

Miljøprojekt nr. 173

1991

Fyring med halm – en metode til renere forbrænding

Miljøprojekt

- Nr. 62: Luftforurening med kvælstofoxider i Danmark
- Nr. 63: Anvendelse af analyseresultater ved vandkontrol
- Nr. 64: Kosmetik - bivirkninger
- Nr. 65: Miljøfremmede stoffer i kommunalt spildevand
- Nr. 66: Undersøgelser af blødt aggressivt vand
- Nr. 67: Kilder til grundvandsforurening
- Nr. 68: Overflade aktiveret iltning af ferrojern i vand fra Hvidmosen
- Nr. 69: Forbrug og forurening med chlorphenoler
- Nr. 70: Organiske opløsningsmidler
- Nr. 71: Kviksølv i havneslam
- Nr. 72: Organic solvents
- Nr. 73: Arealanvendelse og geologi - nitrat i grundvand
- Nr. 74: Kviksølv i danske ferskvandsøkosystemer
- Nr. 75: Forureningstilstanden i danske svømmebade
- Nr. 76: Nitrat og pH i drikkevand
- Nr. 77: Kviksølv i jord
- Nr. 78: Drænvandskvalitet fra pyritholdige arealer
- Nr. 79: Leptospirabakterier i rotter ved dambrug og landbrug
- Nr. 80: Svømmebade og sygdomsrisici
- Nr. 81: Lokale forureninger og helbredseffekter
- Nr. 82: QSAR og toksikologi - en ny strategi i kemikalievurdering
- Nr. 83: Forurening fra gamle affaldsdepoter uden kemikalieaffald
- Nr. 84: Alternativ lossepladsteknologi - en litteraturgennemgang
- Nr. 85: Tilførsel af næringsstoffer til vandløb
- Nr. 86: Genanvendelse af tekstilaffald
- Nr. 87: Substitution af PVC-plast med andre plastmaterialer
- Nr. 88: Emballage til mælk og juice
- Nr. 89: Vandressourcerne og klimasvingninger
- Nr. 90: Nikkelafgivelse fra metallegeringer
- Nr. 91: Algetoksicitetstest
- Nr. 92: CFC-forbrugsmønster i Danmark
- Nr. 93: Mikrobiel nedbrydning af miljøfremmede stoffer i grundvand
- Nr. 94: Genanvendelse af madaffald fra storkøkkener i København
- Nr. 95: Bundfaunaundersøgelser som redskab til overvågning
- Nr. 96: Svovlbrintedannelse og -kontrol i trykledninger
- Nr. 97: Renere teknologi i fiskeindustrien
- Nr. 98: Renere teknologi i træ- og møbelbranchen
- Nr. 99: Kompostering af haveaffald i Frederiksborg amt
- Nr. 100: Hazard assessment of 1,1,1-trichloroethane
- Nr. 101: Organiske opløsningsmidler i husholdningsprodukter
- Nr. 102: Fuglefaunaen på konventionelle og økologiske landbrug
- Nr. 103: Sprøjtefri randzoner i kornmarker
- Nr. 104: Miljøforbedring ved hovedseparation i rejepilleindustrien
- Nr. 105: Forbrug af og forurening med bly i Danmark
- Nr. 106: Haloner - forbrugsmønster i Danmark
- Nr. 107: Galvanisk overfladebelægning uden affald og spildevand
- Nr. 108: Madaffald fra storkøkkener - organisation af indsamling og oparbejdning
- Nr. 109: Erstatningsstoffer for fosfat - spredning og effekter i miljøet
- Nr. 110: Olie/kemikalieaffald - en spørgeskemaundersøgelse
- Nr. 111: Undersøgelser af vejledende pyritgrænseværdier
- Nr. 112: Kvantitative og kvalitative kriterier for risikoaccept
- Nr. 113: Storskrald og haveaffald
- Nr. 114: Papirindsamling via specialcontainere og genbrugsstation
- Nr. 115: Vandmiljøplanens overvågningsprogram
- Nr. 116: Renere teknologi i svine- og kreaturslagteribranchen
- Nr. 117: Dioxinemission ved affaldsforbrænding
- Nr. 118: Klorkilders betydning for dioxindannelse ved forbrænding

Miljøprojekt

- Nr. 119: Okkerrensning i forbindelse med landbrugsmæssig dræning
- Nr. 120: Kontrol af køretøjer med katalysator
- Nr. 121: Forurenede industrigrunde
- Nr. 122: Indsamling af papir og pap fra erhvervsvirksomheder
- Nr. 123: Risikovurdering af forurenede grunde
- Nr. 124: Vedligeholdelse af køle-smøremidler
- Nr. 125: Fugleføde i kornmarker - insekter og vilde planter
- Nr. 126: Miljøvenlige malematerialer i jernindustrien
- Nr. 127: Miljøfremmede, organiske stoffer i kommunalt spildevand
- Nr. 128: Nedsivning fra byggeaffald
- Nr. 129: Genanvendelse af bygge- og anlægsaffald - del 1
- Nr. 130: Forureningsfri galvanomaskiner til værkstedsbrug
- Nr. 131: Miljøvurdering af PVC og udvalgte alternative materialer
- Nr. 132: PVC i kontorartikler, sundhedssektor, m. v.
- Nr. 133: PVC i byggeri og anlæg
- Nr. 134: PVC i emballage
- Nr. 135: Hjemmekompostering
- Nr. 136: Bearbejdning af danske måledata af regn og afstrømning
- Nr. 137: Regulering af forurening fra afløbssystemer under regn
- Nr. 138: Renere teknologi på energiområdet
- Nr. 139: Afvask af trykpresser med sojaolie
- Nr. 140: Vandige malematerialer til korrosionsbeskyttelse
- Nr. 141: Det grønne affaldssystem i AFAV
- Nr. 142: Det grønne affaldssystem i Høng
- Nr. 143: Katodisk elektrodypemaling
- Nr. 144: Reparationsmaling af automobiler
- Nr. 145: Genanvendelse af nedknust tegl
- Nr. 146: Restprodukter fra røggasrensning ved affaldsforbrænding 1
- Nr. 147: Blæserensningsmetoder
- Nr. 148: Storskraldsordninger med genanvendelse
- Nr. 149: Emissionsundersøgelse for pejse og brændeovne
- Nr. 150: Prognose for bygge- og anlægsaffald - hovedrapport
- Nr. 151: Prognose for bygge- og anlægsaffald - bilagsdel
- Nr. 152: Kemikalier i husholdningen
- Nr. 153: Danmarks udledning af industrielt spildevand
- Nr. 154: Miljømærkning af produkter
- Nr. 155: Spredning af forurening i moræner
- Nr. 156: Drikkevandskvalitet i Danmark
- Nr. 157: Anvendelse af nedknust beton i ny beton
- Nr. 158: Bortskaffelse af havneslam
- Nr. 159: Miljøvenlig affedtning i jernindustrien
- Nr. 160: Genanvendelse af bygge- og anlægsaffald - del 2
- Nr. 161: Arbejdsmiljøforhold ved genanvendelse af affald
- Nr. 162: Renere teknologi i eksisterende galvanovirksomheder
- Nr. 163: Forurening fra pelsdyrfarme
- Nr. 164: Deltagelse i kildesortering af husholdningsaffald
- Nr. 165: Luftforurening fra individuel og kollektiv trafik
- Nr. 166: Overfladeaktive stoffer - spredning og effekter i miljøet
- Nr. 167: Renere teknologi i mejeribranchen
- Nr. 168: Miljømæssig vurdering af mælkeemballage
- Nr. 169: Renere teknologi i den grafiske branche
- Nr. 170: Ozonlagsnedbrydende stoffer - forbrug i 1987 - 1989
- Nr. 171: Design af affaldsbeholdere
- Nr. 172: Økonomi i genanvendelse og affaldsbehandling
- Nr. 173: Fyring med halm - en metode til renere forbrænding

Fyring med halm - en metode til renere forbrænding

Det har vist sig muligt at ombygge gårdanlæg for fyring med hele halmballer, således at røgens sædvanlige indhold af kulilte, ildelugtende gasser og sod praktisk talt er forsvundet. I rapporten gives anvisning på, hvordan ombygningerne kan udføres, og hvad det koster.

Pris kr. 60,- inkl. 22% moms

ISSN nr. 0105-3094

ISBN nr. 87-503-9141-0

Miljøministeriet **Miljøstyrelsen**

Strandgade 29 · 1401 København K · Tlf 31 57 83 10

Miljøprojekt nr. 173

1991

Fyring med halm - en metode til renere forbrænding

Gårdanlæg for hele halmballer

Arne Sæbye
Lars Nikolaisen
Søren Gundtoft

Dansk Teknologisk Institut

**Miljøministeriet
Miljøstyrelsen**

Indhold

<u>Forord</u>	5
<u>0. Sammenfatning og konklusion</u>	7
<u>1. Indledning</u>	9
1.1 Baggrund for projektet	9
1.2 Forureningens karakter	10
1.3 Vurdering af forureningen	11
1.4 Sædvanlig forbrænding af halm i hele baller	12
1.5 Forbedret forbrænding	13
<u>2. Teoretisk baggrund for forsøgene</u>	14
2.1 Grundprincippet	14
2.2 Teoretiske og praktiske forudsætninger for forsøgsopstillingen	15
2.3 Indfyret effekt	16
2.4 Beregning af forbrændingstemperatur	17
<u>3. Forsøg udført på storballehalmfyr</u>	20
3.1 Beskrivelse af forsøgsopstilling	20
3.2 Beskrivelse af forsøgsproceduren	25
3.3 Beskrivelse af de 26 forsøg	25
3.4 Vurdering af forsøgsrækken	29
3.5 Resultaterne	37
3.6 Diskussion	40
<u>4. Ombygning af halmfyr</u>	43
4.1 Undersøgelse af eksisterende helballefyr	43
4.2 Ombygningsforslag for eksisterende hel- ballefyr	46
BILAG	
A. Beregninger	52
B. Emissionsmålinger	57

Forord

Dette projekt er udført af Arne Sæbye, Lars Nikolaisen og Søren Gundtoft på Dansk Teknologisk Institut og er finansieret af Rådet for genanvendelse og mindre forurenende teknologi.

Projektet er blevet fulgt af en styregruppe bestående af Hans Thellesen, SJF, Bygholm, Svend Bisgaard, Skelhøje Maskinfabrik, Allan Jakobsen, Skeltek, Kurt Delvig og Jens Sørensen, Miljøstyrelsen, Lars Nikolaisen, Dansk Teknologisk Institut, Århus og Arne Sæbye og Carl-Otto Rachlitz, Dansk Teknologisk Institut, Taastrup.

Rapportens indhold er løbende blevet diskuteret med styregruppen. Ansvarlige for indholdet i rapporten er imidlertid alene forfatterne.

0. Sammenfatning og konklusion

Det har vist sig muligt ved anvendelse af modstrømsforbrændingsprincippet at forbedre forbrændingen i et 500 kW helballefyr betydeligt.

Ved tidligere prøvninger af den pågældende meget udbredte model halmfyr er der i røgen målt fra 0,5% til 4% kulilte.

Ved ombygning af kedlen er det lykkedes at bringe røgens indhold af kulilte ned til under 0,1% (1000 ppm) ved et samtidigt iltindhold mindre end 7%.

Der forekommer dog i forbrændingsforløbet enkelte kortvarige episoder med kulilteindhold større end 1%.

Støvindholdet i røggassen er ved forbrænding af hvedehalm målt til 114 - 358 mg/m³n tør røggas.

Røgens indhold af kvælstofilter er målt til 50 - 175 ppm, mens indholdet af kulbrinter den overvejende del af tiden er målt til 200 - 1000 ppm, med spids-værdier op til 14.000 ppm.

Fra producenterne er der indhentet oplysninger om de mest almindeligt forekommende modeller af helballefyrede halmkedler. På basis af forsøgsresultaterne er der herefter udarbejdet forslag til ombygning af disse modeller til det ændrede forbrændingsprincip. De omtrentlige omkostninger ved ombygningerne er beregnet.

I de enkelte tilfælde kan man herefter, hvis man kender nyttevirkningen på den eksisterende kedel, f. eks. fra prøvningsrapporter, ud fra de beregnede omkostninger ved ombygningen, og ud fra den lokale værdi af sparet halm beregne, hvorvidt en ombygning kan betale sig, i forhold til anskaffelse af en ny kedel.

Beregningerne kan således bidrage til beslutningsgrundlaget for anlægsejere, der er nødt til at reducere miljøbelastningen, og for miljømyndighederne, der skal vurdere de økonomiske konsekvenser ved indgreb overfor miljøulemperne ved halmfyring.

Resultaterne af forsøgsarbejdet og beregningerne kan danne grundlag ved konstruktion af nye halmkedler, men såfremt der ønskes en mindre hyppighed af episoder med mere end 1% kulilte i røggassen end de 8% af driftstiden, der er opnået ved forsøgene, må konstruktion af

kedlerne baseres på yderligere udviklings- og forskningsarbejde.

Ved forsøgene er der opnået gunstige forbrændingsresultater i intervallet 180 - 600 kW, med kulilte- indhold i røggassen under 0,1% ved luftoverskudstal 1,25 - 1,5.

I første halvdel af forsøgene, hvor forbrændingsresultaterne var mindre gode, blev benyttet bygghalm, som i traditionelle kedler regnes for lidt vanskeligere at brænde end hvedehalm, der blev benyttet i sidste halvdel. Den dårligere forbrænding i de første forsøg kan dog forklares alene ud fra kedelkonstruktionen ved disse forsøg.

Modstrømsforbrændingsprincippet bør prøves på en kedel for små halmballer for at finde, ved hvor lav en indfyret effekt man kan brænde halm i hele baller med tilfredsstillende forbrændingsresultat. Endvidere bør der gennemføres et demonstrationsprojekt på et portionsfyret fjernvarmeværk.

1. Indledning

1.1 Baggrund for projektet

Der findes på institutioner og gårde i Danmark ca. 17.000 halmfyrede kedler, hvoraf ca. 1500 fyres med hele storballer à 200 til 500 kg. Kedlerne er af størrelsesordenen 20 til 1000 kW. Herudover findes 54 halmfyrede varmekilder i størrelse fra 600 kW til 9.000 kW (9 MW).

Sammenlignet med de 100.000 naturgasfyrede kedler og de 600-700.000 oliefyrede kedler der også findes, lyder det måske ikke af meget, men hvad angår emission af sod og tjærestoffer er halmfyrenes bidrag større end samtlige oliefyrs.

Forureningen giver i stort omfang anledning til naboklager, og miljømyndighederne, lokale som overordnede, er i den forbindelse plaget af et stigende antal sager, som kan være vanskelige at behandle.

For ejerne af halmfyrene kan forbud mod drift have alvorlige økonomiske konsekvenser. Halmen må ikke længere brændes på markerne.



1.2 Forureningens karakter

Røgen fra halmfyr indeholder, lige som røgen fra gas- og oliefyr, kuldioxyd, svovldioxyd og kvælstofilter, men selv om disse stoffer globalt anses for problemvoldende, giver de i sig selv kun problemer for naboerne ved ekstremt uheldige skorstensforhold.

Der hvor halmfyrene adskiller sig væsentligt fra gas- og oliefyrene er ved udsendelse (emission) af store mængder kulilte, sod, tjærestoffer og støv.

Det er således ikke ualmindeligt, at røgen fra et gårdhalmfyr for hele baller indeholder fra 0,5 til 4% kulilte, mens røgen fra et bedre halmfyret varmekværk typisk har et kulilteindhold, der svinger mellem 0,04 og 0,5%. (Skema 1.1)

År	kW	kg halm/ liter olie	CO %	Støv mg/m ³ ved 12% CO ₂
1982	25-225	2,8-3,9	-	925-2000
1983	25-250	3,2-4,2	-	465
1985	100-700	2,8-3,4	0,5-1	500-1500
1986	50-200	3,5-3,8	>2	800
1986	50-400	3,1-3,3	0,5-1,5	585-995
1987	8,7-45	2,9-3,4	>2	620
1987	50-500	2,8-3,4	0,5-1,5	550-2400
1987	23-290	2,8-3,4	0,2-0,8	240-990
1988	45-660	2,7-3,3	0,1-0,8	600-720
1989	30-65	3,0-3,6	0,5-1,5	700-850
1989	15-100	2,8-3,3	0,5-1,5	330-630
1989	10-110	2,5-3,2	0,3-0,7	550-620
1990	250	2,3	0,3	550

Skema 1.1 Karakteristiske resultater fra "SjF-ordinære prøver, gruppe 16"

Man kan benytte forholdet: kg halm/liter olie ved vurdering af forureningen, idet forhold >2,3 kan tyde på uacceptabel forbrændingskvalitet.

