorerne, herunder ses totalen for den gamle ovn med kat A, C og uden katalysator monteret. Det målte indhold af de 16 udvalgte PAH'er er summeret og gengivet i tabellen i rapporten kapitel 4.

De enkelte komponenters ækvivalensfaktor er udtryk for stoffernes toksicitet. De enkelte komponenters toksicitet vægtes i forhold til Benz[a]pyren (BaP), som er et stof, der er mistænkt for at være kræftfremkaldende. Ved at vægte de målte emissionsværdier med de ovenfor anførte ækvivalensfaktorer kan værdierne adderes, hvorved emissionen udtrykkes ved et enkelt tal, som er et objektivi udsagn om emissionens skadepotentiale. Den samlede PAH-emission udtrykkes således i BaP-ækvivalenter.

Bilag E – partikelmålinger

Specielt partikelemissionen vil være i fokus i miljømålingerne. Udover de gravimetriske partikelmålinger i henhold til standarderne, som omtalt i afsnit 6.1.1. er der anvendt en Sanning MobilityParticleSizer (SMPS), som tæller antallet af partikler, og DustTrak DRX Aerosol monitor, som laver massebaseret partikelmålinger.

Sanning MobilityParticleSizer - SMPS

SMPS tæller partikler i op til 128 fraktioner i størrelsesintervallet 2-1000 nm. Måleudstyret giver en præcis partikelstørrelsesfordeling og en antalskoncentration. Da instrumentet tæller enkelte partikler og ikke måler den totale masse kan indholdet af nanopartikler bestemmes meget præcist, selv i lave koncentrationer på trods af eventuel tilstedeværelse af større partikler.

Måling af nanopartikler i brændeovnsrøg udgør en særlig udfordring grundet den relativt høje emissionskoncentration. Det er derfor nødvendigt at foretage en kontrolleret fortynding af røgen inden SMPS-målingen udføres. Målingernes reproducerbarhed kan forbedres ved at anvende en cyklon efterfulgt af en opvarmet fortyndingstunnel foran SMPS'en, som skitseret herunder.

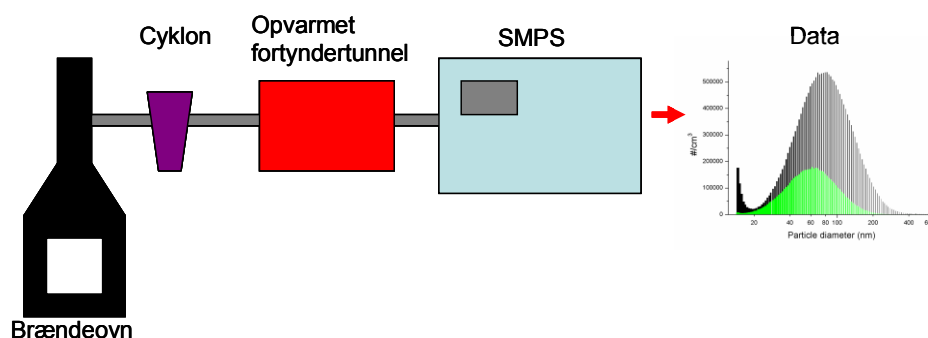


Illustration af partikelmåling med SMPS

Cyklonen sikrer, at partikler med en diameter over 2.500 nm fraskilles, så disse ikke aflejres i det efterfølgende fortyndingsudstyr eller i måleinstrument. Der vil blive anvendt en opvarmet cyklon udført i rustfrit stål, hvilket sikrer, at nanopartikler passerer uhindret igennem.

Fortyndingen sikrer, at koncentrationen af nanopartikler, der når frem til SMPS'en, ikke overstiger grænsen for, hvad instrumentet kan måle samt at flygtige stoffer, som f.eks. vanddamp, ikke kondenserer på nanopartiklerne. Teknologisk Institut råder over en opvarmet roterende disk-fortynder, der er udviklet til at fortynde aerosoler med en partikeldiameter i intervallet 10-1000 nm. Fortyndingsudstyret er robust og kan fortynde røggasser med en faktor 3000 og operere i temperaturområdet 0 – 200° C. Dette udstyr har bl.a. været brugt i et større projekt i samarbejde med DMU til emissionskortlægning af nanopartikler fra dieselskøretøjer, hvilket har været med til at opbygge en unik ekspertise hos Teknologiske Institut inden for måling af nanopartikler i røg med høje partikelkoncentrationer.

Det fysiske princip bag SMPS-målingen er som følger: en impactor, som er koblet på SMPS'ens indgang, fanger partikler > ca. 1 µm. De mindre partikler passerer igennem impactoren, hvorefter

de neutraliseres og tilordnes en kendt størrelsesfordeling ved at passere en radioaktiv Kr-85-kilde. Partiklerne udvælges efterfølgende i en DifferentialMobility Analyzer (DMA) på baggrund af deres elektriske mobilitetsdiameter. Man har således udvalgt partikler i et meget snævert størrelsesinterval. De udvalgte partikler tælles efterfølgende i en CondensationsParticleCounter (CPC) ved detektion af det spredte lys fra partiklerne i en fotodetektor. I det specifikke setup med måling i fortyndingstunnel efter brændeovn er valgt en SMPS-konfiguration, hvor der skannes med fire minutters varighed i et størrelsesinterval 14 – 724 nm.

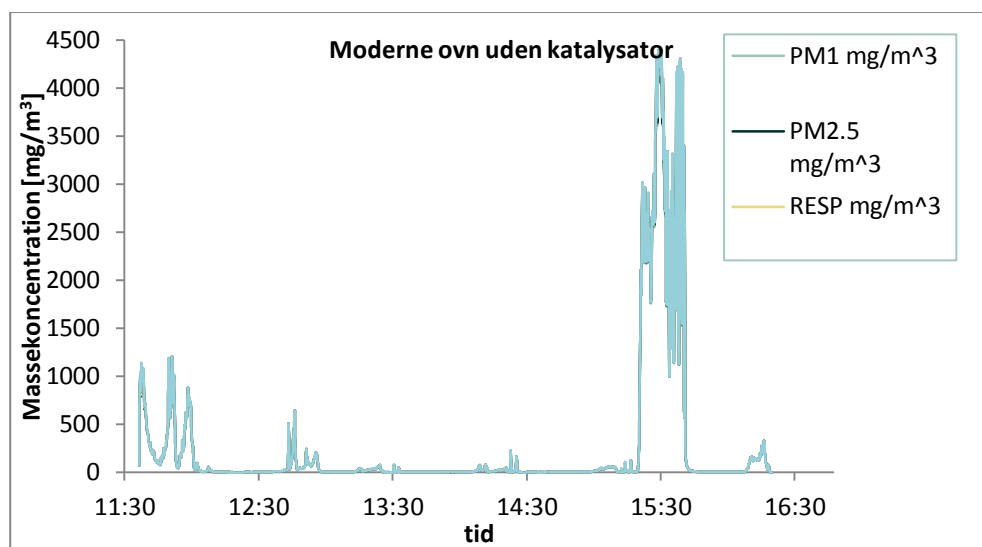
DustTrak DRX Aerosol monitor

DustTrak DRX giver modsat SMPS-målinger en massebaseret partikelmåling. Partiklerne måles simultant i fem størrelsesfraktioner: PM₁, PM_{2,5}, PM₄, PM₁₀ og total PM eller TSP, hvor PM står for Particulate Matter og TSP for Total SuspendedParticulates. PM 1 betyder eksempelvis masse af partikler med en diameter mindre end 1 µm. Instrumentet dækker et koncentrationsområde på 0,001 – 150 mg partikler pr. m³, og en måling kan foretages for hvert sekund. Der er således tale om en reel onlinemåling.

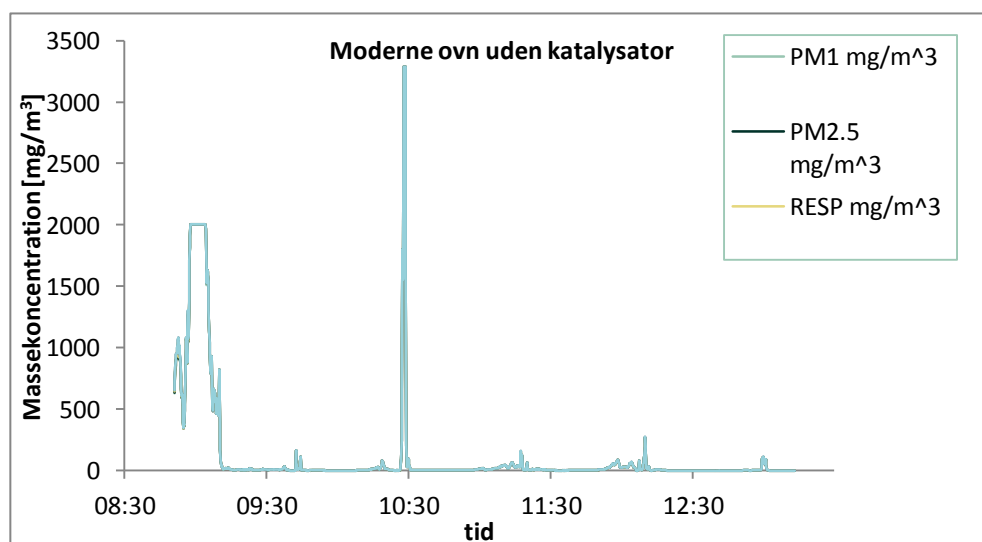
Detektionen foregår optisk ved at det spredte lys fra partiklerne fokuseres ind i en fotodetektor, hvor det omsættes til en spænding. Det gennemsnitlige spændingssignal kan for PM 2.5-partikler konverteres til et masesignal ved at kalibrere op mod en kendt aerosol. Spændingsværdien af signalet for de enkelte partikler måles som enkelte spændingspulser. Disse pulser kan gennem modellering oversættes til en størrelsesfordeling med de fem intervaller PM₁, PM_{2,5}, PM₄, PM₁₀ og TPM.

