



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Slow Heat Release

Brændeovn med salhydratvarmelager

Miljøprojekt nr. 1438, 2013



Titel:

Slow Heat Release - Brændeovn med
salthydratvarmelager

Redaktion:

Uwe Zielke, Teknologisk Institut
Max Bjerrum, Teknologisk Institut
Torben Nørgaard, Teknologisk Institut

Udgiver:

Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K
www.mst.dk

År:

2013

ISBN nr.

978-87-92903-39-6

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
SAMMENFATNING	7
SUMMARY	9
1 FORUNDERSØGELSE	11
1.1 KOMMERCIELLE PRODUKTER	11
1.2 DANSK FORSKNING	13
1.3 UDENLANDSK FORSKNING	14
2 VARMELAGRING I SALTHYDRAT	18
2.1 MATERIALEVALG	18
2.2 MATERIALEDATA	19
3 UDVIKLING AF VARMELAGER	21
3.1 INDLEDENDE BEREGNINGER OG VARMETRANSMISSIONSSIMULERINGER	21
3.2 FORSØG MED VARMELAGER VERSION 1 – ÅBEN BEHOLDER	23
3.2.1 <i>Indledende smelteforsøg samt tilsætning af vand</i>	23
3.2.2 <i>Forsøg hos Morsø Jernstøberi A/S – april/maj 2009</i>	24
3.2.3 <i>Forsøg med iblanding af grafit i salthydrat</i>	31
3.2.4 <i>Forsøg på Teknologisk Institut, opvarmning vha. halogenlamper</i>	32
3.2.5 <i>Forsøg hos Morsø Jernstøberi A/S – august 2009</i>	38
3.2.6 <i>Forsøg hos Morsø Jernstøberi A/S – oktober/november 2009</i>	39
3.3 VARMELAGER VERSION 2 – LUKKET BEHOLDER MED STAG	40
3.3.1 <i>Beregning af varmetransmission gennem stag</i>	40
3.3.2 <i>Konstruktion af nyt varmelager med stag</i>	42
3.3.3 <i>Forsøg med det nye varmelager, med halogenlamper</i>	44
4 FORSØG MED BRÆNDEOVN - OPLADNING OG AFLADNING AF VARMELAGER	46
4.1 FORSØG 1	46
4.2 FORSØG 2	47
5 KONTROLLEREREDE FORSØG PÅ TEKNOLOGISK INSTITUT	49
5.1 MÅLEPROGRAM	49
5.2 MÅLING AF VARMEAKKUMULERING I PCM	50
5.2.1 <i>Placering af temperaturfølere på varmelager</i>	51
5.2.2 <i>Forsøg med fuld opladning af PCM-varmelager</i>	52
5.2.3 <i>Forsøg med delvis opladning af PCM-varmelager</i>	55
5.2.4 <i>Temperaturforløb ved ”natfyring”</i>	58
6 EMISSIONSMÅLINGER	60
6.1 BRÆNDEOVNENS EMISSIONER VED NOMINEL LAST	61
6.1.1 <i>Partikelemission samt emission af ufuldstændig forbrændt røggas</i>	61
6.1.2 <i>Analyse af partikelstørrelse</i>	63
6.1.3 <i>Emissioner ved komplet opladning af varmelagere</i>	65

6.1.4	<i>Emissioner ved delvis opladning af varmelagere</i>	66
6.2	BRÆNDEOVNENS EMISSIONER VED ”NATFYRING”	66
6.2.1	<i>Partikelemission samt emission af ufuldstændig forbrændt røggas</i>	66
6.2.2	<i>Analyse af partikelstørrelse</i>	68
6.3	PAH-EMISSION	69
6.3.1	<i>PAH-prøvetagningsudstyr</i>	71
6.4	PARTIKELMÅLINGER MED DUSTTRAK-UDSTYR	72
7	STYRING AF BRÆNDEOVN	77
7.1	ELEKTRONIKSTYRING TIL BRÆNDEOVN – ET MORSØPROJEKT	77
7.2	FORSØG MED RØGSUGER	79
7.3	FORSØG MED UNDERFORBRÆNDING	81
8	DISKUSSION OG KONKLUSIONER	86
8.1	PCM-VARMELAGERETS EFFEKT	86
8.2	BRÆNDEOVNENS EMISSIONER	86
8.2.1	<i>Partikelemission</i>	86
8.2.2	<i>CO- og OGC-emission</i>	88
8.2.3	<i>PAH-emission</i>	89
9	REFERENCER	92
9.1	KILDER VEDR. PCM-FORSKNING	92
9.2	KILDER VEDR. EMISSIONER FRA BRÆNDEOVNE	95

Forord

Denne rapport indeholder en beskrivelse af udviklingen af en brændeovn med indbygget varmelager bestående af et faseskiftemateriale (PCM, Phase Change Material). Ved at smelte dette materiale optager det en større mængde latent varme, som kan gemmes til senere brug.

Projektets formål er at udvikle og afprøve en brændeovn med indbygget varmelager i form af salthydrat. Herved opnås en renere forbrænding, idet der udelukkende brændes med fuld effekt. Ovnens bliver tilpasset moderne boligers lave varmebehov, idet varmen afgives langsomt. Samtidigt elimineres brugerens tilbøjelighed til at skrue ned for luften og for at ”fyre natten over”, når ovnen selv holder sig varm natten over. Desuden skal det i projektet undersøges, om det er muligt at reducere emissionsspidserne i starten efter brændelsespåfyldning, enten gennem et styrings- og reguleringssystem eller gennem andre tiltag. Herigennem vil projektet bidrage til en reduktion af miljøskadelige emissioner.

Projektet er udført af Teknologisk Institut, Division for Energi og Klima. Projektet er finansieret af Miljøstyrelsens ”Tilskudsordning til miljøeffektiv brændefyringsteknologi”. Rapportens indhold er nødvendigvis ikke udtryk for Miljøstyrelsens holdninger, men styrelsen har støttet projektet, fordi man finder dets målsætning væsentlig og interessant. Projektets team ønsker at takke Miljøstyrelsen for et positivt og konstruktivt samarbejde.

Sammenfatning

I Danmark er der installeret rundt regnet 700.000 brændeovne. Antallet refererer til rapporten ”Brændeforbrug i Danmark 2009 – En undersøgelse af antallet af og brændeforbruget i brændeovne, pejse, masseovne og brændekedler i danske boliger og i sommerhuse” udarbejdet af Force Technology og Teknologisk Institut, oktober 2010. Brændeovne er fordelt med ca. 600.000 på helårsboliger og ca. 100.000 på sommerhuse. I nyere tid har undersøgelser vist, at disse ovne i fyringssæsonen bidrager med en ikke uvæsentlig andel af luftforureningen i byerne. Årsagen er ofte uhensigtsmæssig fyringsadfærd hos brugeren. De fleste ovne har en for stor effekt i forhold til moderne boligers varmebehov. Derfor er brugerne tilbøjelige til at skrue ned for varmen ved at reducere tilførslen af forbrændingsluft. Dette resulterer i en sodende og dermed miljøskadelig forbrænding. I værste fald forsøger brugeren at ”fyre natten over” ved at reducere luften til et absolut minimum. I disse situationer ulmer brændslet hele natten, og ovnen emitterer store mængder af uønskede og sundhedsskadelige stoffer.

Ved at bygge ovnen sammen med et varmelager som kunne optage varmen fra ovnen og afgive den på et senere tidspunkt, når der ikke fyres længere, ville man kunne eliminere incitamentet for de skadelige ”natfyringer”. Projektet er startet med en forundersøgelse omhandlende egnede materialer til varmelager samt et litteraturstudie vedrørende forskning om emnet. Ved at anvende et faseskiftemateriale, i dette tilfælde natriumacetat-trihydrat kunne ovnens vægt, trods varmelager, holdes i rimelige rammer, idet 130 kg PCM kan indeholde samme varmemængde som 1.200 kg sten. Den store udfordring var at kompensere for PCM’s dårlige varmeledningsegenskaber, at fordele varmen i hele varmelageret, således at det smelter jævnt, uden at der opstår lokal kogning. Dette problem blev løst gennem konstruktionsmæssige tiltag. Systemet med Natriumacetat-trihydrat, som smelter ved 58 °C, kom til at fungere tilfredsstillende. 14 timer efter sidste indfyring holdt varmelageret en temperatur på 30 °C.

Forsøgene med PCM blev fulgt op af et omfattende emissionsmåleprogram med fokus på partikelemission inklusive bestemmelse af partikelstørrelse samt PAH-emission. Emissionerne er målt ved normal fyring og ved ”natfyring”. Generelt er der fundet ekstremt små partikler ved samtlige målinger og ingen partikler større end 1 µm. Ved normal fyring er partikelemissionen ca. 2,8 g/kg (tørstof) og ved ”natfyring” øges emissionerne omtrent med faktor 4,7. PAH-emissionen er ikke uvæsentlig med ca. 8 mg/Nm³ eller 0,1 mg BaP Tox. ækvivalenter/ Nm³.

Mulige emissionsreducerende foranstaltninger er undersøgt. Automatisk styring af lufttilførslen har ingen positiv effekt. Øgning af skorstenstrækket vha. røgsuger har resulteret i en mærkbar reduktion af emissionerne. Her er kun de gasformige emissioner undersøgt, som reduceres med faktor 3-4 ved en øgning af skorstenstrækket fra 12 Pa til 48 Pa. Endvidere er virkningen af et helt andet forbrændingsprincip undersøgt. ”Underforbrændingen” er i stand til at fjerne emissionsspidserne i starten af en indfyring, men set over en

hel fyringssekvens er emissionerne nogenlunde de samme som ved en normal brændeovn.

Summary

In Denmark, approximately 700,000 solid fuel stoves are installed. This amount refers to the report “Brændeforbrug i Danmark 2009 – En undersøgelse af antallet af og brændeforbruget i brændeovne, pejse, masseovne og brændekedler i danske boliger og i sommerhuse” (*“Fuel consumption in Denmark 2009 – An examination of the amount of and the fuel consumption in inset appliances, fireplaces, mass stoves and solid fuel boilers in Danish domiciles and summer cottages”*), elaborated by Force Technology and Danish Technological Institute, October 2010. Of the 700,000 solid fuel stoves, 600,000 are installed in permanent residences, and 100,000 are installed in summer cottages. Recent examinations have shown that in the heating season, these stoves contribute with a not negligible share of air pollution in the cities. The reason is often inexpedient firing and an inappropriate performance of the stove. In many cases the thermal output of the stove exceeds the heating demand of a modern residence; and the user typically reduces the stove’s combustion air supply with the purpose of lowering the temperature of the accommodation space. The result is a sooting combustion followed by undesired and environmentally damaging emissions. In worst case the user fires throughout the night reducing the air to an absolutely minimum. In these situations the fuel smoulders all night, and the stove emits large amounts of undesirable and unhealthy emissions.

By constructing the stove with a heat storage that can accumulate the heat from the stove and emit the heat later (when not firing), the problem with the unhealthy ”night firings” should be eliminated. The project started with a pre-examination regarding suitable materials for a heat storage and a literature study of the subject. By using an OGC material, in this case natriumacetat-trihydrat, the weight of the stove, in spite of the heat storage, could be held within reasonable frames, since 130 kg PCM can contain the same heat amount as 1,200 kg stone. The great challenge was to compensate for PCM’s poor heat conductivities, to distribute the heat in the whole heat storage, making it melt regularly without generating local boiling. This problem was solved by construction measures. The system with natriumacetat-trihydrat, which melts by 58 °C, came to function satisfactorily. 14 hours after the last firing, the temperature of the heat storage was 30 °C.

The tests with PCM were followed by an extensive emission measuring program focusing on particle emission including determination of particle size and PAH emission. The emissions were measured at normal firing and at ”night firing”. Generally, extremely small particles were found in all measurements, and no particles larger than 1 µm. At normal firing the particle emission is 2.8 g/kg dry matter and at ”night firing” the emissions were increased by approx. factor 4.7. The PAH emission is not negligible with approx. 8 mg/Nm³ or 0.1 mg BaP Tox. equivalents/ Nm³.

Possible emission reducing measures have been examined. Automatic control of the air supply has no positive effect. An increase of the chimney draught by means of flue gas fan has resulted in a perceptible reduction of the emissions. Only the gaseous emissions have been examined, which are reduced by factor 3-4 by increasing the chimney draught from 12 Pa to 48 Pa. Furthermore, the

effect of a totally different combustion principle has been examined. The "down-draft" combustion is capable of eliminating the emission peaks in the beginning of a firing, but during a whole firing sequence, the emissions are more or less the same as for a normal solid fuel stove.

1 Forundersøgelse

Forundersøgelsen har haft til formål at udpege egnede stoffer, der kan anvendes som smeltevarmelager i forbindelse med varmeafgivelse fra en brændeovn. Der er gennemført et litteraturstudie, som er koncentreret om tre områder: *kommercielle produkter, dansk forskning og udenlandsk forskning*. Der er fokuseret på litteratur fra 1980 eller senere.

Undersøgelsen har vist, at der er gennemført flere projekter, som har haft til formål at undersøge forskellige stoffers egenskaber som smeltevarmelager, og det har endvidere vist sig, at der findes adskillige kommercielle produkter, som anvender teknologien. Både de gennemførte projekter og de fundne produkter har vist meget lovende takter i forhold til, at teknologien vil kunne anvendes på brændeovne.

Nedenfor præsenteres først eksempler på anvendelige smeltevarmelagre, som er eller har været tilgængelige på markedet, og dernæst kommer et udpluk af udvalgte danske og udenlandske projekter, som omhandler emnet.

1.1 KOMMERCIELLE PRODUKTER

På markedet findes små genopladelige varmeguder, som sælges bl.a. under navne som ”Thermo-Pad”, ”Incredible Hot Pad”, ”Magic heater”, ”The heat Solution” m.fl. Varmepuderne anvendes typisk i forbindelse med udendørsaktiviteter, som jagt og lystfiskeri, til at holde fingrene varme. Nogle af produkterne er tilsat farve som vist på Figur 1.

FIGUR 1: GENOPLADELIGE VARMEPUDER (NAHPCO TRADING INC.)

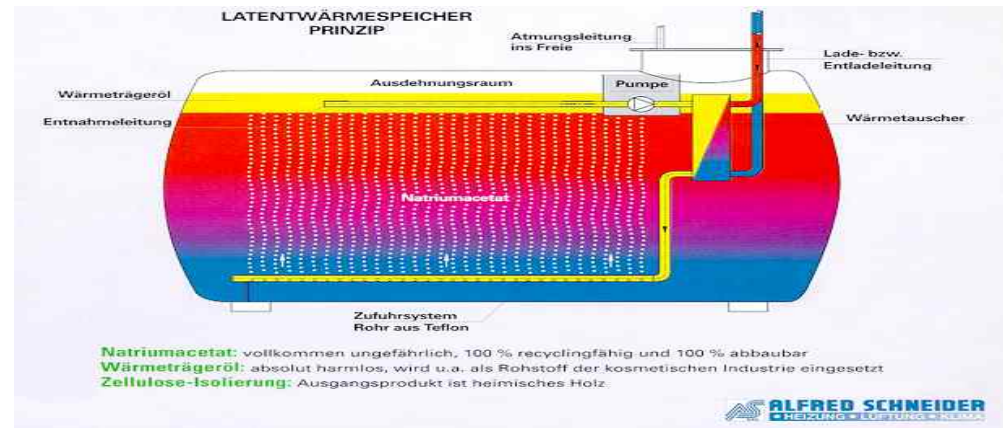


De nævnte produkter består alle af en kraftig plast/akrylpose fyldt med natriumacetatopløsning. Da posen er hermetisk lukket, kan opløsningen i smeltet form underkøles til stuetemperatur. Ved hjælp af en fleksibel metalplade som ”knækker”, når man trykker på den, påføres opløsningen en

pludselig, mekanisk spænding. Dette udløser krystallisationen, og posen bliver herved varmet op til opløsningens smeltepunkt, som er ca. 58 °C.

Alfred Schneider, et tysk firma, fremstiller og markedsfører et natriumacetat/oliebaseret varmelager, som er udviklet i samarbejde med Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

FIGUR 2: SALTHYDRAT/OLIE-VARMELAGER



Systemet fungerer ved, at olien pumpes gennem salthydratet, hvorved der foregår en direkte varmeveksling. Olien fører varmen videre til radiatorerne via en olie-/vandvarmeveksler. Lageret er ifølge producenten egnet til solvarmeanlæg, fastbrændselsfyr, fjernvarmeværker samt til opbevaring af industriel overskudsvarme.

Et firma, som – at dømme efter deres hjemmeside – satser meget på smeltevarme, er det amerikanske MJM Engineering Co. MJM fokuserer en del på aircondition og køling af bl.a. elektronik, men tilbyder også ”general purpose” færdigpakkeede kapsler med smeltemedier, bl.a. natriumacetat.

FIGUR 3: KAPSLER MED NATRIUMACETAT



Kapsler af denne type kan bruges til at øge kapaciteten af eksisterende buffertanke uden ombygning. Når kapslerne tilsættes buffertanken, fortrænger de naturligvis et vist vandvolumen fra lageret men vil alligevel øge lagerets kapacitet på grund af kapslernes høje densitet samt smeltevarmen. Kapslerne findes også i en kugleformet variant.

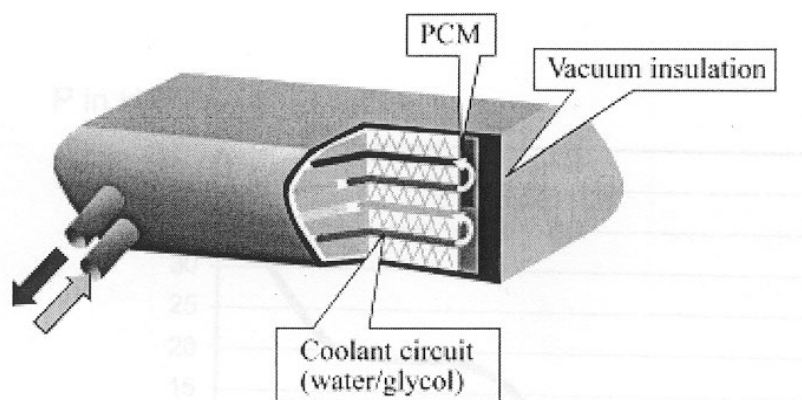
Personligt har forfatteren som ung ingeniør i begyndelsen af 70'erne syslet med et drivhusprojekt, som var baseret på bordtennisbolde fyldt med salthydrat. Disse kunne ligge på en vippeanordning uden for drivhuset i solen og samle varme i løbet af dagen. Når mørket faldt på, kunne de vippes ind i drivhuset, hvor de så afgav varme hele natten. Projektet blev dog aldrig realiseret.

I 1992 præsenterede Svenska Aeroplan Aktiebolaget (SAAB) en konceptbil med navnet SAAB ECOSPORT. Denne bil var udstyret med en form for

restvarmelager, muligvis baseret på salthydrat. Det har dog ikke været muligt at finde konkrete oplysninger om lagerets virkemåde.

Omkring 1995 introducerede Bayrische Motoren Werke (BMW) i samarbejde med Merck og MODINE et varmelager som ekstraudstyr til større personbiler /kilde 23/. Dette varmelager var baseret på et smeltemedie, som dog ikke kunne underkøles. I stedet var lageret isoleret med et vakuumkammer (se Figur 4). Energiindholdet var ca. 0,8 kWh, hvilket svarer til varmeindholdet i ca. 10 liter smeltet natriumacetat. Effektafgivelsen var på helt op til 45 kW i startøjeblikket, hvilket er meget imponerende for et lager af denne type. Varmen kunne angiveligt gemmes i op til to døgn. Så vidt vides indgår varmelageret dog ikke længere i sortimentet hos BMW.

FIGUR 4: SMELTEVARMELAGER FRA BMW/MERCK/MODINE



Det britiske firma PCM Products Ltd. markedsfører et stort udvalg af smeltevarmematerialer (Phase Change Materials, PCM) med faseskiftetemperatur fra under 0°C til køleformål i den ene ende af skalaen, til faseskiftetemperatur på over 1000°C til højtemperaturprocesser.

1.2 DANSK FORSKNING

På Laboratoriet for Varmeisolering hos DTU, har man gennem en lang årrække beskæftiget sig med varmelagring i forskellige smeltemedier, herunder salthydrater. Rapporter af særlig relevans for nærværende projekt ses herunder.

Årstal	Kilde nr.	Resumé
1977	10	I dette projekt er der udført tests af fem udvalgte salthydrater i et oliebaseret lager (princip som Figur 2). Rapporten indeholder omfattende data, bl.a. afkølingskurver for salthydraterne. Størst kapacitet opnås med natriumacetat-trihydrat. Dette gav dog visse praktiske problemer med olie-cirkulationen. Den opnåede lagerkapacitet i 200 kg saltopløsning var kun 6-10 kWh, hvilket er overraskende lidt. Målt smeltevarme med "ekstra vand" er kun 160 J/g.
1978	9	I dette projekt laves en sammenligning af hhv. oliebaseret lager (princip som Figur 2) og en

		kappebeholder. Begge fungerer stabilt, men kappebeholderen anbefales pga. lavere pris. Der foretages endvidere undersøgelser af korrosionsforhold, og det konkluderes, at natriumacetat <i>ikke</i> er specielt aggressivt over for stål.
1980	8	Denne rapport indeholder god baggrundviden om smeltesalte. Der er endvidere en beskrivelse af tre forskellige lagertyper: oliebaseret lager, kappebeholder og beholder med indlagt varmespiral.
1982	7	I dette projekt testes en spiralbeholder med fem forskellige salthyrater med smeltepunktstemperaturer fra 32 °C til 58 °C. Den latente varme i natriumacetat med ”ekstra vand” måles til 249 J/g, hvilket er betydeligt højere end forventet ud fra tidligere undersøgelser.

På baggrund af DTU-rapporterne gives her en oversigt over egnede salthyrater:

Kemisk formel	Kemisk navn	Smeltepunkt	Smeltevarme
$\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	Trinatriumfosfat	65 °C ¹	190 kJ/kg
$\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Natriumacetat	58 °C	160 kJ/kg ²
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Fixersalt	48 °C	209 kJ/kg
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Calciumnitrat	43 °C	153 kJ/kg

DTU har undersøgt en lang række andre salthyrater, som ikke er medtaget her, da deres smeltepunkter eller smeltevarme er for lave, fordi de er ustabile/giftige/korrosive, eller fordi de ganske enkelt ikke kan købes i større mængder.

DTU har også undersøgt forskellige organiske forbindelser, bl.a. stearinsyre, som smelter ved 67 °C. Smeltevarmen for de organiske stoffer er imidlertid under halvdelen af smeltevarmen for natriumacetat, hvorfor de faktisk er uinteressante i denne sammenhæng.

1.3 UDENLANDSK FORSKNING

Via søgning i Compendex, Inspec og Energy er der fundet resuméer af 37 nyere udenlandske forskningsprojekter vedrørende smeltevarmelagre. De vigtigste konklusioner gengives her i afkortet form. Ud for hvert referat findes et listenummer, som henviser til kildelisten bagerst i rapporten. Publikationens fulde titel, forfattere mv. findes ved opslag i kildelisten.

Nr.	Nationalitet	Årstal	Resumé
42	Tyskland	1976	Patentskrift for smeltevarmelager med Na-acetat.
24	Tyskland	1976	Patentskrift for tabsfrit varmelager baseret på underkølet natriumacetat-trihydrat eller magnesiumnitrat-hexahydrat.
13	USA	1979	Eksperimentelle undersøgelser af et

¹ 75 °C iht. kilde 17

² Udenlandske kilder og senere også DTU angiver smeltevarmen for Natriumacetat Trihydrat til 265 kJ/kg

Nr.	Nationalitet	Årstal	Resumé
			smeltevarmelager, hvor varmevekslingen sker via petroleumsdråber, som stiger op gennem smeltemediet. Natriumacetat anbefales som smeltemedie.
12	USA	1979	Undersøgelse af hhv. 1-komponent (varmeveksling gennem væg) og 2-komponent (direkte varme-veksling) smeltevarmelager. Sidstnævnte var bedst.
33	USA	1981	Eksperimentelle undersøgelser af et solvarmelager baseret på natriumacetat.
20	Japan	1981	Patentskrift fra Mitsubishi indgivet i Holland. Blanding af natriumacetat samt et eller flere andre natriumsalte.
2	England	1981	Referat fra en konference om energilagring. Mange forskellige emner, herunder også smeltevarme/natriumacetat.
34	Holland	1982	Udvikling af et salhydratvarmelager. Metode til optimering af lageret kapacitet og varmetransmission. Forbedring af lageret gennem særlige "design features".
16	Japan	1982	Et smeltemedie bestående af eddikesyre samt natriumacetat, ammoniumacetat, kaliumacetat eller calciumacetat.
15	Japan	1982	Patentskrift for et smeltemedie baseret på natriumacetat med en eller flere krystaldannende ingredienser.
32	Israel	1983	Metode til at sænke smeltepunktet i natriumacetat.
38	Japan	1983	Smeltevarmen for natriumacetat angives til 340 J/cm ³ . Tilsætning af natriumpyrofosfat forhindrer underkøling. Urinstof (urea) sænker smeltepunktet.
4	Sverige	1983	Undersøgelse af forskellige kølemidlers egnethed som varmetransportør i smeltevarmelagre af direkte kontakt typen. R11 og natriumacetat trihydrat betegnes som "interessant".
35	Japan	1983	Kongruent smeltende saltopløsning. Smeltevarme 226 J/g. Smeltepunkt 31,5 °C (egnet til solvarme).
30	Tyskland	1984	Eksperimentelle undersøgelser af varmelagre med direkte kontakt mellem smeltemedie og transportmedie. Ud over natriumacetat trihydrat testes også Ba(OH) ₂ • 8H ₂ O.
28	Tyskland	1984	Det anbefales at anvende direkte kontakt mellem smeltemedie og en varmetransportør (fx olie), da varmeovergang gennem en væg ikke er tilstrækkelig.
36	Japan	1984	Undersøger tre forskellige kvaliteter af natriumacetat. Det konkluderes, at den billigste ("teknisk rent") faktisk er den bedste, da urenhederne har en evne til at forhindre bundfald.
25	Tyskland	1984	Aflejring af natriumwolframat dihydrat skaber en sikker og fejlfri krystaldannelse ved frysepunktet

Nr.	Nationalitet	Årstal	Resumé
			eller få grader under frysepunktet i natriumacetatvarmelagre.
27	Vesttyskland	1984	Paper fra AIAA 19. termofysiske konference i USA. Referat haves ikke.
40	Japan	1984	Undersøgelse af, hvorledes opvarmning påvirker de stoffer, som tilsættes for at undgå underkøling. Specielt fokus på Na_2HPO_4 .
39	Japan	1984	Undersøgelse af, hvorledes opvarmning påvirker de stoffer, som tilsættes for at undgå underkøling. Specielt fokus på $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$.
1	Ungarn	1985	Kort gennemgang af diverse fysiske/kemiske problemer med bl.a. natriumacetat
41	Japan	1985	Undersøger ældning af de stoffer, som tilsættes salhydratet for at undgå underkøling.
37	Japan	1985	Patentskrift for smeltemedie (53-69% massefraktion vandfrit salt, polyvinyl alkohol, paraffin samt formaldehyd og/eller acetone).
29	Vesttyskland	1986	Smeltevarmelager med olie som varmetransportør i direkte kontakt med smeltemediet.
6	UK	1987	Numerisk modellering samt test af integreret varmepumpe/lager. CFD-lignende (Finite Difference) modellering af krystallernes udbredelse i en 2D-rotationssymmetri.
21	Japan	1987	Anbefaler Na_2CO_3 som krystaldannende ingrediens.
22	Østtyskland	1988	Undersøgelse af natriumacetat trihydrats termiske egenskaber.
26	Japan	1990	Langtidstest af et varmelager med natriumacetat iblandet fortykkelsesmiddel samt en effektiv krystaldannende ingrediens.
18	Kina	1991	Ved hjælp af differentiell scanningskalorimetri findes smeltepunkt: $50\text{ }^\circ\text{C}$ og smeltevarme: $209,3\text{ J/g}$ for en blanding af natriumacetat og vinsyre.
11	Frankrig	1991	Undersøgelse af nogle krystaldannende stoffer, som kan forhindre underkøling af natriumacetat.
19	Kina	1991	Undersøgelse af eutektisk punkt for natriumacetat-trihydrat. Der opnås et smeltepunkt på $30\text{ }^\circ\text{C}$. Smeltevarmen er $200,5\text{ kJ/kg}$.
43	Korea	1991	Ved hjælp af eksperimentelle undersøgelser fremskaffes basale designoplysninger for smeltevarmelagre af rørtypen.
3	UK	1993	Samlet vurdering af natriumacetat, paraffinovoks og palmefedt. Overraskende konkluderes det, at paraffinovoks er bedst.
14	Japan	1994	En beskrivelse af de systemer til varmelagring og transport, som er praktisk anvendelige i dag. Det nævnes bl.a., at natriumacetat er det bedst egnede uorganiske smeltemedie til varmelagring.
5	Korea	1996	Undersøgelse af varmeovergangstal for krystalliserende natriumacetat i rør uden finner samt rør med tykke og tynde finner (hhv. $250\text{ W/m}^2\text{K}$ og $150\text{ W/m}^2\text{K}$).

Nr.	Nationalitet	Årstal	Resumé
31	Japan	1999	Udvikling af en termisk buffer for gulvvarme, vha. natriumacetat tilsat et fortykkelsesmiddel (polymer), som hindrer fase separation.

Den udenlandske forskning har været koncentreret om følgende hovedemner:

Bestemmelse af grundlæggende stofkonstanter for natriumacetat og andre smeltemedier. Undersøgelserne omfatter mange forskellige blandinger af diverse salte (natriumacetat, kaliumacetat, calciumacetat), syrer (vinsyre, urinsyre, eddikesyre) samt alkohol, paraffin, formaldehyd og polymerer. Den højeste smeltevarme der er fundet rapporteret, er imidlertid ren natriumacetat: 340 J/cm^3 , hvilket er ca. 265 J/g .

Andre projekter har koncentreret sig om *designparametre for optimering af smeltevarmelagre og praktisk afprøvning af smeltevarmelagre*. Disse undersøgelser strækker sig fra eksperimentel måling af varmeovergangstal til CFD-modellering og selvfølgelig fuldskalaafprøvninger. De fleste projekter anbefaler salthydrat med direkte varmeveksling (som Figur 2), enten via en form for olie, via kølemidlet R11 eller via petroleumsdråber.

En stor gruppe af forskningsprojekter koncentrerer sig om at *undgå underkøling i natriumacetat og lignende salthydrater*. Dette gøres primært ved tilsætning af krystaldannende ingredienser. Blandt de anbefalede er Na_2CO_3 samt natriumwolframat.




I nyere tid er der sket en kolossal udvikling inden for anvendelse af PCM. For blot at nævne nogle få eksempler kan fremhæves:

- Udvikling af intelligente tekstiler
- Det US-baserede National Gypsum tester vægelementer med indbyggede varmelagre, udviklet af kemigiganten BASF
- Det tyske firma SGL Carbon Group udvikler PCM/grafitkomposit til køling af lastbilkabiner i chaufførens hviletid, når motoren er stoppet.
- Meget stor aktivitet inden for udvikling af intelligente byggematerialer til udjævning af temperaturer i boliger.