Til sammenligning kan nævnes, at røg fra olie- og gasfyr sjældent indeholder mere end 0,005%, mens røg fra naturgasfyr maksimalt må indeholde 0,1% kulilte.

1.3 Vurdering af forureningen

Nu er det ikke kulilten, der giver anledning til naboklager, men derimod de uforbrændte produkter, som kuliltens tilstedeværelse er et udtryk for.

Det drejer sig om sod og tjærestoffer, de sidstnævnte bestående af diverse organiske syrer og poly-aromatiske kulbrinter (de såkaldte PAH-er).

Halmrøgs karakteristiske lugt skyldes tjærestofferne.

Tilstedeværelsen af disse stoffer er resultatet af ufuldstændig forbrænding, og den "miljørigtige" måde at fjerne dem på er at forbedre forbrændingen, således at stofferne afbrændes, samtidig med at forbrændingsvarmen udnyttes.

Kendskabet til, hvad der er den miljørigtige måde at fjerne disse stoffer på, har ikke været særlig udbredt.

Årsagen hertil skal måske søges i den omstændighed, at forskningsindsatsen på området har haft trange økonomiske kår og derfor har været yderst beskedet.

Resultatet af denne manglende viden har været, at man har skelet til, hvad der gav ulemper ved fyring med fast brændsel før fyring med olie og gas blev almindelig.

Disse ulemper ved fyring med især kul og brun-kul var overvejende partikelemission.

Følgelig har såvel kedelproducenter som miljømyndigheder koncentreret sig om at søge partikel-emissionen og immissionen fra halmfyring begrænset.

Først for få år siden er man overhovedet begyndt at måle f.eks. kulilte.

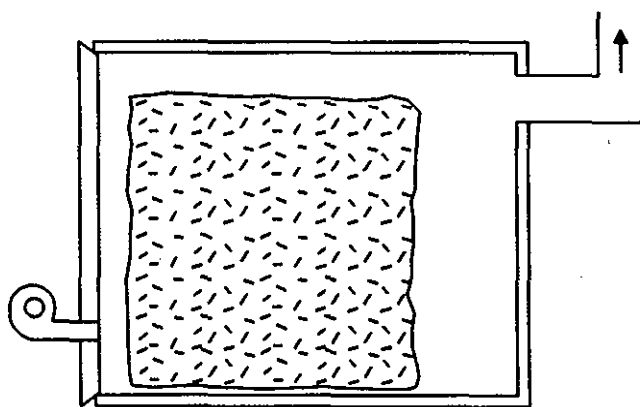
Emissionen begrænses ved montering af filtre, immissionen ved bygning af skorstene, mens der stort set ikke gøres noget ved forbrændingskvaliteten.

Resultatet har i mange tilfælde været væsentlige fordyrelser af anlæggene, øgede driftsomkostninger og røg, der trods rimelig støvfrihed alligevel lugter.

1.4 Sædvanlig forbrænding af halm i hele baller

I de mest udbredte kedelfabrikater for hele halmballer anbringes halmballen, eller halmballerne i et vandkølet kammer, der både tjener som forbrændingskammer og som hedeblade for udnyttelsen af forbrændingsvarmen. Ved nogle kedler er forbrændingskammeret dog efterfulgt af en konvektionsdel, hyppigst vandretliggende røgrør over forbrændingskammeret.

Røgen forlader som regel forbrændingskammeret for oven bagest i kammeret, mens forbrændingsluften tilføres fra lågesiden eller gennem dyser forskellige steder i forbrændingskammeret, enten ved naturligt træk, trækket forårsaget af en røggassuger, og for de større kedlers vedkommende med en eller flere forbrændingsluftblæsere.



Normal kedel

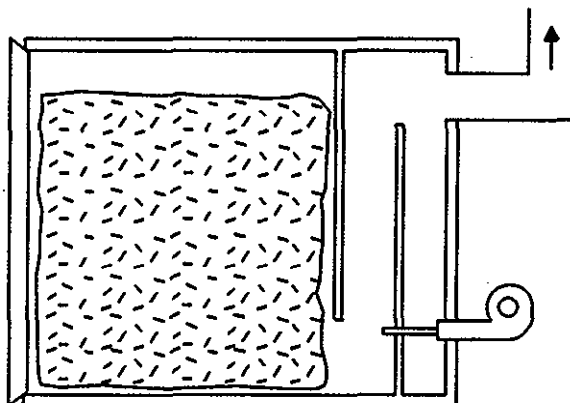
Fig. 1.1

Fælles for alle kedler efter dette princip er, at brændende gasser passerer hen over ubrændt halm, hvorved den halm, der udsættes for de varme røggasser og strålevarme fra flammerne forgasser. Derved tilføres røgen yderligere gasser, der ikke når at blive opblandet med forbrændingsluft, før gasserne og luften er blevet så kolde, at de ikke vil antænde, hvis de overhovedet når at blive blandet, før de er ude i skorstenen.

Teoretisk set kunne problemerne løses på samme måde som ved forbrænding af sygehusaffald og lignende, nemlig ved at lade gasserne udbrænde i et efterforbrændingskammer, men en sådan løsning vil være urealistisk på grund af prisen.

1.5 Forbedret forbrænding

Den idémæssige baggrund for projektet er en genopdagelse af det i 30-erne anvendte overløftsprincip til kul- og brunkulfyring. Ved at kombinere overløftsprincippet med intern recirkulation i flammen, kan man opnå en væsentlig renere forbrænding ved lavere luftoverskud end man er vant til ved forbrænding af halm.



Ombygget kedel

Fig. 1.2

Således har man ved indledende forsøg og få ombygninger i praksis set, at kulilteniveauet er sænket fra de sædvanlige 0,5-4% til 0,02-0,2% i en stor del af driftstiden, samtidig med at luftoverskuddet er sænket fra de sædvanlige ca. 100% til omkring 50%. (Se figur 1.2).

Røgnedslag, som ellers er hyppige, er ophørt, sandsynligvis på grund af lavere indhold af kulbrinter (PAH-er, tjærestoffer), og røgens karakteristiske lugt og farve er praktisk talt forsvundet.

En reduktion af røgens kulilteindhold og en samtidig reduktion af iltindholdet indebærer desuden en bedre udnyttelse af halmens brændværdi.

Dette princip vil i det efterfølgende blive benævnt MODSTRØMSFORBRÆNDING.

2. Teoretisk baggrund for forsøgene

2.1 Grundprincippet

Modstrømsforbrændings-ideen bygger på tre grundprincipper:

1) Den indblæste primærluft skal altid ramme halmen direkte, vinkelret ind mod overfladen, dels for at opnå en styrbar hastighedsgradient mellem halm og luft (det er næsten udelukkende hastighedsgradienten og iltkoncentrationen, og kun i mindre grad temperaturen der bestemmer forbrændingshastigheden for fast brændsel), dels for at fastholde halmen, så den ikke følger med gasserne, og derved vanskeliggør opnåelse af tilstrækkelig hastighedsgradient mellem halm og luft.

2) De brændende gasser, der forlader halmen, og den luft der iblandes skal tvinges sammen gennem så lille en åbning (gashals) som mulig på en måde, der sikrer opblanding af gas og luft på alle leder i gasstrømmen.

3) De brændende gasser skal gives mulighed for opblanding i primærluftstrømmen, således at der opnås intern recirkulation i flammen på samme måde som i en moderne olie- eller gasbrænderflamme, hvor udbrænding af partikler og gasser sikres ved at fuldstændig opblanding af luft og gasser foregår inden komponenterne bliver nedkølede til under antændelsestemperatur. Recirkulationen stabiliserer forbrændingen, idet den "luft", der rammer halmen, ikke er luft, men en blanding af luft og varme røggasser. Halmen modtager varme ikke blot ved stråling, men også ved konvektion. Iltprocenten i forbrændingsluften falder ved stigende forbrændingsintensitet og omvendt.

ad 1) Hvis man blæser lodret ned fra oven eller lodret op fra neden skal man ramme hele halmballens øverste eller nederste flade, hvilket giver en stor indfyret effekt, og kræver en stor efterfølgende hedeflade for at udnytte varmen. Disse to indblæsningsformer er derfor uinteressante, hvis man ønsker minimal eller variabel effekt.

Hvis man blæser ind fra siden, må det ske for neden, for at luften altid kan ramme halm, så længe der er halm tilbage. Hvis indblæsningen sker fra alle andre positioner end umiddelbart ved det sted, hvor de brændende røggasser forlader brændkammeret, skal gasserne bevæge sig forbi ubrændt halm, hvorved de får mulighed for at forårsage yderligere forgasning/afgas-

ning og optagelse af de dannede gasser, hvilket er uacceptabelt.

Såvel primærluftindblæsning som røggasafgang må derfor foregå forneden i brændkammeret.

Da det synes vanskeligt at placere røggasafgangen forneden i lågesiden, har vi valgt at placere røggasafgangen forneden i bagvæggen.

På kedler for Heston-baller på tværs kan det være rigtigt at placere røggasafgangen forneden på siden af brændkammeret.

ad 2) Hvis det alene drejede sig om at tvinge gasser og luft igennem en indsnævring, der sikrede opblanding på alle leder i gasstrømmen, kunne røgafgangen fra brændkammeret placeres hvor som helst.

ad 3) Hvis de brændende gasser skal have mulighed for opblanding i primærluftstrømmen, således at der opnås intern recirkulation, og således at gasserne køles mindst muligt inden opblanding er tilendebragt, må røgafgangen nødvendigvis findes i nærheden af luftindblæsningsstedet som nævnt under 1.

2.2 Teoretiske og praktiske forudsætninger for forsøgsopstillingen.

Halmmagasin og gashals. Der er valgt en kedelstørrelse til forsøgene, som er typisk for mange af de eksisterende anlæg. Halmmagasinet, den del af kedlen hvor halmen ligger, og hvor en del af forbrændingen og forgasningen foregår, skal kunne rumme en Heston-balle på 1,2 x 1,2 x 2,60 m, hvorfor magasinet er lavet 2,70 m langt.

Størrelsen og faconen af åbningen mellem halmmagasin og gasforbrændingskammer, kaldet gas-halsen er bestemt af flere faktorer. Således skal forbrændingsluften kunne passere fra dyserne i gasforbrændingskammeret ind i halmmagasinet, samtidig med at de brændende røggasser skal kunne passere den modsatte vej.

Ved et forsøg på et 9 MW halmfyret varmekværk anvendtes med held en gashals på 2,25 m² ved en indfyret effekt varierende mellem 4 MW og 9 MW, svarende til 0,56 - 0,25 m²/MW.

Da luften ved afbrænding af Heston-baller kun skal kunne ramme i en bredde af 1,20 m, men ved afbrænding af rundballer måske op til en bredde på 1,70-1,90 m for at undgå brodannelse, går den vandkølede væg, som danner den øverste begrænsning af den cirkelafsnitformede

gashals til 0,5 m over kedelbunden, hvilket giver en maksimal bredde af gashalsen på næsten 1,90 m, og et areal på maksimalt ca. 0,6 m².

2.3 Indfyret effekt

Da det er en forudsætning for fuldstændig forbrænding af gasserne, at forbrændingsluft og gasser er blandet, før temperaturen af gasserne når ned under antændelsestemperaturen, 510-650°C, er der udført en beregning over den nødvendige indfyrede effekt for opretholdelse af 800°C i gashalsen, hvor den endelige blanding af gasser og luft antages at foregå. 800°C er anvendt for derved at tage højde for uensartet temperaturfordeling i gasstrømmen.

Der er udført en beregning, hvor der er gjort den antagelse, at den del af halmmagasinet's vægge, der frilægges for modtagelse af strålevarme fra halmafbrendingen vokser i takt med at halmen brænder væk. Den situation, der kræver størst indfyret effekt for at opretholde en gastemperatur på 800°C i gashalsen er slutfasen, hvor kun en mindre rest halm ligger tilbage ved indfyringslågen. Der er regnet med værst tænkelig tilfælde, hvor der ikke er noget isolerende askelag i bunden af kedlen.

Beregningsmodel. I beregningsmodellen i afsnit 2.4 er gjort den antagelse, at en flamme, med en temperatur på 1340°C udgår fra halmoverfladen og køles på sin vej mod gashalsen (fig. 2.1). Modellen giver det resultat, at den indfyrede effekt skal være mellem 2 og 3 MW ved et luftoverskudstal på 1,25 når halmen er brændt hen til en afstand på 2,6 meter fra gashalsen (fig. 2.2). Med en indfyret effekt på 1 MW vil temperaturen være nede på 800°C når halmen er brændt 0,8 meter fra gashalsen. Ved en indfyret effekt på 1 MW og et luftoverskudstal på 1,25 vil temperaturen T₂₅ være nede på 550°C når halmen er brændt hen til indfyringslågen.

2.4 Beregning af forbrændingstemperatur

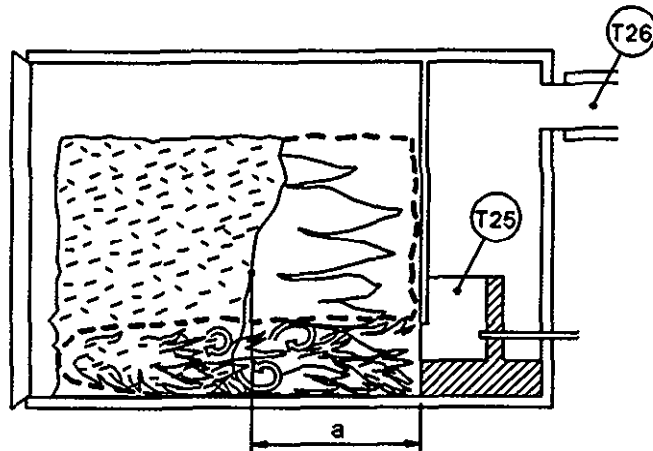


Fig. 2.1

Afstand a mellem halmfront og gashals er afgørende for temperaturen T_{25} .

Kedlen er cylindrisk med en diameter på 2,3 m. Forbrændingsluften tilsættes i modstrøm med røggasstrømmen i gashalsen.

Problemstillingen er følgende: Jo mere udbrændt halmballen bliver, desto større hede-flade blotlægges i kedlen. Dermed aftager temperaturen T_{25} . Det er derfor nødvendigt, at forbrændingsintensiteten (indfyret effekt) stiger under forbrændingsforløbet, så temperaturen T_{25} af hensyn til udbrændingen ikke kommer under ca. 800°C .

Den stigende forbrændingsintensitet forsøges opnået ved at forøge indblæsningen af forbrændingsluft.

Varmeovergangen i fyrrummet kan opdeles i konvektion og stråling.

Teorien er hentet fra Forbrænding - teori og praksis kap. 11, Teknisk Forlag, 1989. Beregningsmodellen omfatter kun olie- og gasfyrede kedelrum, men forudsættes samme omrøring at finde sted i boksen, kan modellen anvendes for en fastbrændselsflamme. Det må altså forudsættes, at flammen er udbrændt og ikke lysende, dvs. der er ingen partikelstråling. Dette er tilnærmelsesvis rigtigt.

Forudsætninger

Halmen antages at brænde fra en skrå halmfront, som langsomt flytter sig mod venstre (fig. 2.1), når halmen brænder. (Forsøgene har senere vist, at forbrændingen snarere sker

under et "låg" af halm). Det forudsættes endvidere, at turbulensgraden i den blotlagte fyrboks svarer til turbulensen i en olie-/gasfyret kedel af samme dimension.

Forudsætninger i øvrigt:

- Partikelstråling er negligeret
- Vandindhold i halm lig med 15%

Resultat

Resultatet fremgår af figur 2.2.