Bilag F – DustTrak og SMPS data

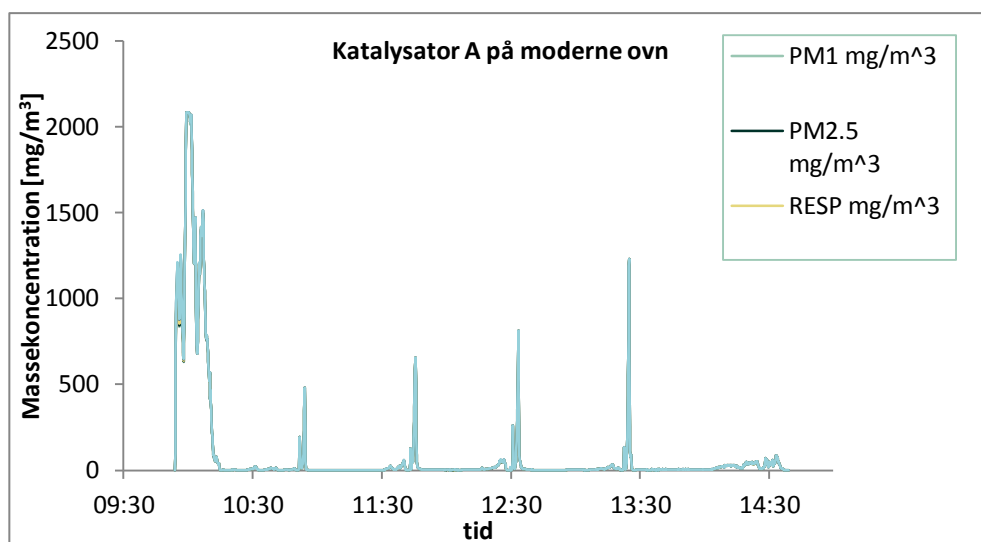
Nedenfor er vist grafer med partikelmasse målt med DustTrak over tid. I alle fyringer måles partikelmassen stort set kun som PM1, hvilket afspejles i det faktum, at kurverne overlejres.



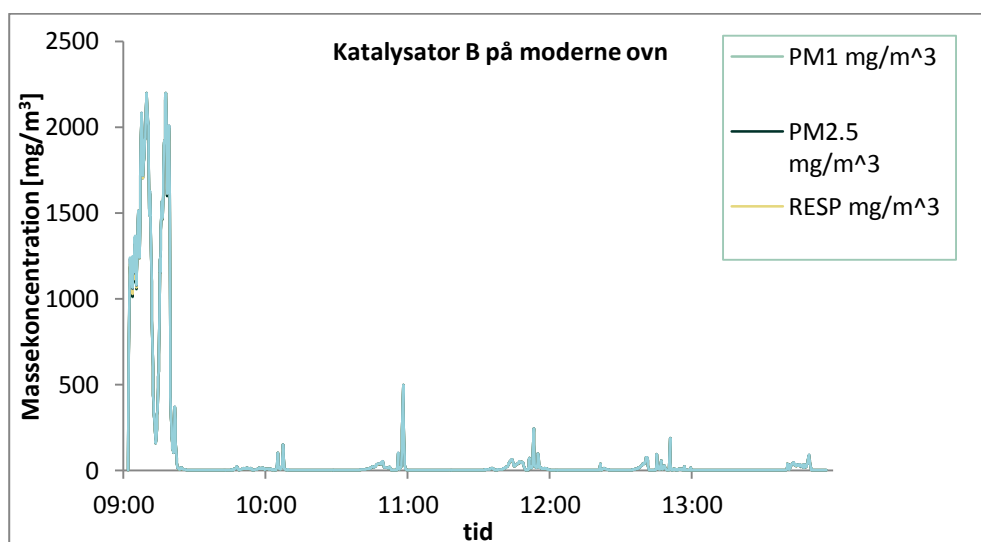
Massekoncentration som funktion af tid for ovn uden katalytisk indsats



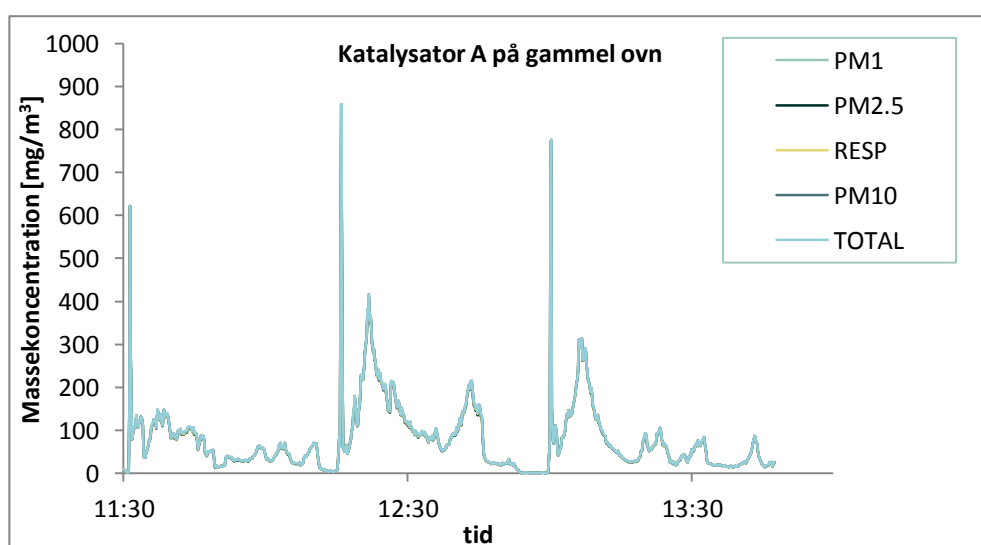
Massekoncentration som funktion af tid for ovn uden katalytisk indsats



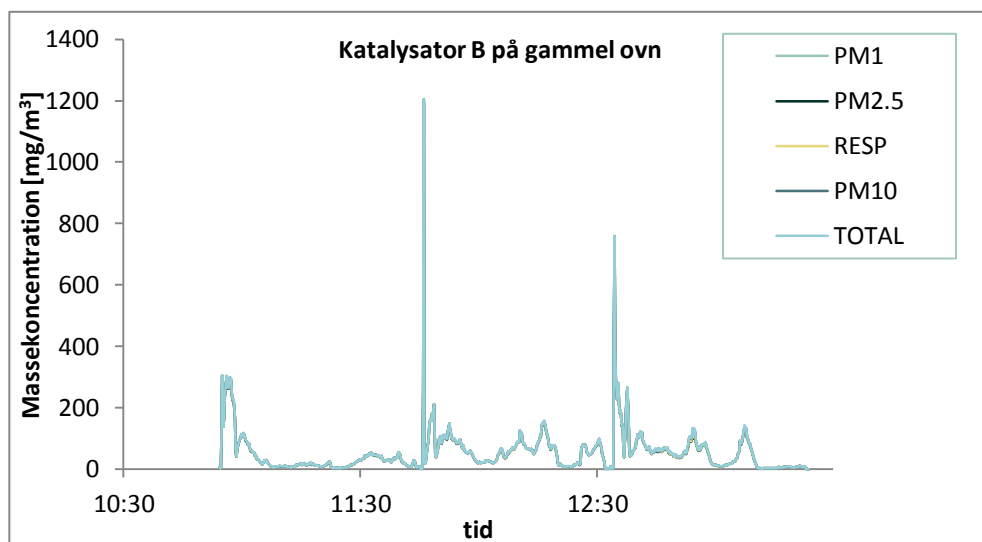
Massekoncentration som funktion af tid for ovn med katalytisk indsats (A)



Massekoncentration som funktion af tid for ovn med katalytisk indsats (B)