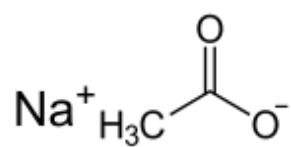
2 Varmelagring i salthydrat

2.1 MATERIALEVALG

Forbrænding af et brændsel er i princippet omdannelse af én energiform til en anden energiform. Energi kan ikke forbruges, den kan blot omdannes. Ved forbrænding omdannes kemisk bunden energi til varme. Varme kan nyttiggøres til arbejde, og alt levende har brug for varme til opretholdelse af livet. Varme er kostbar, og derfor er det vigtigt, at vi kan holde på varmen. Ved åben forbrænding forsvinder varmen i den blå luft, men ved indkapsling af forbrændingen kan varmen overføres til et medie – f.eks. vand i en varmekedel eller damp i en dampkedel. Damp har et højere energiniveau end vand, fordi stoffet er overgået til en anden aggregattilstand, idet fordampningsvarmen er tilført systemet. Forbrænding i en normal brændeovn, resulterer i opvarmning af ovnens materialer, opvarmning af rumluften gennem konvektion samt opvarmning af vægge, gulv, loft og inventar gennem stråling. Varmen bortledes kontinuerligt til koldere omgivelser, og af denne grund har man nogle steder udviklet ovne, som kunne holde på varmen i længere tid. Det er de såkaldte masseovne, tunge stenkolossal, som afbrænder en forholdsvis stor brændemængde på kort tid og herefter afgiver den akkumulerede varme langsomt. Varmen afgives også hen over natten. Sten er et udmærket medie til lagring af varme, men sten er tunge, og de fylder meget. Af denne grund er der i projektet søgt efter et fysik mindre varmelager men med stor kapacitet. Stoffet skal desuden være uproblematisk, hvad angår sundhed, miljø og sikkerhed. Det er oplagt at anvende et stof, som pga. faseskift kan indeholde en særlig stor energimængde. Faseskiftmaterialer, på engelsk Phase Change Materials (PCMs), er ideelle i sammenhæng med termiske processer, idet de hhv. lagrer eller frigiver termisk energi i takt med, at de smelter eller fryser. Det enkleste, billigste og mest effektive PCM er vand. Uheldigvis har vand dog én ulempe, og det er dets lave frysepunkt. 0°C gør vandet uegnet til hovedparten af varmelagringsopgaver, hvor temperaturen fortrinsvis er noget højere. Et stof som er på fast form ved stuetemperatur, og som smelter ved varmepåvirkning fra en brændeovn, kunne være stearin eller endnu bedre et salthydrat. De fleste salhydrater opfylder alle krav, som er oplyst ovenfor. Efterfølgende illustration viser tre forskellige varmelagre med identisk kapacitet.

		
Brænde: 3 kg ca. 12 kWh	Sten: 1200 kg, $0,48\text{ m}^3$ 12,1 kWh	Salthydrat: 130 kg, $0,10\text{ m}^3$ 12,1 kWh

Det er tydeligt, at salthydrat fylder meget mindre end sten, og dette skyldes, at salthydrat ændrer aggregattilstand fra fast til flydende ved en passende temperatur. Sten har et meget højt smeltepunkt, og derfor resulterer opvarmningen blot i en temperaturstigning – sten indeholder således kun den sensible varme. Salhydrats temperatur stiger også, men desuden smelter stoffet, hvorefter det yderligere indeholder smeltevarmen. Varmemængden som kan lagres i salthydrat, kan beregnes vha. følgende formel:



kapacitet 58 °C solid			
Specifik varme- kapacitet 58 °C liquid	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	-	3,0
Varmeledningsevne 58 °C solid	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	-	0,7
Varmeledningsevne 58 °C liquid	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	-	0,4

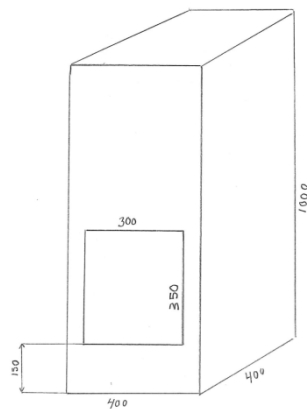
I projektet anvendes natriumacetat-trihydrat, som i det følgende benævnes salthydrat eller PCM.

3 Udvikling af varmelager

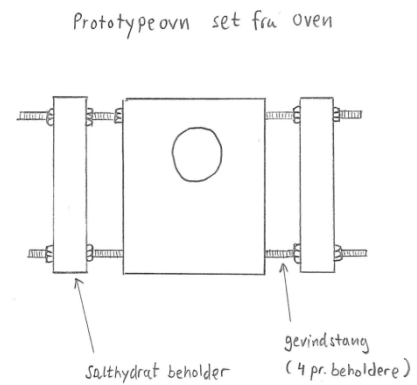
3.1 INDLEDENDE BEREGNINGER OG VARMETRANSMISSIONSSIMULERINGER

Indledningsvis enedes projektpartnerne om at fremstille en simpel brændeovn, med standardforbrændingskammer og påmontere denne ovn to salthyratbeholdere i hver sin side. En simulering af temperaturstigningen i PCM viste hurtigt, at det var nødvendigt med et mellemrum mellem brændeovnens side og salthyratbeholderen.

FIGUR 5: FORSØGSBRÆNDEOVN, OPSTALT

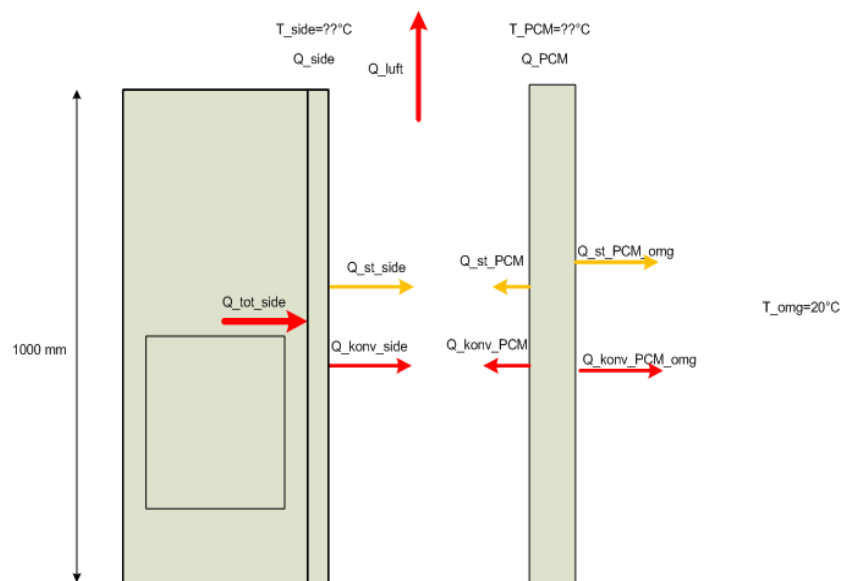


FIGUR 6: FORSØGSBRÆNDEOVN SET FRA OVEN



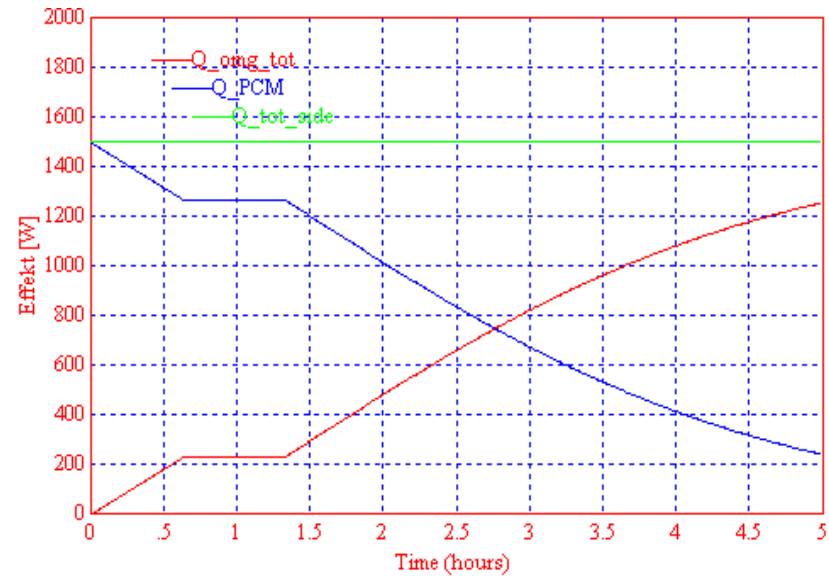
Ved simuleringen af varmetransmissionen forudsættes en 1-dimensionel, dynamisk model, med ideel varmeovergang til PCM og ideel varmeledning i PCM. De idealiserede varmestrømme fremgår af Figur 7 og betegnelserne burde være selvforklarende.

FIGUR 7: SIMULERINGSMODEL FOR VARMETRANSMISSIONSBEREKNINGER

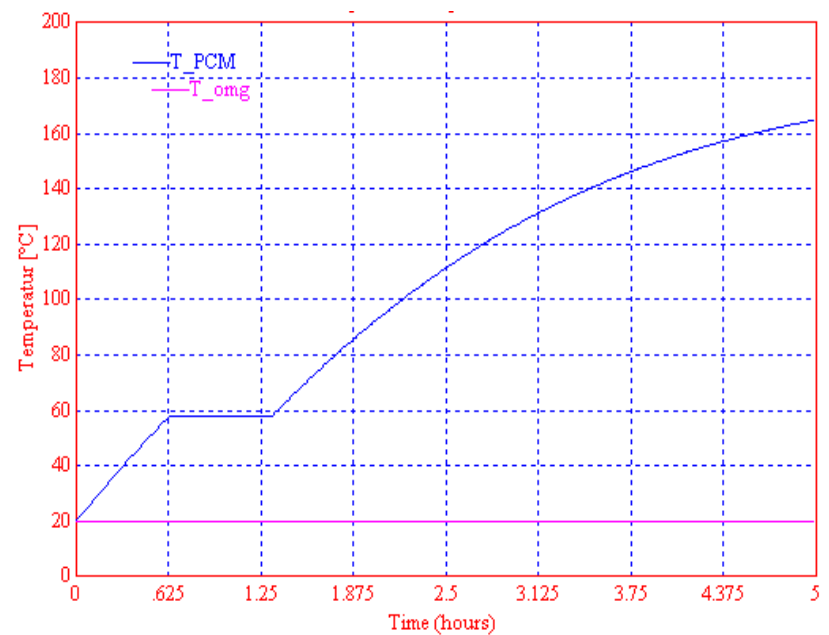


Ved første beregning antages, at afstanden mellem brændeovns side og salthydratbeholderen er "nul". Det ses, at den estimerede effekt gennem siden ($Q_{tot_side} = 1500$ watt) afsættes fuldstændig i PCM, hvorved det får en temperaturstigning, som fremgår af Figur 9.

FIGUR 8: EFFEKTFORDELINGEN I DET IDEELLE SYSTEM MED DIREKTE KONTAKT MELLEM PCM OG OVN

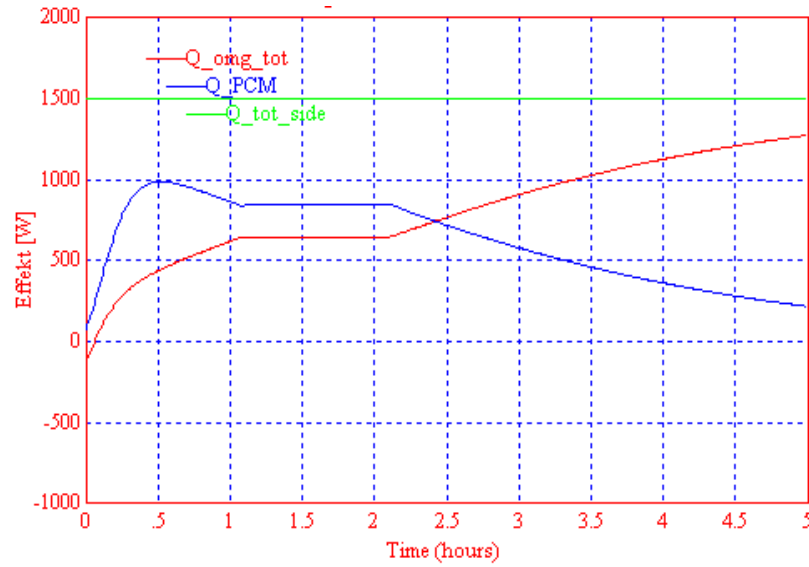


FIGUR 9: TEMPERATURFORLØB VED AFSTAND "NUL"

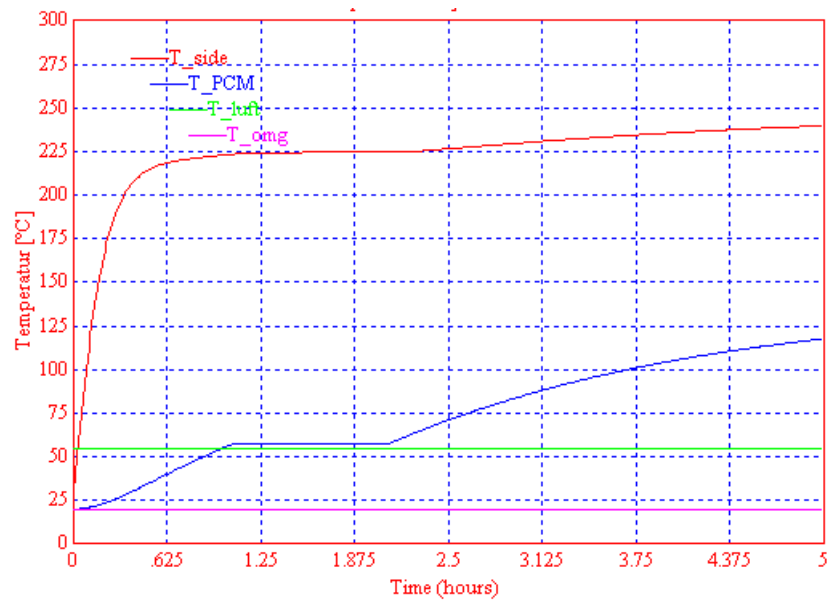


Det fremgår, at temperaturen i PCM ved afstand "nul", passerer de 100 °C allerede efter ca. to timer. I et åbent system vil vandet fordampe, og ved ca. 120 °C vil salthydratets krystalvand afdampe, og den ønskede smelteproces ville ikke finde sted. Salthydratet skal opvarmes mere nøjsomt, så der blev foretaget en simulering med luft mellem ovn og PCM-beholder.

FIGUR 10: EFFEKTFORDELING I DET IDEELLE SYSTEM MED LUFT MELLEM PCM OG OVN



FIGUR 11: TEMPERATURFORLØB, NÅR DER ER LUFT MELLEM PCM OG OVN



Temperatursimuleringen indikerer, at den valgte luftspalte mellem PCM og ovnen kunne være den rigtige løsning – under alle omstændigheder er temperaturstigningen betydeligt mere moderat.

3.2 FORSØG MED VARMELAGER VERSION 1 – ÅBEN BEHOLDER

3.2.1 Indledende smeltforsøg samt tilsætning af vand

Indledningsvis er der på Teknologisk Institut foretaget forsøg med smeltning af salthydrat på en kogeplade. Formålet er bestemmelsen af kogepunkt ved tilsætning af 5 % vand.

BILLEDE 1: FORSØG MED SMELTNING AF SALTHYDRAT



BILLEDE 2: SMELTET SALTHYDRAT



Ved tilsætning af 5% vand er salthydratet omdannet til en klar væske ved 80 °C. Væskens kogepunkt er 115 °C. Ved de efterfølgende forsøg er det tilstræbt at holde systemet under dette kogepunkt.

I foråret 2009 er der hos Morsø Jernstøberi A/S fremstillet en brændeovnsprototype med varmelager i form af stålbeholdere med salthydrat, placeret ud for brændeovnens sider. Som udgangspunkt er selve brændeovnen bygget efter velkendte principper, der sikrer en forbrænding med høj effektivitet og lav emission. Indledningsvis er der gennemført præliminære tests for at samle erfaring med DCM's faseskifteegenskaber.

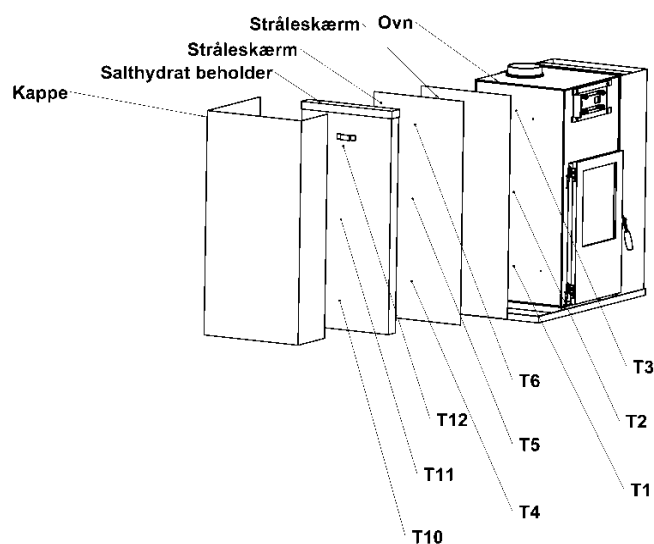
1. Fyldt salthydratbeholder blev placeret 100 mm ud for ovnens venstre side. Indfyring med optændingspinde. Allerede under optændingen opnås temperaturer over 100 °C på overfladen af beholderen. Fyldt salthydratbeholder blev placeret 100 mm ud for ovnens venstre side. Desuden indsættes der en stråleplade mellem ovnens side og beholderen. Indfyring med optændingspinde samt efterfølgende indfyring af 2 kg birkekævlere (tre stk.). I slutningen af indfyringen opnås temperaturer over 100 °C på overfladen af beholderen.
2. Fyldt salthydratbeholder blev placeret 100 mm ud for ovnens venstre side. Desuden indsættes der to stråleplader mellem ovnens side og beholderen. Ved optænding og de efterfølgende indfyringer holder overfladetemperaturen på beholderen sig under 100 °C.

Det besluttes at gå videre med opstillingen fra test 3. Varmeafgivelsen fra ovn til beholder er dæmpet ved hjælp af:

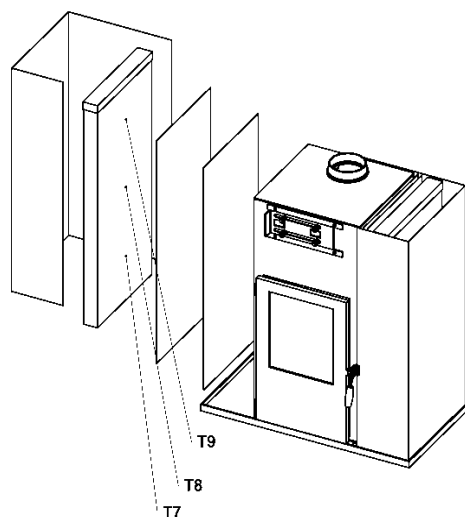
15 mm luftspalte – 1 mm stålplade – 15 mm luftspalte – 1 mm stålplade – 20 mm luftspalte.

Af efterfølgende figurer fremgår placeringen af temperaturfølere.

FIGUR 12: PLACERING AF TERMOELEMENTER PÅ OVN, STRÅLESKÆRM OG DCM-BEHOLDER



FIGUR 13: PLACERING AF TERMOELEMENTER PÅ INDERSIDEN AF DCM-BEHOLDER



3.2.2 Forsøg hos Morsø Jernstøberi A/S – april/maj 2009

Forsøgenes formål er at undersøge varmepåvirkningen af PCM-beholderen samt opvarmnings- og smelteforløbet ved varierende strålingspåvirkning. Termoelementerne er placeret som angivet i Figur 12 og Figur 13.

PCM-beholderens rumfang er 17 liter, og der er påfyldt ca. 17 liter salthydrat.

Driftsbetingelser er som følger:

Eget røgtræk på prøvestand efter standard NS 3058. Måling af vægt og røggastemperatur. Forholdsvis høj varmeydelse på ovn.

Forbrændingsluftspjældet er i høj position med indfyring af ca. 2-2,25 kg birkebrænde i timen (tre stk. kævler).

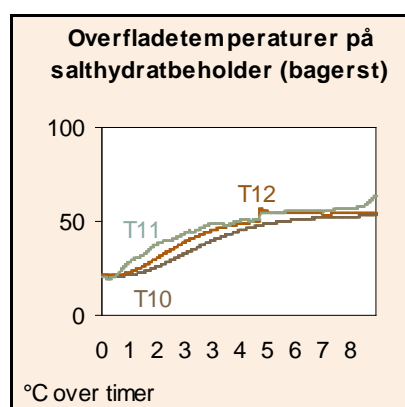
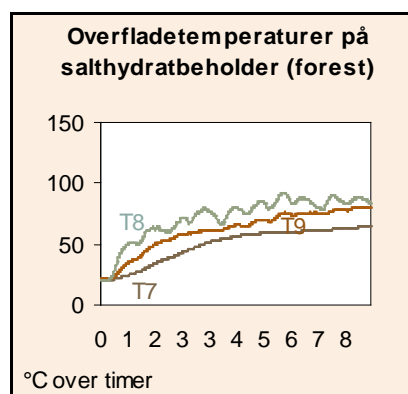
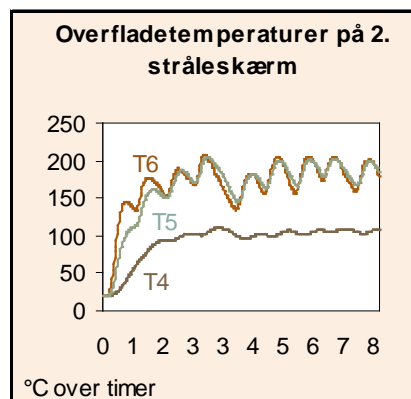
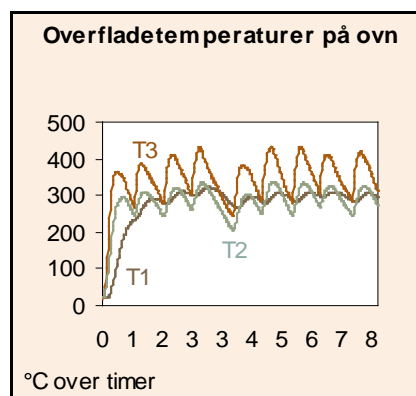
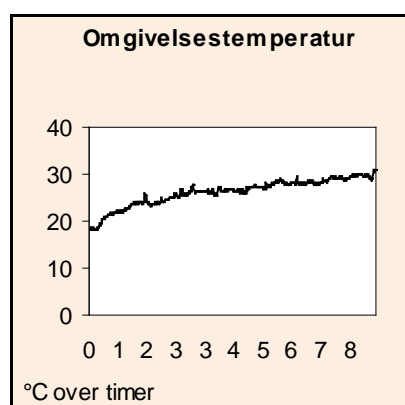
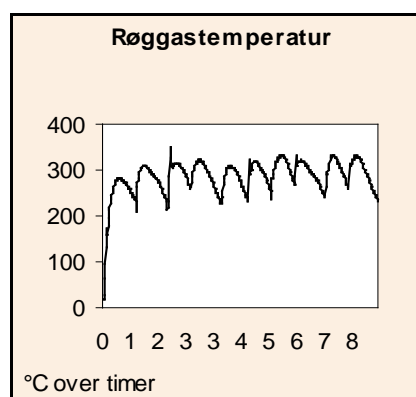
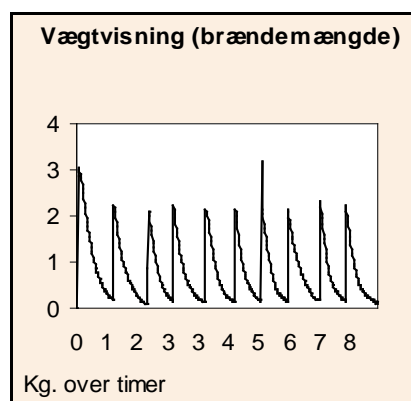
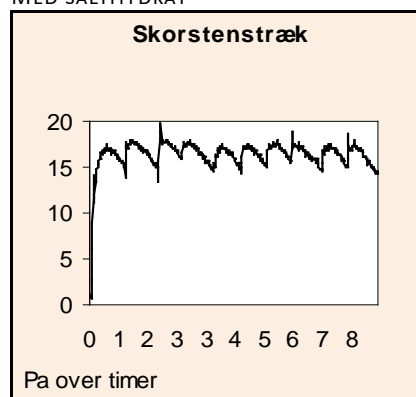
Forsøgslaboratoriet er ca. 40 m² (220 m³). I forhold til beboelse er rummet dårligere isoleret. Der er god ventilation. Altså må man forvente, at almindelige boliger vil blive mere påvirket (højere temperatur).

Forsøget består af en varmeopladningsperiode, hvor man løbende indfyrrer brænde i ovnen, således at salthydrat smelter og ”oplader”. Dernæst følger en periode, hvor salthydratet afgiver varme til omgivelserne. I denne periode indfyres der ikke i ovnen. Til sammenligning udføres der et identisk forsøg uden salthydrat (tom beholder).

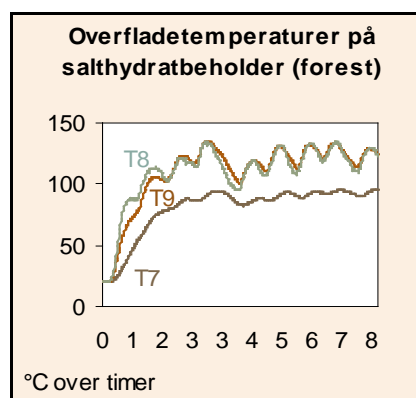
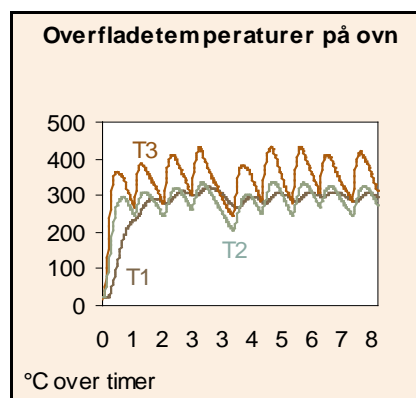
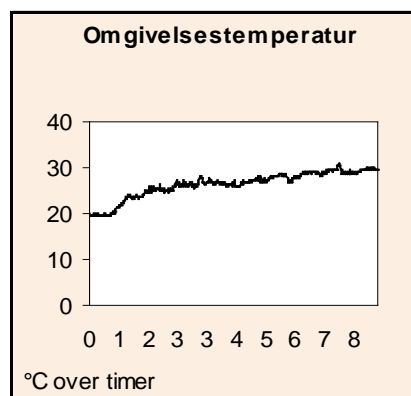
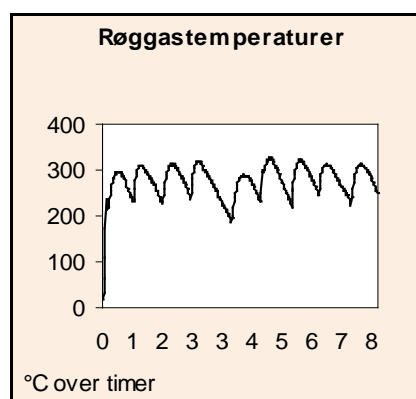
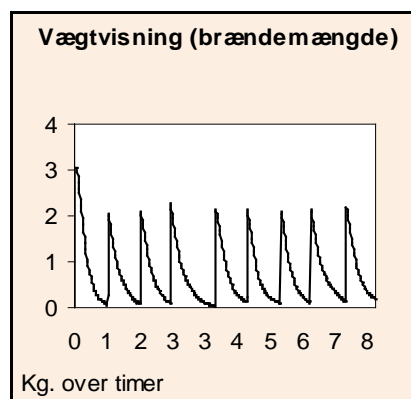
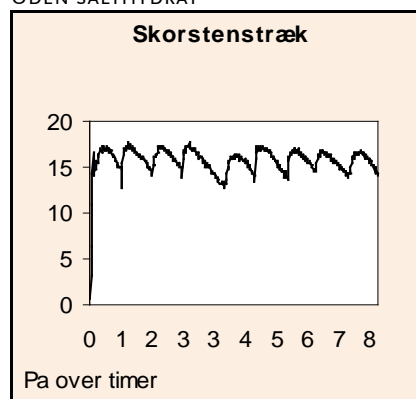
Resultater fra april-/majforsøget:

De følgende grafer viser registreringer i opladningsperioden med salthydrat i venstre beholder.

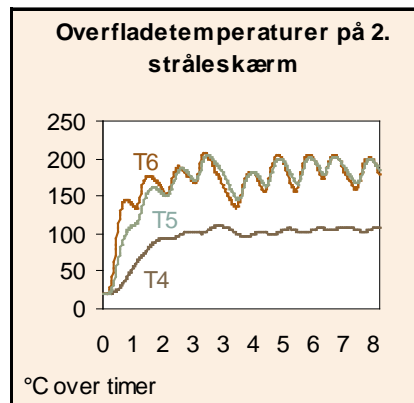
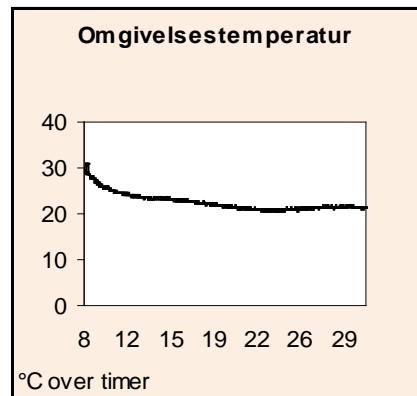
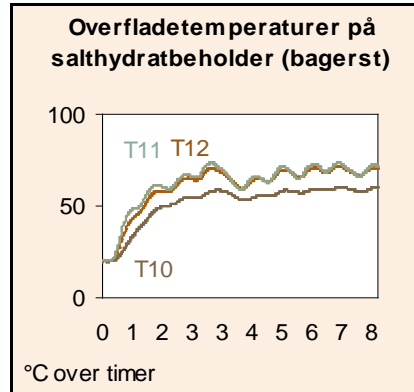
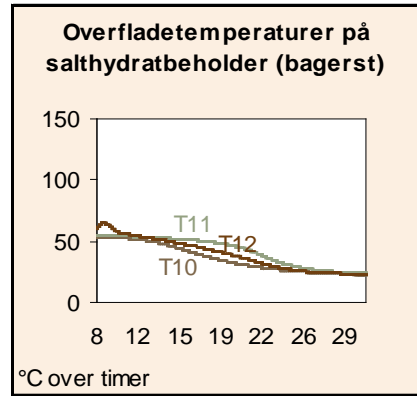
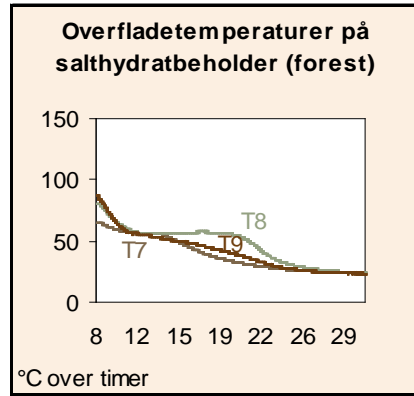
FIGUR 14: REGISTRERINGER I FORSØG 1
MED SALTHYDRAT



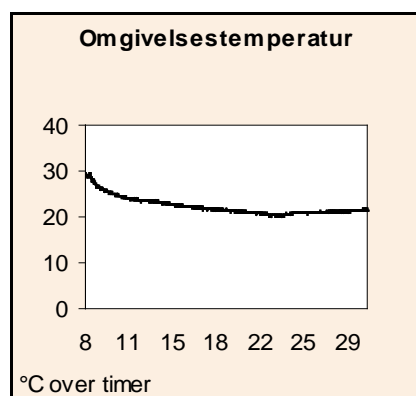
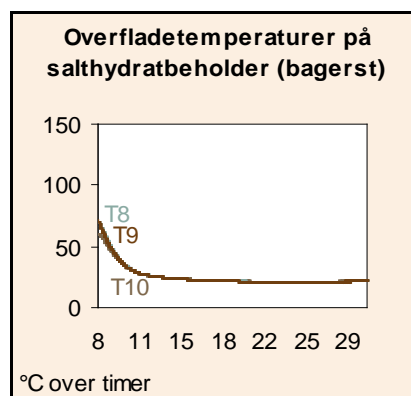
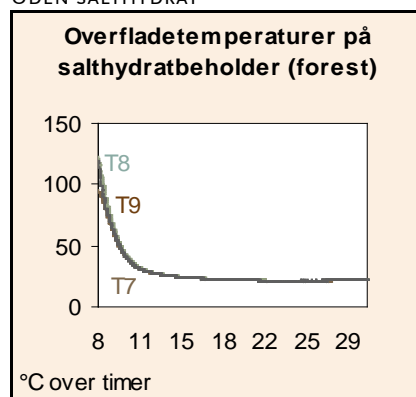
FIGUR 15: REGISTRERINGER FORSØG 1
UDEN SALTHYDRAT



FIGUR 16: FORSØG 1 – AFLADNINGSPERIODE



FIGUR 17: FØRSØG 1 – AFLADNINGSPERIODE
UDEN SALTHYDRAT



Konklusion – Forsøg april/maj 2009.