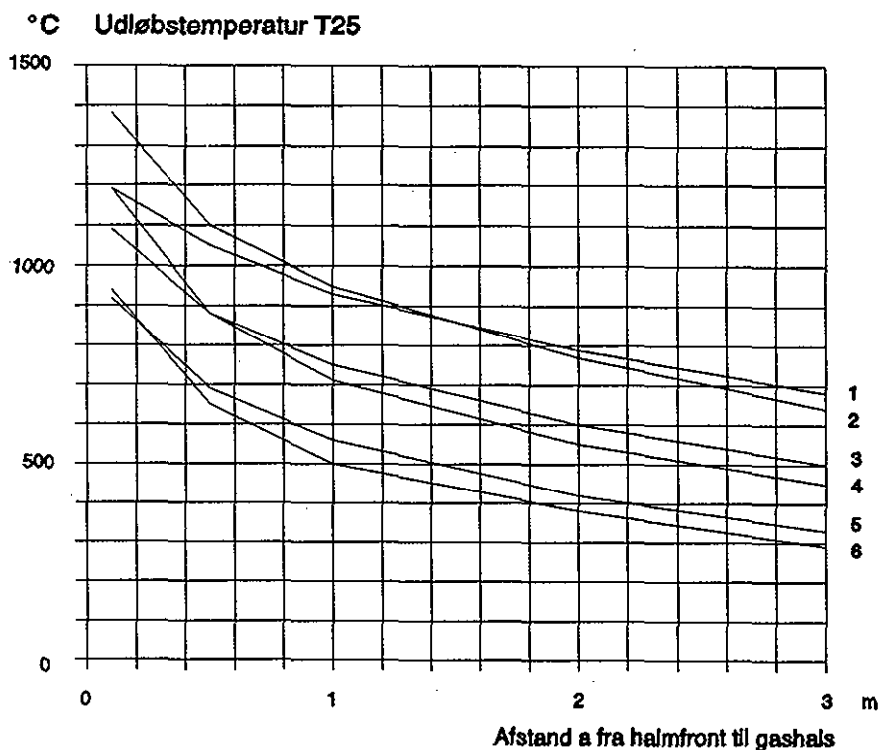


Fig. 2.2

Udløbstemperaturen som funktion af afstand a mellem halmballe og gashals.

- Kurve 1: Effekt = 2,0 MW, $\lambda = 1,25$
Kurve 2: Effekt = 2,0 MW, $\lambda = 1,66$
Kurve 3: Effekt = 1,0 MW, $\lambda = 1,25$
Kurve 4: Effekt = 1,0 MW, $\lambda = 1,66$
Kurve 5: Effekt = 0,5 MW, $\lambda = 1,25$
Kurve 6: Effekt = 0,5 MW, $\lambda = 1,66$

Hvis temperaturen skal over eksempelvis 800°C i gashalsen, skal indfyringen stige fra ca. 0,5 MW (afstand = 0,4 m) til ca. 2,0 MW (afstand = 2 m).

En anden erkendelse er, at luftoverskuddet ikke er så afgørende for temperaturen T25. Forklaringen - der også kendes for olie- og gasfyring - er den, at strålingsbidraget spiller en større rolle ved lavt luftoverskudstal, hvor den adiabatiske temperatur er høj. Hermed opnås en bedre varmeafgivelse.

Konklusion på strålingstabs-beregningen. Efter modellen skulle der således være mulighed for opretholdelse af 800°C i gashalsen ved en indfyret effekt på 1 MW, i 1/3 af forløbet. Efter modellen vil resten af forbrændingen ikke have mulighed for at blive tilfredsstillende, med mindre gasserne kan brænde ved lavere temperatur end de 800°C.

Røgtabsberegning. Med halm indeholdende 15% vand som brændsel, en iltprocent i røgen på 6%, og en røgtemperatur på 400°C er foretaget en røgtabsberegning, der viser et tab på ca. 20% i forhold til nedre brandværdi.

Forbrændingsluftmængde. Med en kølekapacitet på 1 MW og et skorstenstab på 20% ved en røggastemperatur på 400°C kan der maksimalt tillades indfyring af en effekt på 1,25 MW, svarende til 309 kg halm med 15% vand pr. time og en forbrændingsluftmængde på 1500 m³ pr. time.

Træktabsberegning. En træktabsberegning viser, at en 12 meter høj skorsten med en lysning på 315 mm kan transportere røgen fra en indfyret effekt på 1,5 MW ved et luftoverskudstal på 1,25 og en røgtemperatur på 180-300°C ved træk af størrelsesordenen 6-8 mm VS.

Beregningerne er foretaget på regneark som er vist som Bilag A.

3. Forsøg udført på storballe-halmfyr

3.1 Beskrivelse af forsøgsopstilling

Opstillingen er vist på fig. 3.1.

Som basis for fremstilling af forsøgsbrændkammeret er valgt en "Skelhøje Rundballekedel type 350", en cylindrisk kedel med en indvendig diameter på 2,30 m og en indvendig længde på 3,53 m.

Kedlen er ved hjælp af en 0,05 m tyk vandkølet skillevæg (kaldet magasininvæggen) med underkanten 0,5 meter over kedelbunden delt op i et 2,70 m langt "halmmagasin" og et 0,79 m langt gasforbrændingskammer.

Gasforbrændingskammeret er øverst i bagvæggen, via et 1,60 m langt, vandkølet rør med en lysning på 325 mm tilsluttet en 20 m² røgrørskøler.

Røgekøleren er opbygget af 7 x 8 rækker lodrette, 1,7 m lange vandkølede 2-1/2" røgrør (68 mm lysning) med røgtilslutning i et kammer for oven og røgafgang i et kammer forneden. Det øvre og det nedre kammer er, foruden via røgrørene forbundet via et Ø 315 mm by-pass rør med spjæld.

Et vilkårligt antal af røgekølerens røgrør kan afdækkes med plader.

Røgekølerens nedre kammer er tilsluttet en 12 m isoleret stålskorsten med Ø 325 mm lysning.

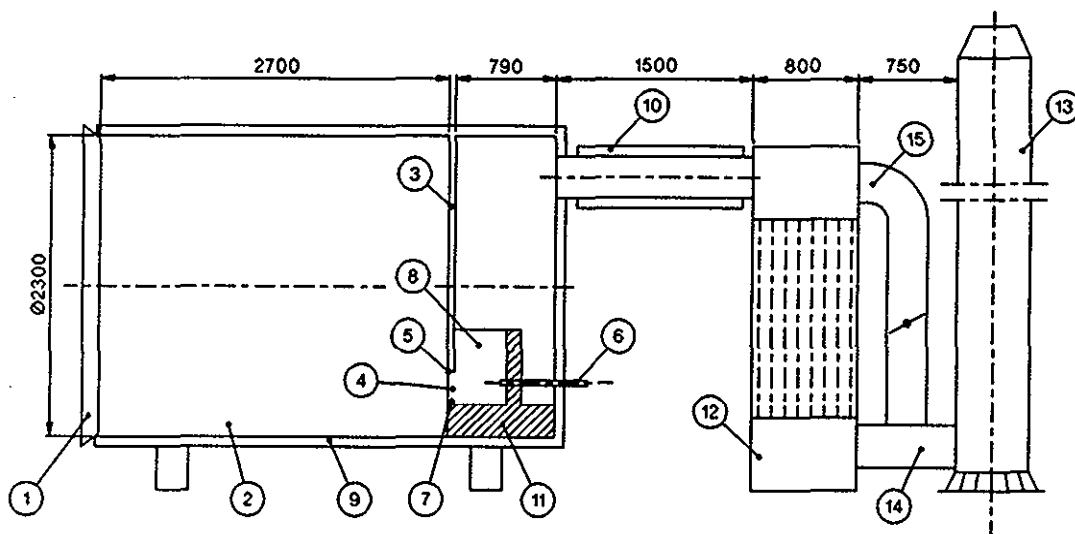


Fig. 3.1

Forsøgskedel

- pos. 1 Vandkølet låge
- pos. 2 Halmmagasin
- pos. 3 Magasinvæg
- pos. 4 Gashals
- pos. 5 Vandnæse
- pos. 6 4 x $\emptyset$ 30 - $\emptyset$ 50 mm luftlanse
- pos. 7 1 x $\emptyset$ 35 mm sekundærluftrør
- pos. 8 Gasforbrændingskammer
- pos. 9 Vandkølet svøb
- pos. 10 Vandkølet røggaskanal
($\emptyset$ 325 mm indvendigt)
- pos. 11 Ildfast murværk
- pos. 12 Røgekøler, 7 x 8 rør, 2½"
- pos. 13 Skorsten $\emptyset$ 325 x 12 m
- pos. 14 Røgkanal $\emptyset$ 325 mm
- pos. 15 Bypass med spjæld $\emptyset$ 315 mm

Åbningen i magasinvæggen mellem halmmagasin og gasforbrændingskammer er ved hjælp af ildfast støbemasse indsnævret til en bredde på 1160 mm og en højde på 250 mm. (Se fig. 3.2). Højden kan ved påmuring af ildfaste sten reduceres, og bredden kan, under drift reduceres indtil 950 mm ved hjælp af kulisser af ildfast stål.

I gasforbrændingskammerets bagvæg er monteret en plade med pakdåser for luftlanser (dyser). Pladen kan forskydes lodret og lansernes position i kedlens længderetning kan varieres. Lansernes diameter kan, med de monterede pakdåser, varieres mellem 30 og 50 mm.

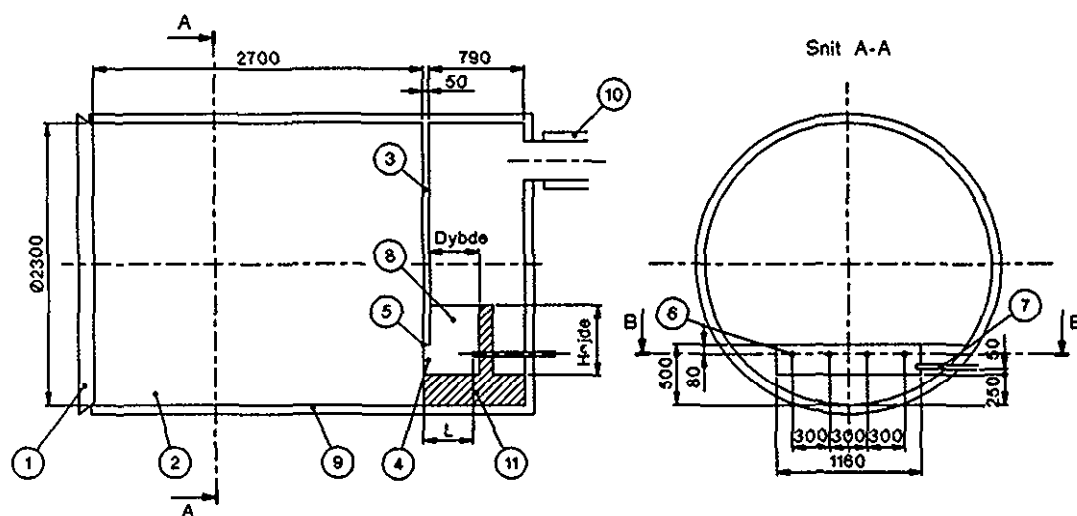


Fig. 3.2

Snit gennem halmmagasin og gasforbrændingskammer.

I gasforbrændingskammeret er endvidere monteret to vandrette, vandkølede rør for understøtning af eventuelle indsnævringer af forbrændingskammeret.

Forbrændingsluftblæser

Til levering af forbrændingsluft er indkøbt en HT 10-630 blæser fra Barker Jørgensens Maskinfabrik A/S, med en 5,5 kW motor, som tilsluttes en 6,5 kW Danfoss VTL 5 frekvensformer.

Forbrændingsluftblæseren kan levere 1500 m³ ved 580 mm VS. Med 4 stk. 40 mm luftlanser kan der indblæses 1000 m³ pr. time med et tryk på 160 mm VS ved lansernes afgreningspunkt, svarende til 1500 m³ ved 380 mm VS, med 50 mm lanser vil samme mængde luft kunne indblæses ved 200-250 mm VS.

Styring af forbrænding

For at kunne øge den indfyrede effekt i takt med at halmen brænder væk og frilægger større og større areal af magasinets vægge for optagelse af strålevarme, er forbrændingsluftblæserens frekvensomformer tilsluttet en PI-reguleringsenhed, der via et termoelement i gasforbrændingskammeret T25, eller umiddelbart efter gasforbrændingskammeret T26 kan søge at

fastholde en ønsket temperatur. Forsøgene viste, at T26 var den bedst egnede.

Køling

Kedel og røgekøler er tilsluttet et kølearrangement med en kølekapacitet på max. 1,1 MW ved et vand-flow på 16 m³ pr. time.

1,1 MW svarer til en difference mellem fremløbstemperatur og returtemperatur på 59°C.

Instrumentering og dataopsamling

En række data af betydning for vurdering af forbrændingsforløbet måles og registreres. Tryk og differenstryk måles med JUMO tryktransducere, røgtemperatur med nikkel-krom-nikkel termoelementer og vandtemperatur med kobber-konstantan termoelementer. Ilt og kulilte måles med en Testo-32, som dækker kulilteområdet fra 20 ppm til 100.000 ppm.

De målte, sammenhængende øjebliksværdier opsamles ved hjælp af en HP-85 og en HP-3497 A datalogger hvert 5. minut på bånd.

De målte parametre og målepunkternes placering fremgår af figur 3.3.

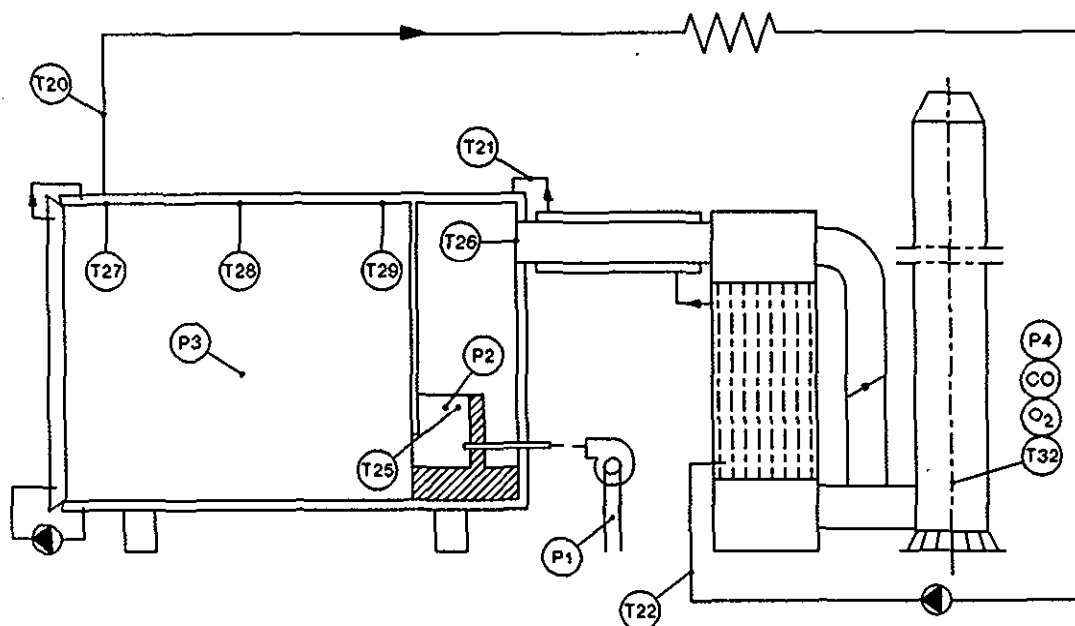


Fig. 3.3

- P1 = Differenstryk i primærluft
- P2 = Undertryk i gasforbrændingskammer
- P3 = Undertryk i magasin
- P4 = Undertryk i skorsten
- CO = Kulilte i røggas
- O₂ = Ilt i røggas
- T20 = Fremløbstemperatur (vand)
- T21 = Mellemtemperatur (vand)
- T22 = Returtemperatur (vand)
- T25 = Gasforbrændingskammertemperatur
- T26 = Temperatur i indløb til røgkanal
- T27 = Magasintemperatur v/låge
- T28 = Magasintemperatur i midten
- T29 = Magasintemperatur v/ væg
- T32 = Røggastemperatur i skorsten

De målte værdier plottes ud med maksimalt 3 kurver pr. ark.

Som x-akser er anført scannummer (hvert 5. minut) samt klokkeslet og dato.