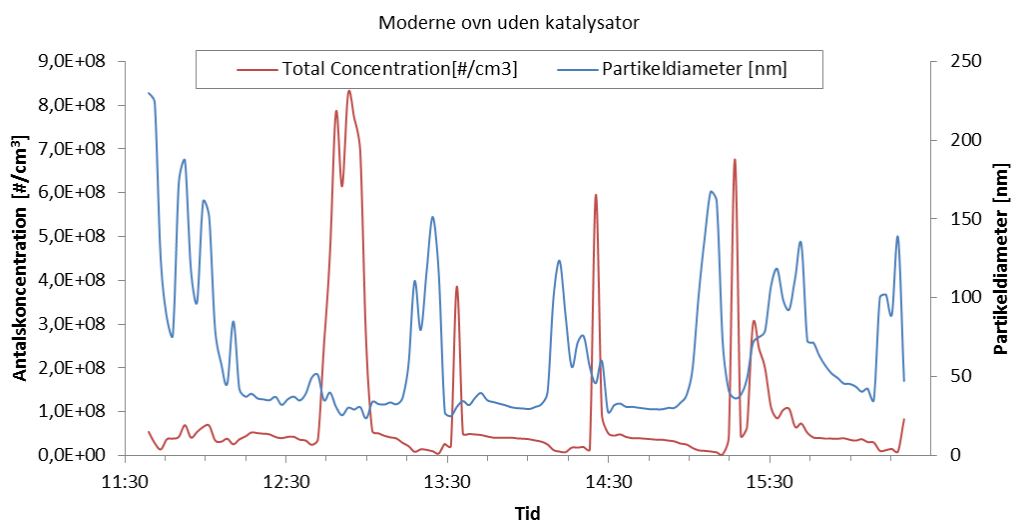
Massekoncentration som funktion af tid for ovn med katalytisk indsats (A)- forfyring til 2. charge



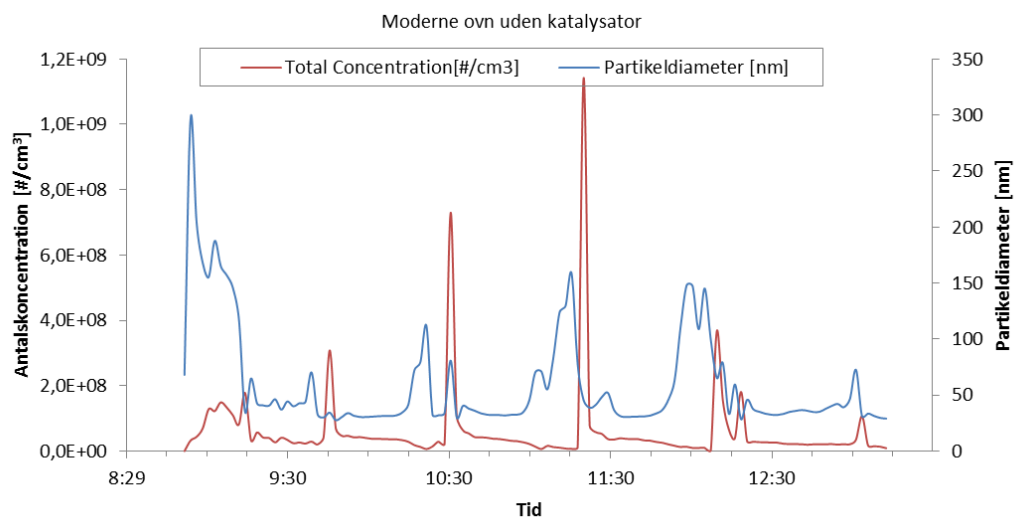
Massekoncentration som funktion af tid for ovn med katalytisk indsats (B)- forfyring til 2. charge

SMPS data

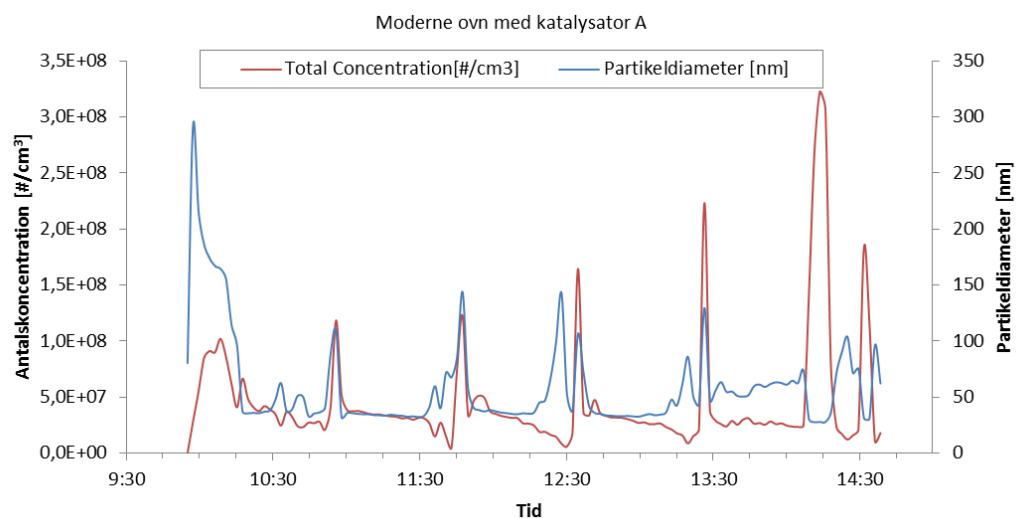
Antalskoncentration og partikeldiameter over tid er vist på de efterfølgende grafer.



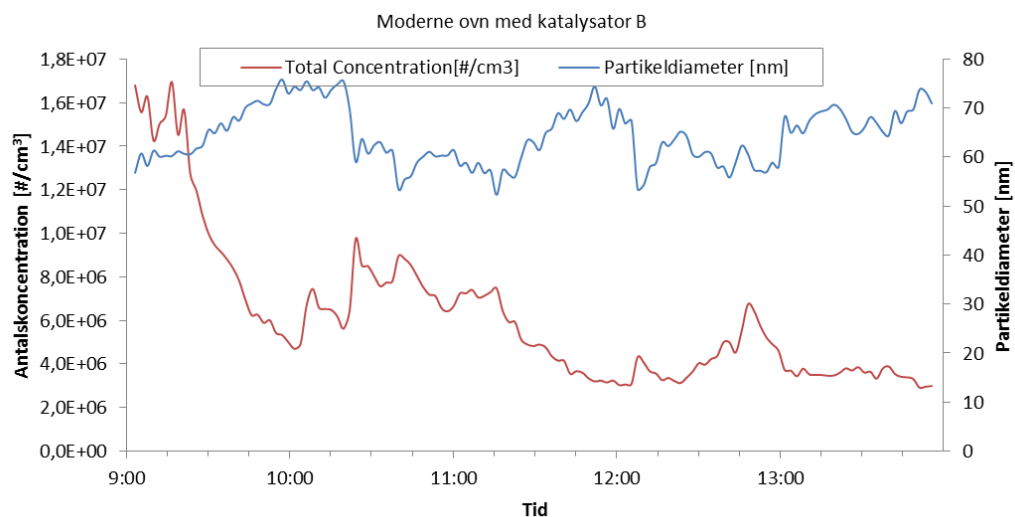
Antalskoncentration og middel partikeldiameter som funktion af tid for moderne ovn uden katalytisk indsats



Antalskoncentration og middel partikeldiameter som funktion af tid for moderne ovn uden katalytisk indsats

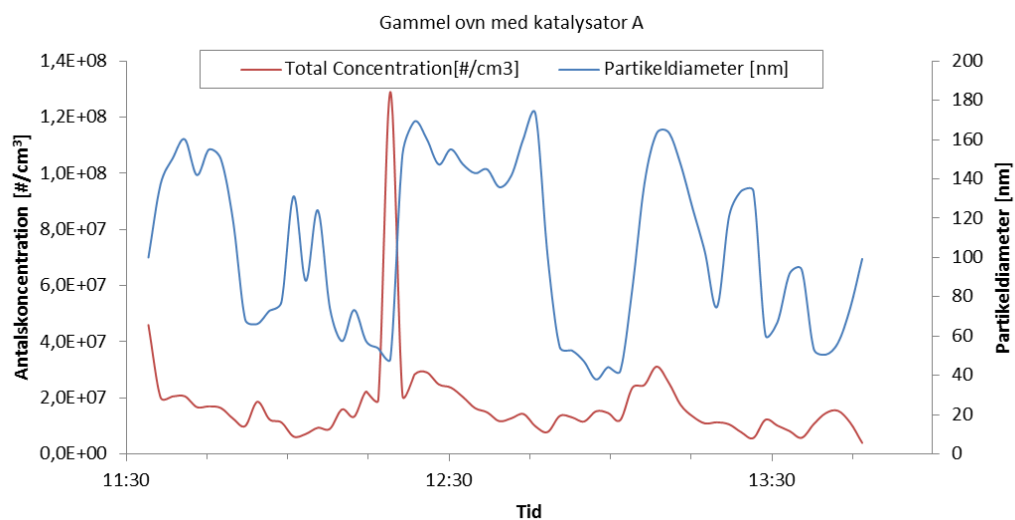


Antalskoncentration og middel partikeldiameter som funktion af tid for moderne ovn med katalytisk indsats (A)