Med den første forsøgsopstilling er det svært at oplade/smelte salthydratet inden for et acceptabelt tidsrum, når der skal tages højde for, at salthydratet ikke må nå kogepunktet. Risiko for lokal kogning er til stede, idet salthydrat er en dårlig varmeleder.

Positive iagttagelser:

- Smeltet salthydrat holder en høj temperatur længe (>50°C i >6 timer).

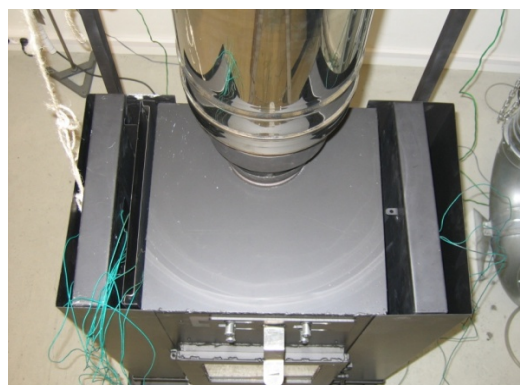
Negative iagttagelser:

- 10 indfyringer over 8 timer er ikke tilstrækkelig tid til at smelte 17 liter salthydrat.
- Inden for 8 timer holdes overfladetemperaturen på PCM-beholderen under 100 °C. Muligvis ville en længere prøveperiode resultere i, at overfladetemperaturen overstiger 100 °C. Blindtesten viser, at en tom beholder opnår en overfladetemperatur på ca. 135 °C.
- Omgivelsestemperaturen i laboratoriet steg med ca. 10 °C under afprøvningen. I normalboligen ville temperaturen stige endnu mere!
- Med et brændeforbrug på 2 kg i timen yder ovnen en effekt på ca. 6,5 kWh, hovedparten som stråling ud gennem ruden i frontlågen.

BILLEDE 3: PROTOTYPE MED PCM VARMELAGER
PÅ NORSK PRØVESTAND



BILLEDE 4: PROTOTYPE MED PRØVEOPSÆTNING TIL
VENSTRE, SET FRA OVEN



Forsøgene med dobbelt glaslåge hos Morsø Jernstøberi A/S – juli 2009
En stor del af varmeeffekten transmitteres ud gennem glaslågen. Her er der intet varmelager, som kan optagevarmeeffekten. Derfor er det hensigtsmæssigt at prøve at begrænse varmeudledningen her.

Forsøgets formål:

Da man af æstetiske grunde ønsker at have visuelt udsyn til flammerne, afprøves det, om man kan mindske varmeudledningen ud gennem lågen ved at tilføje et ekstra glas samt luftspalte (termorudeprincip). Hvor man traditionelt har en 6 mm glasrude i lågen, har man i dette forsøg en låge med først en 6 mm glasrude, dernæst 8 mm luftspalte og endelig endnu en 6 mm glasrude.

Fremgangsmåde:

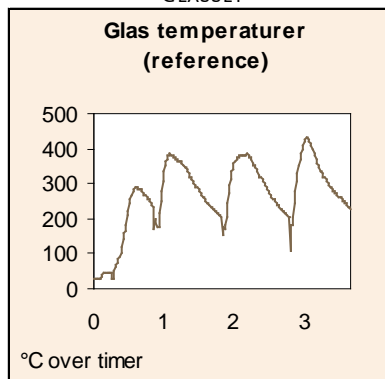
Temperaturen midt på ydersiden af glaslågen måles under drift af brændeovnen. Der indfyres 3 stk. birkekævler, i alt 2 kg. Dette gentages, når der atter er grundglødelag. Ved sidste indfyring i serien indfyres der 6 stk. birkekævler, i alt 2 kg. Denne procedure foretages både for låge med enkelt glas (reference) og for låge med dobbelt glas.

Resultater:

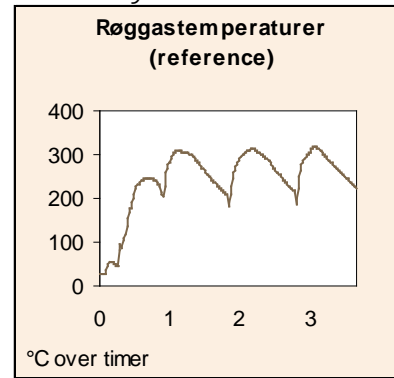
Maksimale temperaturer på glasset (ydre side) samt maksimale røggastemperaturer.

	Låge med 1 glas (reference)			
	Brænde- mængde kg	Antal kævler stk.	Glas- temperatur °C	Røggas- temperatur °C
Optænding	1,7	15	289	247
1. Indfyring	2	3	384	309
2. Indfyring	2	3	384	312
3. Indfyring	2	6	432	317
Middelværdi			372	296

FIGUR 18: TEMPERATUR PÅ YDERSIDEN AF GLASSET

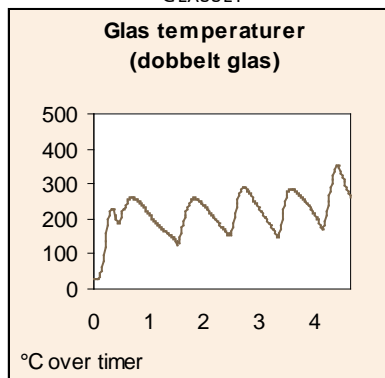


FIGUR 19: RØGGASTEMPERATUR

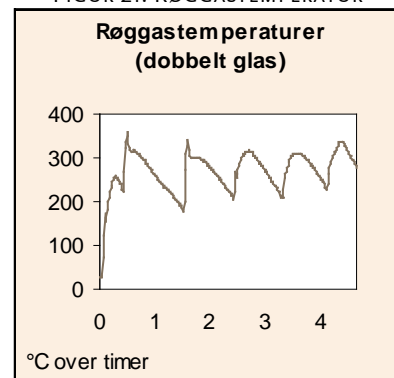


	Låge med dobbelt glas			
	Brænde- mængde kg	Antal kævler stk.	Glas- temperatur °C	Røggas- temperatur °C
Optænding	1,6	15	229	258
1. Indfyring	2	3	261	358
2. Indfyring	2	3	259	340
3. Indfyring	2	3	291	315
4. Indfyring	2	3	283	311
5. Indfyring	2	6	354	336
Middelværdi			279	320

FIGUR 20: TEMPERATUR PÅ YDERSIDEN AF GLASSET



FIGUR 21: RØGGASTEMPERATUR



Konklusion:

Varmetransmissionen ud gennem lågen sænkes, når man isætter et ekstra stykke glas. Overfladetemperaturen på ydersiden af glas nr. 2 er 93°C lavere end glasset på referencelågen. Til gengæld lader det til, at røggastemperaturen stiger en smule ved dobbelt glas. Dette forringer ovnens virkningsgrad, uden at der nødvendigvis afsættes mere varme på PCM-varmelagrene.

3.2.3 Forsøg med iblanding af grafit i salthydrat

Med 0,6 W/(m·K) er salthydrat en forholdsvis dårlig varmeleder. Udenlandsk forskning (se ovenfor) har vist, at PCM's varmetransmissionsegenskaber kan forbedres ved tilsætning af grafit. Grafit har en varmekonduktivitet på 3

$W/(m \cdot K)$, så blandingen burde have betydeligt bedre varmeledningsegenskaber end rent salthydrat.

Forsøgets formål er at afprøve grafits opløselighed i salthydrat.

Fremgangsmåde:

Et glas med 200 gr. salthydrat opvarmes til 80 °C. Ved denne temperatur er salthydratet flydende. 50 gr. grafit i form af fint pulver opvarmes ligeledes til 80 °C. Grafit og salthydrat blandes dernæst til en homogen masse.

Problemstilling:

Grafits massefylde (2100-2300 kg/m³) er større end salhydrats (1280 kg/m³ i smeltet tilstand). Dette antyder, at grafit ikke kan blandes homogent i en salhydratopløsning, derimod vil det samle sig som bundfald.

Resultat:

Efter at salthydratet er størknet, kan resultatet vurderes:

BILLEDE 5: BUNDFÆLDET GRAFIT OG SALTHYDRAT



Grafitten samles som bundfald, altså kan den benyttede grafittype ikke blandes homogent med salthydrat.

Konklusion:

Den prøvede grafittype er mindre egnet som varmeleder i salthydrat, da det samler sig som bundfald.

3.2.4 Forsøg på Teknologisk Institut, opvarmning vha. halogenlamper

Opvarmning af PCM-varmelagre vha. brændefyring er ret tidskrævende, hvorfor der på Teknologisk Institut er lavet en forsøgsopstilling med elektrisk opvarmning via hhv. en og to halogenlamper med en effekt på 1500 W hver. Tanken er at gennemføre mindre tidskrævende opvarmningsforsøg, for derigennem at opnå mere viden på kortere tid. I juli/august 2009 blev gennemført en forsøgsrække med denne forsøgsopstilling. PCM-beholderen blev forsynet med 6 termoelementer i fronten, som vender mod halogenlampen og 6 stk. på bagsiden. Ved forsøget blev anvendt salthydrat med 10 % grafit og 5 % vand. Ved 80 °C bliver blandingen til en tyndtflydende pasta. Der blev også gennemført forsøg med rent salthydrat.

Et præliminært forsøg af den 21.7.2009 gik ud på at undersøge afstandens indflydelse på beholdertemperaturen. Beholderen var tom ved dette forsøg. Følgende temperaturer blev registreret efter 20 minutter ved 1200 W.

Afstand cm	T_{midt} °C	T_{top} °C
20	135	78
15	157	83
10	208	90

T_{midt} er placeret i midten, lige ud for halogenlampen. T_{top} er placeret 23 cm fra beholderens øvre kant. De nederste termofølere som er placeret 32 cm fra beholderens bund, registrerer slet ingen temperaturstigning.

Første forsøg af den 23.7.2009 blev gennemført med 24,09 kg salthydrat tilsat 5 % vand. Afstand mellem halogenlampen og beholderen er 16 cm, og lampens effekt er 1200 W. Efter 25 minutter er T_{midt} steget til 76 °C. Lampen slukkes, og afstanden mellem halogenlampen og beholderen mindskes til 7 cm. Efter 20 minutter (kl. 11:30) er temperaturen 50 °C, hvor lampen tændes igen. I løbet af syv minutter stiger T_{midt} til 93 °C. Der er samlet væske i midten af beholderen, men der er ingen tegn på kogning. Efter yderligere 12 minutter stabiliseres T_{midt} omkring 90 til 100 °C. Siderne er noget koldere, og bunden er helt koldt endnu. Smelteprocessen skrider frem tilfredsstillende, T_{midt} er nu stabil 93 °C, væsken er 40 °C i toppen og 80 °C i midten, og væskespejlet er stigende.

Nu kan smelteprocessen følges gennem opmåling. Kl. 16:35 (efter 5 timer og 5 minutter) er smelten 71 cm dyb i midten og 60 cm i siderne, ca. 80 % af salthydratet er smeltet. Bunden er 28 °C. Beholderens højde er 88 cm, og salthydratfyldningen havde en højde på 84 cm i starten. I begyndelsen var væskespejlet 18 cm fra beholderens øvre kant, og ved forsøgets afslutning er afstanden 7,5 cm, hvilket er udtryk for salthydratets ret store udvidelse, når den opvarmes og smelter. Udvidelsen skal der tages højde for, når der anvendes en lukket beholder.

Konklusion på forsøg 1:

Med den givne varmepåvirkning er smelteprocessen for langsom. Salthydratets dårlige varmeledningsegenskaber bevirker et uens smelteforløb i beholderen. Varmeudvidelsen af salthydrat er ca. 12,5 %. Den 24.7.2009 kl. 08:43 er beholderens gennemsnitstemperatur 26 °C, og rumtemperaturen er 22,5 °C. Salthydratet er størknet langs beholderens sider, og i midten har der samlet sig vand i et krater, som er 41 cm dybt i midten. Vægttabet er 270 g, som skyldes fordampning af vand.

Forsøg 2 af den 24.7.2009 blev gennemført med 26,6 kg salthydrat tilsat 5 % vand samt 10 % grafitpulver. Afstanden mellem halogenlampen og beholderen er 7 cm, og lampens effekt er 1200 W. Kl. 11:15 tændes lampen. Efter 10 minutter er T_{midt} steget til 235 °C. Beholderens vægtemperatur opvarmes meget kraftig, fordi der tilsyneladende ikke er kontakt til salthydratet. Af Billede 6 fremgår det, at pladen som vender mod halogenlampen, buler ud, så her er der en dårlig varmeovergang.

BILLEDE 6: FORSØGSOPSTILLING MED ÉN HALOGENLAMPE



Omkring kl. 13 begynder T_{midt} at falde. Kl. 13:15 er den nede på 135 °C. Der er begyndende kontakt med smeltet salhydrat. Bunden er varmere end ved forsøg 1, kl. 14:45 måles 37 °C i bunden, og T_{midt} er 65 °C. Toppen viser ingen tegn på smeltning. Kl. 16:20 er T_{midt} steget til 86 °C, og toppen er uændret. Halogenlampen slår fra pga. høj temperatur.

Konklusion på forsøg 2:

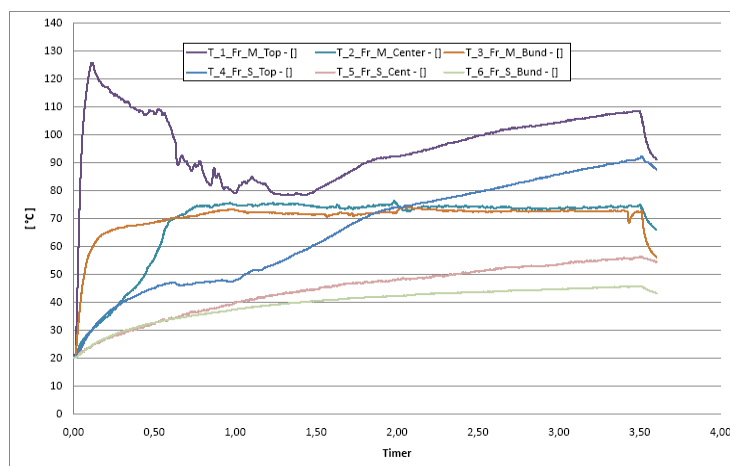
Grafitten har hævet temperaturen en kende i bunden af beholderen, men smelteprocessen er fortsat utilfredsstillende.

Forsøg 3 af den 14.8.2009 blev gennemført med ca. 25 kg salhydrat tilsat 5% vand. Der er opsat to halogenlamper, som er indstillet til 1200 W hhv. 800 W nederst og øverst. Afstanden mellem halogenlamper og beholder er ca. 10 cm. Kl. 11:39 tændes lamperne. Efter 3½ time, kl. 15:09, er alt salhydrat smeltet.

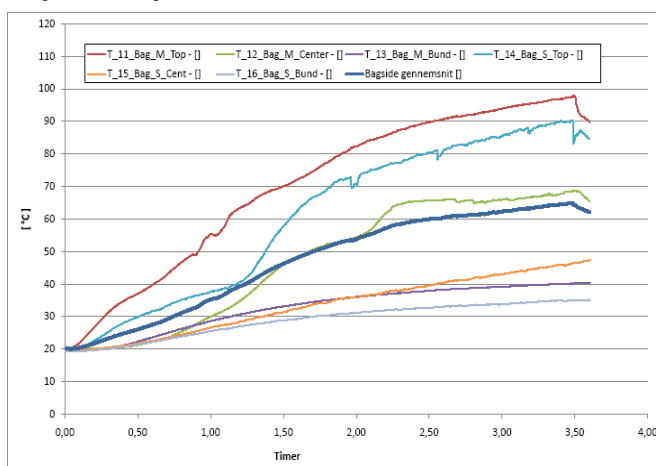
BILLEDE 7: FORSØGSOPSTILLING MED TO HALOGENLAMPER



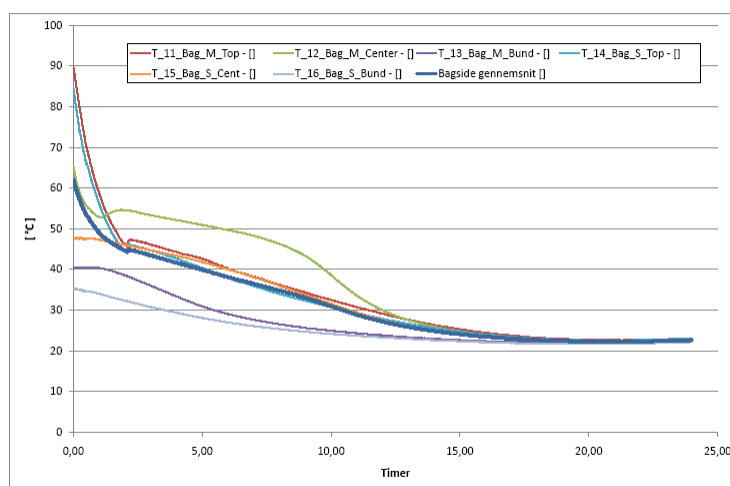
FIGUR 22: FORSØG 3, OPVARMINGSFORLØB AF BEHOLDERENS FRONT



FIGUR 23: FORSØG 3, OPVARMINGSFORLØB AF BEHOLDERENS BAGSIDE



FIGUR 24: FORSØG 3, AFKØLINGSFORLØB



Figur 22 og Figur 23 viser, at varmpåvirkningen af beholderen er ret uensartet, og at varmen fordeler sig meget modvillig i PCM. Middeltemperaturen på beholderens bagside passerer 60 °C efter 2,5 timer. Det meste af PCM er smeltet på det tidspunkt. De to temperaturmålinger nær beholderens bund ligger noget under smeltepunktet endnu.

Figur 24 viser nedkølingsforløbet af smelten. Det ses, at middeltemperaturen passerer 30 °C efter 10 timer. Tiderne for opladning og afladning af PCM ser lovende ud.

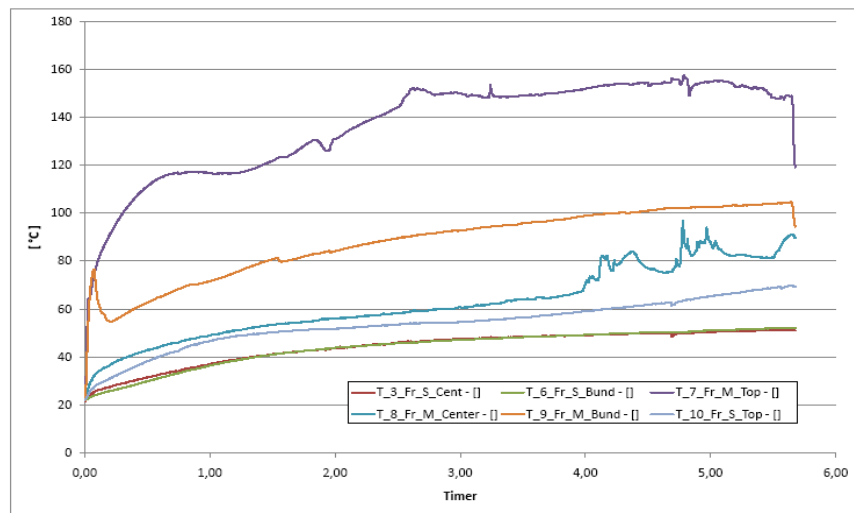
Forsøg 4 af den 17.8.2009 blev gennemført med ca. 27 kg salthydrat tilsat 5 % vand samt 10 % grafit-pulver. Der er opsat to halogenlamper, som er indstillet til 1200 W, hhv. 800 W nederst og øverst. Afstanden mellem halogenlamper og beholder er ca. 10 cm. Kl. 10:15 tændes lamperne. Kl. 12:15 blandingen er smeltet i toppen, væskespejl er 1,5 cm fra beholderens overkant. Kl. 14:56 kogning i toppen, væskespejl 1 cm fra beholderens overkant. Kl. 15:45 koger blandingen over, forsøget stoppes.

Dagen efter kunne det konstateres, at den størknede blanding havde sluppet beholdersiderne, hvilket ville forlænge en efterfølgende opvarmnings- og smeltefase.

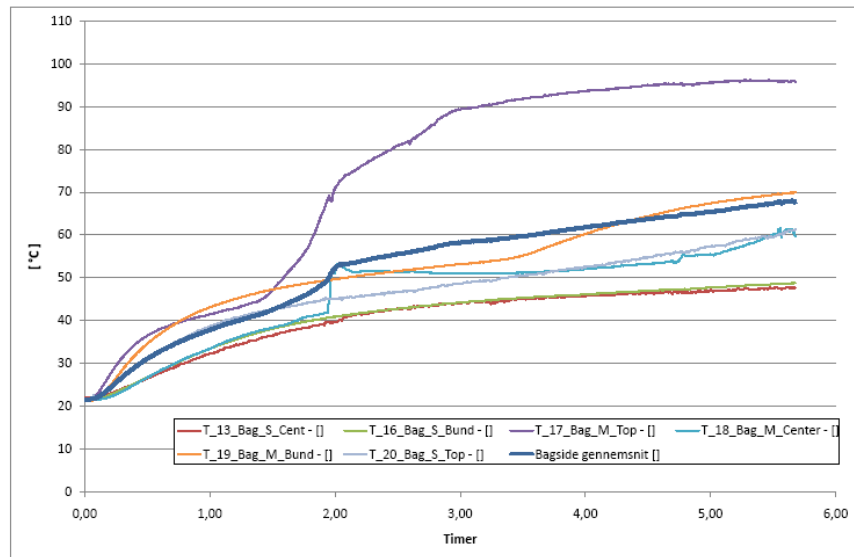
BILLEDE 8: DEN STØRKNEDE BLANDING SLIPPER BEHOLDERSIDERNE



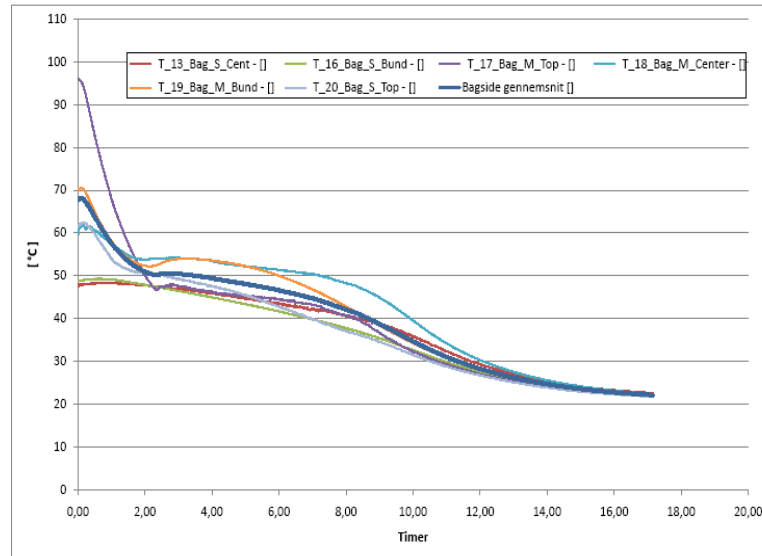
FIGUR 25: FORSØG 4, OPVARMINGSFORLØB AF BEHOLDERENS FRONT



FIGUR 26: FORSØG 4, OPVARMINGSFORLØB AF BEHOLDERENS BAGSIDE



FIGUR 27: FORSØG 4, AFKØLINGSFORLØB AF BEHOLDERENS BAGSIDE



Konklusion på forsøg 4:

Figur 25 og Figur 26 viser, at varmepåvirkningen af beholderen er ret uensartet, og at varmen fordeler sig meget modvillig i PCM på trods af grafitilsætningen. Middeltemperaturen på beholderens bagside passerer 60 °C efter 3,5 timer. Tilsætning af grafit resulterer i, at den smeltede blanding bliver mere tyktflydende (tixotropisk). Der er ikke synligt vand i den størknede blanding. Grafit er ikke ubetinget til fordel for smelteprocessen. Blandingsens udvidelse og sammentrækning ved hhv. opvarmning og afkøling gør, at beholderen skal udformes på en anden måde end de første forsøgsbeholdere. Varmetransmissionen skal forbedres, og problemet med at salthydratet slipper beholderens sider, skal elimineres.

3.2.5 Forsøg hos Morsø Jernstøberi A/S – august 2009

På baggrund af april-/majforsøget og den deraf følgende konklusion deles varmelagerets stålbeholder op i to kamre. Kamrene løber i hele beholderens længde, og bredden på hvert kammer er 35 mm. Formålet er, at det ene af kamrene skal fungere som beskyttelses-”stråleskærm” mod det andet bagvedliggende kammer, der er fyldt med salthydrat. Kammeret tættest på ovnen er fyldt op med polypropylen (PP) granulat. Granulatet fungerer også som varmelager men kan bedre tåle varmepåvirkningen fra ovnen. PP har et smeltepunkt på mellem 130 og 171 °C. PP’s smeltevarme er dog noget lavere end salthydratets.

Resultater fra augustforsøget:

Endnu inden der er fyldt salthydrat i det bagerst liggende kammer i stålbeholderen, undersøges det, hvorledes varmeudviklingen er, ved indfyring af 2 kg træ i timen.

Opstilling	Temperatur på skilleflade mellem kamrene samt tidspunkt
Ovn -> stråleskærm -> kammer med PP	58 °C efter 66 minutter og 128 °C efter 249 minutter (forsøg stoppes)

Ovn -> stråleskærm-> stråleskærm -> kammer med PP	58 °C efter 104 minutter 107 °C efter 271 minutter
---	---

Der er ikke tale om maksimale temperaturer. Temperaturerne vil muligvis stige yderligere, hvis forsøgene havde forsat.

Konklusion – Forsøg august 2009

I lighed med april-/majforsøget kan det konkluderes, at det ikke er muligt med den givne forsøgsopstilling, at oplade/smelte salthydratet inden for et acceptabelt tidsrum, hvis man samtidig skal tage højde for, at salthydratet ikke må nå kogepunktet.

3.2.6 Forsøg hos Morsø Jernstøberi A/S – oktober/november 2009

BILLEDE 9: FORSØGSOPSTILLING OKTOBER/NOVEMBER 2009



Forsøgsopstilling:

Ovn-stråleskærm-beholder med to kamre.

PP i kammer tættest på ovn. Salthydrat i kammer fjernest ovnen.

Låget til beholderen er på billedet fjernet.

Varmeudviklingen ved indfyring af 2 kg træ i timen med begge kamre fyldt op.

Opstilling	Temperatur på skilleflade mellem kamrene samt tidspunkt
Ovn -> stråleskærm -> kammer med PP, kammer med salthydrat	58 °C efter 97 minutter 98 °C efter 371 minutter (forsøg stoppes få minutter efter)
Ovn -> stråleskærm-> stråleskærm -> kammer med PP, kammer med salthydrat	58 °C efter 270 minutter 78 °C efter 417 minutter (forsøg stoppes)

Temperaturen i beholderen er stigende i hele forsøgsperioden. Maksimale temperaturer er ikke opnået.

Opstilling	Temperatur på overflade af beholder, fjernest fra varmekilde
Ovn -> stråleskærm -> kammer med polypropylene, kammer med salthydrat	49 °C efter 371 minutter (forsøg stoppes få minutter efter)
Ovn -> stråleskærm-> stråleskærm -> kammer med polypropylene, kammer med salthydrat	45 °C efter 390 minutter (forsøg stoppes)

I de koldeste områder i beholderen når temperaturen ikke over 58 °C i forsøgsperioden. Med andre ord er salthydratet ikke helt smeltet.

Konklusion – Forsøg oktober/november 2009

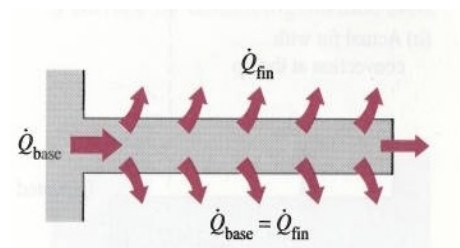
Med den givne forsøgsopstilling er det svært at oplade/smelte salthydratet inden for et acceptabelt tidsrum, hvis man samtidig skal tage højde for, at salthydratet ikke må nå kogepunktet.

3.3 VARMELAGER VERSION 2 – LUKKET BEHOLDER MED STAG

Samtlige forsøg indtil nu har vist, at der er brug for en betydeligt bedre varmetransmission i selve PCM, såvel med henblik på en kortere opvarmningstid, et mere jævnt smelteforløb og for at undgå lokal kogning. I den sammenhæng er det besluttet at udvikle en beholder, hvor det metalliske konstruktionsmateriale fungerer som varmeleder, således at varmen hurtig og målrettet fordeles over hele PCM. Idet der også er konstateret betydelige varmedeformationer af den hidtil relativt tyndvæggede beholder, som bevirker, at det størknede PCM slipper beholdervæggen, er der valgt en lidt kraftigere konstruktion. I varmekedler med plane vandkamre anvendes normalt stag, som forbinder vandkammeret to sider, således at pladerne forhindres i at bule ud. Dette konstruktionsprincip kan med fordel anvendes i forbindelse med PCM-beholderen. Samtidig med at stag stabiliserer konstruktionen, bidrager de også til at lede varmen. Af hensyn til varmeledningen er der monteret ekstra mange stag, og kun ca. hver femte stag er gennemgående og svejst på ydersiden for stabilitetens skyld. Yderligere er stagene anbragt asymmetrisk, med et større antal i den ene side af beholderen. Dette gøres for at skabe cirkulation i smelten. Den side hvor stagene sidder tættest, bliver varmest. Her stiger smelten op, og i den koldere side bevæger den sig ned. Herved opnås en omrøring i beholderen, som gør, at PCM smelter hurtigere og mere homogent.