Opstilling

Kedel, røgekøler, skorsten og forbrændingsluftblæser er opstillet ud for DTI's kedellaboratorium og tilsluttet pumpe, flowmålere og køleenheder via 4" rør.

Frekvensformere, dataloggere, tryktransducere og måleinstrumenter er opstillet i laboratoriet.

3.2 Beskrivelse af forsøgsproceduren

Generel fremgangsmåde under de enkelte forsøg:

Kedlen blev monteret med fire luftlanser med den ønskede diameter og højde under "vandnæsen", og med munden i den for forsøget ønskede afstand bag vandnæsen. Afstanden kunne varieres under drift.

En halmballe blev ved hjælp af en gaffel-truck der var forsynet med specielle tænder for halmhåndtering, anbragt i halmmagasinet, hvorefter dette blev lukket. Ved de første 13 forsøg blev anvendt byghalm leveret i baller med målene 1200 x 1200 x 2400 mm, ved de sidste 13 forsøg blev anvendt hvedehalm leveret i baller med målene 1200 x 1200 x 1900 mm. I alle forsøgene blev ballerne anbragt på snorene. Gennem gasforbrændingskammerets mandehul, hvis dæksel er udformet som eksplosions-klap, blev anbragt optændingsmateriale i form af avispir.

Datalogger og måleinstrumenter blev startet og kalibreret, der blev sat vandcirkulation på anlægget, begyndende med koldt vand ved samtlige forsøg, og forbrændingsluftblæseren blev afprøvet og derefter standset.

Herefter blev optændingsmaterialet antændt, dækslet lukket og forbrændingsluftblæseren startet på ganske lavt omdrejningstal. Efter få minutters forløb blev blæserhastigheden øget og derefter indreguleret i forsøg på at finde og fastholde en temperatur på termoføler T25 og T26, indtil forbrændingen udtrykt ved ilt- og kuliltekoncentrationen blev bedst mulig i den givne situation. T26 viste sig at reagere bedst på ændringer i luftindblæsningen.

Skorstenstrækket blev maksimeret ved afblænding af en del af røgekølefladen og ved at lede en del af røggassen uden om røgekøleren.

3.3 Beskrivelse af de 26 forsøg

Forsøgene 1 - 6 blev udført uden murværk i gasforbrændingskammer og halmmagasin, idet støbemassen, der dannede bund og sider i gas-halsen ikke er regnet med som murværk. Der blev anvendt 40 mm luftlanser.

Efter forsøg 6 blev asken fjernet.

Fra og med forsøg 7 er forskellige størrelser og udformninger af gasforbrændingskammeret blevet prøvet.

Forsøgene 7 - 9 blev udført med et gasforbrændingskammer opbygget i tunge ildfaste sten med en varmeledningskoefficient på $1,25 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ ved 800°C . Der blev anvendt 50 mm luftlanser. Forbrændingsresultaterne var fortsat dårlige, og der opstod overtryk i gasforbrændingskammeret allerede ved indfyrede effekter mellem 180 kW og 240 kW.

Fra og med forsøg 10 var væggen mellem halmmagasinet og gasforbrændingskammeret beklædt med 25 mm Keranap 50 plader, der har en varmeledningskoefficient på $0,16 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ ved 800°C på hele den side, der vender mod halmen, og i et felt 1250 mm bredt og i en højde af 1000 mm over vandnåsen på den side, der vender mod gasforbrændingskammeret.

I forsøg 10 - 16 blev forskellige kombinationer af prelplader i gasforbrændingskammeret prøvet.

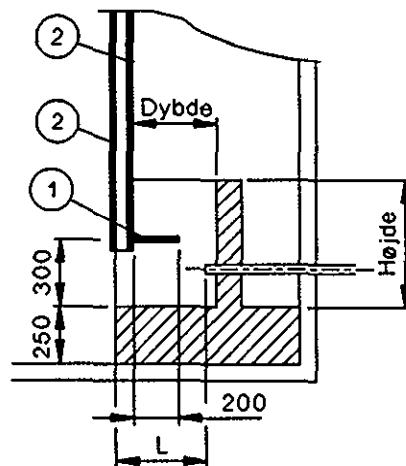


Fig. 3.4

Forsøg 10-12

(1) Prelplade, 25 mm Keranap 50,
bredde = 1160 mm

(2) Isolering magasin væg 25 mm Keranap 50

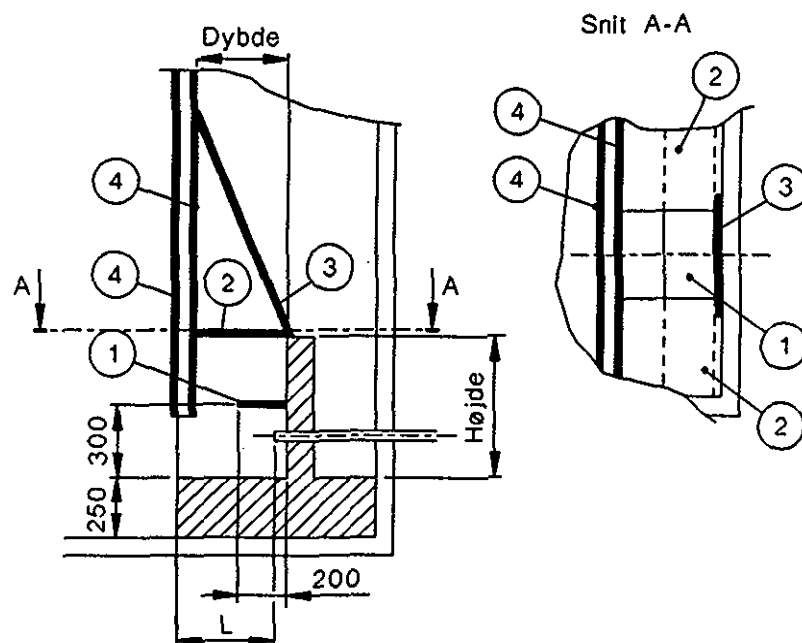


Fig. 3.5

Forsøg 13-16

- (1) Prelplade, 25 mm Keranap 50, bredde = 1160 mm.
- (2) Prelplade, 25 mm Keranap 50, 2 stk. 500 mm x 400 mm.
- (3) Prelplade, 25 mm Keranap 50, 1 stk. 1000 mm x 500 mm. (Skråstillet)
- (4) Isolering magasin væg, 25 mm Keranap 50.

Fra forsøg 12 - 18 blev anvendt 30 mm luftlan-ser, fra og med forsøg 19 er blevet anvendt 40 mm lan-ser.

Fra og med forsøg 16 er luftstrålernes spred-ning søgt øget ved montering af en bolt på tværs af hver af lansemundingerne.

Fra og med forsøg 17 er der anbragt en 35 mm sekundærluft-lanse i gashalsen. (Pos. 7 på fig. 3.1 og 3.2).

Fra og med forsøg 18 er gashalsens højde øget til 400 mm ved bortmejsling af gasforbrænd-ingskammerets bund. (Se fig. 3.6 og 3.7).

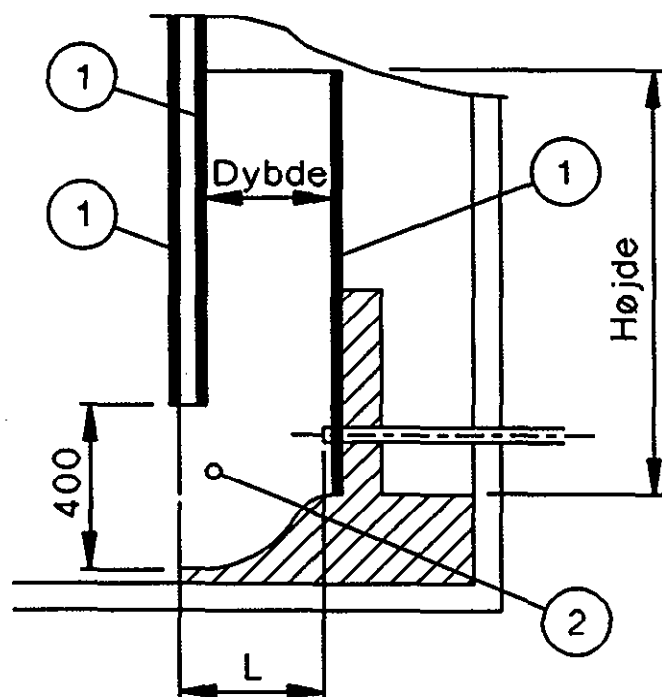


Fig. 3.6

(1) 25 mm Keranap 50

(2) Ø 35 mm sekundærluftrør

Fra og med forsøg 19 er anvendt 40 mm lanser.
Fra og med forsøg 20 har gasforbrændingskam-
meret været foret med 25 mm Keranap 50 plader.

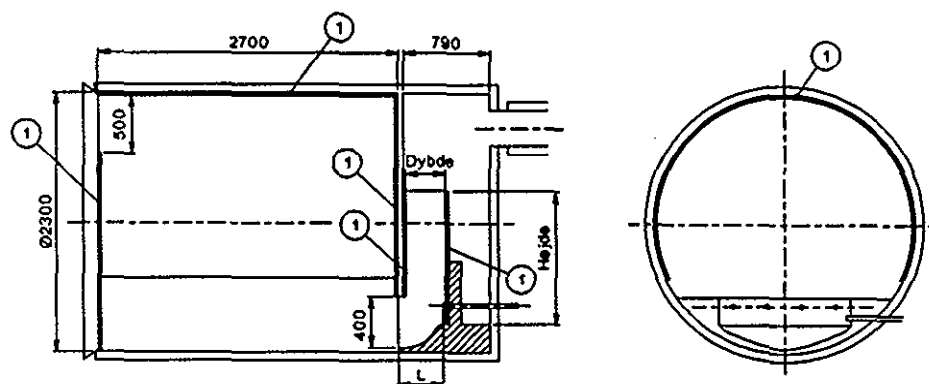


Fig. 3.7

(1) 25 mm Keranap 50.

Fra og med forsøg 22 har magasinsvøb og låge
ligeledes været foret med 25 mm Keranap 50
plader, magasinet ned til ca 200 mm over aske-
laget, lågen op til 500 mm under magasinets
loft. (Vist som pos. 1 på fig. 3.7).

Først fra forsøg 22 har PI-regulering af luftindblæsningen været anvendt.

Samtlige ændringer fremgår af skema 3.1 og 3.3.

Også de enkelte forsøgs "resultat" er opgjort skematisk i skema 3.2 og 3.4. Her er som negative kriterier anført, i hvor stor en del af tiden røgens kulilteindhold har været over henholdsvis 2% og 1% , og i hvor stor en del af tiden der har været overtryk i gasforbrændingskammeret.

Som positive kriterier er anført, i hvor stor en del af tiden røgens kulilteindhold har været under 0,1% og i hvor stor en del af tiden iltindholdet har været under 10% , samt i hvor stor en del af tiden gasforbrændingskammerets temperatur T25 har været over 700°C.

I skemaet er også anført en række andre oplysninger af betydning ved vurdering af forsøgsresultaterne, herunder om indfyret effekt og om træk.

3.4 Vurdering af forsøgsrækken

Uden murværk

I ingen af forsøgene 1 - 9 , hvor halmmagasinet var helt uden murværk/isolering kunne der opnås et brugbart forbrændingsresultat. Således var den højeste opnåede andel af tiden, hvor temperaturen i gasforbrændingskammeret nåede over 700°C 6% . Den højeste indfyrede effekt, der blev opnået uden overtryk i gasforbrændingskammeret var 470 kW, forsøg 6, hvor den nødvendige effekt for at opnå 700°C anført i beregningsmodel 1 er 400 kW allerede når halmen er brændt 0.4 meter væk fra gas-halsen.

Begrænset isolering

Fra forsøg 10 - 19 hvor magasin-væggen, men ikke svøbet var isoleret, kunne en temperatur på 700°C i gasforbrændingskammeret opnås i op til 58% af tiden (forsøg 11). Her var forbrændingsresultatet imidlertid utilfredsstillende, bl. a. på grund af manglende sekundærluft. (Vist som pos. 7 på fig. 3.1 og 3.2).

Fuldt isoleret

Først i forsøgene 20 - 26, hvor også svøbet og lågen var isoleret, kunne forbrændingstemperaturen opretholdes i en større del af tiden.

Forsøg nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Dato 1990	11/7	13/7	19/7	24/7	1/8	3/8	5/9	6/9	25/9	26/9	27/9	5/10	10/10	15/10
Vandflow m ³ /h, når det ikke er registreret	16	16	16	16	16,5	16	19,5	16,6	18,3	13,1	19,6	18,6	18,4	15,3
Halm	Byg	Byg	Byg	Byg	Byg	Byg	Byg	Byg	Byg	Byg	Byg	Byg	Byg	Hvede
Røg - bypass	0	0	0	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1
Røg - køleflade	8/8	5/8	3/8-5/8	4/8	0	0/8-3/8	3/8	3/8	8/8	4/8	4/8	4/8	4/8	4/8
Gashals - højde mm	250	250	200	200	200	200	200	250	250	250	250	250	250	250
Gashals - bredde mm	950				1160			1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160
Luftlanse - diameter	40	40	40	40	40	40	50	50	50	50	50	30	30	30
Luftlanse - antal	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Luftlanse - højde under vandnæse	125	125	100	100	60	60	65	65	65	65	65	80	80	80
Luftlanse - mm bag vandnæse	400-500	500	250-500	300-500	500-550	500	380-500	250	-10-250	250-500	250-280	250-550	300-550	250-300
Gasforbrændingskammer - dybde	-	-	-	-	-	-	400	280	280	550	550	550	500	500
Gasforbrændingskammer - bredde							1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160
Gasforbrændingskammer - højde							350	350	350	600	600	600	600	600
Prelplader										X *	X *	X *	X *	X *
Isolering af magasin væg										X	X	X	X	X
Isolering af låge														
Isolering af svøb														
Isolering af gasforbrændingskammer														
Askelag	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5	6	7
Temperaturstyring af luft	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sekundærluftdyse mm														
Bolt i luftlanse														
Spjældåbning luftlanse 1 og 4 **	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	30°-45°	10°-90°	10°-90°	30°-90°

Skema 3.1
Fysiske data

Bemærkninger: * Se tegning af prelplader fig. 3.4 og 3.5
** 90° = åbent, 0° = lukket

Byg: 1200 x 1200 x 2400 mm
Hvede: 1200 x 1200 x 1900 mm

Forsøg nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Dato 1990	11/7	13/7	19/7	24/7	1/8	3/8	5/9	6/9	25/9	26/9	27/9	5/10	10/10	15/10
% tid med CO > 20.000 ppm	23	24	44	34	35	34	17	38	8	47	55	26	17	14
% tid med CO > 10.000 ppm	77	62	74	49	95	65	52	47	29	70	69	48	59	28
% tid med CO < 1000 ppm	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	23
% tid med O ₂ < 10%	26	34	27	41	38	40	13	42	17	57	71	57	33	87
% tid med t ₂₅ > 700°C	0	0	0	0	0	0	0	2	6	41	58	42	23	33
% tid med overtryk i gasforbrændingskammer	-	-	89	49	75	44	41	34	74	40	18	10	9	-
Indblæst luft Q m ³ /h ved begyndende overtryk i gasforbrændingskammer	-	-	581	626	537	850	894	402	559	291	447	402	580	-
O ₂ % umiddelbart før overtryk indtræffer	-	-	12	8	7	9	15	8	14	3	3	7	7	-
Samtidigt træk mmVS	-	-	3	5	6	6	4	4	3	3	6	0	3,5	-
Samtidigt indfyret KW	-	-	239	376	347	470	244	241	179	241	371	259	374	-