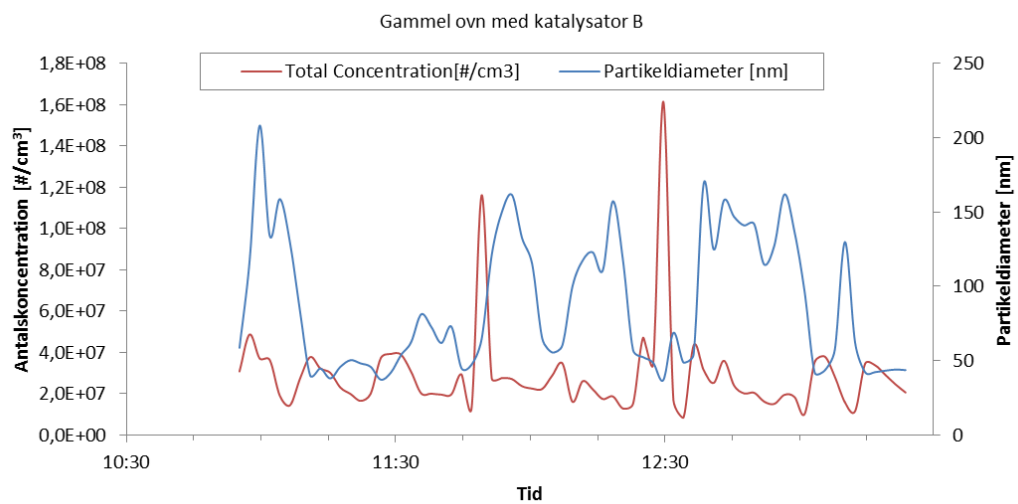


Antalskoncentration og middel partikeldiameter som funktion af tid for en moderne ovn med katalytisk indsats (B)

Ved målingerne med den gamle ovn blev partiklerne først målt fra forfyringen, da partikelmængden under optændingen oversteg instrumenternes målekapacitet.



Antalskoncentration og middel partikeldiameter som funktion af tid for en gammel ovn med katalytisk indsats (A)- forfyring til anden charge



Antalskoncentration og middel partikeldiameter som funktion af tid for en gammel ovn med katalytisk indsats (B) - forfyring til anden charge.

Bilag G – Resultater fra en 3. katalysator

Diesel/industriel oxidation katalysatorer er velkendte og designet til hurtig temperaturrespons samt aktivitet ved lave temperaturer. Det kunne derfor være relevant at afprøve et lignende produkt i nærværende projekt, dog med relativ store kanaldiametre for at minimering af trykfald og reducere risiko for tilstopning.

Haldor Topsøe har udviklet en oxidationskatalysator ("HTAS Catalyst") til projektet.

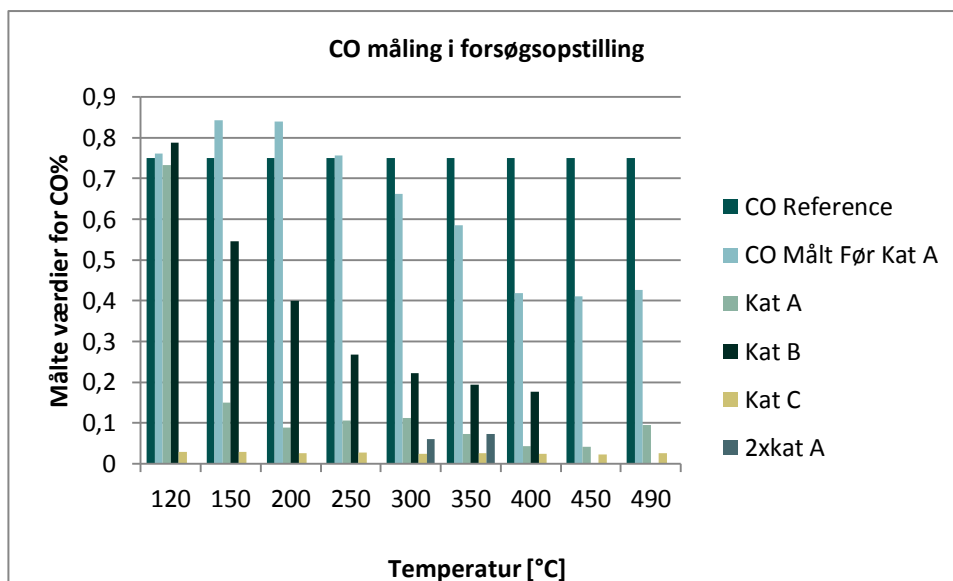
Haldor Topsøe har stillet tre kvadratiske katalysatorer (150 x150 x 100 mm) til rådighed.



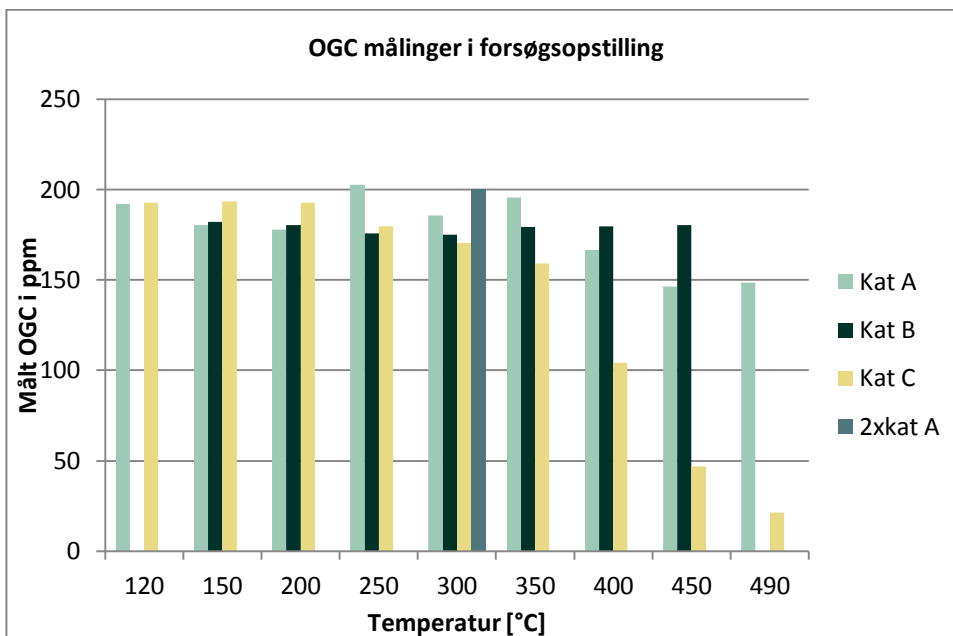
HALDOR TOPSØE KATALYSATOR

Resultaterne i nærværende bilag er opnået i forbindelse med forsøg lavet parallelt med de forsøg der er udført på de to øvrige katalysatorer (katalysator A og B), der er udvalgt i projektet. Der henvises til derfor til relevante kapitler i den efterfølgende tekst. Katalysatoren fra Haldor Topsøe benævnes katalysator C.

Resultater med reference til kapitel 2, Prækvalifikation og test



SØJLEDIAGRAM AF GENNEMSNTLIGE VÆRDIER FOR CO-MÅLINGER



SØJLEDIAGRAM AF GENNEMSNTLIGE VÆRDIER FOR OGC-MÅLINGER.

Katalysator C fra Haldor Topsøe, reducerer CO % med > 90 % allerede fra lave temperaturer på 120 °C. For OGC målinger har katalysatoren en begyndende effekt på temperaturer højere end 250 °C. Ved 350 °C reduceres OGC med 25 % og med hele 75 % ved temperaturer på omkring 450 - 490 °C.

TABEL FOR KATALYSATOR C (HALDOR TOPSØE KATALYSATOR), SOM BESKRIVER FORSØGSRESULTATERNE

Haldor Topsøe katalysator C		
CO	OGC	
>90 % v. 120 °C	25 % v. 350 °C	
-	50 % v. 400 °C	
-	>75 % v. 450 °C	

Ovenstående grafer viser, at katalysatoren fra Haldor Topsøe er den mest effektive af de tre testede. Katalysatoren er ikke kommerciel og indeholder ifølge emballagen skadelige stoffer, som ikke anses for fordelagtige da elementet støver betragteligt og let smuldrer ved forarbejdning. Produktet er dog ud fra de gennemførte tests i præ-kvalifikationen, det mest attraktive emne til eftermontering på brændeovne og kedler hvad emissioner angår.