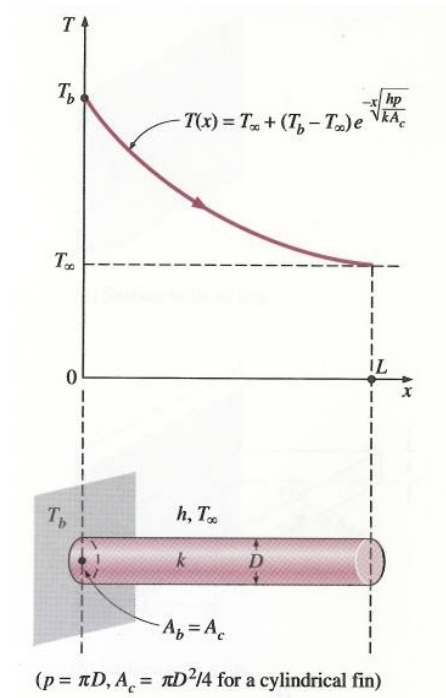
3.3.1 Beregning af varmetransmission gennem stag

$T(x)$ er temperaturforløbet gennem et langt cylindrisk stag med ensartet tværsnit. k er materialets varmekonduktivitet [$W/(m \cdot K)$], og

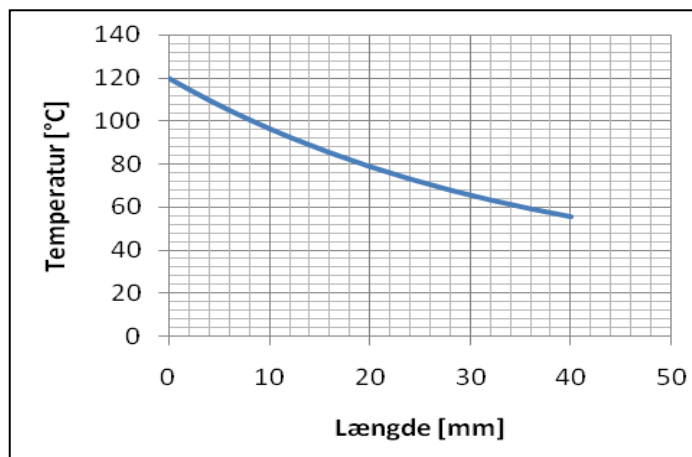


h er varmeovergangstallet [$W/(m^2 \cdot K)$].

Under stationære forhold er varmetransmissionen fra stagets overflade lig med varmekonduktiviteten gennem stagets base.



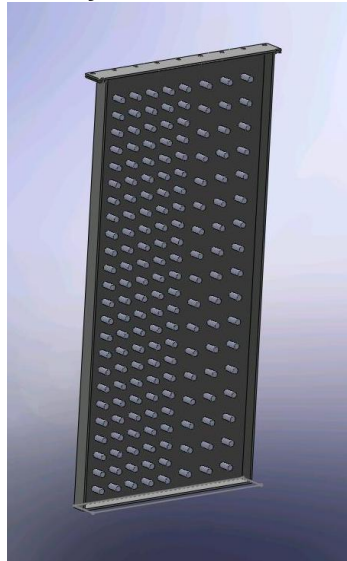
FIGUR 28: BEREGNING AF TEMPERATURFALD Gennem ET STAG



Et regneeksempel viser, at der ved anvendelse af 160 stag (ø10 x 40 mm) kan overføres en effekt på 1280 W med stålstag, 1760 W med aluminiumsstag og 1860 W med kobberstag. Den plane beholderoverflade af stål kan til sammenligning overføre 500 W.

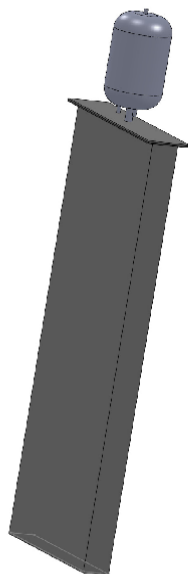
3.3.2 Konstruktion af nyt varmelager med stag

FIGUR 29: VARMELAGER MED STAG

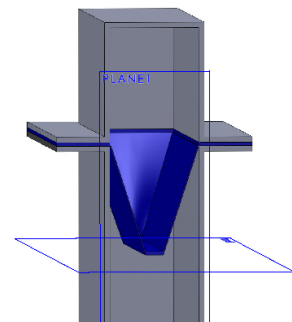


Af hensyn til symmetrien er der placeret 120 stag i beholderens venstre side og 51 i højre side. Forskellen i antal stag skal resultere i en temperaturdifferens, som tilvejebringer en omrøring i det smeltede materiale, så alt PCM smelter hurtigst muligt. For at undgå fordampning af vand er det besluttet, at beholderen er hermetisk lukket. Dette bevirker et vist overtryk. Derfor er nogle stag gennemgående for at holde stammen på de plane vægge. Beregning af stagenes nødvendige tværsnitsareal og beholderes pladetykkelse er udført iht. H. Netz, Dampkessel.

FIGUR 30: EKSPANSIONSSYSTEM VERS. 1

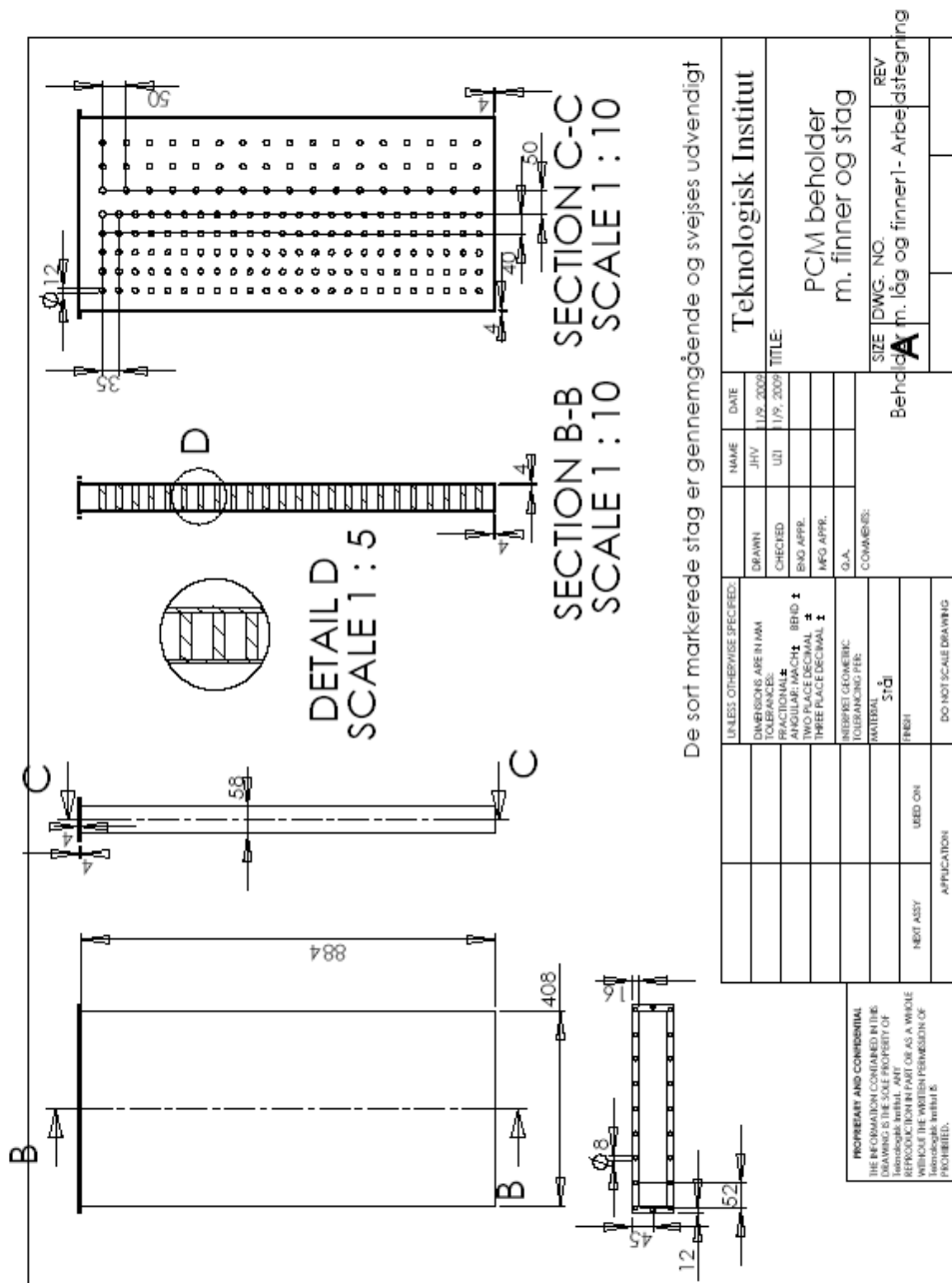


FIGUR 31: EKSPANSIONSSYSTEM VERS. 2



Grundet salhydratets store varmeudvidelse er der overvejet forskellige løsninger for ekspansionsystem. En lukket buffertank med sikkerhedsventil er en mulig løsning, som tilfredsstillende de teknisk og sikkerhedsmæssige krav,

men som er æstetisk uacceptabel. En lukket ekspansion med membran som anvendes i boligopvarmningssystemer, kan være løsningen. Til testformål er der set bort fra ekspansionssystemet. Vi har undladt at fylde beholderen fuldstændig, herved blev der plads til ekspansion.



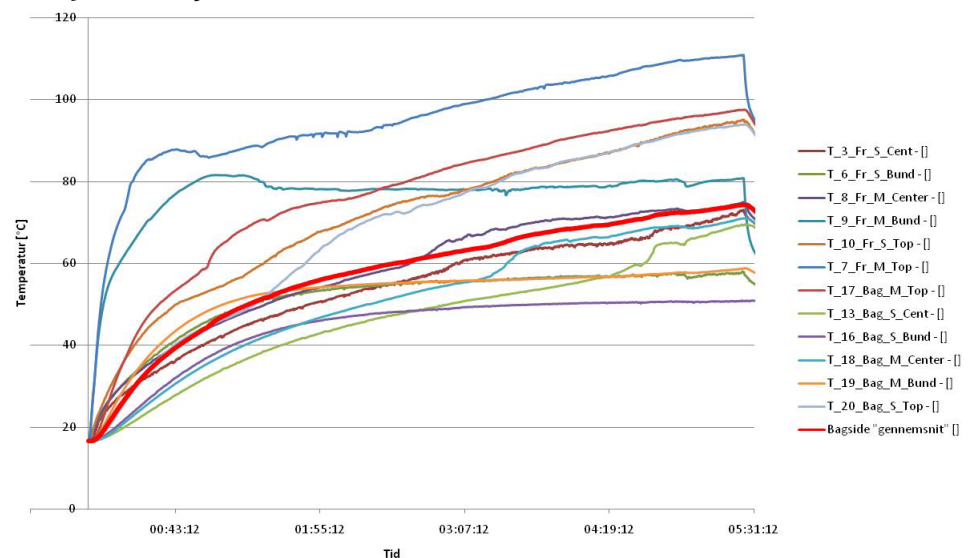
3.3.3 Forsøg med det nye varmelager, med halogenlamper

BILLEDE 10: FORSØGSOPSTILLING MED DEN NYE BEHOLDER



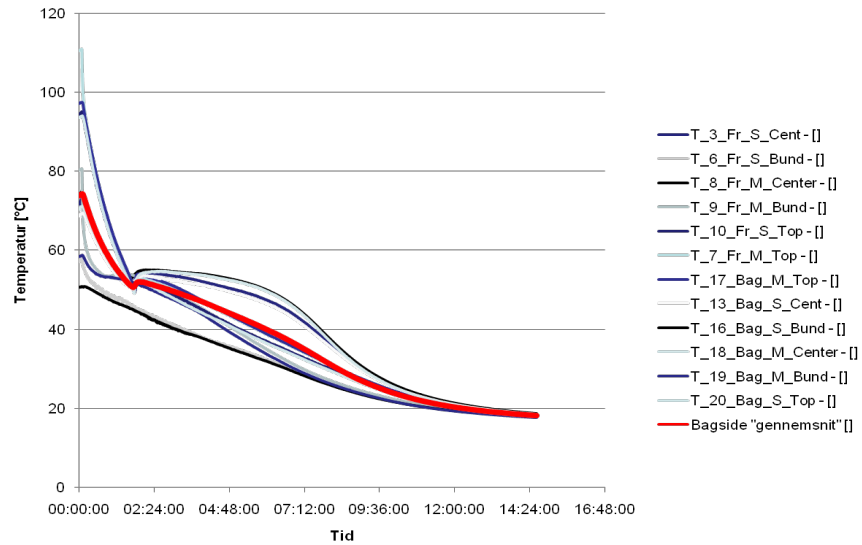
Forsøg 5 af den 4.11.2009 blev gennemført med den nye beholder, hvor varmeledningen forbedres af 171 stag. Der er ca. 3 liter luft i toppen af beholderen for varmeudvidelsen af salhydratet. Beholderen opvarmes af to styk halogenlamper, som yder 2000 W tilsammen. Beholderen er i toppen forsynet med manometer, sikkerhedsventil og stophane for trykudligning. Idet beholderen er lukket hermetisk, er det ikke muligt at følge smelteprocessen visuelt, og det er således kun temperaturmålingerne, som fortæller om procesforløbet.

FIGUR 32: FORSØG 5 – OPVARMNINGSFORLØBET AF BEHOLDERES FRONT OG BAGSIDE



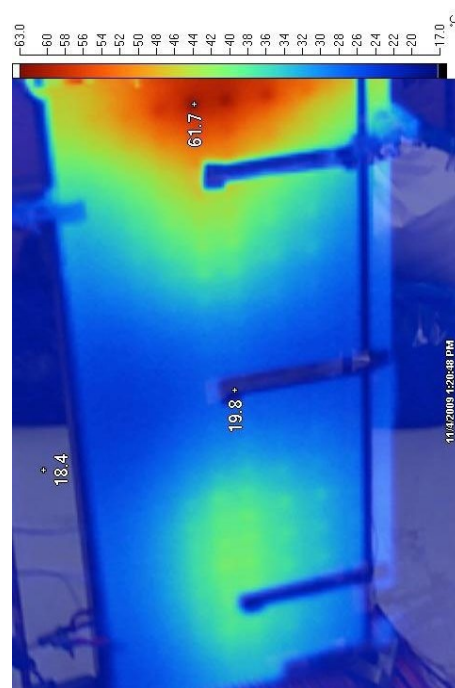
Af Figur 32 fremgår det, at det meste af PCM er smeltet efter ca. 2½ time, hvilket er tilpas for de fleste brugeres fyringsadfærd. Trykket i beholderen steg til 2 bar under opvarmningsprocessen, hvilket er uproblematisk for konstruktionen. Det konstateredes dog, at beholderen krummer pga. den ensidige varmepåvirkning. Der ses ingen blivende deformation, idet beholderen retter sig ud igen efter afkøling.

FIGUR 33: FORSØG 5 – AFKØLINGSFORLØB

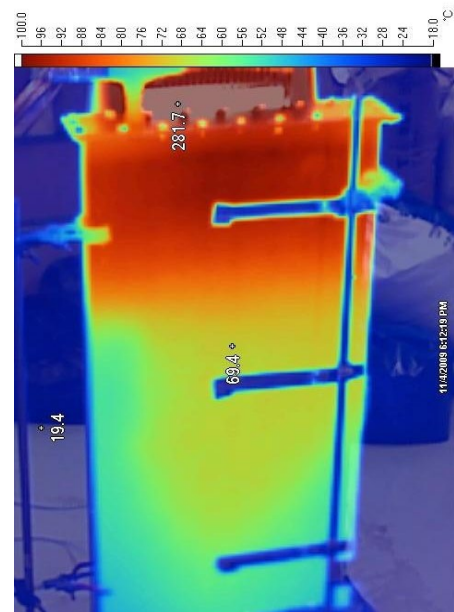


Af Figur 33 fremgår det, at middeltemperaturen på beholderens bagside passerer 40 °C efter ca. 6 timer. Toppen af beholderen holder en temperatur > 40 °C i 8 timer. Dette må betegnes som meget tilfredsstillende.

BILLEDE 11: TERMOGRAFI FOTOFOTO AF BEHOLDERENS BAGSIDE 30 MINUTTER EFTER START



BILLEDE 12: TERMOGRAFI FOTOFOTO AF BEHOLDERENS BAGSIDE VED FULD OPLADNING

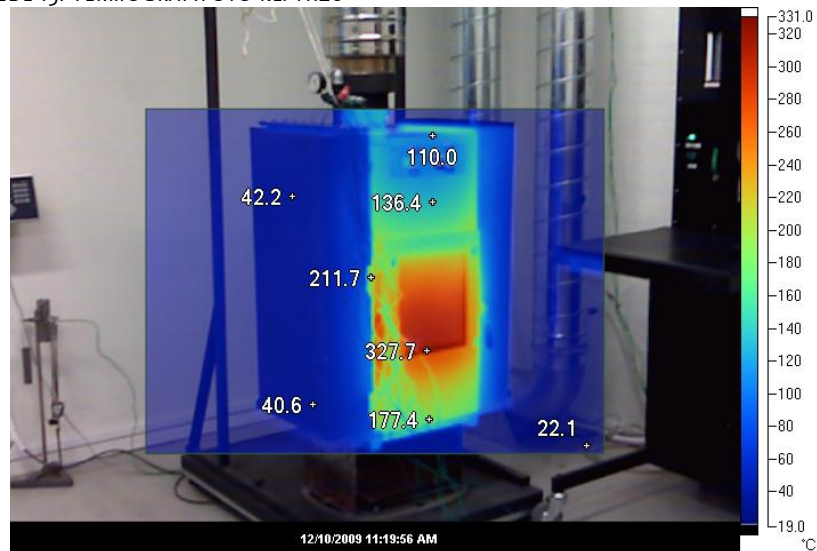


4 Forsøg med brændeovn - Opladning og afladning af varmelager

4.1 FORSØG 1

Den 10. december 2009 er der gennemført et forsøg med de nye varmelagre og forsøgsovn hos Morsø Jernstøberi A/S. Johan Hardang Vium, Teknologisk Institut, deltager i forsøget. PCM-varmelageret er placeret 30 mm fra ovnsiden. Bundpladen mellem ovn og varmelager er lukket, således at der ikke er nogen konvektionsluftstrøm i mellemrummet. Kl. 08:03 startes op med 2,95 kg brænde, og fra kl. 09:24 indfyres 2 kg hver time indtil kl.15:20, altså 7 indfyringer.

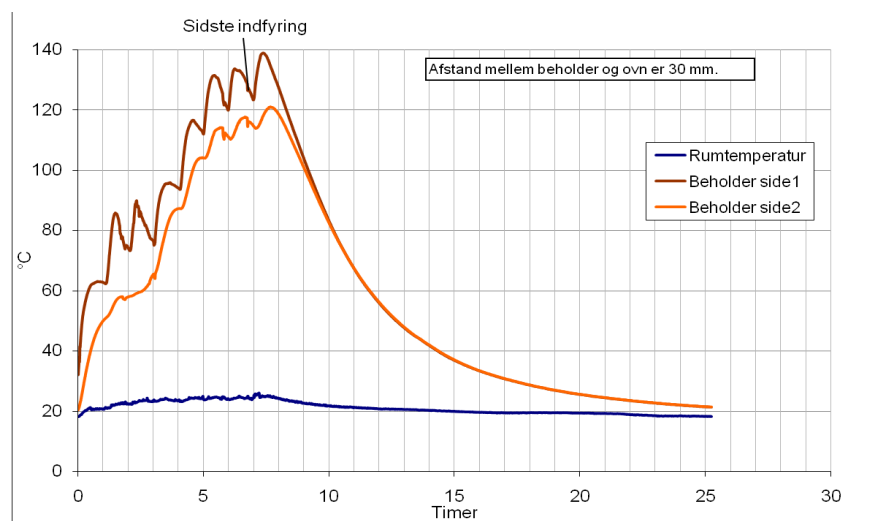
BILLEDE 13: TERMOGRAFIFOTO KL. 11:20



BILLEDE 14: FULDT OPLADET VARMELAGER KL. 14:11



FIGUR 34: OVERFLADETEMPERATUR MIDT PÅ VARMELAGERET (UDEN KONVEKTION)



Opvarmningsforløbet er normal fyringsadfærd, selv om 7 timers indfyring nok er i overkanten af salhydratets tolerance. Allerede efter 2½ time passerer temperaturen 60 °C på ydersiden af varmelageret. Afkølingsforløbet iht.

Figur 34 er helt forkert. Afkølingskurven efter den sidste indfyring ligner en normal afkøling for en brændeovn uden PCM. Ved nærmere efterspørgsel oplyser Frank Juel Nielsen, Morsø Jernstøberi A/S, at varmelagerets sikkerhedsventil åbnede ved 3,5 bar sidst i fyringsforløbet. På det tidspunkt var temperaturen i PCM tæt på 120 °C. Vores formodning er, at vandet er afblæst via sikkerhedsventilen, og at natriumacetat-trihydratet er omdannet til et vandfrit salt, som ikke længere indeholder smeltevarmen.

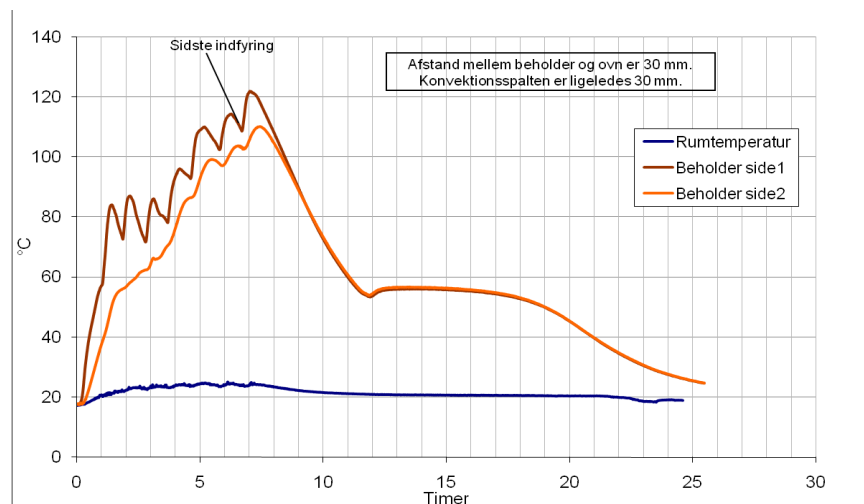
Konklusionen på forsøg 1 er, at det fejlede totalt.

4.2 FORSØG 2

Den 9. februar 2010 blev forsøget gentaget med samme opstilling, blot var der åbnet for en 30 mm spalte i bundpladen, mellem ovn og varmelager, således at en konvektionsluftstrøm passerer mellem de to overflader. Herved opvarmes PCM lidt mere moderat. Resultatet fremgår af Figur 35.

Konklusionen på forsøg 2 er, at vi har et perfekt afkølingsforløb. Varmelageret bevarer en temperatur på 55 °C i ca. 7 timer.

FIGUR 35: OVERFLADETEMPERATUR MIDT PÅ VARMELAGERET (MED KONVEKTION)



5 Kontrollerede forsøg på Teknologisk Institut

Efter det vellykkede forsøg hos Morsø Jernstøberi A/S er parterne parate til at gennemføre en række forsøg under kontrollerede forhold i Energilaboratoriet på Teknologisk Institut i Aarhus. Forsøgene har to hovedformål, undersøgelse af varmeakkumuleringen og undersøgelse af emissionsforhold.

5.1 MÅLEPROGRAM

For at simulere flere fyringssituationer fra efterår, vinter og forår er der udarbejdet et måleprogram, som genspejler de forskellige forhold. Følgende driftssituationer er simuleret med almindelig Morsø brændeovn:

”Nominel” (mange fyringer ved nominel ydelse):

- Optænding, Forfyring, 1. Nominel, 2. Nominel, 3. Nominel, 4. Nominel og evt. 5. Nominel.

”Kort” (få fyringer, afslutning med natfyringscharge):

- Optænding, Forfyring, 1. Nominel og Natfyringscharge.

Følgende driftssituationer er simuleret med Morsøbrændeovn med PCM-varmelager:

”Delvis” (delvis opladning samt afladning af salthydratvarmelager):

- Optænding, Forfyring, 1. Nominel samt afladning af salthydratvarmelager.

”Komplet” (mange fyringer, komplet opladning samt afladning af salthydratvarmelager):

- Optænding, Forfyring, 1. Nominel, 2. Nominel, 3. Nominel, 4. Nominel, evt. 5. Nominel samt afladning af salthydratvarmelager.

Følgende målinger er foretaget i to målerunder:

Målerunde 1: Den 3.8.2010 – 16.8.2010

- CO, CO₂, OGC⁴, NO_x (kontinuerligt)
- Partikler iht. NS 3058/3059 (ved maksimalt 35 °C) alle charges
- Partikler med SMPS (kontinuerligt)
- Overfladetemperatur på ovn
- Overfladetemperaturer på salthydratvarmelager.

3.8.2010: Emissionsmålinger uden PCM ved nominel last

4.8.2010: Emissionsmålinger uden PCM kort program med natfyring

5.8.2010: Emissionsmålinger uden PCM kort program med natfyring

⁴ OGC = Organic Gaseous Compounds

6.8.2010: Emissionsmålinger uden PCM ved nominal last
12.8.2010: Emissionsmålinger med PCM, fuld opladning
13.8.2010: Emissionsmålinger med PCM, delvis opladning
16.8.2010: Emissionsmålinger med PCM, fuld opladning
17.8.2010: Emissionsmålinger med PCM, delvis opladning

Målerunde 2:

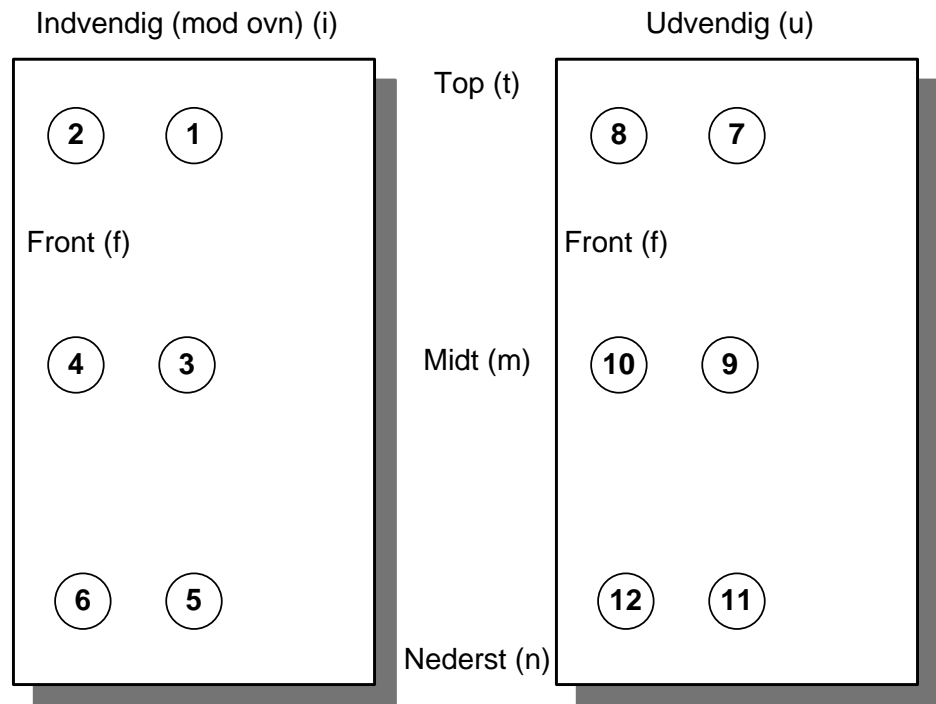
- CO, CO₂, OGC (kontinuerligt)
- PAH måles således:
 - 1 gang ved "Nominal" og 1 gang ved "Delvis"
 - 2 gange ved "Kort", begge afsluttet med natfyring
- LAS-X (kontinuerligt)
- Dust Track fra TSI (kontinuerligt).

5.2 MÅLING AF VARMEAKKUMULERING I PCM

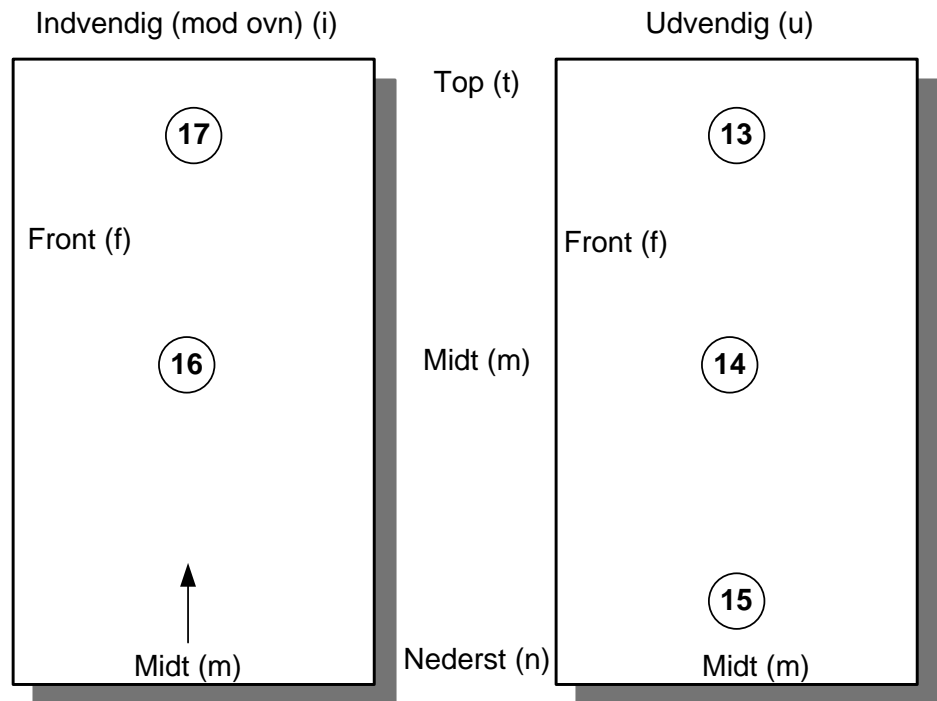
Forsøgssovn fra Morsø Jerstøberi A/S som blev anvendt til de førnævnte forsøg, blev også anvendt til forsøgene på Teknologisk Institut. Alle målinger blev foretaget på akkrediteret brændeovnsprøvestand.