Skema 3.2
Måledata

Forsøg nr.	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26		
Dato 1990	18/10	23/10	26/10	30/10	31/10	2/11	8/11	13/11	14/11	19/11	21/11	22/11		
Vandflow m ³ /h, når det ikke er registreret	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R		
Halm	Hvede	Hvede	Hvede	Hvede	Hvede	Hvede	Hvede	Hvede	Hvede	Hvede	Hvede	Hvede		
Røg - bypass	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1		
Røg - køleflade	4/8	3/8	3/8	3/8	4/8	5/8	5/8	5/8	5/8	5/8	5/8	5/8		
Gashals - højde mm	250	250	250	400	400	400	400	400	400	400	400	400		
Gashals - bredde mm	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160		
Luftlanse - diameter	30	30	30	30	40	40	40	40	40	40	40	40		
Luftlanse - antal	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
Luftlanse - højde under vandnæse	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80		
Luftlanse - mm bag vandnæse	300-440	350-440	300-350	250-400	300-400	350	350	350	350	350	350	350		
Gasforbrændingskammer - dybde	500	500	350	350	350	300	300	300	300	300	300	300		
Gasforbrændingskammer - bredde	1160	1160	1160	1160	1160	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100		
Gasforbrændingskammer - højde	600	600	870	870	870	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
						**	**	**	**	**	**	**		
Prelplader	X *	X *												
Isolering af magasinvæg	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Isolering af låge								X	X	X	X	X		
Isolering af svøb						X	X	X	X	X	X	X		
Isolering af gasforbrændingskammer						X	X	X	X	X	X	X		
Askelag	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19		
Temperaturstyring af luft								1/2	X	X	X	X		
Sekundærluftdyse mm	-	-	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35		
Bolt i luftlanse		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Spjældåbning luftlanse 1 og 4 ***	90°	90°	0°-45°	0°-45°	0°-90°	0°-90°	0°	0°-90°	0°	0°	0°	90°		
Sekundærluftspjældåbning ***	-	-	0°-90°	0°-90°	0°-90°	0°-45°	0°-45°	0°-45°	0°-45°	45°-60°	45°-60°	0°-60°		

Skema 3.3

Fysiske data

Bemærkninger: * Se tegning af preplader fig. 3.4 og 3.5

** Brændkammerets mindste tværsnit 1100 x 220

*** 90° = åbent, 0° = lukket

reobalm.3

Forsøg nr.	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
Dato	18/10	23/10	26/10	30/10	31/10	2/11	8/11	13/11	14/11	19/11	21/11	22/11	
% tid med CO > 20.000 ppm	22	3	20	7	7	8	4	4	5	2	-	-	
% tid med CO > 10.000 ppm	32	50	44	21	12	28	10	17	13	8	-	-	
% tid med CO < 1000 ppm	9	0	0	4	29	17	36	38	78	76	-	-	
% tid med O ₂ < 10%	86	7	51	40	19	55	34	32	79	74	91	14	
% tid med t ₅ > 700°C	15	0	2	16	15	40	45	46	79	71	86	74	
% tid med overtryk i gasforbrændingskammer	0	10	0	2	54	36	22	34	16	27	15	34	
Indblæst luft Q m ³ /h ved begyndende overtryk i gasforbrændingskammer	* 720	700	650	650	700	600	700	800	600	700	725	825	
O ₂ % umiddelbart før overtryk indtræffer	** 10	16	** 10	12	15	8	13	12	7	7	8	12	
Samtidigt træk mmVS	5	0	5	5	4	4	6	5	5	5	6	6	
Samtidigt indfyret KW	*** 364	159	** 329	268	192	359	257	330	387	452	434	341	
Målte specialværdier									NO _x	CH ₃	Støv		

* Max indblæst luft uden overtryk i gasforbrændingskammer
 *** Tilsvarende indfyret effekt
 ** Tilsvarende O₂

Den største indfyrede effekt, 452 kW, uden overtryk i gasforbrændingskammeret blev opnået i forsøg 24. Her var iltindholdet i røgen samtidig kun 7%. Den største indfyrede effekt i samme forsøg, men med overtryk i gasforbrændingskammeret, var 580 kW og et iltindhold i røgen på 8%.

Forsøgene 23 - 26 har været karakteriserede ved fuld isolering af såvel magasin som gasforbrændingskammer og PI- styring af luftindblæsningen. Temperaturen i gasforbrændingskammeret har i 71 - 86% af tiden ligget over 700°C. Røgens indhold af kulilte har i forsøg 24 været under 0,1% (1000 ppm) i 76% af tiden, og kun været over 1% (10.000 ppm) i 8% af tiden, mens iltindholdet i 74% af tiden har været mindre end 10%.

I forsøg 25 og 26 har den væsentligste forskel mellem de to forsøg været, at luftlanserne 1 og 4, de to yderste, har haft lukkede spjæld i forsøg 25, men åbne spjæld i forsøg 26, det sidste resulterende i, at iltindholdet i røgen har ligget under 10% i 91% af tiden i forsøg 25, men kun i 14% af tiden i forsøg 26. Temperaturen i gasforbrændingskammeret har været over 700°C i 86% af tiden i forsøg 25, men kun i 74% af tiden i forsøg 26.

I forsøgene 20 - 26 har gasforbrændingskammerets volumen udgjort 0,33 m³. Med 17% vand i halmen og et iltindhold i røgen på 8% svarer 1 m³ forbrændingsluft til ca 7 m³ 800°C varm røggas. I forsøg 24 har den største indblæste luftmængde ved disse omstændigheder, ved en effekt på ca 580 kW, udgjort 1000 m³ pr time svarende til 7000 m³ varm røggas pr time eller ca 2 m³ pr sekund igennem gasforbrændingskammeret.

Opholdstiden i gasforbrændingskammeret har således været af størrelsesordenen 0,16 sekund. Ved højere vandindhold i halmen vil opholdstiden under tilsvarende omstændigheder være endnu kortere. Gasforbrændingskammerets mindste tværsnit har et areal på 1100 x 220 mm eller 0,242 m² således at gashastigheden i forbrændingskammeret har været 8 m pr sekund. Gashastigheden i indløbet på det vandkølede afgangsrør med diameter 325 mm har, forudsat at der ikke er sket nogen væsentlig køling af gasserne forinden, været op til 24 m pr sekund, hvilket har været den overvejende årsag til overtryk i gasforbrændingskammer og halm-magasin.

°C Temperatur i gasforbrændingskammer, røgkanal og skorsten

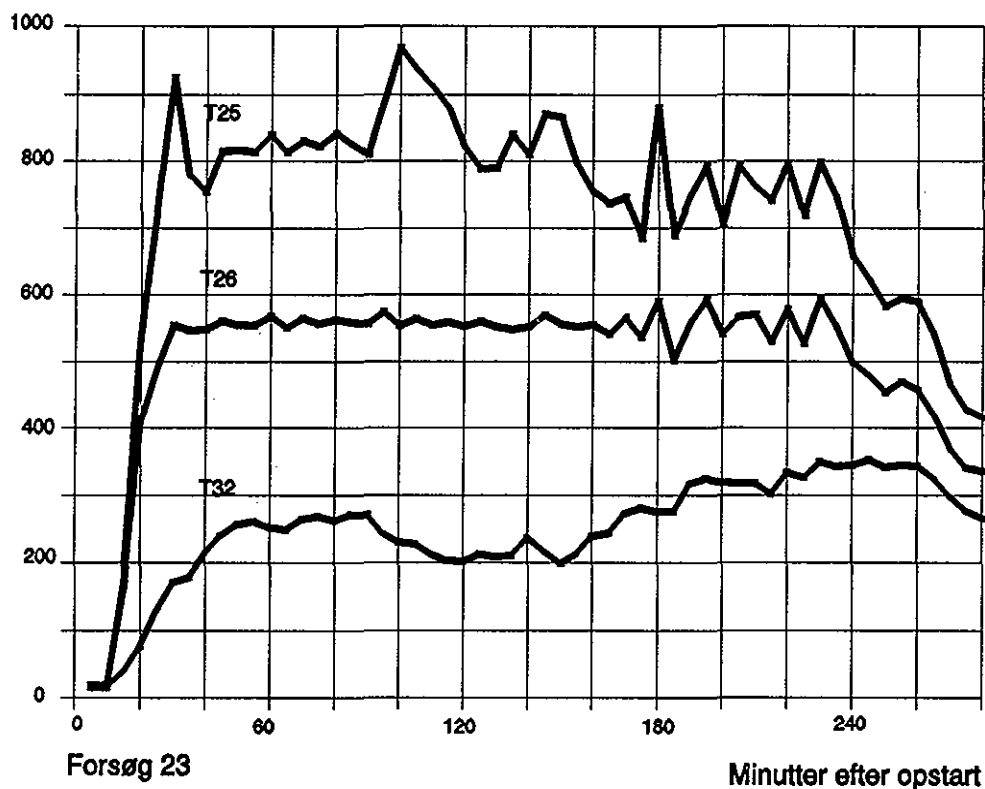


Fig. 3.8

Når termoføleren T26 i afgangsrøret har vist temperaturer ca 200°C lavere end føleren i gasforbrændingskammeret T25, er det ikke fordi gastemperaturen faktisk har været så meget lavere, men snarere fordi føleren i gasforbrændingskammeret har været stråletabsbeskyttet, mens føleren i afgangsrøret har siddet tæt op ad vandkølede flader.

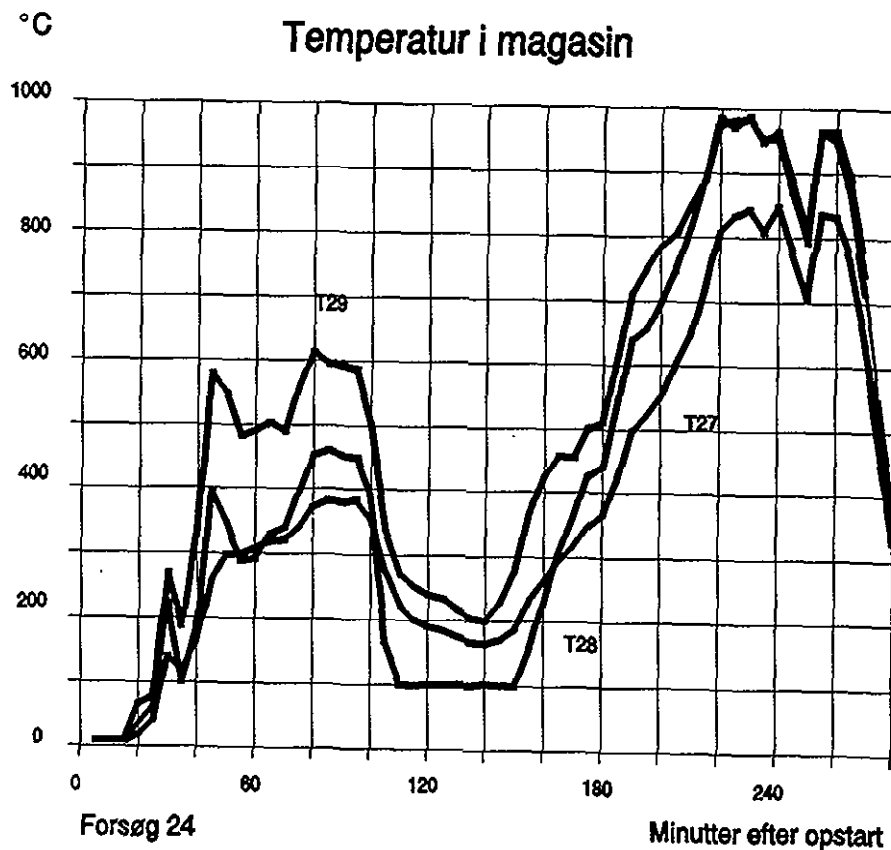


Fig. 3.9

Forløbet af temperaturerne i halmmagasinet i forsøg 24 (fig. 3.9) viser, at halmen en stor del af tiden må have dannet skjold, således at temperaturerne først i den sidste del af forbrændingen når op på 1000°C men at der tidligere i forløbet har været en stigning, der kunne tyde på midlertidig gennembrænding af skjoldet.

3.5 Resultaterne

I et af de bedste forsøg, nr. 24, er ved en indfyret effekt stigende fra 200 kW til 580 kW (fig. 3.10) opnået mindre end 0,1% (1000 ppm) kulilte i røggassen i 76% af tiden, mens kulilten kun i 8% af tiden har oversteget 1% (fig. 3.11). I samme forsøg har kulbrinteindholdet i røggassen i 69% af tiden været mindre end 1000 ppm, mens iltindholdet har ligget under 10% (fig. 3.12 og 3.13).

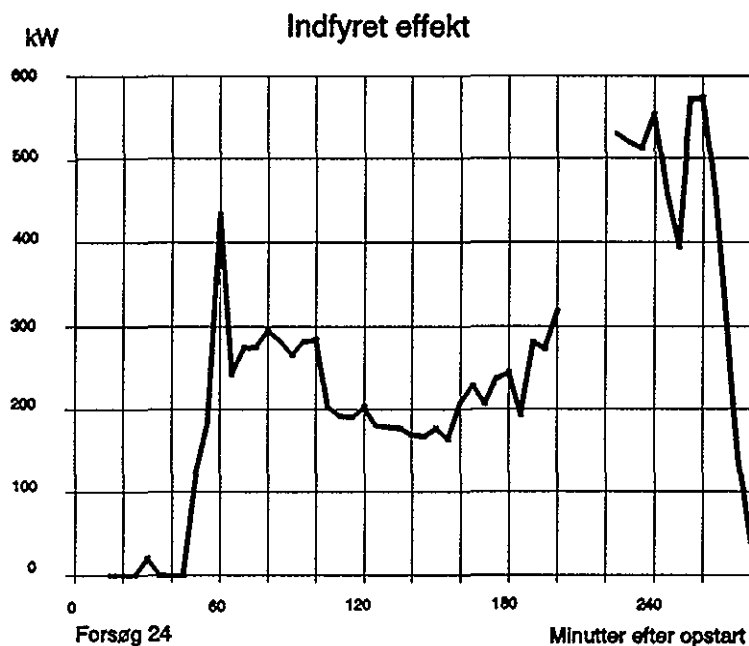


Fig. 3.10

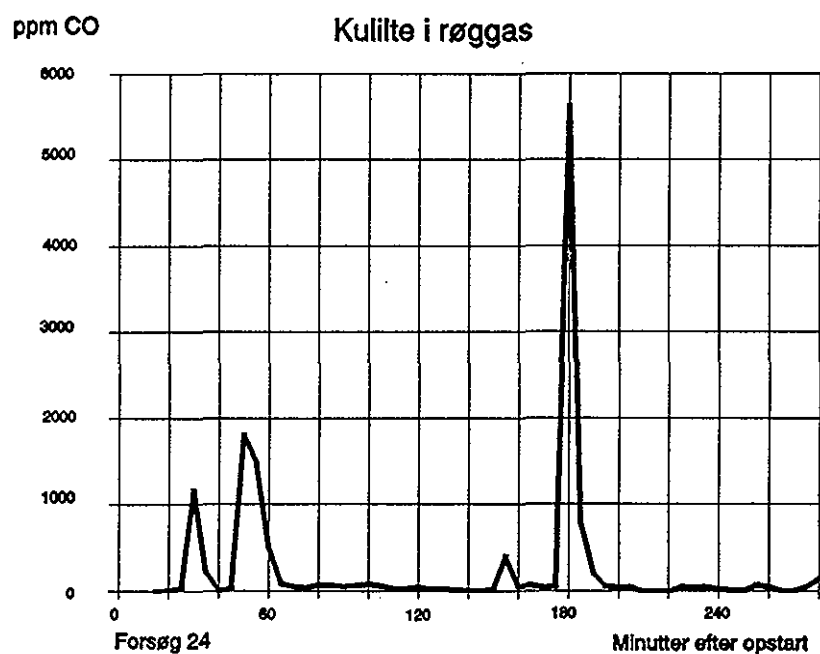


Fig. 3.11

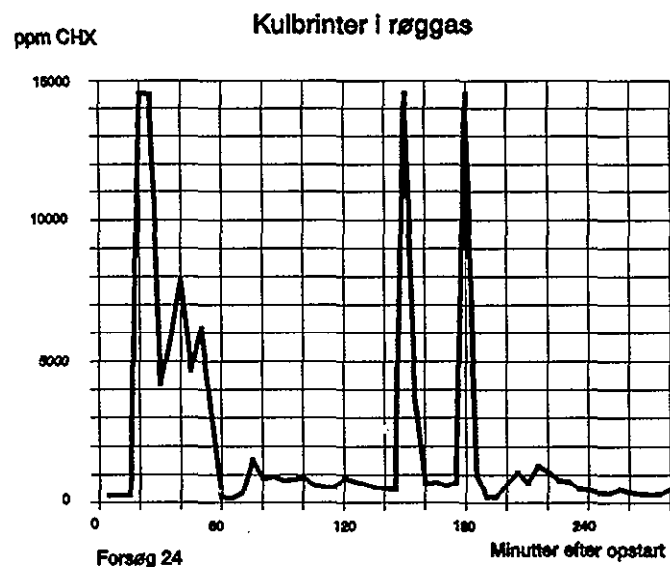


Fig. 3.12

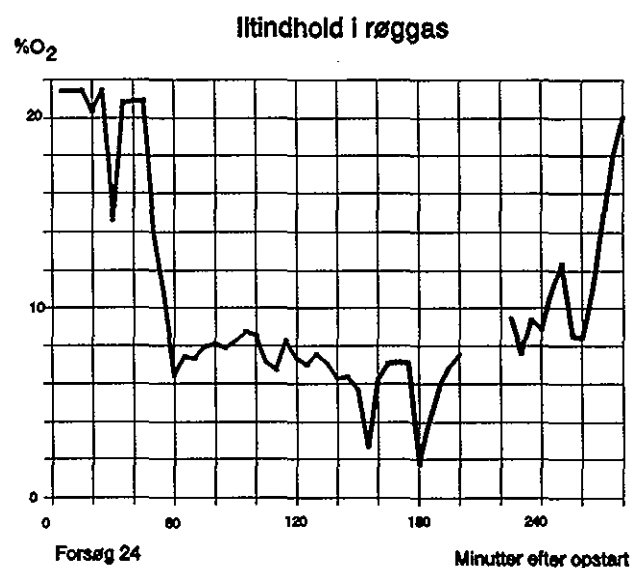


Fig. 3.13

Kl.	13:52	14:38	15:12	15:38
O ₂ %	7,3	4	6	9
Støvkonc. mg/m ³ n,t	142	319	488	224
Støvkonc. ved 10% O ₂ mg/m ³ n,t	114	206	358	280
Støvemission kg/h	0,105	0,084	0,409	0,411
m ³ luft/h ca.	500	200	250-1000	1000

I forsøg 25 er støvemissionen, omregnet til 10% O₂ i røggassen, målt til 114, 206, 358 og 280 mg/m³n,t, med den største timeemission på 0,41 kg.