Resultater med reference til kapitel 4, Test af katalysatorer på ovne og kedler

Den moderne ovn med katalysator C

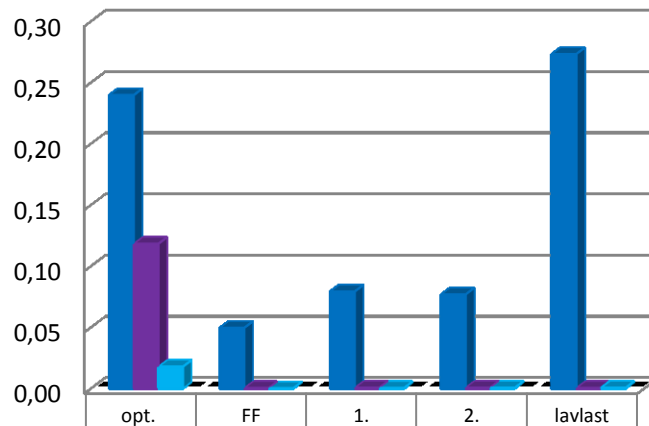


KATALYSATOR C EFTER FORSØG PÅ MODERNE OVN. DET FREMGÅR AT DER ER SKET VÆSENTLIG TILDÆKNING.

Som det ses på billederne, er der efter en fyringscyklus konstateret en del belægning. Da der er et større trykfald over katalysator C end konstateret over katalysator A og B, er der derfor foretaget endnu en fyringscyklus med øget skorstenstræk. Trykfaldet tilskrives udformningen og højden på katalysatoren der er 100 mm. Resultaterne fra begge forsøg er vist i nedenstående figurer.

CO-emission ved 13% ilt [%vol (tør)]

CO-emissioner - kat. C på moderne ovn



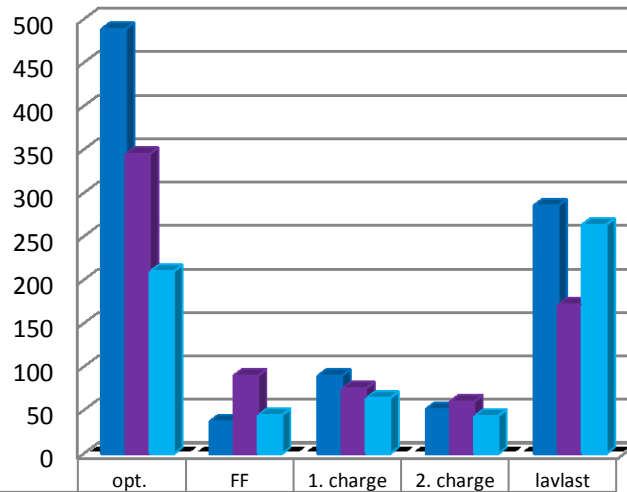
2. Måling moderne ovn u/kat	0,24	0,05	0,08	0,08	0,27
CO-måling med Kat C i moderne ovn - uændret træk	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
CO-måling med Kat C i moderne ovn - ændret træk	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00

CO-

MÅLINGER PÅ MODERNE OVN HENHOLDSVIS MED OG UDEN KATALYSATOR C.

OGC v. 13% ilt (C-ækv.) [mg/nm³ (tørstof)]

OGC-emissioner - kat. C på moderne ovn



2. Måling moderne ovn u/kat	489	37	90	51	286
OGC-måling med Kat C i moderne ovn - uændret træk	345	90	75	60	172
OGC-måling med Kat C i moderne ovn - ændret træk	210	44	64	43	263

OGC-

MÅLINGER PÅ MODERNE OVN HENHOLDSVIS MED OG UDEN KATALYSATOR C.

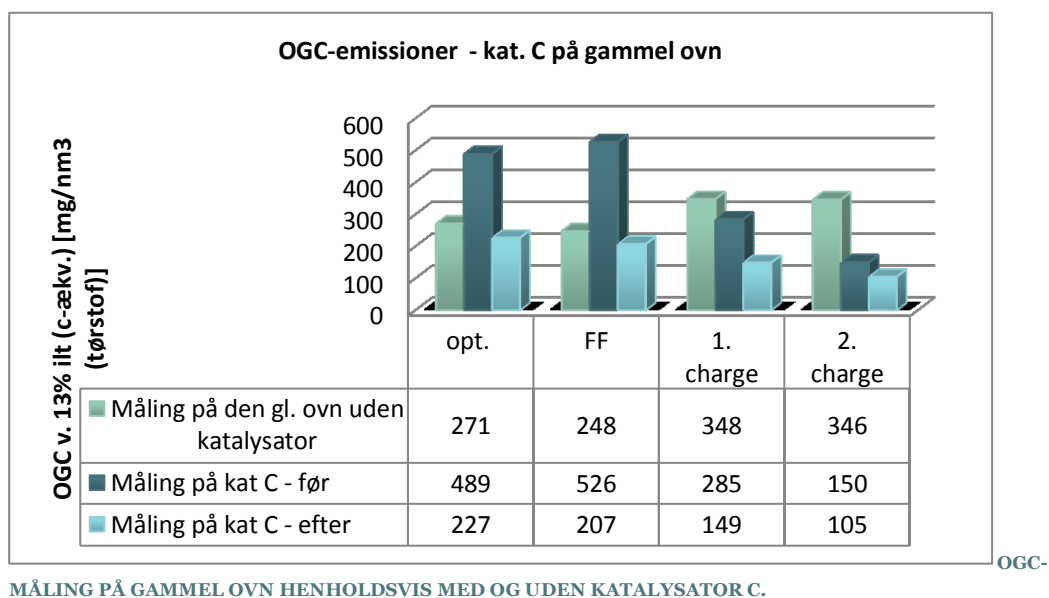
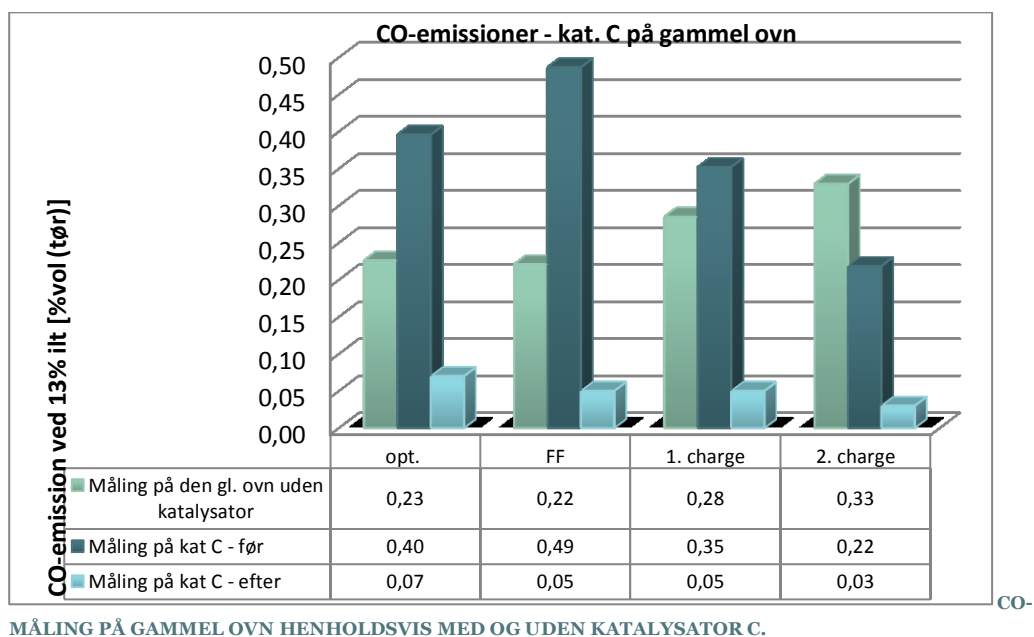
Katalysatoren ses at reducere CO indholdet til under 50 ppm. OGC indholdet reduceres også betragteligt ved optænding og forfyring, men kun en mindre grad ved de efterfølgende charges. Det ændrede træk ses at have betydning og medfører, med undtagelse af lavlast, en større emissionsreduktion af både CO og OGC.

Den gamle ovn med katalysator C

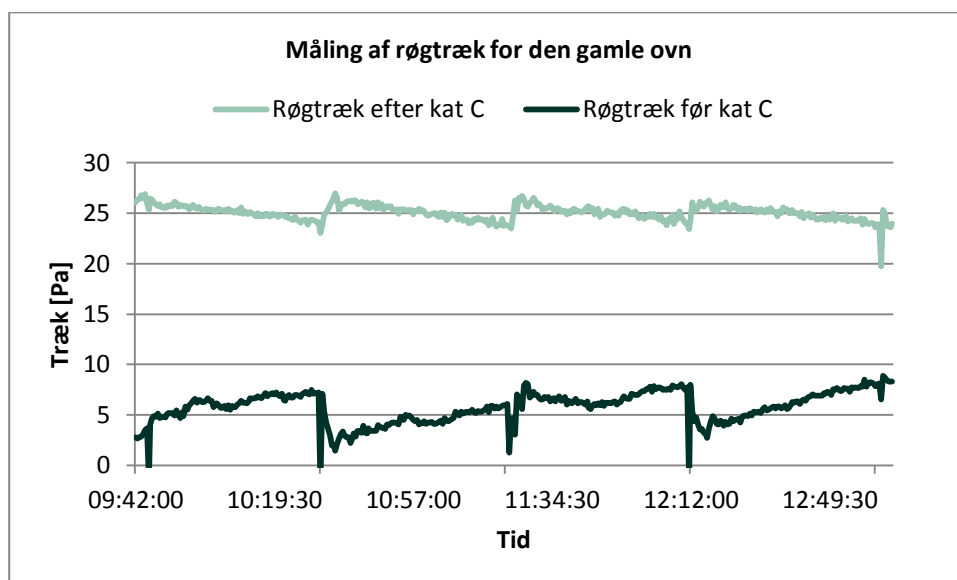


KATALYSATOR C EFTER FORSØGET PÅ DEN GAMLE OVN. DER SES VÆSENTLIG TILDÆKNING AF KATALYSATOREN.