5.2.1 Placering af temperaturfølere på varmelager

Venstre Varmelager (V)



Højre Varmelager (H)



5.2.2 Forsøg med fuld opladning af PCM-varmelager

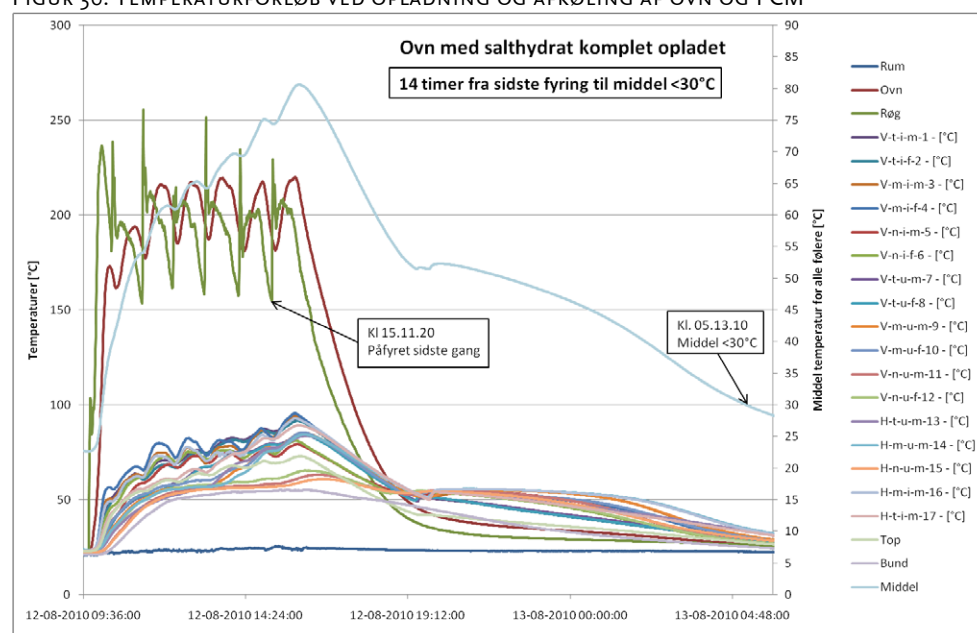
Forsøg af den 12.8.2010

Indfyringer ved forsøg med fuld opladning af varmelager, den 12.8.2010 var som følger:

12.8.2010	Klokkeslæt	Brændselsmængde kg/h	Ydelse kW
Optænding	09:46 – 10:26	2,40	8,4
Forfyring	10:26 – 11:21	1,75	6,0
1. Charge	11:21 – 12:15	1,79	6,2
2. Charge	12:15 – 13:12	1,70	5,9
3. Charge	13:12 – 14:12	1,59	5,5
4. Charge	14:12 – 15:11	1,65	5,7
5. Charge	15:11 – 16:12	1,59	5,5

Figur 36 og de tilsvarende figurer for de efterfølgende forsøg viser temperaturer af ovnen (et målepunkt i midten af ovnens side), røggas (i røgrør ved udgang fra ovnen), varmelagerets overfladetemperaturer (placering af målepunkter iht. 5.2.1) og endelig middeltemperaturen af samtlige temperaturmålinger på varmelageret (værdiakse i grafens højre side).

FIGUR 36: TEMPERATURFORLØB VED OPLADNING OG AFKØLING AF OVN OG PCM



Af efterfølgende tabel fremgår udvalgte klokkeslæt med tilhørende temperaturer, som tydeliggør afkølingsforløbet af ovn og PCM-varmelager. Så længe der fyres på ovnen, er dennes temperatur naturligvis højere end varmelagerets temperatur, men når indfyringen ophører, afkøles ovnen hurtigere end varmelageret. Dette forsinkede afkølingsforløb bidrager til at opretholde boligens ønskede temperatur i længere tid.

Klokkeslæt	Tidsforløb fra sidste indfyring h:min	Ovntemperatur °C	Varmelager- middeltemperatur °C	Differens °C
Sidste indfyring sker klokken 15:11				
18:52	3:41	54,7	54,7	0
19:08	3:57	50	52,9	2,9
19:33	4:22	45	51,8	6,8
20:22	5:11	40	52,3	12,3
21:56	6:45	36	50,3	14,3 ⁵
22:47	7:36	35	48,9	13,9
02:44	11:33	30	38,1	8,1
07:27	16:16	25	26,2	1,2
09:55	18:44	23,3	23,9	0,6

Den største temperaturdifferens på enkelt temperaturfølerniveau haves kl. 23:58, hvor varmelagerets målepunkt 16 med 53,9 °C er 20,4 °C varmere end ovnen.

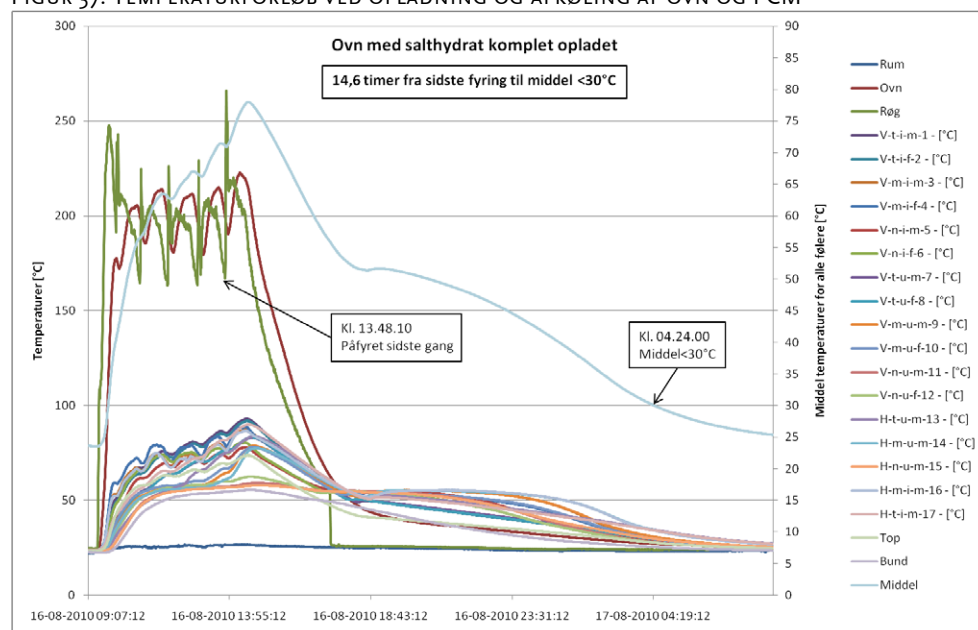
Forsøg af den 16.8.2010

Indfyringer ved forsøg med fuld opladning af varmelager, den 16.8.2010 var som følger:

16.8.2010	Klokkeslæt	Brændselsmængde kg/h	Ydelse kW
Optænding	09:28 – 10:05	2,59	9,1
Forfyring	10:05 – 10:55	1,94	6,7
1. Charge	10:55 – 11:51	1,71	6,0
2. Charge	11:51 – 12:52	1,59	5,5
3. Charge	12:52 – 13:48	1,70	5,9
4. Charge	13:48 – 17:18	0,45	1,5

⁵ Største temperaturdifferens $T_{\text{middel}} - T_{\text{ovn}}$

FIGUR 37: TEMPERATURFORLØB VED OPLADNING OG AFKØLING AF OVN OG PCM



Af efterfølgende tabel fremgår udvalgte temperaturer, som tydeliggør afkølingsforløbet af ovn og PCM-varmelager samt temperaturdifferensen.

Klokkeslæt	Tidsforløb fra sidste indfyring h:min	Ovn temperatur °C	Varmelager-middeltemperatur °C	Differens °C
Sidste indfyring sker klokken 13:48				
17:49	4:01	53,2	53,2	0
18:02	4:14	50	52,4	2,4
18:33	4:45	45	51,5	6,5
19:38	5:50	40	51,3	11,3
21:08	7:20	36,8	49,4	12,6 ⁶
22:26	8:38	35	47,1	12,1
01:54	12:06	30	37,5	7,5
08:22	18:34	25,3	25,4	0,1

Den største temperaturdifferens på enkelt temperaturfølerniveau haves kl. 23:58, hvor varmelagerets målepunkt 16 med 53,2 °C er 20,5 °C varmere end ovnen.

⁶ Største temperaturdifferens $T_{\text{middel}} - T_{\text{ovn}}$

BILLEDE 15: FORSØGSOPSTILLING PÅ BRÆNDEOVNSPRØVESTANDEN



Konklusion på forsøg med fuld opladning af varmelagre:

Når der fyres normalt fra kl. 8 til ca. kl. 15, hvor indfyringen stoppes, ses, at der omkring midnat stadig er store områder af varmelageret, der har en temperatur omkring 50 °C, hvilket er ca. 20 °C varmere end ovnen. Dette må anses for en tilfredsstillende forsinkelse af varmeafgivelsen fra brændeovnen. Først ved 4-5-tiden om morgenen falder varmelagerens middeltemperatur til under 30 °C. Dette skal naturligvis ses på baggrund af en generel rumtemperatur på 20 °C.

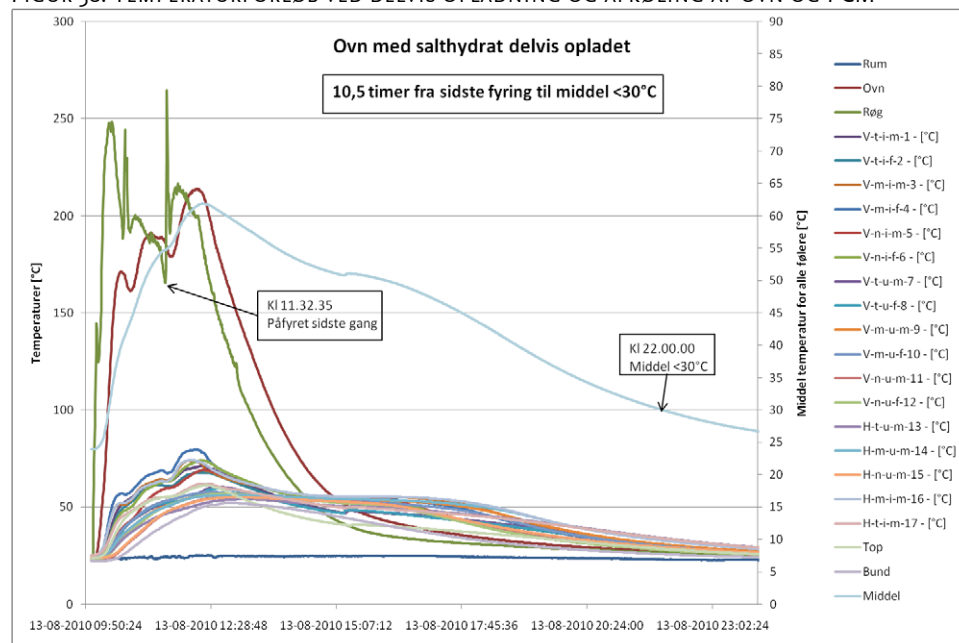
5.2.3 Forsøg med delvis opladning af PCM-varmelager

Forsøg af den 13.8.2010

Indfyringer ved forsøg med delvis opladning af varmelager den 13.8.2010 var som følger:

13.8.2010	Klokkeslæt	Brændselsmængde kg/h	Ydelse kW
Optænding	10:00 – 10:38	2,56	8,6
Forfyring	10:38 – 11:33	1,79	6,1
1. charge	11:33 – 12:29	1,72	6,0

FIGUR 38: TEMPERATURFORLØB VED DELVIS OPLADNING OG AFKØLING AF OVN OG PCM



Af efterfølgende tabel fremgår udvalgte temperaturer, som tydeliggør afkølingsforløbet af ovn og PCM-varmelager samt temperaturdifferensen.

Klokkeslæt	Tidsforløb fra sidste indfyring h:min	Ovn-temperatur °C	Varmelager-middeltemperatur °C	Differens °C
Sidste indfyring sker klokken 11:32				
15:24	3:52	50	51,0	1,0
15:52	4:20	45	50,5	5,5
16:40	5:08	40	48,8	8,8
17:29	5:57	36,5	46,1	9,6 ⁷
17:53	6:21	35	44,5	9,5
19:52	8:20	30	36,1	6,1
01:00	13:28	25	25,7	0,7

Den største temperaturdifferens på enkelt temperaturfølerniveau haves kl. 17:48, hvor varmelagerets målepunkt 16 med $52,6^{\circ}\text{C}$ er $17,4^{\circ}\text{C}$ varmere end ovnen.

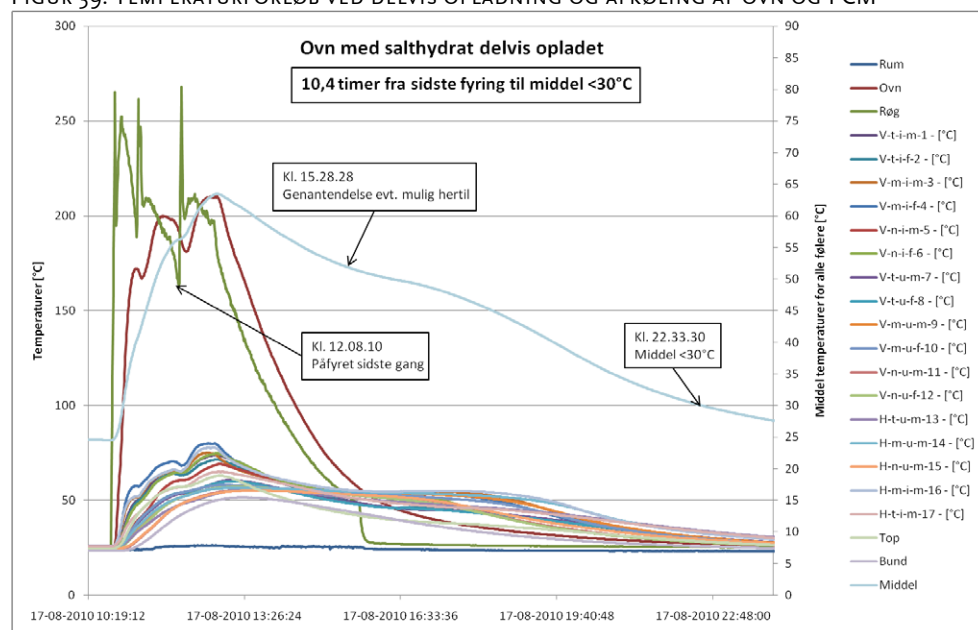
Forsøg af den 17.8.2010

Indfyringer ved forsøg med delvis opladning af varmelager den 17.8.2010 var som følger:

17.8.2010	Klokkeslæt	Brændselsmængde kg/h	Ydelse kW
Optænding	10:46 – 11:17	3,18	10,9
Forfyring	11:17 – 12:08	1,89	6,5
1. charge	12:08 – 13:09	1,57	5,4

⁷ Største temperaturdifferens $T_{\text{middel}} - T_{\text{Ovn}}$

FIGUR 39: TEMPERATURFORLØB VED DELVIS OPLADNING OG AFKØLING AF OVN OG PCM



Af efterfølgende tabel fremgår udvalgte temperaturer, som tydeliggør afkølingsforløbet af ovn og PCM-varmelager samt temperaturdifferensen.

Klokkeslæt	Tidsforløb fra sidste indfyring h:min	Ovn temperatur °C	Varmelager-middeltemperatur °C	Differens °C
Sidste indfyring sker klokken 12:08				
16:06	3:58	50	50,5	0,5
16:32	4:24	45	49,6	4,6
17:14	5:06	40	48,5	8,5
18:13	6:05	35,6	45,6	10,0 ⁸
18:24	6:16	35	44,9	9,9
20:28	8:20	30	36,2	6,2
02:49	14:41	25	25,1	0,1

Den største temperaturdifferens på enkelt temperaturfølerniveau haves kl. 18:38, hvor varmelagerets målepunkt 16 med 53,6 °C er 19,4 °C varmere end ovnen.

Konklusion på forsøg med delvis opladning af varmelagre:

Når der fyres i kort tid fra kl. 10 til ca. kl. 12:30, hvor indfyringen stoppes, ses, at der omkring kl. 18 stadig er store områder af varmelageret, der har en temperatur omkring 45 °C, hvilket er ca. 10 °C varmere end ovnen. Dette må anses for en moderat forsinkelse af varmeafgivelsen fra brændeovnen.

⁸ Største temperaturdifferens $T_{\text{middel}} - T_{\text{ovn}}$

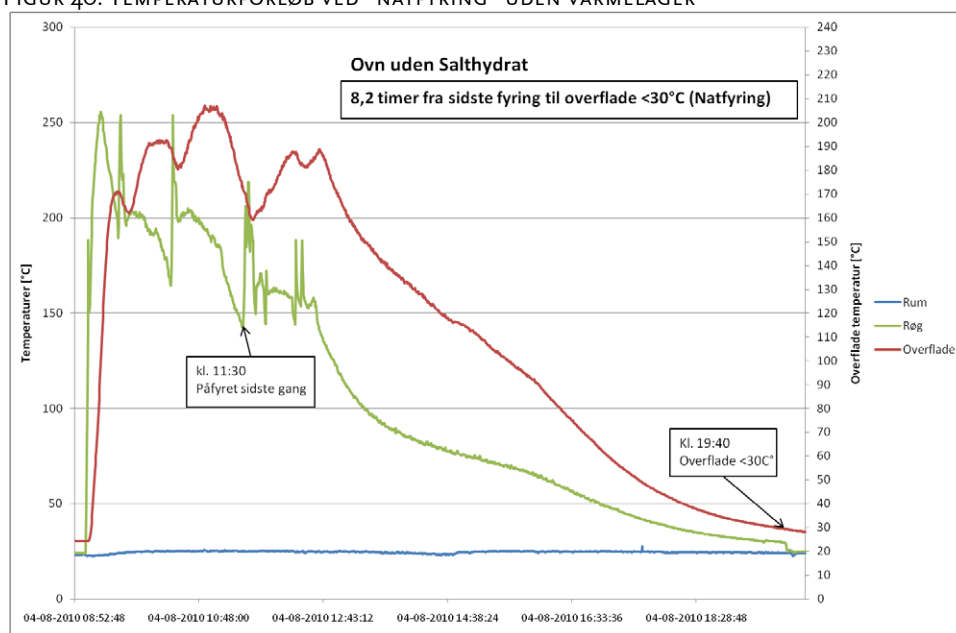
5.2.4 Temperaturforløb ved ”natfyring”

Forsøg af den 4.8.2010

Indfyringer ved forsøg uden varmelager men med ”natfyring” var som følger:

4.8.2010	Klokkeslæt	Brændselsmængde kg/h	Ydelse kW
Optænding	09:04 – 09:34	3,20	11,1
Forfyring	09:34 – 10:23	1,96	6,8
1. charge	10:23 – 11:30	1,45	5,1
”Natfyring”	11:30 – 19:30	0,45	1,6

FIGUR 40: TEMPERATURFORLØB VED ”NATFYRING” UDEN VARMELAGER



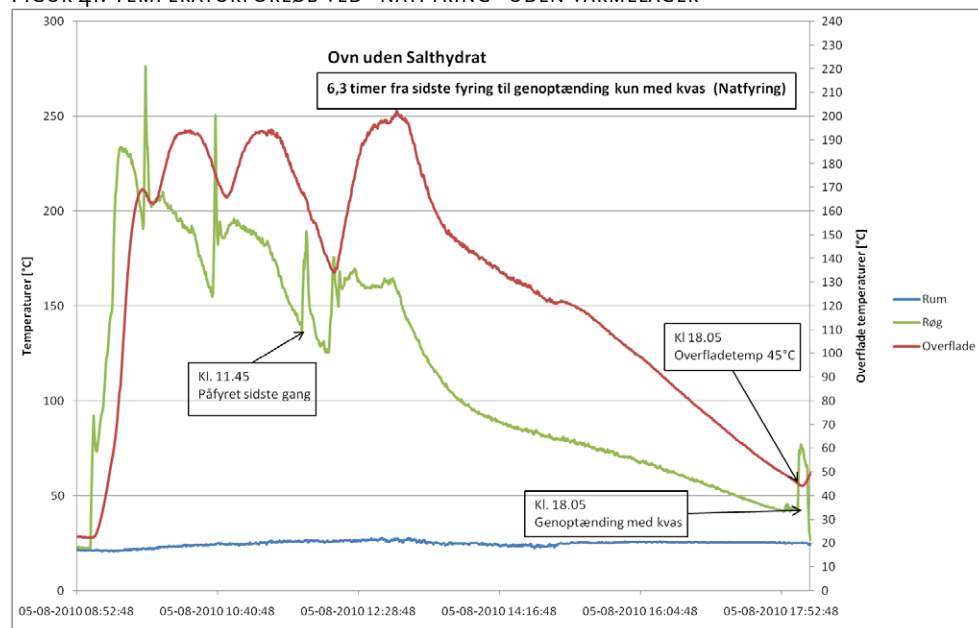
Kl. 11:30 foretages den sidste indfyring, som simulerer en ”natfyring”. 3,6 kg brænde lægges på gløderne, hvorefter lufttilførslen reduceres til et minimum, således at synlige flammer kvæles. Herefter er der åbnet en lille smule for sekundærluften, således at gløderne holdes i live. Af Figur 40 fremgår det, at efter 8,2 timer er ovnen afkølet til 30°C . Til sammenligning kan nævnes, at det fuldt opladte PCM-varmelager holdt $14\frac{1}{2}$ timer, og det delvis opladte varmelager holdt $10\frac{1}{2}$ timer på de 30°C .

Forsøg af den 5.8.2010

Indfyringer ved forsøg uden varmelager men med ”natfyring” var som følger:

5.8.2010	Klokkeslæt	Brændselsmængde kg/h	Ydelse kW
Optænding	09:04 – 09:44	2,37	8,4
Forfyring	09:44 – 10:38	1,81	6,3
1. charge	10:38 – 11:45	1,43	5,0
”Natfyring”	11:45 – 17:52	0,61	2,1

FIGUR 41: TEMPERATURFORLØB VED "NATFYRING" UDEN VARMELAGER



Kl. 11:45 foretages den sidste indfyring, som simulerer en "natfyring". 3,7 kg brænde lægges på gløderne, hvorefter lufttilførslen reduceres til et minimum, således at synlige flammer kvæles. Herefter er der åbnet en lille smule for sekundærluften, således at gløderne holdes i live. Af Figur 41 fremgår, at efter 6,3 timer er ovnen afkølet til 45 °C, hvorefter det er muligt at genoptænde med kvas. Til sammenligning kan nævnes, at det fuldt opladede PCM-varmelager holdt 10 timer, og det delvis opladede varmelager holdt 9 timer på de 45 °C.

6 Emissionsmålinger

Forud for ovennævnte undersøgelser af PCM-varmelageres varmeakkumulering og varmeafgivelse er der foretaget en række emissionsmålinger på brændeovnen uden varmelager. Under varmeakkumuleringsforsøgene er der ligeledes foretaget emissionsmålinger. Resultater af disse målinger fremgår af det følgende.

Målemetoder anvendt i sammenhæng med undersøgelse af partikelemission

Gravimetrisk partikelmålinger

Der er anvendt tre forskellige målemetoder ved undersøgelsen af partikelemissionen. De gravimetrisk partikelmålinger er foretaget ved isokinetisk prøvetagning iht. NS 3058 "Lukkede vedfyrte ildsteder. Røykutslipp. Del 2: Bestemmelse af partikulære utslipp".

Når der sammenlignes værdier i mg/m^3 (tør) ved 13% O_2 , skal det bemærkes, at støvemissionen målt i varm røggas (f.eks. som i DIN Plus) er væsentligt lavere end som her i dette projekt, hvor der er målt ved maksimalt 35°C.

TSP-værdier angivet i parentes "(TSP)" betyder, at denne værdi er målt i kold røggas (maksimalt 35 °C).

Partikelmålinger vha. SMPS

Dernæst er der anvendt en Sanning Mobility Particle Sizer (SMPS) fra TSI Inc., som tæller antallet af partikler i op til 128 størrelsesfraktioner 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. Tilknyttet til SMPS'en er et rotating disc-fortyndingssystem, der kan fortynde røggasser en faktor 15-3000, hvilket muliggør målinger af aerosoler i meget høje koncentrationer (op til ca. 10^9 partikler pr. cm^3). SMPS'en kan også anvendes til at opsamle partikler i en meget specifik størrelsesfraktion, som så efterfølgende kan analyseres med andre teknikker.

Det fysiske princip bag SMPS-målingen er her kort skitseret: En impactor, 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 Differential Mobility 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 Condensations Particle Counter (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 4 minutters varighed i et størrelsesinterval 14 – 724 nm.

Partikelmålinger vha. DustTrak DRX Aerosol monitor

DustTrak'en, også fra TSI Inc., giver modsat SMPS-målinger en massebaseret partikelmåling. Partiklerne måles simultant i fem størrelsesfraktioner (PM1, PM2,5, PM4, PM10 og total PM eller TSP, hvor PM står for Particulate Matter og TSP betyder Total Suspended Particulates). 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 massesignal 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, PM2.5, PM4, PM10 og TPM.

6.1 BRÆNDEOVNENS EMISSIONER VED NOMINEL LAST

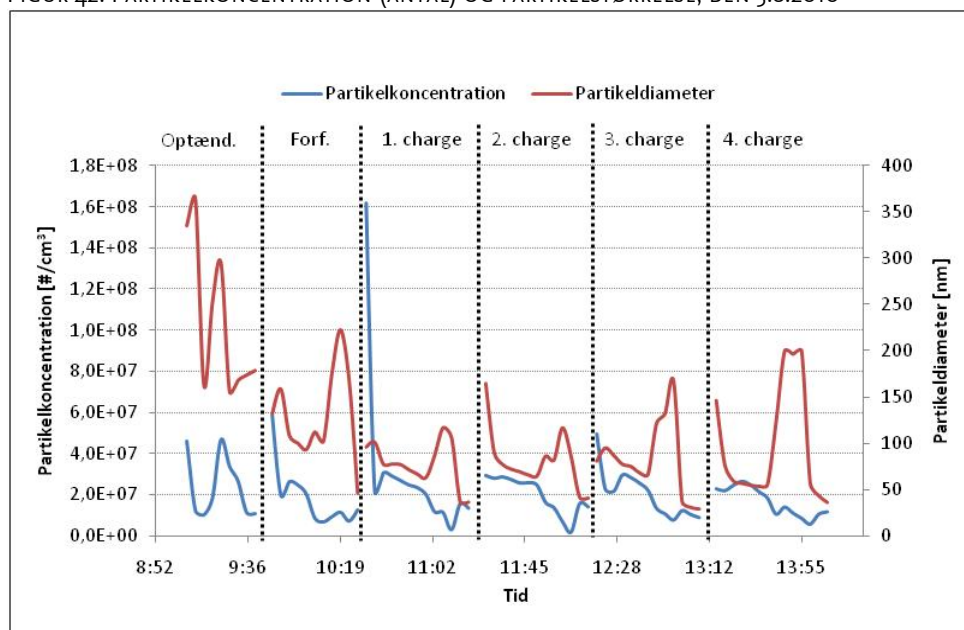
6.1.1 Partikelemission samt emission af ufuldstændig forbrændt røggas

Forsøg af den 3.8.2010

Indfyringer og emissioner ved forsøg med nominel last uden varmelager den 3.8.2010 var som følger:

3.8.2010	Klokkeslæt	Brændselsmængde kg/h	Ydelse kW	Partikler g/kg (tørstof)	Emissioner ved 13 % O ₂ , mg/m ³ _n		
					(TSP)	CO	OGC
Optænding	09:07 – 09:44	2,70	9,7	4,24	(364)	152 9	168
Forfyring	09:44 – 10:30	2,11	7,4	3,36	(288)	156 8	188
1. charge	10:30 – 11:24	1,79	6,3	2,89	(249)	180 7	143
2. charge	11:24 – 12:18	1,78	6,3	4,08	(350)	177 3	206
3. charge	12:18 – 13:10	1,85	6,5	2,57	(221)	189 0	138
4. charge	13:10 – 14:08	1,67	5,9	2,06	(177)	171 1	170

FIGUR 42: PARTIKELKONCENTRATION (ANTAL) OG PARTIKELSTØRRELSE, DEN 3.8.2010

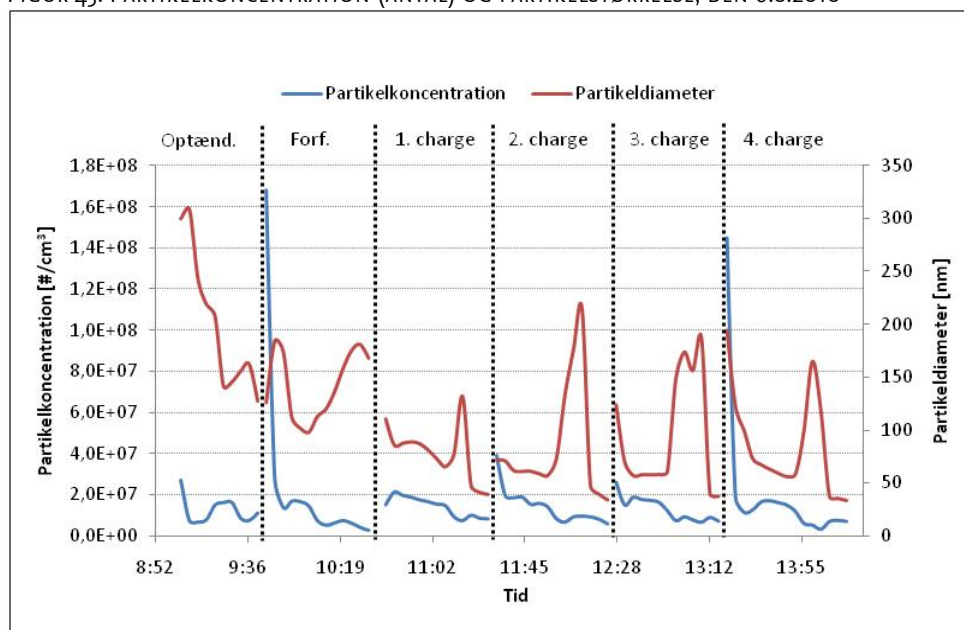


Forsøg af den 6.8.2010

Indfyringer og emissioner ved forsøg med nominel last uden varmelager, den 6.8.2010 var som følger:

6.8.2010	Klokkeslæt	Brændsels- mængde kg/h	Ydelse kW	Partikle r g/kg (tørstof)	Emissioner ved 13 % O ₂ mg/m ³ _n		
					(TSP)	CO	OGC
Optænding	09:05 – 09:46	2,37	8,2	3,80	(337)	183 3	249
Forfyring	09:46 – 10:39	1,83	6,3	3,84	(331)	198 2	275
1. charge	10:39 – 11:31	1,84	6,5	1,64	(141)	177 0	145
2. charge	11:31 – 12:27	1,74	6,1	1,63	(140)	173 3	100
3. charge	12:27 – 13:22	1,77	6,3	1,96	(169)	182 3	144
4. charge	13:22 – 14:19	1,68	5,9	3,25	(280)	189 0	176

FIGUR 43: PARTIKELKONCENTRATION (ANTAL) OG PARTIKELSTØRRELSE, DEN 6.8.2010



Af de gravimetriske partikelmålinger ved nominal last fremgår det, at emissionen generelt er størst ved opstart af brændeovnen, selvom der kan forekomme atypiske målinger, som f.eks. 2. charge af 3.8.2010. Emissioner af ufuldstændigt forbrændte røggaskomponenter (CO og OGC) har ikke samme tendens, de er mere jævnt fordelt over hele fyringsperioden.