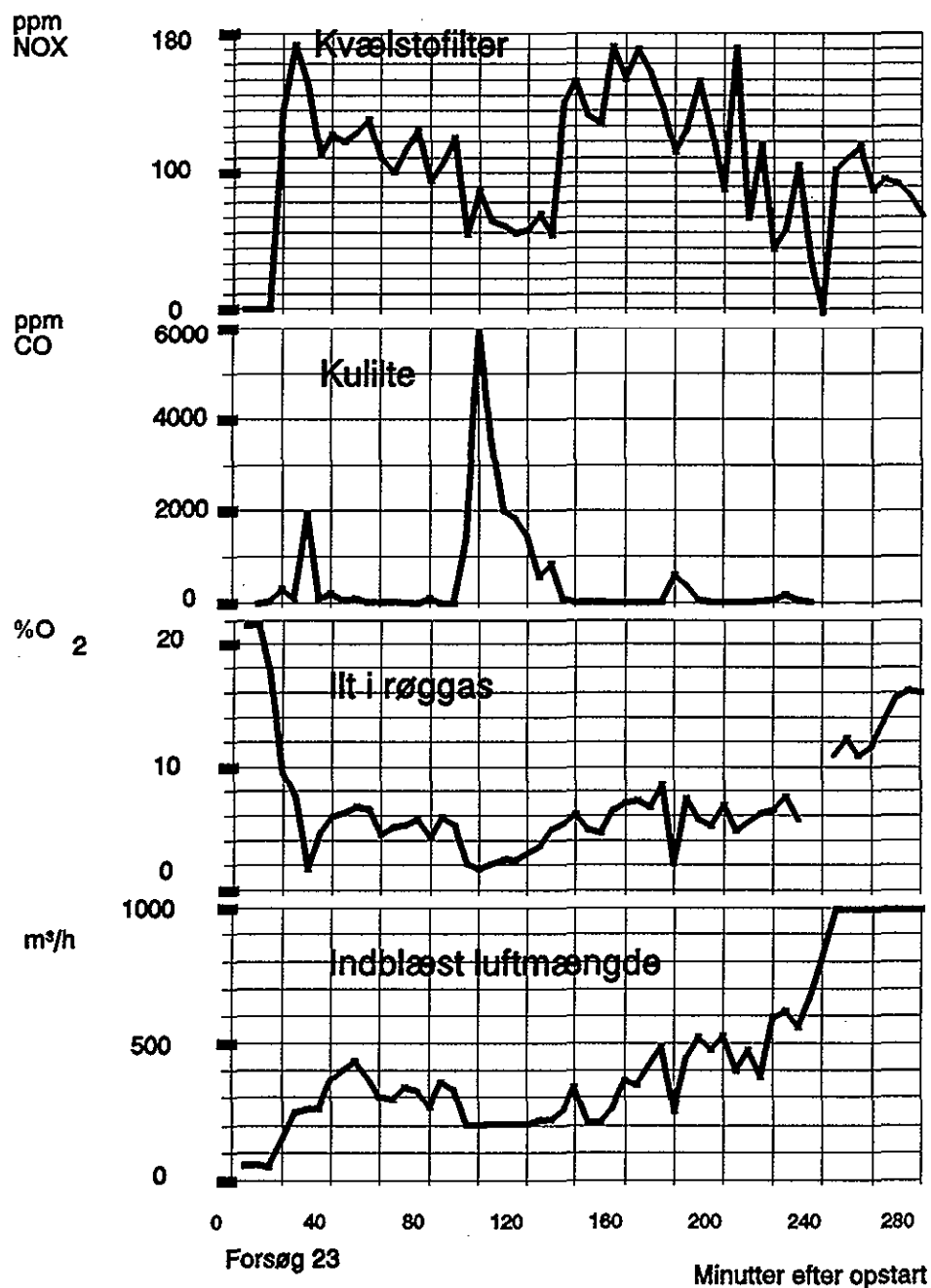


Fig. 3.14

I forsøg 23 er målt kvælstofiltekoncentrationer (NO_x) fra 50 ppm til 170 ppm. I figur 3.14 er vist de samtidigt målte værdier af CO, O₂ og indblæst luftmængde.

3.6 Diskussion

Spidsværdier

Forsøgene har vist, at det kan lade sig gøre at brænde en storballe halm i en cylindrisk kedel efter modstrømsprincippet med tilfredsstillende resultat den overvejende del af driftstiden. Forbrændingsresultatet er kun dårligt i få procent af tiden, visende sig ved kortvarige spidsværdier af røgens indhold af uforbrændte gasser og et samtidigt dyk i røgens iltprocent. Spidsværdierne skyldes sandsynligvis sammenfald af halm, og kan måske modgås ved en bredere fordeling af luften, således at hele halmunderlaget brænder væk samtidigt, hvor der netop i forsøgene er tilstræbt en huledannelse for at reducere stråletab i magasinet og for at forhindre unødigt luftoverskud af luft, der rammer ved siden af halmen (fig. 3.15). En kombination af ensartet bortbrænding af halmunderlaget og en beskyttelse mod stråletab og mod at en del af luften rammer ved siden af halmen kan opnås ved at tilpasse halmmagasinets facon til halmballens facon, således at luften kan blæses ind i en bred vifte uden at kunne ramme ved siden af.

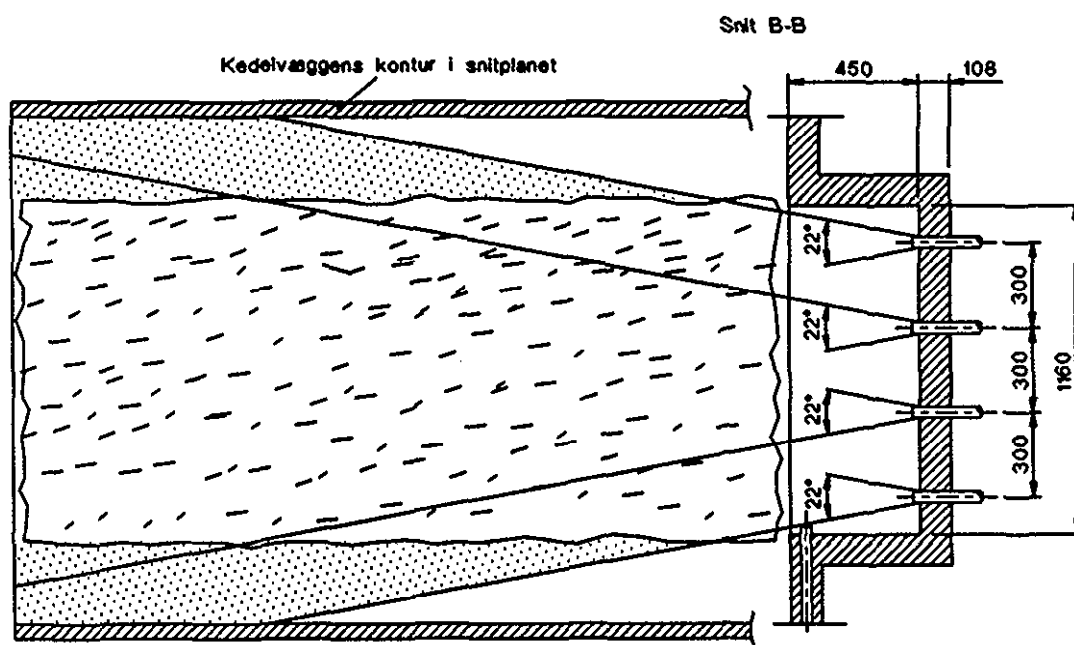


Fig. 3.15

Sekundærluft

Luftlansernes diameter har indflydelse på behovet for sekundærluft, således at "den naturlige sekundærluftvirkning" er størst ved tynde luftstråler, som samtidigt kræver større blæsertryk. For at gøre forbrændingskvaliteten mere uafhængig af valget af luftlansediameter er der i forsøgene 17-26 anvendt separat sekundærluft-tilførsel.

Tryktab

Gasforbrændingskammerets tværsnitsareal på $0,33 \text{ m}^2$ og gashalsens areal på $0,46 \text{ m}^2$ synes passende til en maksimal indfyret effekt på ca 600 kW men bør være noget større, hvis der skal være plads til chikaner, der kan sikre en bedre gasblanding. Gasforbrændingskammerets volumen bør under alle omstændigheder have et lidt større rumfang for at forlænge opholdstiden. Tværsnitsarealet af afgangsrøret fra gasforbrændingskammeret bør øges til lidt mere end det dobbelte for at reducere et unødvendigt tryktab, bl.a. for at give plads til et mere nødvendigt tryktab ved gas/luft bladfunktionen i gasforbrændingskammeret. Hvis der mellem gasforbrændingskammerets murede del og afgangsrøret er plads til at køle røgen, f.eks ved indbygning af retardere eller en decideret røgekøler kan man muligvis undlade en øgning af afgangsrørets tværsnitsareal.

Murværk

Ildfast murværk bør have en passende isole-ringsevne, da ikke isolerende, tungt murværk dårligt kan nå at blive varmt, inden halmballen er brændt ud. På steder udsat for direkte flamme-påvirkning bør murværket være alkaliresistent. I den sidste del af gasforbrændingskammeret kan man tillade sig at benytte tungere murværk, da det her kan få tid til at blive opvarmet før det "skal i funktion". Alle steder, hvor røggastemperaturen kan komme over $400-500^\circ\text{C}$ bør kanaler mm af brandtekniske årsager udføres i vandkølet udgave.

Styring

Forudsætningen for at kunne benytte automatisk styring af forbrændingsluftblæseren efter temperaturen i eller efter gasforbrændingskammeret er, at stigende luftmængde medfører stigende temperatur. Dette har kun i begrænset omfang været tilfældet ved forsøg 1-20, hvorfor styringen først er taget i brug efter at der i forsøg 21 viste sig mulighed for at benytte den.

Akkumulering, uafbrudt fyring

Det er en forudsætning for optimal drift, at forbrændingen kan foregå uafbrudt med den stigning i indfyret effekt, som den automatiske styring tilsiger. Derfor kræves en akkumuleringstank med en kapacitet der er tilpasset halmballe-størrelsen og forbrugsmønsteret.

4. Ombygning af halmfyr

4.1 Undersøgelse af eksisterende helballefyr

Fra 21 producenter er der indhentet oplysninger om de mest almindeligt forekommende helballefyrede anlæg. Nogle producerer ikke lænhalmfyr, enkelte ønskede ikke at være med i rapporten. I alt er der materiale fra 8 fabrikanter. Der er dog en god dækning, hvad angår antallet af producerede enheder, idet nogle af de største producenter indgår i materialet. Det drejer sig om følgende:

- Maskinfabrikken REKA A/S
- Skelhøje Maskinfabrik ApS
- KF-Halmfyr
- Passat Energi A/S
- Hans Schmidt Smede- og maskinfabrik
- Aunslev Smede- og maskinfabrik A/S
- SUNO
- Allelev Smede- og maskinforretning

I undersøgelsen blev der spurgt efter det totale antal solgte kedler. Dvs. opgørelsen dækker firmaernes produktion til det danske marked fra slutningen af 1970'erne og frem til i dag.

På baggrund af materialet er det muligt at opdele de helballefyrede kedler i 4 modeller, som er vist i det nedenstående:

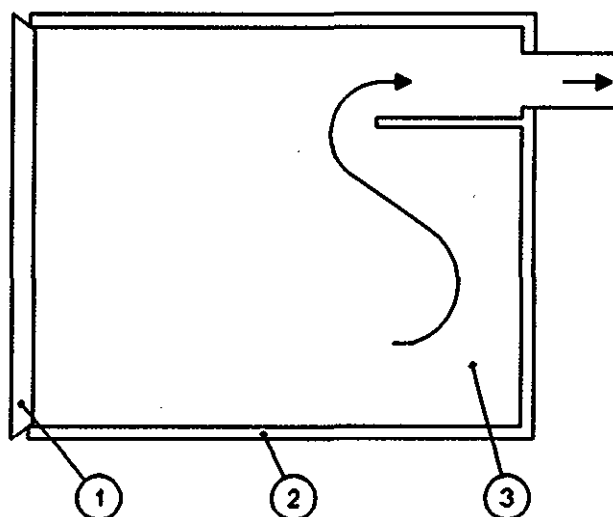


Fig. 4.1

Model 1

Pos. 1: Vandkølet låge

Pos. 2: Vandkølet svøb

Pos. 3: Fyrrum

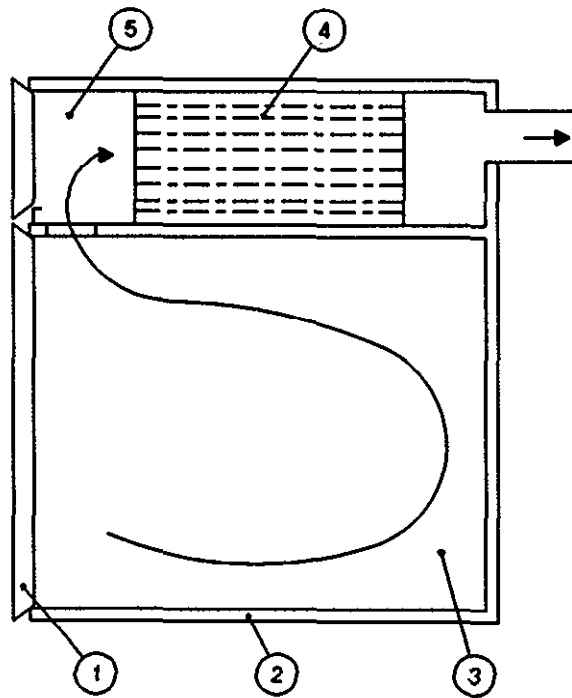


Fig. 4.2
Model 2

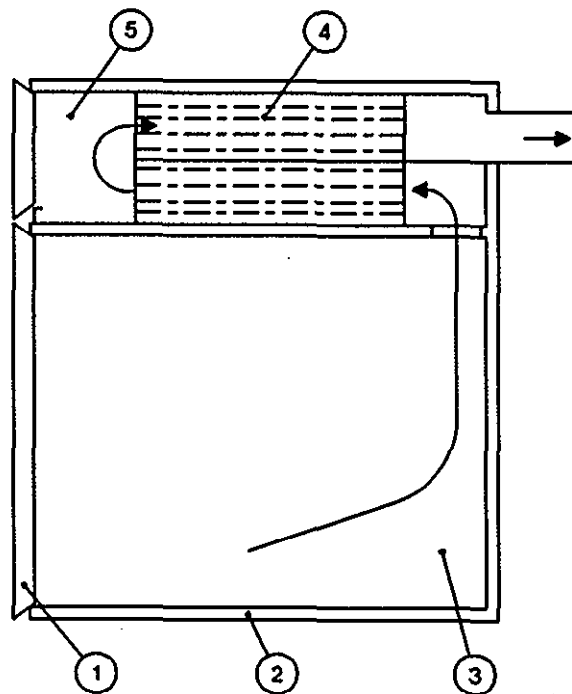


Fig. 4.3
Model 3

For fig. 4.2 og 4.3:
 Pos. 1: Vandkølet låge
 Pos. 2: Vandkølet svøb
 Pos. 3: Fyrrum
 Pos. 4: Røgrør i vandkammer
 Pos. 5: Røgvendekammer