Ved prøvning på den gamle brændeovn halveres katalysatortykkelsen for at reducere tryktabet. Billederne viser tildækning af katalysatoren efter endt forsøg på den gamle brændeovn. Forsøg med denne katalysator blev udført øget træk, da erfaringerne fra den moderne ovn vist stort trykfald over katalysatoren.

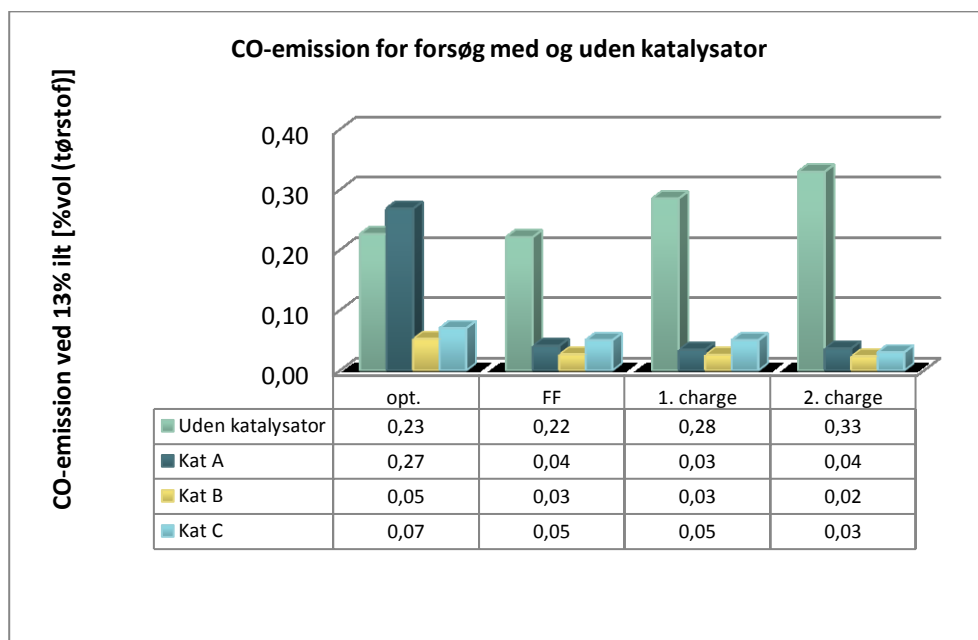


CO indholdet i røggassen ses at blive reduceret op til ca. 80 % i forhold målingerne uden katalysator. Der ses også en reduktion af OGC på omkring 60-70 % ved fyringerne efter optænding og forfyring, hvor katalysatoren mere effektiv.