Figur 42 og Figur 43 viser en tydelig tendens til, at partiklerne er størst i starten af en fyringssekvens, hvilket er i overensstemmelse med de gravimetriske målinger, idet større partikler betyder mere masse. Det ses, at der lige efter indfyring af en ny brændselscharge sker en markant øgning af partikelkoncentrationen, hvilket skyldes afgang af træets flygtige bestanddele. Under afkøling danner disse komponenter tjæreaerosol, som er kendetegnet ved særligt små partikler. Det ses endvidere, at partiklernes middeldiameter igen bliver større i den sidste tredjedel af hver charge. Disse peaks fremkommer i det øjeblik, hvor synlige flammer dør ud. Årsagen er, at der er en rest flygtige bestanddele tilbage i brændslet, som nu ikke længere bliver forbrændt (ingen flammer). Resultatet er en momentan øgning af tjæreaerosol, som aftager i takt med, at resten af flygtige bestanddele afgasser. Herefter er det udelukkende ren kulstof, som ligger tilbage og gløder.

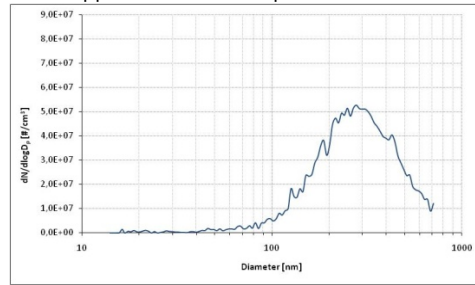
6.1.2 Analyse af partikelstørrelse

Det er bemærkelsesværdigt, at partiklerne generelt er meget små. Middelpartikeldiameteren fremgår af efterfølgende tabel.

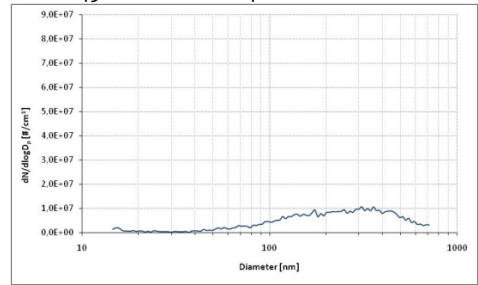
Dato	Enhed	Optænding	Forfyring	1. charge	2. charge	3. charge	4. charge
3.8.2010	nm	231	129	78	81	82	97
6.8.2010	nm	201	142	78	83	94	85
Middel	nm	216	135	85			

For partikelmålingerne af 6.8.2010 er der yderligere foretaget en analyse af partiklernes størrelsesfordeling.

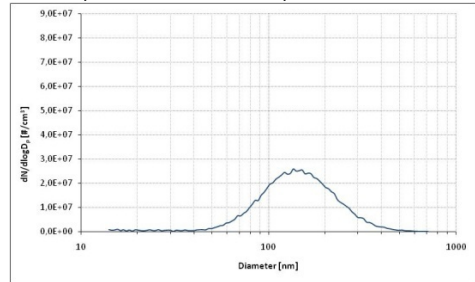
FIGUR 44: OPTÆNDING 0-4 MIN



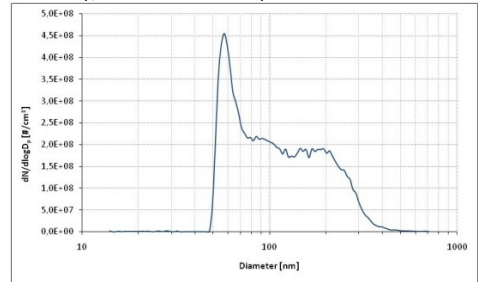
FIGUR 45: OPTÆNDING 4-16 MIN



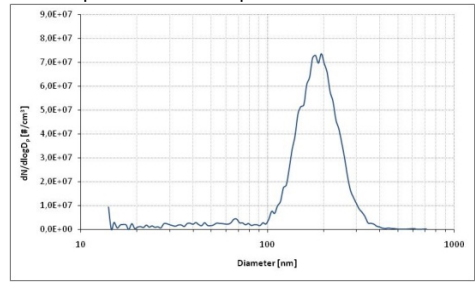
FIGUR 46: OPTÆNDING 16-40 MIN



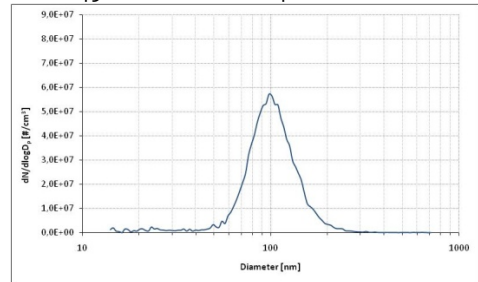
FIGUR 47: FORFYRING 0-4 MIN



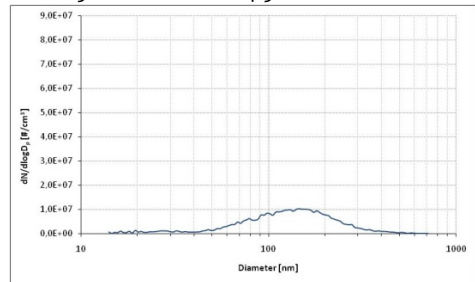
FIGUR 48: FORFYRING 4-12 MIN



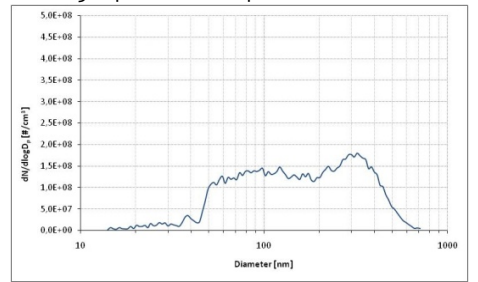
FIGUR 49: FORFYRING 12-24 MIN



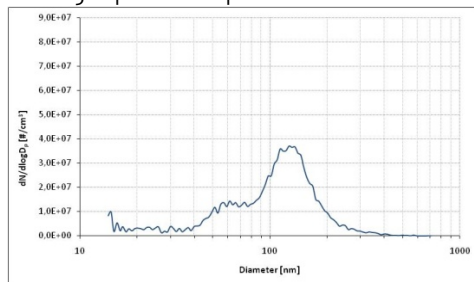
FIGUR 50: FORFYRING 24-52 MIN



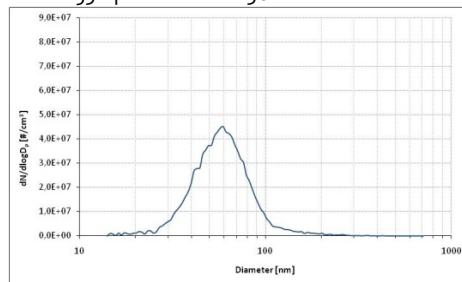
FIGUR 51: 4. CHARGE 0-4 MIN



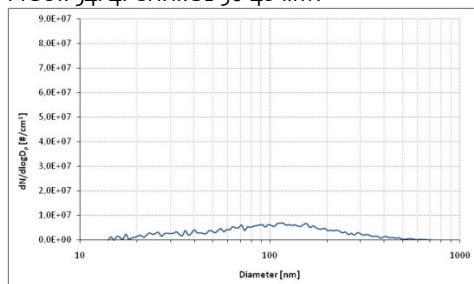
FIGUR 52: 4. CHARGE 4-12 MIN



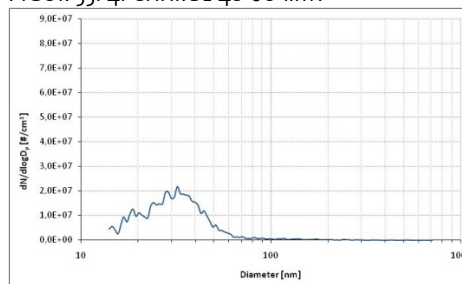
FIGUR 53: 4. CHARGE 12-36 MIN



FIGUR 54: 4. CHARGE 36-48 MIN



FIGUR 55: 4. CHARGE 48-60 MIN



6.1.3 Emissioner ved komplet opladning af varmelagere

Forsøg af den 12.8.2010

Indfyringer og emissioner ved forsøg med komplet opladning af varmelager, den 12.8.2010, var som følger:

12.8.2010	Klokkeslæt	Brændselsmængde kg/h	Ydelse kW	Partiklerg/kg (tørstof)	Emissioner ved 13 % O ₂ mg/m ³ _n		
					(TSP)	CO	OG C
Optænding	09:46 – 10:26	2,40	8,4	3,05	(263)	2194	174
Forfyring	10:26 – 11:21	1,75	6,0	2,46	(211)	1623	179
1. charge	11:21 – 12:15	1,79	6,2	1,36	(117)	1568	86
2. charge	12:15 – 13:12	1,70	5,9	2,93	(253)	2158	187
3. charge	13:12 – 14:12	1,59	5,5	1,92	(166)	1989	151
4. charge	14:12 – 15:11	1,65	5,7	3,58	(311)	2639	267
5. charge	15:11 – 16:12	1,59	5,5	3,98	(344)	2294	125

Forsøg af den 16.8.2010

Indfyringer og emissioner ved forsøg med komplet opladning af varmelager, den 16.8.2010, var som følger:

16.8.2010	Klokkeslæt	Brændselsmængde kg/h	Ydelse kW	Partiklerg/kg (tørstof)	Emissioner ved 13 % O ₂ mg/m ³ _n		
					(TSP)	CO	OG C
Optænding	09:28 – 10:05	2,59	9,1	3,23	(277)	1609	108
Forfyring	10:05 – 10:55	1,94	6,7	2,16	(185)	1701	174
1. charge	10:55 – 11:51	1,71	6,0	2,14	(185)	2047	195
2. charge	11:51 – 12:51	1,59	5,5	4,63	(401)	2421	332
3. charge	12:51 – 13:48	1,70	5,9	6,56	(568)	2496	489
4. charge	13:48 – 17:18	0,45	1,5	2,21	(199)	6428	127

6.1.4 Emissioner ved delvis opladning af varmelagere

Forsøg af den 13.8.2010

Indfyringer og emissioner ved forsøg med delvis opladning af varmelager, den 13.8.2010, var som følger:

13.8.2010	Klokkeslæt	Brændsels- mængde kg/h	Ydelse kW	Partikle r g/kg (tørstof)	Emissioner ved 13 % O ₂ mg/m ³ _n		
					(TSP)	CO	OGC
Optænding	10:00 – 10:38	2,56	8,6	2,69	(231)	159 6	102
Forfyring	10:38 – 11:33	1,79	6,1	2,80	(242)	226 9	245
1. charge	11:33 – 12:28	1,72	6,0	2,12	(183)	206 8	176

Forsøg af den 17.8.2010

Indfyringer og emissioner ved forsøg med delvis opladning af varmelager, den 17.8.2010, var som følger:

17.8.2010	Klokkeslæt	Brændsels- mængde kg/h	Ydelse kW	Partikle r g/kg (tørstof)	Emissioner ved 13 % O ₂ mg/m ³ _n		
					(TSP)	CO	OGC
Optænding	10:46 – 11:17	3,18	10,9	2,84	(247)	2832	225
Forfyring	11:17 – 12:08	1,89	6,5	1,74	(149)	1508	152
1. charge	12:08 – 13:09	1,57	5,4	2,49	(216)	2672	202

6.2 BRÆNDEOVNENS EMISSIONER VED "NATFYRING"

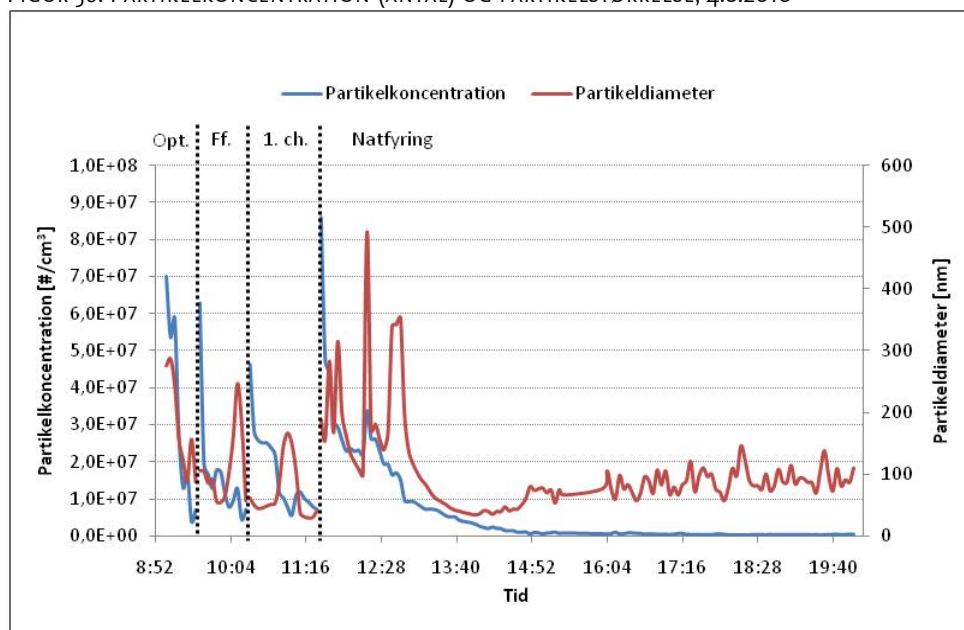
6.2.1 Partikelemission samt emission af ufuldstændig forbrændt røggas

Forsøg af den 4.8.2010

Indfyringer og emissioner ved forsøg med nominal last uden varmelager, den 4.8.2010, var som følger:

4.8.2010	Klokkeslæt	Brændsels- mængde kg/h	Ydel se kW	Partikle r g/kg (tørstof)	Emissioner ved 13 % O ₂ mg/m ³ _n		
					(TSP)	CO	OGC
Optænding	09:03 – 09:33	3,20	11,1	4,26	(376)	4.248	596
Forfyring	09:33 – 10:23	1,96	6,8	3,41	(293)	1.705	187
1. charge	10:23 – 11:30	1,45	5,1	1,89	(164)	2.418	115
Natfyring	11:30 – 19:30	0,45	1,6	11,69	(1.140)	14.96 0	1.240

FIGUR 56: PARTIKELKONCENTRATION (ANTAL) OG PARTIKELSTØRRELSE, 4.8.2010

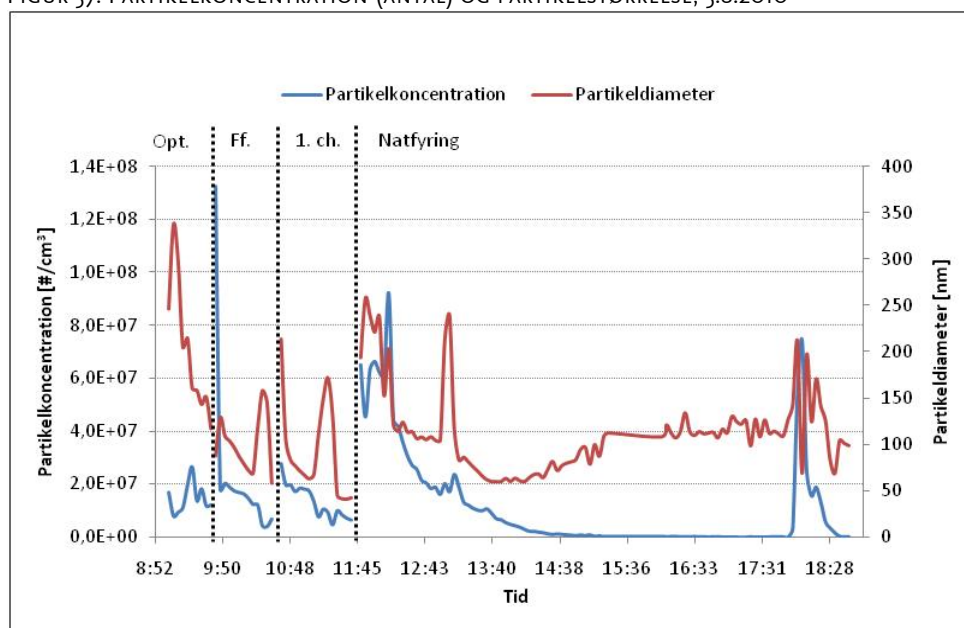


Forsøg af den 5.8.2010

Indfyringer og emissioner ved forsøg med nominel last uden varmelager, den 5.8.2010, var som følger:

5.8.2010	Klokkeslæt	Brændsels- mængde kg/h	Ydel- se kW	Partikle r g/kg (tørstof)	Emissioner ved 13 % O ₂		
					(TSP)	mg/m ³ CO	OGC
Optænding	09:03 – 09:44	2,37	8,4	3,86	(332)	1.744	189
Forfyring	09:44 – 10:38	1,81	6,3	2,32	(200)	1.876	192
1. charge	10:38 – 11:45	1,43	5,0	3,44	(299)	2.715	281
Natfyring	11:30 – 19:30	0,61	2,1	14,97	(1.440)	13.790	1.320

FIGUR 57: PARTIKELKONCENTRATION (ANTAL) OG PARTIKELSTØRRELSE, 5.8.2010



Som før er det optændingen, der giver de største emissioner, når der ses bort fra ”natfyringen”. Specielt skal bemærkes emissionerne ved optænding den 4.8.2010, hvor der startes på en ekstra stor brændselsmængde (3,71 kg). Dette resulterer i markant større emissioner. Mere generelt og som nyttig tommelfingerregel kan følgende partikelemissioner anvendes:

Ved optænding	3,5 g/kg (tørstof) svarende til 3,0 g/kg indfyret træ, eller 300 mg/normal m ³ ved 13 % O ₂ målt ved maksimalt 35°C
Ved forfyring	2,8 g/kg (tørstof) svarende til 2,4 g/kg indfyret træ, eller 240 mg/normal m ³ ved 13 % O ₂ målt ved maksimalt 35°C
Ved normal fyring	2,8 g/kg (tørstof) svarende til 2,4 g/kg indfyret træ, eller 240 mg/normal m ³ ved 13 % O ₂ målt ved maksimalt 35°C
Ved ”natfyring”	13 g/kg (tørstof) svarende til 11 g/kg indfyret træ, eller 1300 mg/normal m ³ ved 13 % O ₂ målt ved maksimalt 35°C

Det er tydeligt, at natfyringer bør undgås, idet partikelemissionen øges med en faktor 4,7 i forhold til normal fyring.

Emissioner af ufuldstændigt forbrændte røggaskomponenter (CO og OGC) er, som før nævnt, mere jævnt fordelt over hele fyringsperioden. Ved normal fyring er CO-emissionen i gennemsnit 1.800 mg/normal m³ ved 13 % O₂. Ved natfyring øges CO-emissionen i gennemsnit til 14.400 mg/normal m³ ved 13 % O₂, hvilket svarer til en faktor 8. OGC-emissionen er 200 mg/normal m³ ved 13 % O₂, og den øges til 1300 mg/normal m³ ved 13 % O₂, svarende til en faktor 6,5.

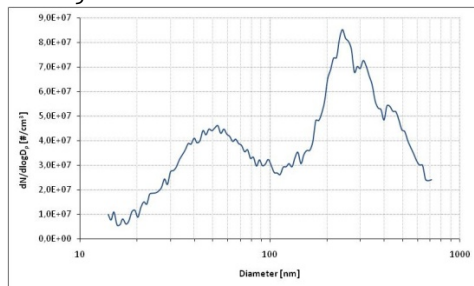
6.2.2 Analyse af partikelstørrelse

Det er bemærkelsesværdigt, at partiklerne generelt er meget små. Middelpartikeldiameteren fremgår af efterfølgende tabel.

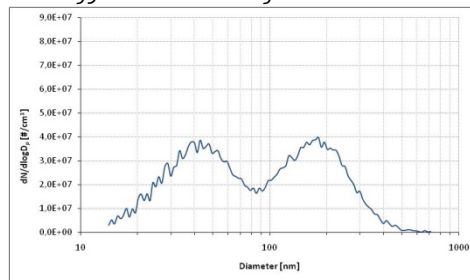
Dato	Enhed	Optænding	Forfyring	Nat 0-1h	Nat 1-2h	Nat 2-3h	Nat 0-8h
4.8.2010	nm	178	110	196	155	40	102
5.8.2010	nm	203	101	160	102	67	112
Middel	nm	190	105	180	130	50	110

For partikelmålingerne af den 5.8.2010 er der yderligere foretaget en analyse af partiklernes størrelsesfordeling.

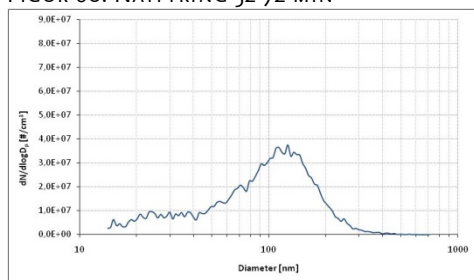
FIGUR 58: NATFYRING 0-28 MIN



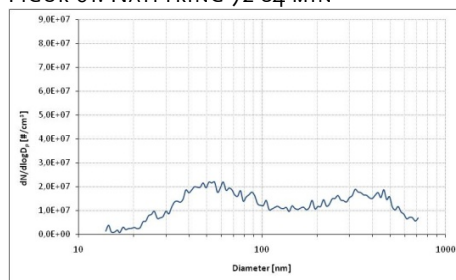
FIGUR 59: NATFYRING 28-52 MIN



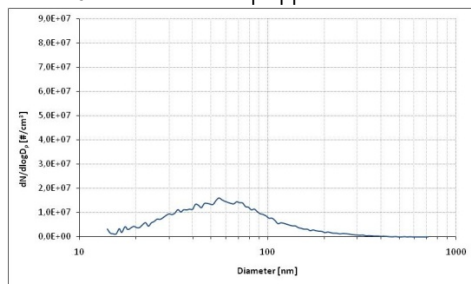
FIGUR 60: NATFYRING 52-72 MIN



FIGUR 61: NATFYRING 72-84 MIN



FIGUR 62: NATFYRING 84-144 MIN



6.3 PAH-EMISSION

I perioden fra den 16. til den 23. november 2010 er der gennemført en serie undersøgelser med henblik på at bestemme PAH-emissionen fra brændeovnen, både ved nominal last, delast og ved natfyring. Målingerne er udført iht. metodeblad nr. MEL-10 ”Bestemmelse af koncentrationer af Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) i strømmende gas.

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

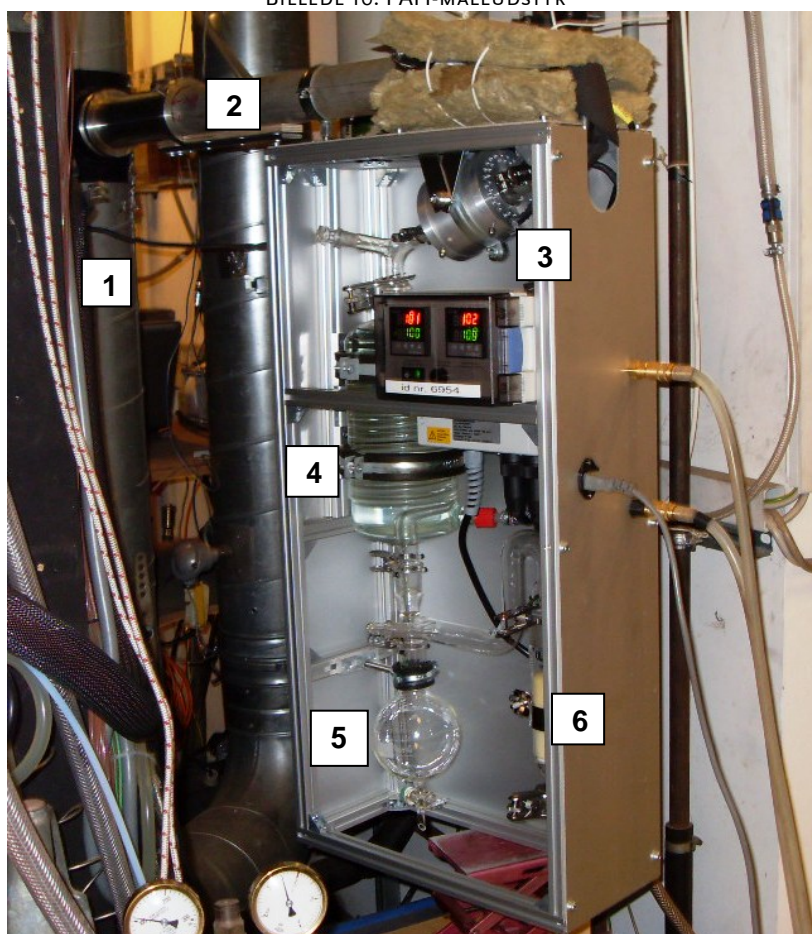
Fluoranthen	0,05
Pyren	0,001
Benz[a]anthracen	0,005
Chrysen	0,03
Benz[b,k]fluoranthener	0,1
Benz[e]pyren	0,002
Benz[a]pyren	1
Indeno[1,2,3]pyren	0,1
Benz[ghi]perylene	0,01
Dibenz[ah]anthracen	1,1

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.

Fyringsmåde	Delvis	Natfyr. 1	Natfyr. 2	Nominel	Natfyr. 3
Dato	16.11.10	17.11.10	18.11.10	22.11.10	23.11.10
	$\mu\text{g}/\text{m}^3_n$	$\mu\text{g}/\text{m}^3_n$	$\mu\text{g}/\text{m}^3_n$	$\mu\text{g}/\text{m}^3_n$	$\mu\text{g}/\text{m}^3_n$
Naphthalen	2293,5	534,9	414,6	1446,5	977,8
Acenaphthylen	1037,6	5033,6	4015,8	1208,6	7447,3
Acenaphthen	85,2	23624,2	9698,1	1562,5	27551,8
Fluoren	228,3	1600,0	2078,0	698,2	6638,7
Phenanthren	1089,1	3064,1	2285,2	1480,6	1834,8
Anthracen	300,8	504,8	336,1	232,1	427,2
Fluoranthen	142,7	659,7	548,7	516,2	474,2
Pyren	284,7	1346,1	1483,0	1162,1	1308,1
Benz[a]anthracen	2,1	76,1	103,2	79,2	76,3
Chrysen	2,9	104,1	133,2	124,3	103,3
Benz[b,k]fluoranthener	19,2	153,4	136,7	72,0	106,6
Benz[e]pyren	6,2	53,6	48,9	18,7	25,2
Benz[a]pyren	9,6	75,3	67,5	31,2	52,3
Indeno[1,2,3]pyren	11,3	74,4	50,5	20,8	46,7
Benz[ghi]perylene	2,3	3,8	10,1	7,6	4,5
Dibenz[ah]anthracen	14,0	65,2	51,9	27,6	57,1
Sum PAH [$\mu\text{g}/\text{m}^3_n$]	5529	36973	21462	8688	47132
BaP ækv. [$\mu\text{g}/\text{m}^3_n$]	39,8	239,6	193,4	107,5	199,4
Sum PAH [$\mu\text{g}/\text{m}^3_n$] ved 13 % O ₂	5693	36140	21250	8386	43850
BaP ækv. [$\mu\text{g}/\text{m}^3_n$] ved 13 % O ₂	41	234	192	104	186

6.3.1 PAH-prøvetagningsudstyr

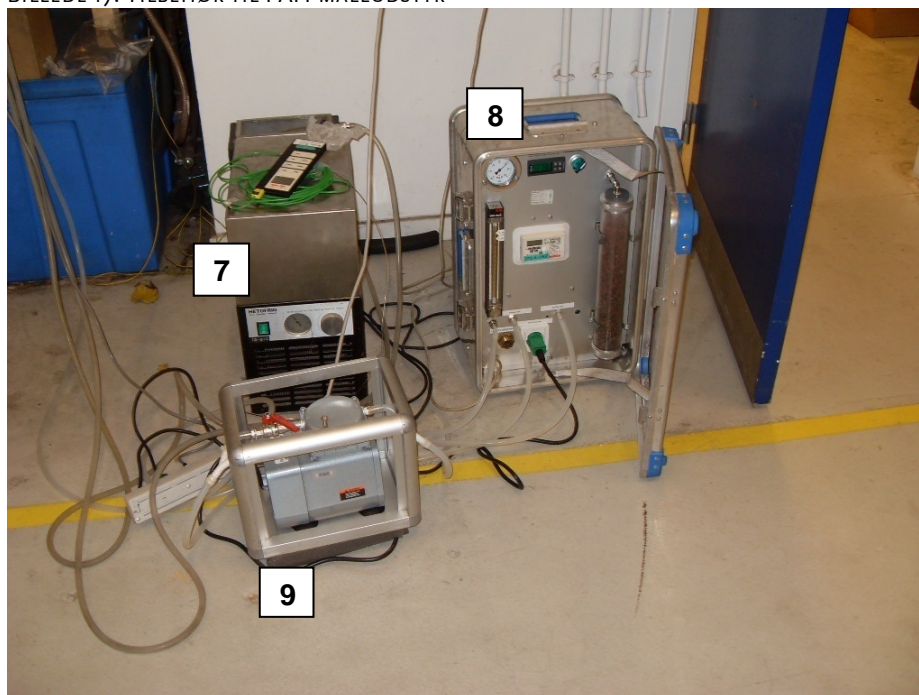
BILLEDE 16: PAH-MÅLEUDSTYR



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 stålrør (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 på billedet nedenfor. På laboratoriet ekstraheres filter og PUF, hvorefter ekstrakterne, kondensatet og skyllevæsken analyseres for PAH vha. GC/MS.

BILLEDE 17: TILBEHØR TIL PAH-MÅLEUDSTYR



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

6.4 PARTIKELMÅLINGER MED DUSTTRAK-UDSTYR

I forbindelse med PAH-målingerne blev der også foretaget partikelmålinger med en ny, kontinuerligt registrerende støvmåler. DustTrak-udstyret måler PM1; PM2,5; respirabelt støv; PM10 og total partikelmasse (TSP- Total Suspended Particulates) i $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{n}}$.