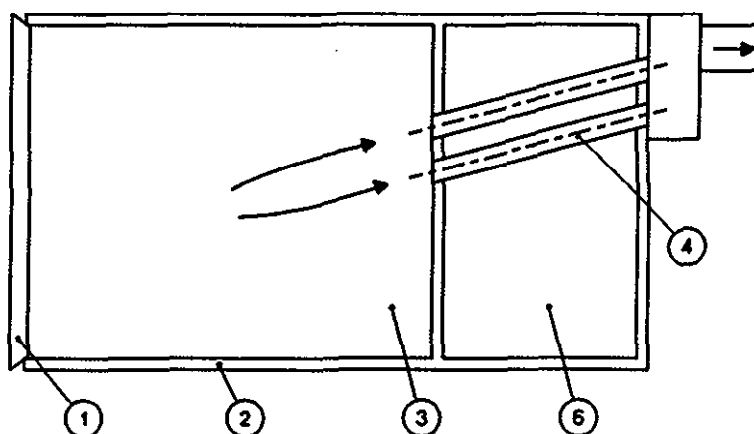


Fig. 4.4

Model 4

Pos. 1: Vandkølet låge

Pos. 2: Vandkølet svøb

Pos. 3: Fyrrum

Pos. 4: Røgrør

Pos. 5: Akkumuleringsstank

Indenfor hver model er der forskellige typer opdelt efter effektstørrelse og detailudformning. Enkelte typer har låge med ildfaste sten, men de fleste typer har vandkølet låge. Fyrrummets størrelse varierer med kedlens effekt. De store typer kan rumme 1 hesstonballe eller 1 rundballe. De mindste typer kan rumme fra 1-10 12 kg's baller. Nogle få typer har åben bund udført med ildfaste sten. Resten har vandkølet bund. Næsten alle af model 1, 2 og 3 kan leveres med ekstern akkumuleringsstank.

Luftfordelingssystemet for forbrændingsluften varierer meget. De små typer er ikke nødvendigvis forsynet med blæser, og luften tilføres gennem naturlig træk via spjæld i lågen. De fleste er forsynet med 1-2 blæsere, og luften tilføres fra front, side eller bag, gennem varierende antal dyser der også (via spjældomstilling) er afhængig af, hvor lang tid der er gået siden indfyringen af halmballen.

Om forbrændingskvaliteten i de eksisterende modeller henvises til afsnit 1.2 og 1.4.

Ud fra de indhentede oplysninger kan der laves følgende fordeling på effektstørrelse af model 1, 2, 3 og 4, vist i skema 4.1.

Skemaet viser antal solgte kedler i Danmark.

Antal Kedler	Effekt i kW (ydelse)		
	0-100	100-300	300-1000
MODEL 1	12.000	0	0
MODEL 2	5.700	300	50
MODEL 3	1.300	150	0
MODEL 4	50	100	0
SUM	≈ 19.000	550	50

Skema 4.1

Disse tal gælder for de 8 fabrikanten. Der er blevet produceret flere kedler i perioden på 10-12 år, men en væsentlig del er med i undersøgelsen. Samtidig skønnes levetiden for disse kedler at være 10-15 år, så der er nogle af de ældste kedler, der er skrottet. Samlet stemmer dette godt overens med antagelsen om, at omkring 17.000 halmfyrede kedler er i drift.

4.2 Ombygningsforslag for eksisterende helballefy

At foreslå ombygning af eksisterende halmfy er "dristigt" forstået på den måde, at det er nødvendigt at systematisere ombygningsforslagene til at omfatte de i afsnit 4.1 omtalte 4 modeller. Derved bliver der uundgåeligt nogle fabrikater eller typer, der ikke kan underkastes en ombygning efter disse retningslinier. Det kan så overlades til ombyggerens fantasi at tilpasse disse ideer til den aktuelle kedel.

Ombygningsforslaget går ud på, at der indbygges et gasforbrændingskammer bestående af ildfaste sten i fyrrummets bagende. Der skæres hul i kedlens bagvæg til nødvendigt antal dyser. Ved model 4 må disse være ekstra lange, idet de går igennem akkumuleringskammeret.

Der skæres et hul i siden af kedlen for indføring af en sekundærdyse "på tværs" i gashalsen. Det foreslås at indsætte en inspektionslåge over dyserne i bagvæg for at lette adgangen til gasforbrændingskammeret. Det tidligere fyrrum opdeles nu i et gasforbrændingskammer og et halmmagasin, som adskilles vha. en 40-50 mm tyk vandkølet magasininvæg. På magasininvægens side mod gasforbrændingskammeret beklædes den med 25 mm ildfaste sten i højde svarende til målet "Højde" i gasforbrændingskammeret (skema

4.2). Mod halmmagasinet beklædes væggen ligeledes med 25 mm ildfaste sten fra top til vandnæse.

Halmmagasinet fores med 25 mm ildfaste sten på hele svøbet undtagen den del, der vil blive dækket med aske.

Stenene monteres som vist på fig. 4.5. Der påsvejses i svøbets længderetning T-jern-stykker med længden 50 mm, således at hvert jern har kontakt med 4 sten. Udskiftning af knækkede sten kan foretages uden brug af værktøj ved at skubbe stenene fra lågen frem til hullet, hvor en sten er knækket, og så indsætte en ny sten ved lågen.

Hvis lågen er vandkølet, fores denne også med 25 mm ildfaste sten.

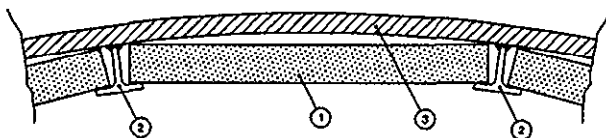


Fig. 4.5

Pos. 1: Chamottesten ISOMAX, AL42
230 x 114 x 25 mm

Pos. 2: T-jern 30 x 30, L = 50 mm,
kvalitet 18/8

Pos. 3: Halmmagasinet's svøb

Når denne ombygning udføres, sker der en delvis isolering af brændkammeret. Der sker dog samtidig det, at den mere fuldstændige forbrænding nu sker ved et lavere luftoverskud, hvorved temperaturen i forbrændingszonen stiger, og der afsættes næsten den samme effekt i halmmagasinet som før isoleringen. Beregningsmæssigt andrager faldet 3-5%. Det betyder, at det ikke forventes nødvendigt at tilføje ekstra hedeblade udover magasin-væggen. Kun ved den simpleste model 1, hvor der ikke er indbygget røgrør, kan det eventuelt blive nødvendigt (se figur 4.6).

De 4 modeller kan ombygges på nedenstående måde. Det bemærkes, at principperne forudsættes at gælde for hele effektområdet op til 1 MW. Pos.nr. gælder for fig. 4.6, 4.7, 4.8 og 4.9.

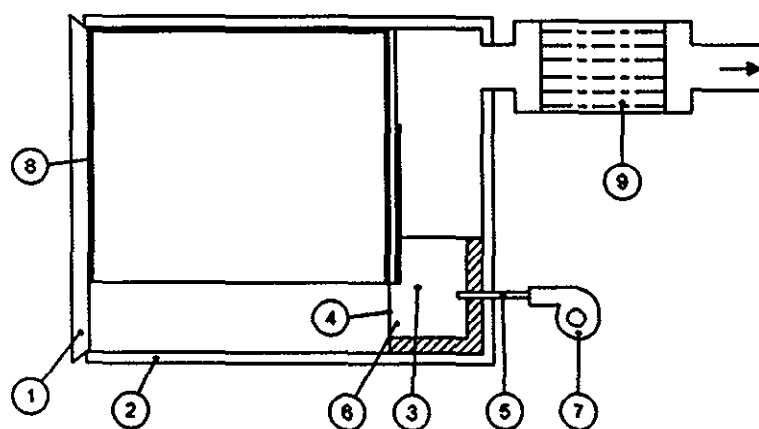


Fig. 4.6

Ombygget model 1

- Pos. 1: Vandkølet låge
- Pos. 2: Vandkølet svøb
- Pos. 3: Gasforbrændingskammer
- Pos. 4: Gashals
- Pos. 5: Luftlanser
- Pos. 6: Sekundærdyse
- Pos. 7: Blæser for pos. 5 og 6
- Pos. 8: 25 mm ildfaste Chamottesten
- Pos. 9: Eventuelt ekstra røgekøler (kun fig. 4.6)
- Pos.10: Akkumuleringstank (kun fig. 4.9)

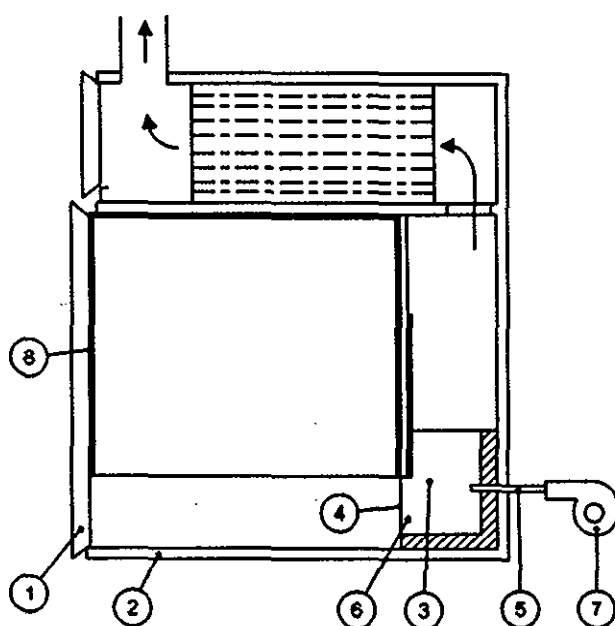


Fig. 4.7

Ombygget model 2

Her er røgvejen vendt i røgrørene for at få røggassen hen i bagenden af kedlen.

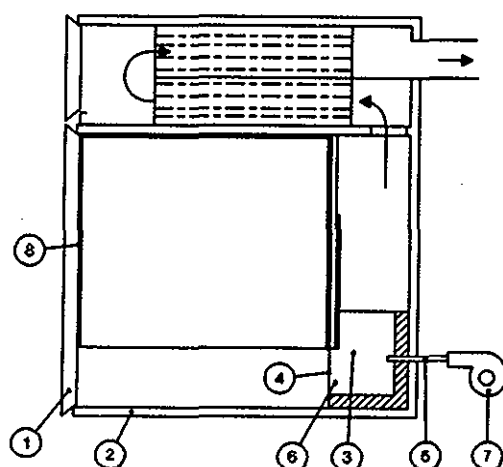


Fig. 4.8
Ombygget model 3

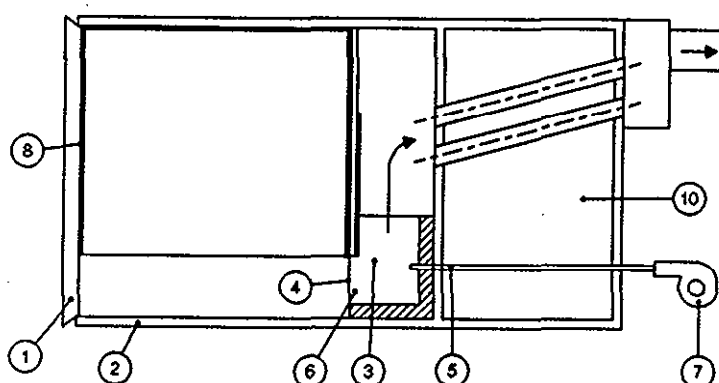


Fig. 4.9
Ombygget model 4

I skema 4.2 er der for alle 4 modeller angivet vejledende dimensioner og priser for ombygning af kedler i de 3 effektområder. Der er valgt kedler med 3 ydelser: 75 kW, 150 kW og 500 kW.

Dimensioneringen er foretaget ud fra en forventet røggastemperatur i gashals og gasforbrændingskammer på 800°C , en ønsket gashastighed på 2-4 m/s samt en opholdstid i gasforbrændingskammeret på 0,3 - 0,5 sek. Samtidig giver kedlens ydre mål nogle rent fysiske begrænsninger.

Blåserens kapacitet er angivet som luftbehov ved luftoverskud 1,5, og trykket er det nødvendige tryk bag dysen. Der skal altså adderes tryktab i kanalføringen fra blæser til dyse.

Ved 75 kW-ydelsen skal de 2 lanser sidde symmetrisk om kedlens centerlinie med en indbyrdes afstand på 200 mm.

Ved 150 kW-ydelsen skal den ene lanse sidde i centerlinien, og afstanden til hver dyse skal være 200 mm.

Ved 500 kW-ydelsen skal lanserne placeres som på fig. 3.2.

Lanserne og sekundærdysens længde skal mindst være 6 x diameteren.

Priserne må nødvendigvis tages med forbehold, da ingen af de adspurgte leverandører har haft mulighed for at tage stilling til en konkret ombygning.

"Murværk inkl. løn" omfatter dels en udmuring af magasinet efter princippet i fig. 4.5 til en pris af 1000-1300 kr./m² for murværk inkl. materialer og arbejds løn. Derudover kommer opbygning af gasforbrændingskammeret.

"Blæser og el-udrustning" omfatter blæser, spjældmotor, føler for røggastemperatur og net-tilslutning.

"Materialer, montage, løn" omfatter lukning af gamle og etablering af nye huller i kedlen, indsætning af magasin væg, dyser, inspektionslåge, montage af blæser, kanaler, styring m.v. udført på kedlens opstillingssted inkl. montørkørsel (max. 1½-2 timer hver vej).

Der er ikke prissat evt. ekstra røgekøler, ligesom der ikke er kalkuleret på en akkumleringstank, som er nødvendig til denne fyrringsform.

Effektområde kW		0-100	100-300	300-1000
Kedelydelse i kW		75	150	500
Længdereduktion af halmmagasin i mm		375	425	575
Gashals i mm	Højde	200	200	400
	Bredde	350	600	1200
Gasforbrændings- kammer i mm	Højde	800	800	1000
	Bredde	350	600	1200
	Dybde	250	300	450
Forbrændingsluft	Antal lanser	2	3	4
	Diameter, lanse, mm	20	25	40
	Sekundær dyse, mm	1x20	1x25	1x35
	Nm ³ /h	175	350	1200
	Tryk før dyse, Pa	3000	3000	4000
Ca-pris for ombygning i kr.	Murværk inkl. løn	7000	13000	25000
	Blæser + el- udrustning	11000	13000	15000
	Materialer, montage, løn	26000	29000	32000
	SUM	44000	55000	72000

Alle priser er excl. moms.

Skema 4.2

De foreslåede dimensioner på gashals og gasforbrændingskammer og de foreslåede blæserkapaciteter kan umiddelbart benyttes ved konstruktion af nye kedler.