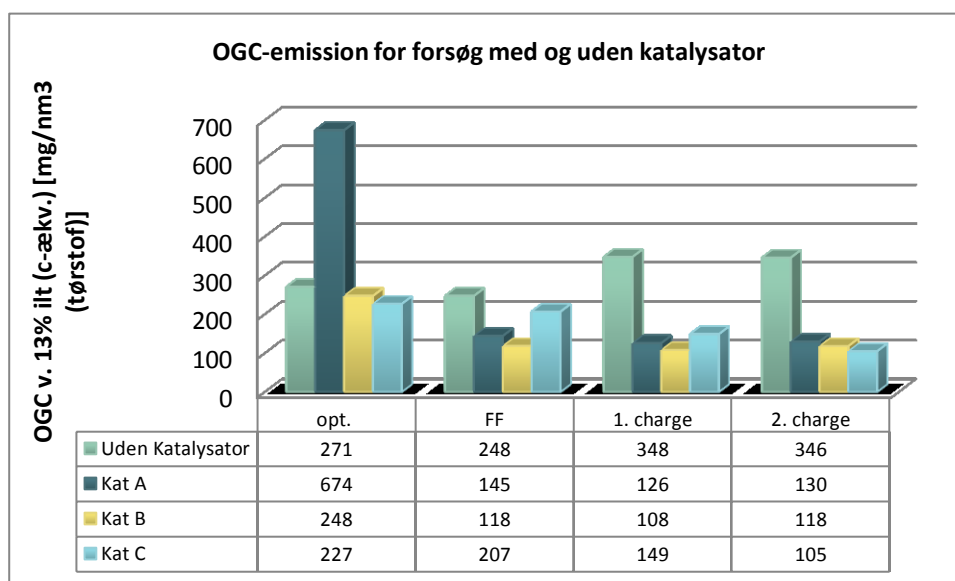


MÅLING AF RØGTRÆK VED FORSØG MED KAT C PÅ GAMMEL OVN

Sammenligning af katalysatorer

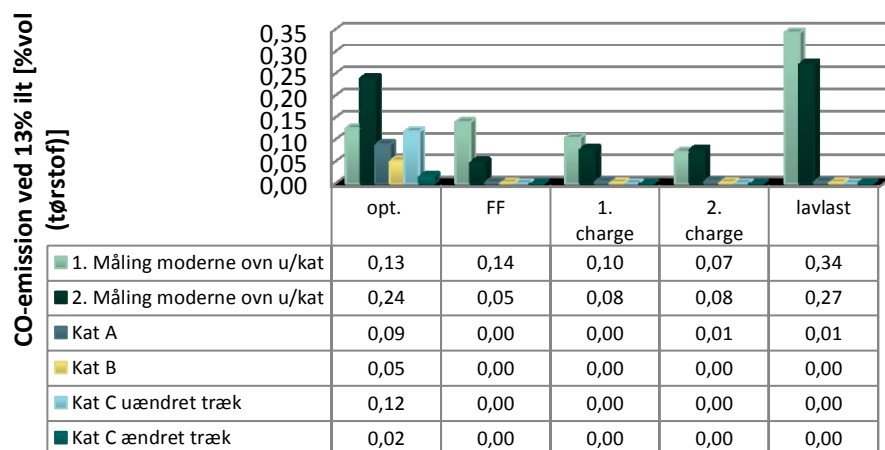


SAMLET CO MÅLINGER MED OG UDEN KATALYSATORER FOR DEN GAMLE OVN



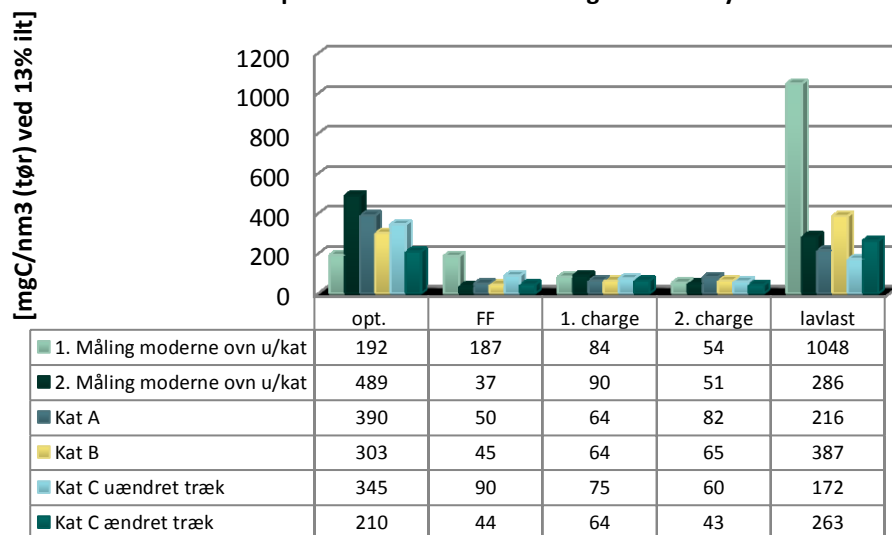
SAMLET OGC-MÅLINGER MED OG UDEN KATALYSATORER FOR DEN GAMLE OVN

CO-emission på den moderne ovn med og uden katalysator



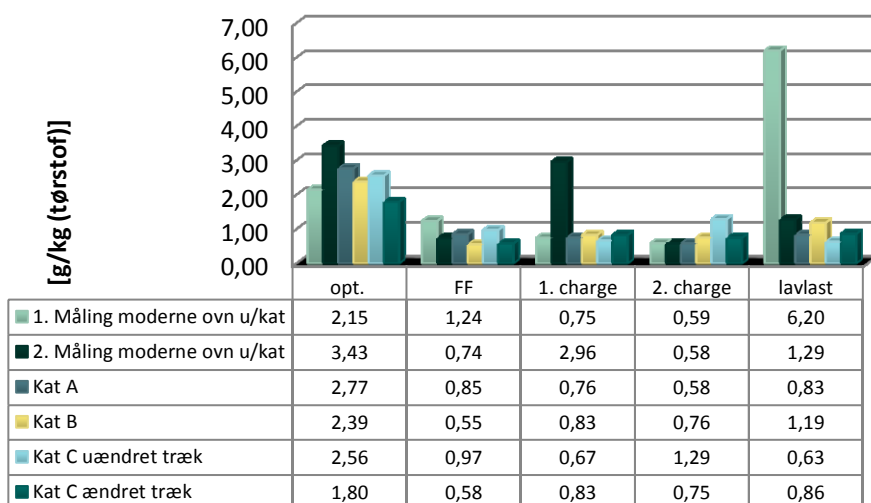
SAMLEDE CO-MÅLINGER MED OG UDEN KATALYSATORER FOR DEN MODERNE OVN

OGC-emission på den moderne ovn med og uden katalysator



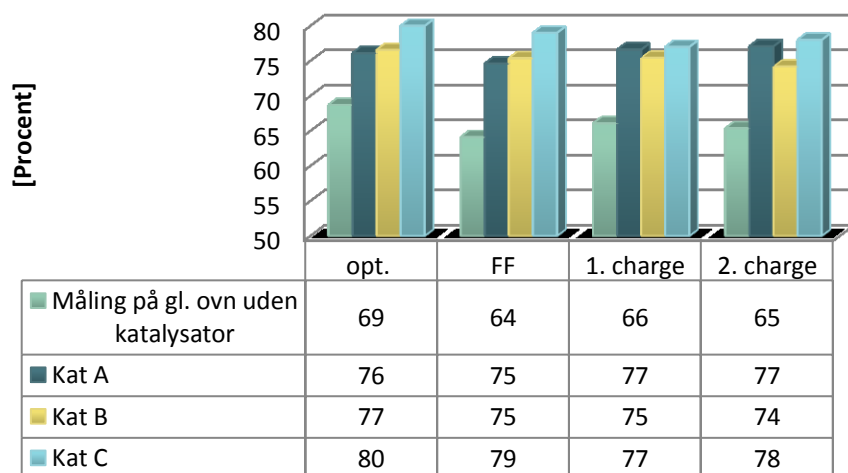
SAMLEDE OGC-MÅLINGER MED OG UDEN KATALYSATORER FOR DEN MODERNE OVN

Partikler (NS metode)



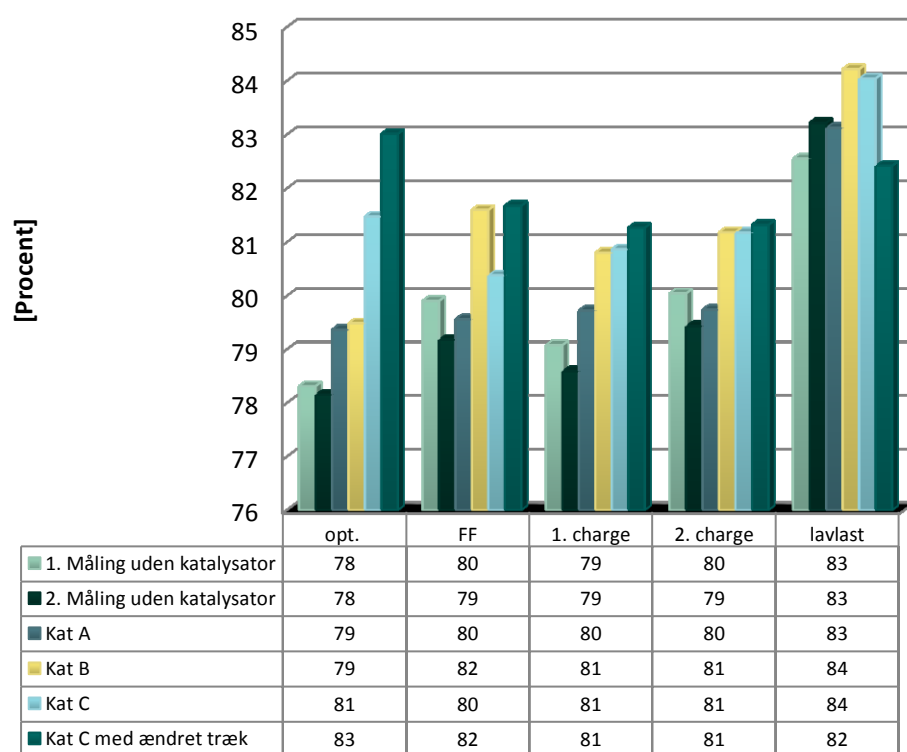
OGC-MÅLINGER MED OG UDEN KATALYSATORER FOR DEN MODERNE OVN

Virkningsgrad for den gamle ovn



VIRKNINGSGRADER FOR DEN GAMLE OVN MED OG UDEN KATALYSATORER

Virkningsgrad for den moderne ovn



VIRKNINGSGRADER FOR MODERNE OVN MED OG UDEN KATALYSATORER

Måling af PAH

	Uden kat	Kat C	Kat B
	BaP ækv. [$\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n}}$] ved 13 % O ₂	BaP ækv. [$\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n}}$] ved 13 % O ₂	BaP ækv. [$\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n}}$] ved 13 % O ₂
Naphthalen	2,22	0,67	2,14
Acenaphthylen	0,83	0,16	1,16
Acenaphthen	0,02	0,01	0,06
Fluoren	0,06	0,02	0,15
Phenanthren	0,26	0,11	0,31
Anthracen	0,05	0,02	0,05
Fluoranthren	13,09	5,61	13,88
Pyren	0,15	0,07	0,16
Benz-a-anthracen	0,13	0,09	0,20
Chrysen	0,85	0,54	1,79
Benz-(b,K)- fluoranthener	10,24	2,70	14,30
Benz-e-pyren	0,05	0,00	0,06
Benz(a)pyren	33,57	0,00	22,71
Indeno-123-pyren	3,93	1,52	4,54
Benz-ghi-perylen	0,00	0,00	0,00
Dibenz-ah-anthracen	35,05	0,00	39,79
SUM	100	12	101

PAH-EMISSION UDTRYKT I BAP ÆKVIVALENTER

DustTrak

		Fyring	Optænding	Forfyring	1. charge	2. charge	3. charge(lav)
modern ovn	U/kat	Middelmasse [mg/m^3]	166,1	45,7	11,5	13,3	897,9
	U/kat		482,1	7,0	102,2	14,5	6,3
	Kat A		357,2	11,5	23,4	18,1	27,4
	Kat B		390,1	8,8	15,3	10,3	8,4
	Kat C		354,5	12,5	7,6	11,1	0,2
	Kat C		155,7	8,5	4,5	7,8	5,2
gammel ovn	Kat A	Middelmasse [mg/m^3]	ikke målt	62,7	107,7	68,7	
	Kat B		ikke målt	41,4	66,2	58,1	
	Kat C		ikke målt	70,0	74,6	52,2	

MIDDELMASSEN MÅLT MED DUSTTRAK I FORTYNDERTUNNEL. MIDDELVÆRDIEN AF MASSEN ER ANGIVET FOR HVER ENKELT FYRINGSPERIODE. VED FYRINGER, SOM ER UNDERLAGT MED GRÅ FARVE, ER VÆRDIEN FOR LAVT, DA DETEKTOREN VAR GÅET I MÆTNING I KORTE PERIODER

SMPS

		Fyring	Optænding	Forfyring	1. charge	2. charge	3. charge(lav)
modern ovn	U/kat	Middelantalskoncentration [$\#/cm^3$]	4,23+E07	2,39+E08	4,65+E07	5,86+E07	9,02+E07
	U/kat		6,29+E07	4,84+E07	6,14+E07	8,03+E07	4,91+E07
	Kat A		4,59+E07	3,51+E07	6,52+E07	3,30+E07	6,66+E07
	Kat B		1,02+E07	7,51+E06	5,56+E06	3,70+E06	3,97+E06
	Kat C		4,04+E07	2,69+E07	4,37+E07	5,99+E07	2,74+E07
	Kat C		3,10+E07	2,48+E07	3,18+E07	2,45+E07	2,97+E07
gammel ovn	Kat A		ikke målt	1,60+E07	2,25+E06	1,36+E06	
	Kat B		ikke målt	2,87+E07	3,49+E07	2,44+E07	
	Kat C		ikke målt	2,91+E07	6,02+E07	2,29+E07	

MIDDEL ANTALSKONCENTRATION FOR ØVN MED OG UDEN KATALYTISK INDSATS.