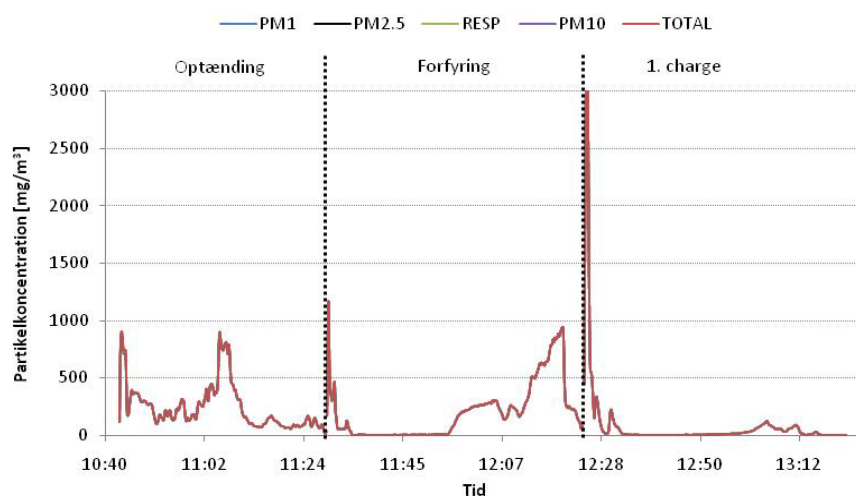
Forsøg af den 16.11.2010

Indfyringer og emissioner ved forsøg med delvis opladning af varmelager, den 16.11.2010, var som følger:

16.11.2010	Klokkeslæt	Brændselsmængde kg/h	Ydelse kW	Emissioner ved 13 % O ₂ mg/m ³ _n		
				(TSP)	CO	OGC
Optænding	10:44 – 11:29	2,12	7,4	(242)	2052	388
Forfyring	11:29 – 12:25	1,70	5,7	(201)	3357	508
1. charge	12:25 – 13:22	1,68	5,8	(82)	1882	161

Det skal bemærkes, at stort set alle målte partikler er PM1, derfor ses kun én kurve på de efterfølgende grafer.

FIGUR 63: PARTIKELKONCENTRATION I FORBINDELSE MED PAH-MÅLINGER DEN 16. NOV. 2010



Forsøg af den 17.11.2010

Indfyringer og emissioner ved forsøg med natfyring, den 17.11.2010, var som følger:

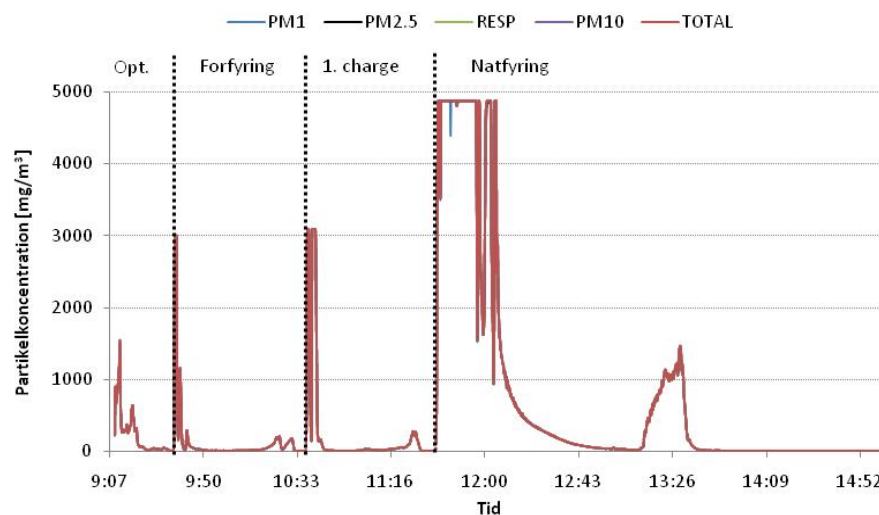
17.11.2010	Klokkeslæt	Brændselsmængde kg/h	Ydelse kW	Emissioner ved 13 % O ₂		
				(TSP)	mg/m ³ _n CO	OG C
Optænding	09:10 – 09:37	3,5	12,1	(207)	1579	147
Forfyring	09:37 – 10:38	1,57	5,3	(116)	3000	249
1. charge	10:38 – 11:38	1,60	5,5	(215)	2676	327
Natfyring	11:38 – 15:04	1,07	3,7	(>755*)	10.88 9	1073

Partikelemissionen i natfyringsperioden kan differentieres yderligere, når perioden opsplittes i kortere intervaller:

- Natfyring 0-1 time TSP = >2294* mg/m³_n
- Natfyring 1-2 timer TSP = 315 mg/m³_n
- Natfyring 2-3 timer TSP = 3 mg/m³_n

* Som det fremgår af Figur 64, når DustTrak-udgangssignalet den øvre grænse for instrumentets måleområde i perioden fra kl. 11:30 til 12:10. I dette tidsrum har partikelemissionen i virkeligheden været større end anført ovenfor. Dette er i god overensstemmelse med målingerne iht. afsnit 6.2, hvor den gennemsnitlige TSP-emission for en hel natfyring er målt til 1300 mg/m³_n. Det ses endvidere, at TSP-emissionen i den første halv time af en natfyring er >5000 mg/m³_n.

FIGUR 64: PARTIKELKONCENTRATION I FORBINDELSE MED PAH-MÅLINGER DEN 17. NOV. 2010



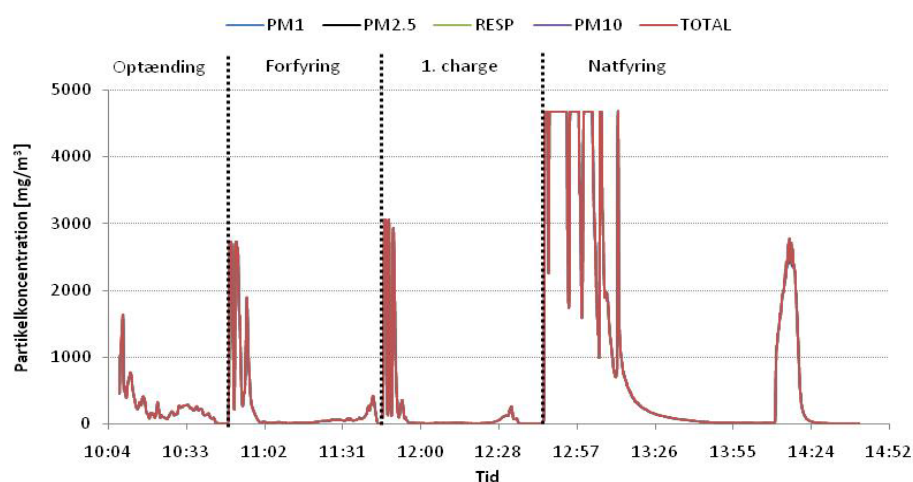
Forsøg af den 18.11.2010

Indfyringer og emissioner ved forsøg med natfyring, den 18.11.2010, var som følger:

18.11.2010	Klokkeslæt	Brændselsmængde kg/h	Ydelse kW	Emissioner ved 13 % O ₂		
				(TSP) mg/m ³ _n	CO	OG C
Optænding	10:09 – 10:49	2,38	8,4	(243)	1203	137
Forfyring	10:49 – 11:46	1,68	5,7	(250)	3053	420
1. charge	11:46 – 12:46	1,61	5,5	(166)	2340	222
Natfyring	12:46 – 16:00	1,14	4,0	(>1059*)	9327	965

* Som det fremgår af Figur 65, når DustTrak-udgangssignalet også denne gang den øvre grænse for instrumentets måleområde, i perioden fra kl. 12:46 til 13:10. I dette tidsrum har partikelemissionen i virkeligheden været større end anført ovenfor. Også den 18. nov. bemærkes, at TSP-emissionen i den første halve time af en natfyring er >5000 mg/ m³_n.

FIGUR 65: PARTIKELKONCENTRATION I FORBINDELSE MED PAH-MÅLINGER DEN 18. NOV. 2010

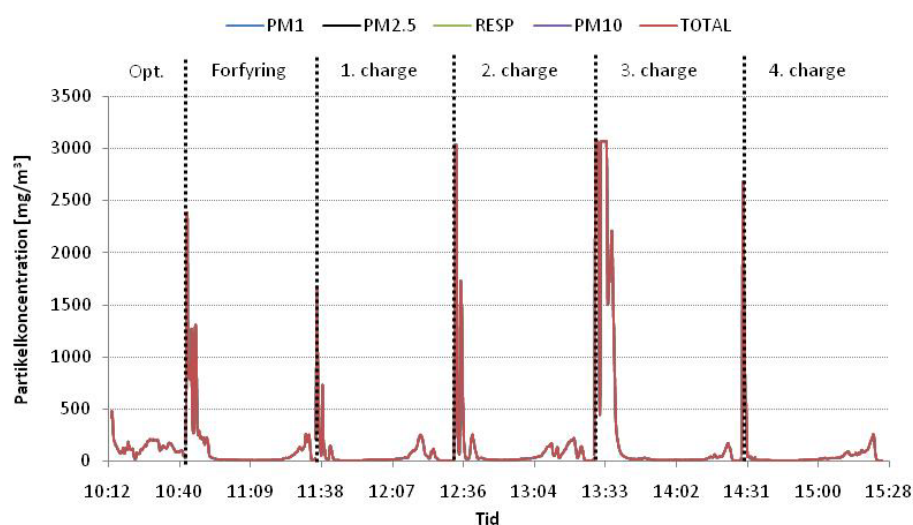


Forsøg af den 22.11.2010

Indfyringer og emissioner ved forsøg med nominal fyring, den 22.11.2010, var som følger:

22.11.2010	Klokkeslæt	Brændselsmængde kg/h	Ydelse kW	Emissioner ved 13 % O ₂		
				(TSP) mg/m ³ _n	CO	OGC
Optænding	10:01 – 10:44	2,24	7,8	(130)	1557	168
Forfyring	10:44 – 11:36	1,82	6,1	(127)	1795	178
1. charge	11:36 – 12:32	1,71	5,9	(62)	1840	145
2. charge	12:32 – 13:30	1,66	5,8	(128)	1820	168
3. charge	13:30 – 14:29	1,61	5,6	(341)	2639	372
4. charge	14:29 – 15:26	1,70	5,8	(75)	3181	349

FIGUR 66: PARTIKELKONCENTRATION I FORBINDELSE MED PAH-MÅLINGER DEN 22. NOV. 2010



Forsøg af den 23.11.2010

Indfyringer og emissioner ved forsøg med natfyring, den 23.11.2010, var som følger:

23.11.2010	Klokkeslæt	Brændselsmængde kg/h	Ydelse kW	Emissioner ved 13 % O ₂		
				(TSP)	mg/m ³ _n CO	OGC
Optænding	08:42 – 09:17	2,74	9,4	(-)	1706	129
Forfyring	09:17 – 10:15	1,67	5,7	(-)	2884	496
1. charge	10:15 – 11:16	3,51	12,1	(-)	2395	192
Natfyring	11:16 – 14:25	1,15	4,0	(-)	9810	1143

For den 23. november foreligger der ingen partikelmålinger – den dag blev blot målt PAH.

7 Styring af brændeovn

7.1 ELEKTRONIKSTYRING TIL BRÆNDEOVN – ET MORSØPROJEKT

I perioden 1997-2001 udviklede Morsø Jernstøberi A/S sammen med samarbejdspartnere en elektronikstyring til brændeovne. Nedenstående er en kort gennemgang af dette projekt. Informationerne er baseret på arkiveret materiale fra projektføreløbet. Elektronikstyringen blev benyttet på en Morsø 3440 ovn, som på daværende tidspunkt var den nyeste model med tertiær forbrændingsluft.

Formål

Formålet med elektronikstyringen er at opnå en ren og fuldstændig forbrænding. Dette forsøges opnået ved automatisk indstilling af ovnens forbrændingsluftspjæld. Der måles kontinuerligt på røggassens temperatur og indhold af O_2 . Ud fra disse data indstilles spjældene, så der opnås en forbrænding med høj virkningsgrad og lav udledning af kulilte (CO).

Systembeskrivelse

Ovnstyringen er opbygget af en computer, der er placeret køligt under ovnen sammen med strømforsyning og øvrigt elektrisk installation. Vha. spindelmotorer som er placeret på indbyggede luftspjæld bag på ovnen, reguleres lufttilførslen. Forbrændingen kontrolleres vha. en temperaturmåler og en lamdasonde, der er indbygget i røggasafgangen. Lambdasonden måler indholdet af ilt i røggassen.

På et vægpanel indstilles, hvilken effekt der ønskes fra ovnen, samt det indikeres, når der tændes op i ovnen. Vægpanelet giver samtidig information om ovnens tilstand med hensyn til:

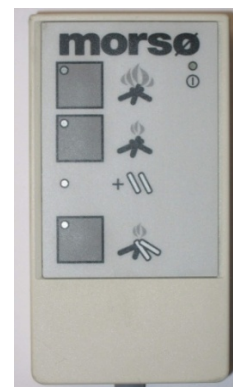
- at der er strøm til styringen
- effekttrin (Høj/Lav)
- behov for påfyldning af brændsel
- behov for påfyldning og genoptænding.

Betjening/regulering

Betjeningspanelet indeholder 3 taster og 5 indikatorer. LED er lysdioder som indikatorer. Tasterne og indikatorerne har følgende funktion og betydning:

- Tast 1: Valg af høj effekt på ovnen
Tast 2: Valg af lav effekt på ovnen
Tast 3: Påfyldning ved optænding eller genfyring i næsten udbrændt ovn

- LED 1: Lyser når der er valgt høj effekt.
Blinker når termostat styrer effekten
- LED 2: Lyser når der er valgt høj effekt.
Blinker når termostat styrer effekten
- LED 3: Lyser i optændingsfase
- LED 4: Lyser når ovnen er ved at brænde ud.
Blinker når der skal brændsel på
- LED 5: Lyser når der er tændt for el til ovne



Når ovnen tændes, ønskes tilført så meget luft som muligt. Dette gøres ved aktivering af Tast 3. Når Tast 3 (optænding) aktiveres, åbnes der helt for luften, indtil en temperatur på 400 °C opnås. Derefter lukkes for primærluften, og der startes en timer. Ovnen styres nu efter maksimum temperatur (dvs. høj effekt) i den tid, timeren angiver. Efter at tiden for optænding er udløbet, skifter ovnen over til at styre efter det effektrin, der er ønsket. I perioden efter optændingsfasen, hvor ovnen brænder stabilt, er der lukket for tilførsel af primærluft, således at ovnen ikke soder. Temperaturen, og dermed effekten, holdes konstant ved at regulere på tilførsel af sekundær luft. Den tertiære luft reguleres efter iltindhold, så der opnås en ren forbrænding med lav CO og god virkningsgrad.

Ved genfyring styres der igen efter maksimum effekt i tiden, der styres af timeren, så der kommer god ild i det nye brændsel. Når ovnen er ved at brænde ud, lukker styringen lidt for luften til ovnen, så der opnås bedre varmeøkonomi. Ved udbrænding lukkes luften til et minimum for at holde på varmen.

Pris

Kostprisen (1999) var 2.700 kroner.

Testresultater

I foråret 2000 blev en Morsø 3440 med elektronikstyring testet hos Teknologisk Institut. I alt blev der lavet 10 indfyringer efter DS 887-standarden. Som reference ses en Morsø 3440 med standardspjæld.

Parameter	Morsø 3440 med elektronikstyring DS 887	Morsø 3440 med standard spjæld DS 887	Morsø 3440 med standard spjæld EN 13 240
Kulilte (CO)%	0.29	0.22	0.10
TOC (tjære)(ppm)	564	-	72
Virkningsgrad	74.0	72.0	80.1

Testresultaterne for Morsø 3440 med elektronikstyring er gennemsnit af 10 indfyringer efter DS 887. CO-indhold er henført til 7,5 % CO₂. Ved EN 13 240-testresultaterne for Morsø 3440 med standardspjæld, er CO-indhold henført til 13 % ilt. Selvom testene ikke er helt ens, er de forholdsvis sammenlignelige.

Brugerundersøgelse

I forbindelse med projektet blev en række brændeovne med elektronikstyring sendt ud til afprøvning hos testbrugere. Efter en prøveperiode blev

testbrugerne bedt om at udfylde et spørgeskema. Morsø modtog 3 udfyldte skemaer.

Konklusion

Morsø Jernstøberi A/S konkluderer, at den valgte elektronikstyring ingen positiv effekt har på emissioner og virkningsgrad. Da udstyret desuden er forholdsvis kostbart, ønsker Morsø Jernstøberi A/S ikke at fortsætte en yderligere udvikling i den beskrevne retning. I stedet for er undersøgt to alternativer, som muligvis kan reducere emissioner fra brændeovne. Resultater af disse undersøgelser fremgår af det følgende.

7.2 FORSØG MED RØGSUGER

Den styring som blev udviklet hos Morsø Jernstøberi A/S, og de få typer af styringer, der ellers findes til brændeovne, omfatter oftest regulering af forbrændingsluftspjæld, så der kommer mere eller mindre luft til forbrændingen. En måde at simulere dette kunne være at variere skorstenstrækket med en røgsuger. Øges skorstenstrækket, øges luftmængden til forbrændingen. Af denne grund er der undersøgt om forskelligt skorstenstræk har en indflydelse på emissionen fra brændeovne. Ved en normal afprøvning af en brændeovn i henhold til standard EN 13 240 holdes et konstant skorstenstræk på 12 Pa. Det er især i starten af en afprøvning, at der er en stor udledning af skadelige røggasser. Derfor er det kun i starten af afprøvningen, at der prøves med andet skorstenstræk. Efter opstarten holdes skorstenstrækket atter på 12 Pa.

Fremgangsmåde

Brændeovnen afprøves efter retningslinjerne i EN 13 240 med supplement af OGC-måling(tjære). Alle faktorer bortset fra skorstenstrækket holdes så ensartet som muligt i afprøvningsrækken:

- Charge: 2 kævler à ca. 1,6 kg afbarket birk med et vandindhold på 19 %
- Ilægning: Placer kævlerne med længderetningen parallelt med frontlågen. Forinden nogenlunde ensartet optænding og forfyring. Åbn låge, ilæg charge og dernæst luk lågen med det samme. Det ville man ikke gøre normalt, men for at se den fulde effekt af forskelligt skorstenstræk er det nødvendigt. Normalt ville man lade lågen stå på klem, indtil ilden fænger ordentlig i træet.
- Træk: 12 Pa (hele chargen)
24 Pa (de første 5 minutter, dernæst 12 Pa)
48 Pa (de første 5 minutter, dernæst 12 Pa)
- Spjæld: Halv åbent fra start til slut.

Resultater

Middelværdier for de første 5 minutter

Skorstenstræk	Pa	12,0	22,6	47,2
Vægt af brændsel	kg	0,221	0,301	0,128
Antal brændekævlere	stk	2	2	2
Vandindhold i brændsel	%	19	19	19
Varmeydelse	kW	8,50	11,74	4,97
Virkningsgrad η (%)	%	76,46	78,09	78,03
CO (%)	%	0,377	0,281	0,148
CO ved 13 % ilt (%)	%	0,372	0,225	0,110
THC (propan ækvivalent)	(ppm)	771	443	176
OGC ved 13 % ilt	(mgC/m ³)	1767	1091	439
CO ₂ (%)	%	7,96	10,09	10,08
Luftoverskudstal λ	-	3,21	2,76	2,48
Røggastemperatur (°C)	°C	211,8	238,1	269,0
Rumtemperatur (°C)	°C	25,2	25,7	27,5
Antal charges	-	9	6	3

Middelværdier for hele chargen

Varighed	(hh:mm:ss)	00:48:53	00:47:25	00:44:43
Vægt af brændsel	kg	1,597	1,597	1,599
Antal brændekævlere	stk	2	2	2
Vandindhold i brændsel	%	19	19	19
Varmeydelse	kW	6,67	6,98	7,26
Virkningsgrad η (%)	%	81,50	81,54	81,55
CO (%)	%	0,125	0,128	0,081
CO ved 13 % ilt (%)	%	0,098	0,100	0,060
THC (propan ækvivalent)	(ppm)	150	129	69
OGC ved 13 % ilt	(mgC/m ³)	293	269	148
Skorstenstræk	Pa	12,4	13,4	16,7
CO ₂ (%)	%	9,62	9,93	10,16
Luftoverskudstal λ	-	2,33	2,24	2,14
Røggastemperatur (°C)	°C	233,1	241,1	253,5
Rumtemperatur (°C)	°C	25,4	26,0	27,6
Antal charges	-	9	6	3

Diskussion

Hvordan og hvor hurtigt ilden fænger i træet, har stor betydning for især OGC-udledningen i starten af afbrændingen. Har ilden svært ved at fænge, eller hvis det bare ulmer, udvikles stor mængde OGC. Da antændingen af chargen er forskellig fra gang til gang, kan der forekomme ”outliers” (meget høj OGC).

Som bruger er det derfor vigtigt at bruge tørt træ og lade lågen stå på klem i starten, indtil der er godt gang i bålet.

Konklusion

Emissionsværdierne i startfasen af en afbrænding reduceres markant, når skorstenstrækket øges. I de første 5 minutter af en charge falder CO-emissionen til 30 % af normalværdien, når skorstenstrækket øges fra 12 til 48 Pa, og OGC-emissionen falder endog til 25 % af normalværdien. Set over hele chargen reduceres OGC-emissionen til det halve af normalemissionen.

Ved tidligere lejlighed har Teknologisk Institut undersøgt en røgsugers indflydelse på brændeovns emissioner. Her kunne der ikke påvises nogen positiv effekt, i bedste fald var virkningen marginal. Ydermere blev brændeovns virkningsgrad forringet betydeligt. Der skal dog gøres opmærksom på, at disse forsøg blev gennemført med et større undertryk end forsøgene hos Morsø Jernstøberi A/S. De nye resultater indikerer, at der er grund til at verificere skorstenstrækkets indflydelse i større sammenhæng og under kontrollerede forhold. Det er almindelig kendt viden, at såvel for lidt luft som for meget luft fører til uønskede emissioner. Derfor er det vigtigt at finde brændeovnenes optimale driftspunkt. Naturlig skorstenstræk vil formentlig ikke altid kunne tilfredsstille behovet for undertryk. Men meget tyder på, at en korrekt dimensioneret røgsuger kan eliminere de værste emissionsproblemer.

7.3 FORSØG MED UNDERFORBRÆNDING

Hovedparten af de brændeovne der findes på markedet fungerer efter nogenlunde samme princip med brændkamre, der i grove træk er identiske. En moderne ovn har som regel to typer af forbrændingsluft. En forbrændingsluft der skyller ned langs indersiden af ruden i frontlågen og videre ned i glødelaget og brændet. Formålet er at holde ruden ren for sod samt at aktivere bålet. Den anden type af luft tilsættes over bålet og har til formål at afbrænde de gasser, der afgives fra træet.

Der findes andre brændeovne (få), der fungerer efter et andet princip. Disse brændeovne bruger underforbrændingsprincippet. Røggasser der i en traditionel ovn forsvinder op gennem røgkanalen og videre op igennem skorstenen, tvinges her til at bevæge sig ned gennem glødelaget først. Formålet er, at kontakten mellem de varme gløder og røggasserne samt tilsætning af luft aktiverer yderlig udbrænding (lavere emission). Morsø Jernstøberi A/S har vurderet, at det i sammenhæng med dette projekt kunne være formålstjenlig at undersøge, om underforbrændingen giver miljømæssige gevinster i forhold til traditionel forbrænding.

Formål

Formålet med afprøvningen af underforbrændingen er at vurdere emissionen og betjeningen i forhold til en traditionel brændeovn.

Problemstilling

Ved afprøvning af brændeovne med henblik på certificering måles virkningsgraden og emissioner såsom CO (kulilte), OGC (tjære) samt partikler. Resultatet af en brændeovns afprøvning er gennemsnittet af målingerne over hele den tidsperiode som brændeovnen er målt i. Tiden for en afprøvning er den tid, det tager at afbrænde prøvebrændslet.

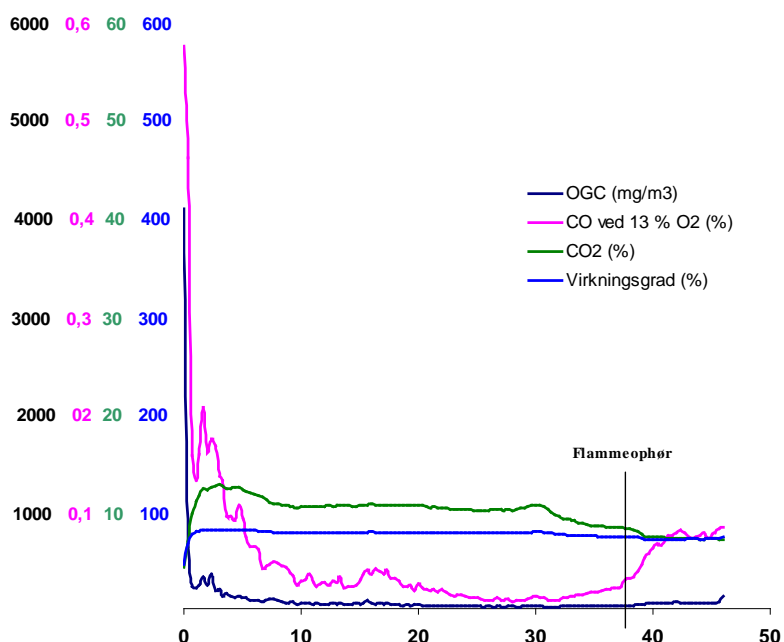
Målingerne dækker imidlertid over store variationer gennem prøveperioden. For en traditionel brændeovn er det meste af prøvetiden præget af lav emission og høj virkningsgrad. Det der trækker gennemsnittet ned, er indfyringen samt udglødningen (flammeophør). Det er reelt kun på disse

tidspunkter, at det er muligt at reducere emissionen væsentligt, hvis man ser på det samlede gennemsnit.

En underforbrændingsovn kan måske reducere emissionen, specielt i starten, i forhold til en traditionel ovn. Det baseres på følgende hypotese:

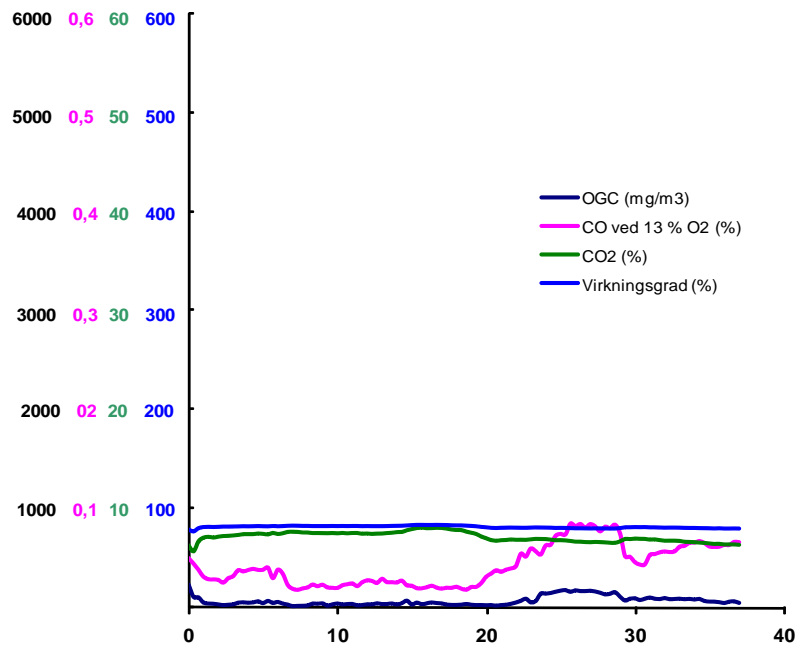
- Brændet kan hurtigt lægges i brændkammeret. Det tager kun et par sekunder (det betyder, at CO_2 -værdien ikke falder drastisk, der ellers ville betyde, at emissionen stiger, når man omregner til referencetilstand). Det kan man ikke gøre i en traditionel ovn, uden at emissionen stiger drastisk.
- De gasser der efterhånden udvikles, tvinges ned gennem glødelaget, hvor de antændes. I en traditionel ovn forlader de første gasser ofte ovnen i uforbrændt tilstand med en kraftig emissionsspids til følge.

FIGUR 67: EKSEMPEL PÅ FORBRÆNDINGSFORLØB I TRADITIONEL OVN



Af Figur 67 fremgår det, at der i starten af et forbrændingsforløb haves en meget markant emissionsspids, såvel for CO som for OGC. Når brændslet er overtændt, er emissionen moderat, og først efter ”flammeophør” stiger den igen. Dette er det normale forløb for traditionelle brændeovne.

FIGUR 68: EKSEMPEL PÅ FORBRÆNDINGSFORLØB I UNDERFORBRÆNDINGSOVN



Af Figur 68 fremgår det, at emissionsspidsen i starten af et forbrændingsforløb er ikke eksisterende. Senere i forbrændingsforløbet er emissionerne dog ret ustabile.

Middelværdi for hele chargen

	Enhed	Traditionel ovn	Underforbr.
Varighed	hh:mm:ss	00:46:20	00:37:09
Vægt af brændsel	kg	1,575	0,892
Antal brændekævlere	stk	2	1
Vandindhold i brændsel	%	16	16
Varmeydelse	kW	6,25	4,84
Virkningsgrad η	%	74,0	81,1
CO (%)	%	0,06	0,04
CO ved 13 % O ₂	%	0,05	0,04
OGC ved 13 % O ₂	mg/m _n ³	115	71
Skorstenstræk	Pa	12,5	11,9
CO ₂	%	9,5	7,2
Luftoverskudstal λ	-	2,2	2,8
Røggastemperatur	°C	331	203
Rumtemperatur	°C	19,4	20,1

De to ovne har forskellig brændkammervolumen. Derfor er brændselsmængderne forskellige. For begge ovne er der forsøgt at finde den optimale brændemængde.

I dette forsøg har underforbrændingsovnen marginalt bedre værdier end den traditionelle. Generelt er de dog ikke bedre end dem, man kan opnå med en traditionel ovn. Dog har underforbrændingsovnen, pga. lavere røggastemperatur, tydeligt højere virkningsgrad end den traditionelle ovn.

Gennemsnit over en forbrænding (inddelt i perioder)

Første 5 minutter:

Middelværdier	Enhed	Traditionel ovn	Underforbr.
Varighed	hh:mm:ss	00:05:00	00:05:00
Virkningsgrad η	%	75,1	81,0
CO (%)	%	0,22	0,03
CO ved 13 % O ₂	%	0,15	0,03
OGC ved 13 % O ₂	mg/m _n ³	432	58
Skorstenstræk	Pa	12,0	12,1
CO ₂	%	11,0	7,15
Luftoverskudstal λ	-	2,0	2,8
Røggastemperatur	°C	336	204
Rumtemperatur	°C	19,2	20,1

Maksimal værdier		Traditionel ovn	Underforbr.
CO ved 13 % O ₂	%	0,56	0,08
OGC ved 13 % O ₂	mg/m _n ³	3984	229

I de første 5 minutter af afprøvningen har en traditionel ovn en større emission end underforbrændingsovnen. OGC-emission er ca. 7,5 gange større, hvorimod CO-emissionen er ca. 5 gange større.

Fra 5. minut til 25. minut:

Middelværdier	Enhed	Traditionel ovn	Underforbr.
Varighed	hh:mm:ss	00:20:00	00:20:00
Virkningsgrad η	%	76,0	81,7
CO (%)	%	0,04	0,03
CO ved 13 % O ₂	%	0,02	0,03
OGC ved 13 % O ₂	mg/m _n ³	48	54
Skorstenstræk	Pa	12,6	12,1
CO ₂	%	10,3	7,46
Luftoverskudstal λ	-	1,9	2,7
Røggastemperatur	°C	338	205
Rumtemperatur	°C	19,4	20,1

I mellemprioroden er emissionsniveauet nogenlunde ens for de to ovne.