Beregningen, trin for trin for afsnit 2.4

- Tabel 1: Driftskonditioner. Input i alle celler.
- Tabel 2: Brændselsanalyse, tør basis.
- Tabel 3: Brændselsanalyse, aktuel basis.
- Tabel 4: Beregning af luft- og røggasmængder. Traditionel beregning, jf. Forbrænding - teori og praksis, side 64 ff.
- Tabel 5: Røggasanalyse. Traditionel beregning, jf. Forbrænding - teori og praksis, side 64.
- Tabel 6: Entalpi af røggasser ved adiabatisk temperatur. Beregningen efter SAND 87 (Sandia National Lab.).
- Tabel 7: Energiberegninger ved adiabatisk temperatur.
- Tabel 8: Forudsætninger for beregning af udløbstemperaturen, t_u . t_u og T_g gættes.
- Tabel 9: Beregning af emissionstal for vanddamp ved temperaturen t_g . Beregningen følger VDI 1982, Kc5.
- Tabel 10: Beregning af emissionstal for kuldioxyd. Beregningen følger Schack, K. "Berechnung der Strahlung von Wasserdampf und Kuldioxid", Chemie-ing.-Techn., 42. Jahrg. 1970/Nr 2. side 53 ff.
- Tabel 11: Den resulterende gasemission beregnes igen efter VDI.
- Tabel 12: Strålingsvarmeovergang beregnes efter Forbrænding - teori og praksis, kap. 11.
- Tabel 13: Konvektiv varmeovergang beregnes efter Forbrænding - teori og praksis.
- Tabel 14: Varmebalancen kontrolleres, dvs. t_u beregnes og sammenlignes med den gættede værdi i tabel 8.

 Fyrboksberregning

***** HALMFYRING - ARNE SÆBYE *****

 Søren Gundtoft, Energiteknologi, DTI
 1990.05.03

Vandindhold i rå br.	w-rå	%	15
Adiabatisk temp.	t-Ad	°C	1340
Rumtemperatur	t-rum	°C	20
Vandindhold i fbr.luft	x	kg/kg	0,003
Kuldioxyd (tør røggas)	CO2-målt	%	12
Kulilte (tør røggas)	CO-målt	%	0
Brændselsforbrug	m-br	kg/h	482
Ristgennemfald	m-rist	kg/h	0
Bortglødeligt i slagge	BG-s	%	0

Tabel 1 - Driftsdata

Brændværdi, nominel	H-n, nom	MJ/kg	18
Vandindhold, nominel	w-nom	%	0
Kulstof (tør)	c-t	-	0,493
Svovl (tør)	s-t	-	0,001
Brint (tør)	h-t	-	0,058
Kvælstof (tør)	n-t	-	0,005
Ilt (tør)	o-t	-	0,395
Aske (tør)	a-t	-	0,05
Sum (tør)	sum-t	-	1,002

Tabel 2 - Brændselsdata

Brændværdi, nedre	H-n	MJ/kg	14,93
		kWh/kg	4,15
Brændværdi, øvre	H-ø	MJ/kg	16,38
Brændværdiforhold	H-a/H-ø	-	1,097
Kulstof	c-rå	-	0,419
Svovl	s-rå	-	0,001
Brint	h-rå	-	0,049
Kvælstof	n-rå	-	0,004
Ilt	o-rå	-	0,336
Aske	a-rå	-	0,043
Vand	w-rå	-	0,150
sum	sum-rå	-	1,002
Kulstof, uforbrændt	c-f	-	0,000
Kulstof, forbrændt	c-red	-	0,419

Tabel 3 - Beregning af aktuelle brændselsdata

Min. ilt	L-O ₂ , min	m ³ /kg	0,821
Min. luft	L-min	m ³ /kg	3,919
Min. tør røg	V-tør, min	m ³ /kg	3,879
Max. CO ₂	CO ₂ -max	%	20,0
Røggasmgd-tør	V-tør	m ³ /kg	6,472
Røggasmgd-våd	V-våd	m ³ /kg	0,766
Røggasmgd-tot	V-tot	m ³ /kg	7,238
Massefylde, røg	Rho-0	kg/m ³	1,295
- ved t-røg	Rho-t	kg/m ³	0,219
Røggasflow, t-røg	V-røg	m ³ /h	20611,45
Røggasmassestrøm	m-røg	kg/h	4516,94
		kg/s	1,255
Luftoverskud	lambda	-	1,66
Luftforbrug, t-rum	L-rum	m ³ /h	3368,49
Iltindhold (tør)	O ₂ -tør	%	8,4

Tabel 4 - Beregning af luft- og røgmængder

Gasart:	m ³ /kg	%-våd	%-tør
V(CO ₂)	0,777	10,7	12,0
V(SO ₂)	0,001	0,0	0,0
V(H ₂ O)	0,766	10,6	0,0
V(N ₂)	5,151	71,2	79,6
V(O ₂)	0,543	7,5	8,4
V-sum	7,238	100,0	100,0

Tabel 5 - Røggassammensætning

Røg-/rumtemperatur	K	1613,2	293,2
H(CO ₂)	kJ/m ³	450,3	87,6
H(SO ₂)	kJ/m ³	0,3	0,1
H(H ₂ O)	kJ/m ³	2781,7	408,1
H(N ₂)	kJ/m ³	1794,6	296,8
H(O ₂)	kJ/m ³	201,9	35,7

Tabel 6 - Entalpi af røggasser

Middelvarmefylde	c-p, tør	kJ/(m ³ *K)	1,536
-	c-p, våd	kJ/(m ³ *K)	1,798
Røgtab, fri varme	q-sens	%	100,0
Røgtab, bunden	q-lat	%	0,0
Slaggetab	q-slag	%	0,0
Tab, sum	q-sum	%	100,0
Virkningsgrad	Eta	%	0,0
Indfyret effekt	Q-indf(n)	kW	1999,46
Varmeydelse	Q-varme	kW	-0,25

Tabel 7 - Energiberegninger

Længde	L_box	m	0,10
Diameter	D_box	m	2,30
Brønderdiameter	d_br	m	0,2
Ikke vandkølet del	e	%	0
Indv. overflade	A_br	m ²	9,03
Vandk., indv. overfl.	A_vk	m ²	9,03
Strålingslængde	s	m	0,16
	p_CO2	bar	0,109
	p_H2O	bar	0,107
Recirkulation	r	%	20
Vægttemperatur	t_w	°C	70
Adiabatisk temperatur	t_ad	°C	1340
Udløbstemperatur	t_u	°C	1194
Hottel	t_g	°C	1260
	T_g	K	1533

Tabel 8 - Strålingsberegning

Tryk*vej	ps	bar*m	0,017
Konstanter	A	-	3,265
	B	-	0,356
	C	-	-0,059
	D	-	0,001
	X	-	-4,060
	f	-	1,072
Emmission, Vanddamp	eps_H2O	-	0,0231

Tabel 9 - Vanddampemission

Dim.løs temp.	gam	-	-0,26
Tryk*længde	ps	-	0,018
Konstanter	a(0)	-	0,0581
	a(1)	-	0,0359
	a(2)	-	-0,0266
	a(3)	-	-0,0271
Emissivitet	eps_CO2	-	0,047

Tabel 10 - Kuldioxydemission

Sum ps	pss	bar*m	0,035
	z	-	0,504
	f_k	-	0,979
	eps_gas	-	0,069

Tabel 11 - Gasemission (sum)

	eps_gas (*)	-	0,069
	t_i	°C	1334
	M	kg/s	1,506
	fi	-	16,2
Røg-/rumtemperatur	K	1606,7	1467,0
H(CO2)	kJ/m3	448,2	404,8
H(SO2)	kJ/m3	0,3	0,3
H(H2O)	kJ/m3	2768,0	2478,2
H(N2)	kJ/m3	1786,6	1615,8
H(O2)	kJ/m3	201,0	182,0
Varmefylde	cpm_tr	kJ/(m3*K)	1,671
	cpm_H2O	kJ/(m3*K)	2,075
	cpm	kJ/(m3*K)	1,713
	cpm	J/(kg*K)	1323
	kappa	-	0,073

Tabel 12 - Andre strålingskonstanter

Reynolds tal	Re	-	13061
- konstanter	f1	-	7,57
	f2	-	1,02
	f3	-	0,48
	f4	-	0,95
Faktor	f	-	3,53
Varmeovergangstal	h_u	W/(m2*K)	2,20
	h	W/(m2*K)	7,8

Tabel 13 - Konvektiv varmeovergang

Regnestørrelse	beta	-	0,776
	gamma	-	0,373
Virkningsgrad	eta	-	0,087
	eta/kappa	-	1,189
	T_g_gæt	K	1533
	eta/kappa'	-	1,185
	fejl	%	0
Udgangstemperatur	T_u	K	1467
	t_u	°C	1194
Fejl	d_t_u	K	0

Tabel 14 - Balance

STØVEMISSION

Prøve nr.	:	1	2	3	4
Dato	:	90.11.21	90.11.21	90.11.21	90.11.21
Tid	:	13.52	14.38	15.22	15.38
Anlæg	:	Halmfyr	Halmfyr	Halmfyr	Halmfyr
Produktion	:				
Kanaldiameter	m:	0.3	0.3	0.3	0.3
Kanaltværsnit	m ² :	0.07	0.07	0.07	0.07
Barometerstand	mbar:	995.5	995.5	995.5	995.5
Statisk tryk i kanal	mmVS:	-6	-6	-6	-6
Dynamisk tryk i kanal	mmVS:	0.34	0.34	0.34	0.34
Gastemperatur	grd.C:	310	220	270	360
Oxygenindhold i gas	%:	7.3	4	6	9
Vandindhold i gas	m ³ n/m ³ n,t:	0.119	0.119	0.119	0.119
Densitet, gas	kg/m ³ n,v:	1.2	1.2	1.2	1.2
Densitet, gas	kg/m ³ n,t:	1.35	1.35	1.35	1.35
Densitet, gas, kanal	kg/m ³ ,v:	0.562	0.664	0.603	0.517
Gashastighed	m/s:	7.1	2.1	7.4	19.0
Gas, kanal	m ³ /h:	1799	540	1893	4841
Gas	m ³ n,v/h:	842	299	951	2087
Gas	m ³ n,t/h:	742	263	838	1838
Afvejet støvmængde	mg:	125.2	261.1	314.1	95.4
Gasprøve	m,t:	1.348	1.419	1.419	0.736
Korrektion, gasmåler	%:	0.15	0.35	0.2	0.8
Røggasprøve, korr.	m ³ ,t:	1.350	1.424	1.221	0.742
Gastemp. i måler	grd.C:	11	11	11	11
Korr., temperatur	grd.C:	0	0	0	0
Gastemp.,udstyr,korr.	grd.C:	11	11	11	11
Sta. tryk i måler	bar:	-0.32	-0.4	-0.45	0.4
Korrektion, sta. tryk, udstyr	bar:	0	0	0	0
Sta. tryk,udstyr,korr.	bar:	-0.32	-0.4	-0.45	-0.4
Støvkonzentration	mg/m ³ n,t:	142	319	488	244
Støvkonzentration ved 10% O ₂ i røggas	mg/m ³ n,t:	114	206	358	280
Støvemission	g/s:	0.03	0.02	0.11	0.11
Støvemission	kg/h:	0.105	0.084	0.409	0.411

t = tør gas

v = våd gas

HALM - RØGGASMÆNGDER - DENSITET

Prøve nr.	:	1	2	3	4
Dato	:				
Tidspunkt	:				
Brændsel, (br.)	:	halm	halm	halm	halm
Kulstof	kg/kg vådt brændsel:	0.402	0.402	0.402	0.402
Svovl	kg/kg vådt brændsel:	0.000	0.000	0.000	0.000
Hydrogen	kg/kg vådt brændsel:	0.051	0.051	0.051	0.051
Nitrogen	kg/kg vådt brændsel:	0.000	0.000	0.000	0.000
Oxygen	kg/kg vådt brændsel:	0.335	0.335	0.335	0.335
Vand	kg/kg vådt brændsel:	0.172	0.172	0.172	0.172
Aske	kg/kg vådt brændsel:	0.040	0.040	0.040	0.040
Ilt i røggas, målt	m3n/m3n,t:	0.073	0.040	0.060	0.090
Kuldioxyd i røggas	m3n/m3n,t:	0.130	0.162	0.143	0.114

BEREGNINGRESULTATER

Oxygen, min.	m3n/kg br.:	0.799	0.799	0.799	0.799
Kuldioxyd	m3n/kg br.:	0.745	0.745	0.745	0.745
Svovldioxyd	m3n/kg br.:	0.000	0.000	0.000	0.000
Vanddamp	m3n/kg br.:	0.783	0.783	0.783	0.783
Nitrogen	m3n/kg br.:	0.000	0.000	0.000	0.000
Luft, min.	m3n/kg br.:	3.816	3.816	3.816	3.816
Tør røggas, min	m3n,t/kg br.:	3.725	3.725	3.725	3.725
CO2%, max	%:	20.00	20.00	20.00	20.00
SO2, max	ppm:	0	0	0	0
Tør røggas	m3n,t/kg br.:	5.71	4.60	5.22	6.52
Luftoverskudskoefficient	:	1.52	1.23	1.39	1.73
Vanddamp	m3n/kg br.:	0.841	0.830	0.836	0.849
Våd røggas	m3n,v/kg br.:	6.551	5.432	6.052	7.369
Oxygen, målt	%:	7.28	3.99	5.98	8.97
Vanddamp	kg/m3n,t:	0.118	0.145	0.129	0.105
Vanddamp	% af våd røggas:	12.84	15.28	13.81	11.52
Densitet, røggas	kg/m3n,t:	1.36	1.38	1.37	1.35
Densitet, røggas	kg/m3n,v:	1.29	1.29	1.29	1.29
Vanddamp	m3n/m3n,t	0.147	0.180	0.160	0.130

VANDINDHOLD I RØGGAS

Prøve nr.		1
Dato		90.11.21
Tid		13,09
Kanaltværsnit	m2	0,071
Barometerstand,	mbar:	995,5
Statisk tryk i kanal,	mmVS:	-6
Dynamisk tryk i kanal,	mmVS:	0,34
Røggastemperatur,	grd. C:	310
Oxygenindhold i røggas,	%:	7,8
Kuldioxydindhold i røggas,	%:	12,6
Vandmængde, afvejet	g:	80,1
Røggasprøve	m3,t:	0,803
Korrektion, gasmåler	%:	0,4
Røggasprøve, korrigeret	m3,t:	0,806
Gastemperatur i måleudstyr,	grd. C:	10
Korrektion, temperatur	grd. C:	0
Gastemp., udstyr, korrigeret	grd. C:	10
Statisk tryk i måleudstyr,	mbar:	-210
Korrektion, statisk tryk	mbar:	0
Statisk tryk, udstyr, korr.	mbar:	-210
Røggasprøve,	m3n,t:	0,614
Vandindhold,	kg/m3n,t:	0,131
Vandindhold,	m3n/m3n,t:	0,162
Vandindhold,	m3n/m3n,v:	0,139
Vandindhold,	% af våd røggas:	13,9
Densitet, røggas	kg/m3n,t:	1,348
Densitet, røggas	kg/m3n,v:	1,165
Densitet, røggas, kanal	kg/m3,v:	0,545
Gashastighed	m/s:	3,5
Emitteret røggas, kanal	m3/h:	891
Emitteret røggas	m3n,v/h:	417
Emitteret røggas	m3n,t/h:	349
Vand, emitteret	g/s:	13
Vand, emitteret	kg/h:	46

REGISTRERINGSBLAD

Udgiver: Miljøstyrelsen, Strandgade 29, 1401 København K

Serietitel, nr.: Miljøprojekt, 173

Udgivelsesår: 1991

Titel:

Fyring med halm - en metode til renere forbrænding

Undertitel:

Gårdanlæg for hele halmballer

Forfatter(e):

Sæbye, Arne; Nikolaisen, Lars; Gundtoft, Søren

Udførende institution(er):

Miljøstyrelsen. Rådet vedr. genanvendelse og mindre forurenende teknologi (spons); Dansk Teknologisk Institut. Energiteknologi

Resumé:

Det har vist sig muligt at ombygge gårdanlæg for fyring med hele halmballer, således at røgens sædvanlige indhold af kulilte, ildelugtende gasser og sod praktisk talt er forsvundet. I rapporten gives anvisning på, hvordan ombygningerne kan udføres, og hvad det koster.

Emneord:

halm; forbrænding; halmfyr; emissioner; fyringsteknik; renere teknologier

ISBN: 87-503-1141-0

ISSN: 0105-3094

Pris (inkl. moms): 60 kr.

Format: A4

Sideantal: 64

Md./år for redaktionens afslutning: december 1990

Oplag: 500

Andre oplysninger:

Tryk: Scantryk, København