ANTALSKONCENTRATIONEN AF PARTIKLER ER MIDLET OVER HVER ENKELT FYRINGSPERIODE

		Fyring	Optænding	Forfyring	1. charge	2. charge	3. charge(lav)
modern ovn	U/kat	Middelpartikelstørrelse [nm]	84	53	47	56	72
	U/kat		98	40	58	63	40
	Kat A		88	44	56	44	59
	Kat B		66	65	62	63	66
	Kat C		112	55	53	60	45
	Kat C		93	54	39	47	45
gammel ovn	Kat A		ikke målt	105	114	99	
	Kat B		ikke målt	72	94	94	
	Kat C		ikke målt	108	114	94	

MIDDEL PARTIKELDIAMETER FOR ØVN MED OG UDEN KATALYTISK INDSATS. PARTIKELSTØRRELSEN

ER MIDLET OVER HVER ENKELT FYRINGSPERIODE

Referencer

AHHA webpage. List of Australian certified wood stoves -

<http://www.homeheat.com.au/certified.php> (last accessed 02-2013)

Andersen, J.S.. Sammenligning af måleresultater mellem brændeovne afprøvet efter EN 13240 og NS 3058. Miljørapport 1138, **2006**.

Binding R., Butt S., Hartmann I., Matthes M. and Thiel C. Application of Heterogeneous Catalysis in Small-Scale Biomass Combustion Systems. *Catalyst* **2012**, 2, 223-243

Butschbach, P.; Hammer, F.; Kohler, H.; Potreck, A.; Trautmann, T. Extensive reduction of toxic gas emissions of firewood-fueled low power fireplaces by improved in situ gas sensorics and catalytic treatment of exhaust gas. *Sensors and Actuators B: Chemical* **2009**, 137(1), 32-41

Capablo, J.; Jensen, P.A.; Pedersen, K.H.; Hjuler, K.; Nikolaisen, L.; Backman, R.; Frandsen, F. Ash properties of Alternative Biomass. *Energy & Fuels* **2009**, 23 (4), 1965-1976.

Carnö, J.; Ferrandon, M.; Björnbom, E.; Järås, S. Mixed manganese oxide/platinum catalysts for total oxidation of model gas from wood boilers. *Applied Catalysis A* **1997**, 155(2), 265-281

Carnö, J.; Berg, M.; Järås, S. Catalytic abatement of emissions from small-scale combustion of wood – a comparison of the catalytic effect in model and real flue gases. *Fuel* **1996**, 75(8), 959-965

Catator AB Homepage - http://www.catator.se/?page_id=15 (last accessed 02-2013)

ChimCat® RETRO. Catalysts for biomass incineration -

http://www.chimcat.com/fileadmin/images/20101013_ChimCat_RETRO.pdf and First catalysts with DIBt approval for fireplace retrofits - http://ekat-international.com/mediapool/119/1194531/data/20110920_ChimCat_Retro.pdf (last accessed 02-2013)

Clear Skies Unlimited webpages - <http://www.clearskiesunlimited.com/woodburningstoves.html> and <http://www.stovecombustors.com/whybuyfromus.html> (last accessed 02-2013)

Clear Skies Unlimited presentation: HearthCAT™ Fireplace Technology-

http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0C DIOFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.clearskiesunlimited.com%2Fimages%2FClear_Skies_Presentation.ppt&ei=TTArUcnJEYfLsgbKvYHIDQ&usg=AFQjCNEEXKi-aDW6furoh2V9ZPKENmAC4RQ (last accessed 02-2013)

Clear Skies, **2009**. OMNI-Test Laboratories, Inc. Fireplace Emissions Test Report. March 2, 2009 - http://www.clearskiesunlimited.com/images/HearthCAT_Test_Omni.pdf (last accessed 02-2013)

Condar webpage for woodstove combustors - <http://www.woodstovecombustors.com/> (last accessed 02-2013)

Ecolabelling Denmark Homepage - <http://www.ecolabel.dk> (last accessed 04-2011)

EPA webpage. List of EPA-certified wood stoves - <http://www.epa.gov/oecaerth/resources/publications/monitoring/caa/woodstoves/certifiedwood.pdf> (last accessed 02-2013)

Hargitai T. Katalytisk rening av rökgaserfrånvedeldadbraskamin. Catator 20/06/**2006**.

Hartmann I. Overview on catalytic exhaust gas purification at small-scale biomass combustion systems. International Biomass Conference. Leipzig, 24.05.**2011**

HearthCat webpage - <http://www.clearskiesunlimited.com/hearthcat.html> (last accessed 02-2013)

Houck, J.E.; Pitzman, L.T..Catalytic Comeback?*Hearth and Home***2011**, February, 30-34

Ferrandon, M.; Björnbom, E. Deactivation in a wood-stove of catalysts for total oxidation.*Catalyst Deactivation***1999**, 126, 423-426

FireCat Homepage - <http://www.firecatcombustors.com/> (last accessed 02-2013)

IEA Bioenergy.Survey on the present state of particle precipitation devices or residential biomass combustion with a nominal capacity up to 50 kW in IEA Bioenergy Task32 member countries. Graz, December **2011**

Johansson, L.S.; Tullin, C.; Leckner, B.; Sjövall, P. Particle emissions from biomass combustion in small combustors.*Biomass and Bioenergy* **2003**, 25 (4), 435-446

Kanauer Homepage - http://www.knauer.net/products/product-detail-view/productdetail/smartline_pump_100-1.html (last accessed 02-2013)

KlimaKat filter system webpage - <http://www.caminos.de/en/technics-accessories/klimakat/klimakat-filter-system.html> (last accessed 02-2013)

Majewski, W.A.; Khair, M.K. Diesel Emissions and Their Control, SAE International, **2006**.

MoreCat Homepage - <http://www.morecat.de/start%20EN/index.html> (last accessed 02-2013)

Neeft, J.P.A.; Makkee, M.; Moulijn, J.A. Diesel particulate emission control.*Fuel Processing Technology***1996**, 47(1), 1-69.

Neufeld, C. The complete catalytic combustor.*The Chimney Sweep News***2010**, March.

Nussbaumer, T. Characterisation of particles from wood combustion with respect to health relevance and electrostatic precipitation, International workshop on aerosols from small scale biomass combustion plants, Graz, 27 January, **2011**.

NVI Vedkatalysator webpage - <http://www.nvi.se/vedkatalysator.html> (last accessed 02-2013)

Paulson, T.; Moss, B.; Todd, B.; Eckstein, C.; Wise, B.; Singleton, D.; Zemskova, S.; Silver, R. New Developments in Diesel Oxidation Catalysis.*SAE International Journal of Commercial Vehicles* **2009**, 1(1), 310-314.

Rau, J. R.; Composition and Size Distribution of Residential Wood Smoke Particles.*Aerosol Science and Technology* **1989**, 10(1), 181-192.

Sander, B. Properties of Danish Biofuels and the Requirements for Power Production. *Biomass & Bioenergy* **1997**, 12(3), 177-183.

Saracco, G.; Specchia, V. Catalytic filters for the abatement of volatile organic compounds. *Chemical Engineering Science* **2000**, 55(5), 897-908.

Schleicher O., Fuglsang K., Wåhlin P., Olesen H.R., Nøjgaard J.K. and Bjerrum M. Test of technologies for flue gas cleaning and combustion improvement for existing residential wood burning appliances. Environmental Project No.1393 **2011**. Danish Ministry of Environment, Environmental Protection Agency.

Schmidl, C.; Marr, I.L.; Caseiro, A.; Kotianova, P.; Berner, A.; Bauer, H.; Kasper-Giebl, A.; Puxbaum, H. Chemical characterisation of fine particle emissions from wood stove combustion of common woods growing in mid-European Alpine regions. *Atmospheric Environment* **2008**, 42 (1), 126-141.

Vedkatalysator brochure - http://www.nvi.se/doc/vedkatabroschyr_komplett.pdf (last accessed 02-2013)

Zero CO fireplace webpage - http://www.fondis.com/dn_technologie_zero_co_principe-EN/ (last accessed 02-2013)

MiljøKAT

Projektets formål er at udvikle en eftermonterbar enhed til katalytisk rensning af røggas fra eksisterende brændeovne og -kedler. På baggrund af studiet er to forskellige katalysatortyper udvalgt og testet.

Resultaterne viser, at katalysatorerne alle er meget effektive i reduktion af CO, og mindre grad i fjernelse af OGC. Der er udført en markedsfølsom interesseafsøgning for miljøkatalysatorer til brændeovne.

Undersøgelsen viser bl.a., at slutbrugerens primære interesseområder er stor brugervenlighed og lav pris, hvilket medfører at designet af katalysatorenheden udføres uden by-pass.



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Strandgade 29
1401 København K
Tlf.: (+45) 72 54 40 00

www.mst.dk