Fra 25. minut til slut:

Middelværdier	Enhed	Traditionel ovn	Underforbr.
---------------	-------	-----------------	-------------

Varighed	hh:mm:ss	00:21:00	00:20:00
Virkningsgrad η	%	71,8	81,7
CO (%)	%	0,03	0,06
CO ved 13 % O ₂	%	0,03	0,07
OGC ved 13 % O ₂	mg/m _n ³	92	107
Skorstenstræk	Pa	12,6	12,1
CO ₂	%	8,3	6,7
Luftoverskudstal λ	-	2,5	3,0
Røggastemperatur	°C	338	201
Rumtemperatur	°C	19,4	20,1

I slutfasen er emissionsniveauet lidt højere for underforbrændingsovnen.

Diskussion

Underforbrændingsovn

Når man er vant til at betjene en traditionel ovn, kræver underforbrændingsovnen en smule tilvænning. For at få det bedste resultat, skal følgende faktorer tilgodeses:

- Den rette mængde træ
- Den rette mængde glødelag
- Placering af brændet. Placeres væk fra ”flamme-/glødecentrum”. Eksempelvis opnås der et godt resultat, hvis den nye charge placeres på den gamle udbrændte charge. Her er der måske lidt køligere, og chargen brænder lidt mere kontrolleret.

I andre forsøg end det viste eksempel, blev der også opnået gode resultater i forbrændingens slutfase.

Det kan ikke afvises, at et optimeret underforbrændingsbrændkammer samlet set kan minimere emissionen yderligere. Det testede system er tilsyneladende ikke optimeret på alle trin i forbrændingen.

Konklusion

Med underforbrænding er det muligt at mindske emissionen væsentligt i startfasen af en forbrænding.

8 Diskussion og konklusioner

8.1 PCM-VARMELAGERETS EFFEKT

Med natriumacetat-trihydrat tilsat 5 % vand er det muligt at forlænge brændeovns ”varmeperiode” på tilfredsstillende vis. Temperaturforløbet er følgende:

- Ved indfyringens ophør er brændeovnen varmere end PCM
- Efter ca. 4 timer er ovnsens temperatur lig med PCM-temperatur
- Efterfølgende er PCM varmere end ovnen (smeltepunkt 58 °C)
- Efter ca. 7 timer registreres den største temperaturredifferens mellem ovn og PCM (middel 12-15 °C, maks. 20 °C)
- Efter ca. 14 timer er varmelageret kølet ned til 30 °C
- Efter ca. 20 timer er temperaturen mellem varmelager og ovn udlignet.

Dette betyder, at varmelageret nærmest fungerer som en radiator, der kan holde på varmen natten over. Hvis brugerne fyrer i deres brændeovn indtil kl. 21, vil varmelageret fortsat være behageligt varmt kl. 7 næste morgen. Det vil sige, at et varmelager kan fjerne incitamentet for de uønskede og miljøskadelige ”natfyringer”.

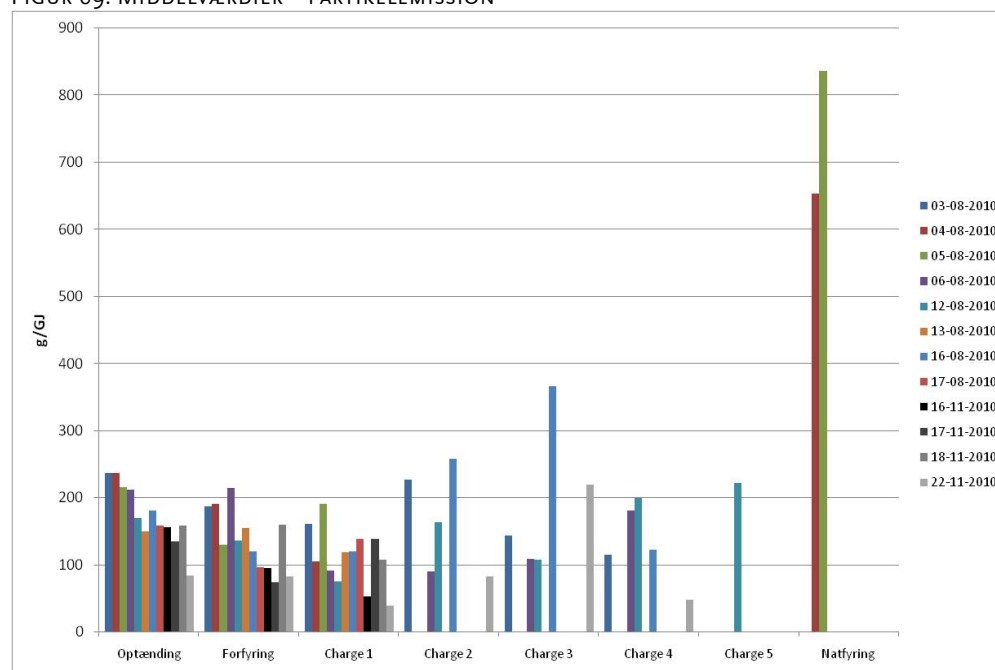
For at varmelageret kan fungere tilfredsstillende, skal der sikres en god varmetransmission. Salthydrat er en dårlig varmeleder, og derfor er der i dette projekt udviklet et varmelager med specielt gode varmetransmissionsegenskaber. Varmelageret er dog omdannet til en trykbeholder, som ikke direkte passer ind i vores forestillinger om et æstetisk design for en brændeovn. Designet ligger imidlertid uden for dette projekts ramme.

8.2 BRÆNDEOVNENS EMISSIONER

8.2.1 Partikelemission

Alle partikelemissionsmålinger er foretaget i fortyndingstunnel (DT-metoden, *Dilution Tunnel*), hvorved kondenserbare røggaskomponenter er inkluderet i de målte partikelemissionsværdier.

FIGUR 69: MIDDELVÆRDIER – PARTIKELEMISSION



Nøgletal for partikelemission, middelværdier for hele forløbet

	Optænding	Forfyring	Charges	Natfyring
g/kg (tørstof)	3,5	3,0	3,0	13
mg/Nm ³ ved 13 % O ₂	300	250	250	1300
g/kg træ	3,0	2,5	2,5	11
g/GJ	200	150	150	750

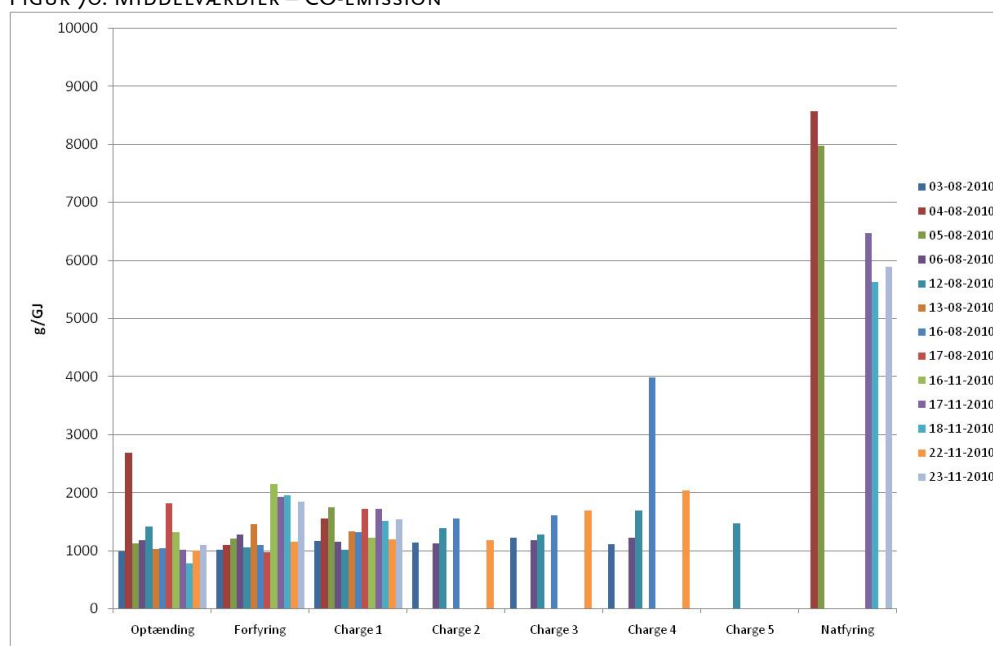
Ovenstående nøgletal er middelværdier af de målte partikelemissioner, som opnås, når moderne brændeovne håndteres korrekt, og når der anvendes lufttørret brændsel (16 % vand). Naturligvis konstateres visse variationer, også under disse forhold. De enkelte charges varierer således fra 75 til 370 g/GJ. Yderligere er der endnu større variationer inden for hver charge, som anført ovenfor. Hvis emissionen afviger væsentligt fra de anførte nøgletal, skyldes det enten u hensigtsmæssig fyringsadfærd eller dårligt/fugtigt brændsel. Tallene understreger med al ønskelig tydelighed, at ”natfyring” bør undgås.

Det skal bemærkes, at de målte værdier er noget lavere end de ”officielle emissionsfaktorer” (Olsen, H. Rørdam 2010), men at de er i fin overensstemmelse med (Nussbaumer, T. 2008), som rapporterer en partikelemission på 220-240 mg/ Nm³ ved ”typiske driftsbetingelser”.

Partikelstørrelsen er målt med SMPS og DustTrak-udstyr. Begge instrumenter finder meget små partikler. Der konstateres stort set ingen partikler over PM₁₀. Middeldiameteren under optændinger er 200 nm, ved forfyring reduceres partikeldiameteren til 120 nm, ved de efterfølgende charges er middeldiameteren 85 nm, og ved natfyringen øges middeldiameteren atter til 120 nm.

8.2.2 CO- og OGC-emission

FIGUR 70: MIDDELVÆRDIER – CO-EMISSION



Kulmonoxid (CO) i sig selv er ikke noget miljøskadeligt stof, idet CO er ret ustabil, og stoffet hurtigt bliver iltet til CO₂, når det forlader skorstenen. Men CO-koncentrationen er interessant, fordi den er udsagn for forbrændingens kvalitet, og den er således indikator for tilstedeværelse af andre uønskede stoffer. Middelværdien for samtlige indfyringer fremgår af efterfølgende tabel.

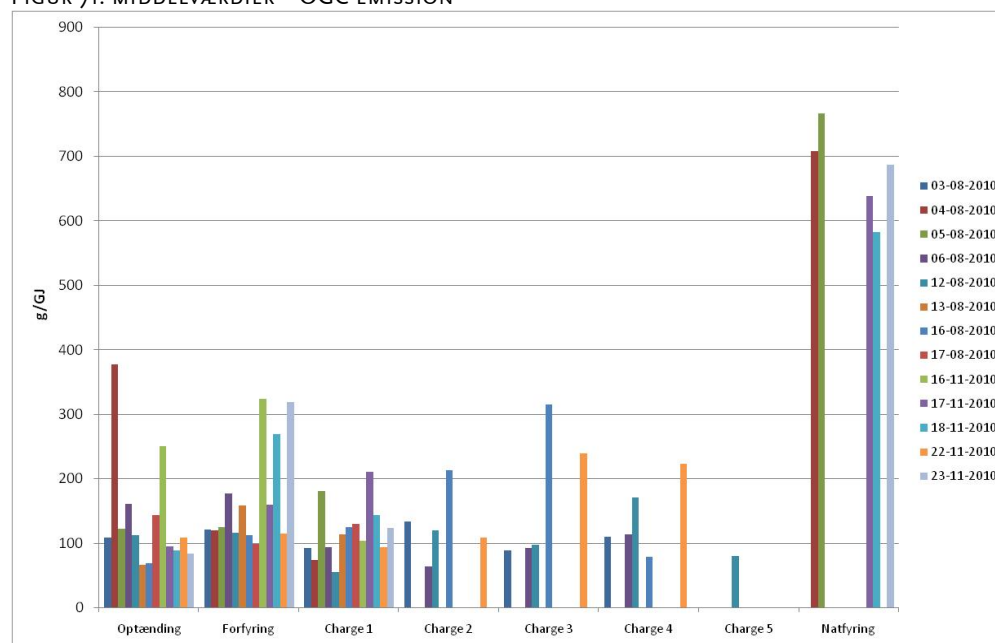
Nøgletal for CO-emission, middelværdier for hele forløbet

	Optænding	Forfyring	Charges	Natfyring
mg/Nm ³ ved 13 % O ₂	2000	2200	2400	12.000
g/kg træ	19	21	23	105
g/GJ	1300	1400	1500	7000

Til sammenligning kan nævnes, at der er følgende kravværdier i forskellige godkendelsesordninger for brændeovne:

- CE-mærket $\leq 1,0 \%$ (12.500 mg/m³)
- Svanemærket indtil 31.10.2011 $\leq 0,2 \%$ (2500 mg/m³)
- Svanemærket efter 12.10.2010 $\leq 0,136 \%$ (1700 mg/m³)
- DIN+ $\leq 0,12 \%$ (1500 mg/m³)
- Østrig ≤ 1100 mg/MJ (~1650 mg/m³)
- Tyskland efter 31.12.2014 $\leq 0,10 \%$ (1250 mg/m³)

FIGUR 71: MIDDELVÆRDIER – OGC-EMISSION



Nøgletal for OGC-emission, middelværdier for hele forløbet

	Optænding	Forfyring	Charges	Natfyring
mgC/Nm ³ ved 13 % O ₂	215	265	200	1150
g/kg træ	2,1	2,6	1,9	10,2
g/GJ	140	170	130	680

Kulbrinter (HC) eller Organic Gaseous Compounds (OGC) er en fællesbetegnelse for produkter af en ufuldstændig forbrænding. Denne stofgruppe kan indeholde miljø- og sundhedsskadelige komponenter. Til sammenligning kan nævnes, at der er følgende kravværdier i forskellige godkendelsesordninger for brændeovne:

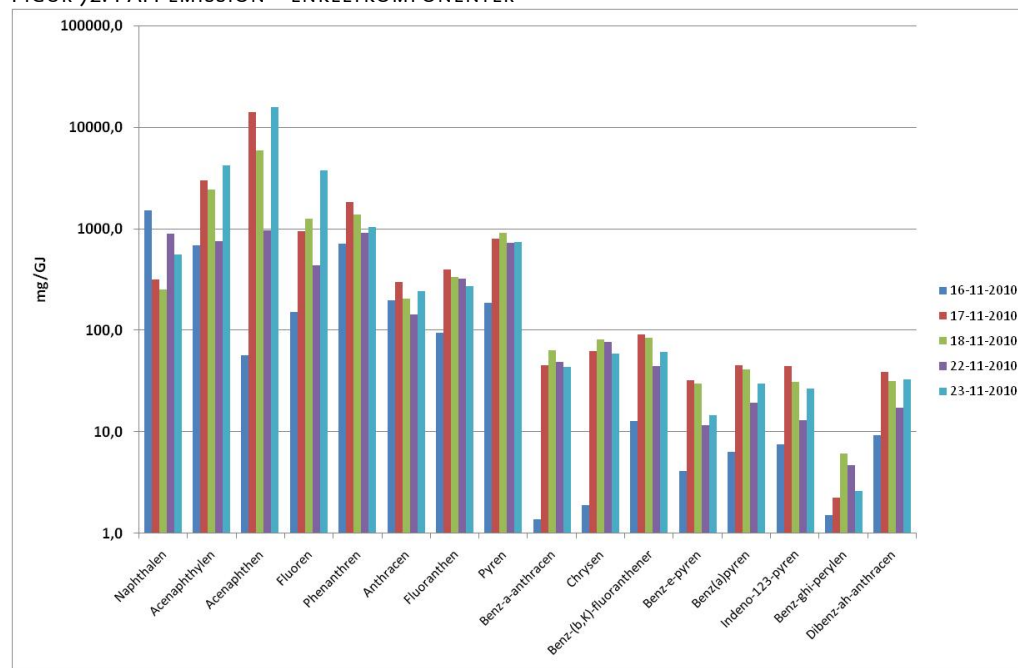
- CE-mærket Ingen
- Svanemærket indtil 31.10.2 $\leq 50 \text{ mg/m}_n^3$
- Svanemærket efter 12.10.20 $\leq 10 \text{ mgC/m}_n^3$
- DIN+ $\leq 10 \text{ mg/m}_n^3$
- Østrig $\leq 80 \text{ mg/MJ}$ ($\sim 120 \text{ mg/m}_n^3$)

8.2.3 PAH-emission

Det vides, at brændeovne bidrager til udledning af PAH (tjærestoffer) til luften i bymiljøerne. De nationale emissionsfaktorer for PAH er imidlertid særdeles usikre, fordi de er baseret på ganske få målinger. Af denne grund er der i dette projekt også fokuseret på PAH-emissionen, som blev målt over fem dage. Følgende driftssituationer er simuleret:

- 16.11.2010 måling ved kort fyringsseance (2,64 timer)
- 17.11.2010 måling ved natfyring (5,91 timer)
- 18.11.2010 måling ved natfyring (5,86 timer)
- 22.11.2010 måling ved nominel fyring (5,41 timer)
- 23.11.2010 måling ved natfyring (5,71 timer)

FIGUR 72: PAH-EMISSION – ENKELTKOMPONENTER



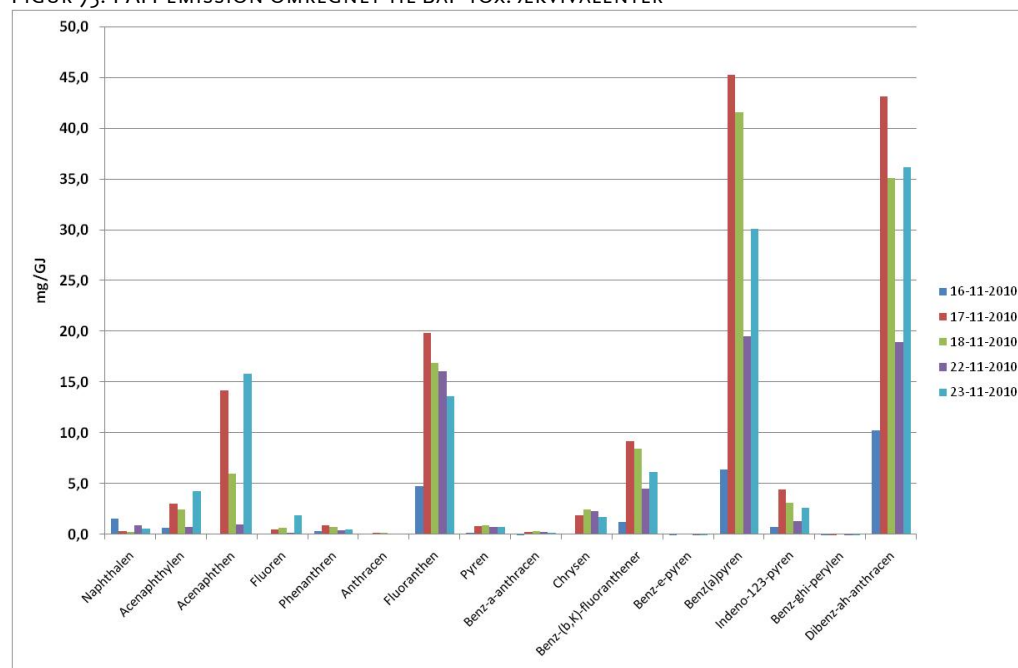
Bemærk, at værdiskalaen er logaritmisk. Endvidere er summen af PAH beregnet inklusive naphthalen.

Nøgletal for PAH-emission, middelværdier for hele forløbet

	Dellast	Nominel last	Natfyring
mg PAH/Nm ³ ved 13 % O ₂	5,7	8,4	33,7
g/kg træ	0,055	0,082	0,31
g/GJ	3,7	5,4	20,9

De målte værdier er en smule højere end emissionsfaktorer iht. (Glasius, M. et al. 2007), som oplyser 2 g PAH/GJ, med et spænd på 0,25 – 27 g/GJ.

FIGUR 73: PAH-EMISSION OMREGNET TIL BAP TOX. ÆKVIVALENTER



Nøgletal for PAH-emission (BaP Tox. ækvivalenter), middelværdier for hele forløbet

	Dellast	Nominel last	Natfyring
BaP TE mg/Nm ³ ved 13 % O ₂	0,041	0,104	0,204
BaP TE g/kg træ	0,0004	0,001	0,0019
BaP TE g/GJ	0,0265	0,0672	0,126

De målte værdier er en smule lavere end den officielle danske emissionsfaktor, som af (Nielsen, M et al. 2009) oplyses til 0,126 g/GJ. Netop denne værdi måler vi ved ”natfyring”, som må henregnes under dårlig fyringsadfærd.

9 Referencer

9.1 KILDER VEDR. PCM-FORSKNING

1. Bajnoczy, G.: "Physiochemical problems connected with phase change materials." Technical University Budapest, 1985. ISSN 0031-5311.
2. BHRA Fluid Engineering: "International Conference on energy storage". Brighton, 1981.
3. Bugaje, I.M.: "Thermal energy storage in phase change materials". Ph.D.-afhandling. Newcastle Upon Tyne University, 1993.
4. Carlsson, B.; Schmidt, A: "The use of refrigerants for reflux boiling direct contact heat exchanging in heat-of-fusion storage unit using salt hydrates". Royal Institute of Technology, Stockholm, 1983.
5. Choi, Jon Chan; Kim, Sang Done; Han, Gui Young: "Heat transfer characteristics in low-temperature latent heat storage system using salt hydrates at the heat recovery state", Samsung Engineering Co, Seoul Korea, 1996. ISSN 0927-0248.
6. Cooke, B.H.: "Design and performance of an integrated heat pump – latent heat store water heating system". Ph.D.-afhandling, Edinburg University, 1987.
7. Furbo, Simon: "Heat storage units using a salt hydrate as storage medium based on the extra water principle". Danmarks Tekniske Universitet, Laboratoriet for varmeisolering, 1982.
8. Furbo, Simon: "Heat storage with an incongruently melting salt hydrate as storage medium based on the extra water principle". Danmarks Tekniske Universitet, Laboratoriet for varmeisolering, 1980.
9. Furbo, Simon: "Investigation of heat storages with salt hydrate as storage medium based on the extra water principle." Danmarks Tekniske Universitet, Laboratoriet for varmeisolering, 1978.
10. Furbo, Simon; Svendsen, S.: "Heat storage in a solar heating system using salt hydrates". Danmarks Tekniske Universitet, Laboratoriet for varmeisolering, 1977.
11. Guion, J.; Teisseire, M.: "Nucleation of sodium acetate trihydrate in thermal heat storage cycles". Université de Nice, 1991. ISSN 0038-092X.
12. Hallett, J.: "Studies of salt hydrate heat storage system". University of Nevada, 1979.
13. Hallett, J.; Keyser, G.: "Power characteristics of a continuous crystallization latent heat recovery system". Desert Research Institute, Nevada, 1979.

ISSN 0402-1215.

14. Hasatani, M.: "Heat storing and increasing technology that has reached a practical use stage, and its new system", Nagoya university, Japan, 1994. ISSN 0375-9253.
15. Kimura, H.; Kai, J.: "Heat storage material". Patent nr. DE 3208254 A.
16. Koke, K.; Yanadori, M.: "Heat storage composition". Patent nr. DE 3209128.
17. Lewis, Richard J. Sr.; Sax, Irving, N.: "Hawleys Condensed Chemical Dictionary". Van Nostrand, 1987, ISBN 0-442-28097-1.
18. Li Jinghua, Zhou Jiankou, Huang Shanxing: "An investigation into the use of the eutectic mixture sodium acetate trihydrate - tartaric acid for latent heat storage". Henan University, Kina, 1991. ISSN 0040-6031.
19. Li, Jing-Hua; Zhang, Giu-En; Wang, Jin-Yun: "Investigation of an eutectic mixture of sodium acetate and urea as a latent heat storage". Henan University, Kina, 1991. ISSN 0038-092X.
20. Mitsubishi Denki Kabushiki Kaisa: "Material for the storage of heat; method for preparing this material". Patent nr. NL 191418 C.
21. Morimoto, Kazou; Katakai, Nobuyoshi; Senda, Takayuki: "Studies on nucleation of sodium acetate". Hitachi Chemical Co, 1987.
22. Naumann, R.; Fanghaenel, Th.; Emons, H.: "Thermoanalytical investigation of sodium acetate trihydrate for application as a latent heat thermal energy storage material". Mining Academy Freiberg, 1988. ISSN 0368-4466.
23. Neuschütz, Mark: "High performance latent heat batteries for cars". Merck KgaA, Darmstadt, 1998.
24. Röther, U.; Fuchs, W: "Process for using latent heat of subcooled salt melts for heating purposes". Patent nr. DE 2448739. Tyskland, 1976.
25. Schroeder, J.; Piel-Nicklich, V.: "Latent heat storage material, process for the manufacture of a nucleus former and latent heat store". Philips GmbH 1984 Patent nr. DE 3411399A.
26. Shpilrain, E.E.; Bizhanov, A.M., Dolesov, A.G.: "Sodium acetate trihydrate for solar heat storage". Kobe, Japan, 1990. ISBN 0-08-037193-0.
27. Tamme, R.: "Behavior of sodium acetate trihydrate in a dynamic latent heat storage system". DFVLR Stuttgart, 1984. ISSN 0146-3705.
28. Tamme, R.: "Latent heat accumulators". Brennstoff-Wärme-Kraft (artikel), 1984.

29. Tamme, R.: "Low temperature thermal storage using latent heat and direct contact heat transfer".DFVLR, Stuttgart, 1986. ISSN 0146-955X.
30. Tamme, R.: "Use of sodium acetate trihydrate and barium hydroxide octahydrate in dynamic latent heat storage systems". DGS Sonnenenergie, München, 1984.
31. Uchiki, Y.: "Studies for reduction in cost of heat storing type floor heating system". Kansai, Osaka, 1999. ISSN 0913-4352.
32. Ulman, Abraham; Valentin, Bruno: "Investigations of sodium acetate trihydrate for solar latent heat storage, controlling the melting point". Weizman Institute of science, 1983. ISSN 0165-1633.
33. Van Galen, E.: "Experimental results of a latent heat storage system based on sodium acetate trihydrate in a stabilizing colloidal polymer matrix". TNO, Holland, 1981. ISBN 90-247-2492-9.
34. Van Galen, E.; Palz, W.; Steemers, T.C.: "Optimization method and experimental results of a phase change storage system based on sodium acetate trihydrate." TNO Holland, 1982.
35. Wada, T.; Kimura, F.; Yamamoto, R.: "Studies of salt hydrate for latent heat storage, II eutectic mixture of pseudo-binary system $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na} \bullet 3\text{H}_2\text{O} - \text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ". Matsushita Electric Co, 1983.
36. Wada, T.; Matsou, Y.; Yamamoto, R.: "Heat storage capacity of sodium acetate trihydrate during thermal cycling." Matsushita Electric Co, 1984.
37. Wada, T.; Yamamoto, R.; Yokotani, F.: "Heat storage material". Matsushita Electric Co, 1985. Patent nr. US 4561989.
38. Wada, Takahiro m.fl. "Latent heat storage material". Matsushita, 1983. ISSN 0028-0291.
39. Wada, Takahiro; Matsunaga, Koji; Matsou, Yoshihiro: "Studies on salt hydrates for latent heat storages V. Preheating effects on crystallisation of sodium acetate trihydrate from aqueous solution with a small amount of sodium pyrophosphate decahydrate." Matsushita Electric Co, 1984. ISSN 0009-2673.
40. Wada, Takahiro; Matsuo, Yoshihiro: "Studies on salt hydrates for latent heat storages VI. Preheating effects on crystallisation of sodium acetate trihydrate from aqueous solution with a small amount of disodium hydrogenphosphate". Matsushita Electric Co, 1984. ISSN 0009-2673.
41. Wada, Takahiro; Yoneno, Hiroshi: "Studies on salt hydrates for latent heat storages VII. The reation between activation process of crystal nucleation catalysts for sodium acetate trihydrate and their deactivation temperatures". Matsushita Electric Co, Osaka, 1985. ISSN 0009-2673.
42. Werding, W.J.: "Heat storage equipment and application". Patent nr. DE 2551379, Tyskland, 1976.

43. Woo, S. W.; Ryu, H. W.; Kim, S. D.: "Heat transfer characteristics in a latent heat storage system", Korean Institute of Science and Technology, 1991, ISSN 0146-955X.

9.2 KILDER VEDR. EMISSIONER FRA BRÆNDEOVNE

Evald, A., FORCE Technology og Nikolaisen, L., Teknologisk Institut, Brændeforbrug i Danmark 2009, En undersøgelse af antallet af og brændeforbruget i brændeovne, pejse, masseovne og brændekedler i danske boliger og sommerhuse, 2010.

Glasius, M., Vikelsøe, J., Bossi, R., Andersen, H.V., Holst, J., Johansen, E., Danmarks Miljøundersøgelse, Schleicher, O. FORCE Technology, Dioxin, PAH og partikler fra brændeovne, Arbejdsrapport fra DMU, nr. 212, 2005.

Glasius, M., Konggaard, P., Stubkjær, J., Bossi, R., Hertel, O., Ketznel, M., Wählin, P., og Palmgren, F., Danmarks Miljøundersøgelse, Schleicher, O. FORCE Technology, Partikler og organiske forbindelser fra træfyring – nye undersøgelser af udslip og koncentrationer, Arbejdsrapport fra DMU, nr. 235, 2007.

Nielsen, M, Nielsen O-K., Plejdrup, M., and Hjelgaard, K., Danish Emission Inventories for Stationary Combustion Plants. Inventories until year 2007. National Environment Research Institute, Aarhus University, Denmark. NERI Technical Report no. 744, 2009.

Nussbaumer, T., Czasch, C., Klippel, N., Johansson, L., Tullin, C., Particulate emission from biomass combustion in IEA countries. Survey on measurements and emission factors. Report on behalf of International Energy Agency (IEA), Bioenergy, Task 32, 2008.

Olsen, H. Rørdam, Jensen, S.S., Stubkjær, J., Brug af brændeovne i Slagslunde. Resultater fra en spørgeskemaundersøgelse indenfor projektet WOODUSE. Danmarks Miljøundersøgelse, Aarhus Universitet, Arbejdsrapport fra DMU nr. 260, 2010.

Olsen, H. Rørdam, Wählin, P., Illerup, J. Boll, Brændefyrings bidrag til luftforurening, Nogle resultater fra projekt WOODUSE. Danmarks Miljøundersøgelse, Aarhus Universitet, Faglig rapport fra DMU nr. 779, 2010.

Resumé

Mange fyrer i brændeovn "natten over" ved at skrue godt ned for luften. Det betyder at brændslet ulmer og at der afgives store mængder af sundhedsskadelige stoffer. Ved "natfyring" øges eks. partikelemissionen med faktor 4-5.

Ved at bygge ovnen sammen med et varmelager, som kan optage varmen og afgive den, også når der ikke fyres, kan man undgå de skadelige "natfyringer".

I projektet er faseskifte materialet Natriumacetat-trihydrat testet som varmelager. Det vejer ca. 1/9 af sten, som man normalt bruger som varmelager (masseovn).

Systemet med Natriumacetat-trihydrat, som smelter ved 58 °C, kom til at fungere tilfredsstillende, idet der op til 14 timer efter indfyring var 30 °C i varmelageret.



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

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

www.mst.dk