

Ökad elproduktion från halm genom sameldning med trädbränslen

Henry Hedman, Daniel Nordgren, Dan Boström, Marcus Öhman, Nader Padban

**Ökad elproduktion med halm genom sameldning
med trädbränslen**

**Increased electricity production from straw by
co-firing with woody biomass**

Henry Hedman, Daniel Nordgren, Dan Boström, Marcus Öhman
Nader Padban

A08- 809

VÄRMEFORSK Service AB
101 53 STOCKHOLM · Tel 08-677 25 80
Januari 2011
ISSN 1653-1248

Abstract

I projektet har följande pulverförbränningsförsök genomförts med (i) halm 100 %, (ii) halm/bark 50/50 %, (iii) halm/bark 75/25 % (iv) halm/trä 75/25 % (v) halm/trä 50/50 % (viktsbasis). Resultaten från detta projekt visar tydligt hur slagg- och beläggningstendensen minskar vid inblandning av trädbränslen i halm. Generellt kan sägas att en koncentrationsökning av Ca och en koncentrationsminskning av K och Si kan ses i bottenaska, beläggningar på simulerade pannrör och flygaska. Förutom en ren utspädningseffekt så visar resultaten även att halmaskans Si-K-baserade asksmälta övergår till att innehålla mer Si-Ca-baserade faser. Detta märks tydligast i bottenaskan vid inblandning av bark. Danska erfarenheter visar att de askrelaterade driftsproblemen som uppstår vid halmanvändning kan reduceras vid installation av extra vattensotblåsare i eldstadsväggarna samt vid eventuella screen-rör. Ytterligare anläggningsmodifieringar som bör övervägas är modifiering av bottenaskutmatning samt att elektrofilter som kan behöva utrustas med kulsotning och slagor/vibratorer.

Sammanfattning

Projektets målsättning är att visa hur inblandning av rena träbränslen påverkar alkalirelaterade problem vid pulverförbränning av halm. I storskaliga anläggningar där halm eldats i pulverform har påtagliga alkalirelaterade problem varit ett problem som påverkar tillgängligheten. Projektet har försökt svara på frågan om askrelaterade problem minskar och om en minskning beror på kemiska reaktioner eller utspädningseffekten som uppnås med lägre askhalt och ändrad asksammansättning.

I projektet har följande förbränningsförsök genomförts med (i) halm 100 %, (ii) halm/bark 50/50 %, (iii) halm/bark 75/25 % (iv) halm/trä 75/25 % (v) halm/trä 50/50 % (viktsbasis). Inblandning av träbränslen har vid samtliga försök haft någon positiv effekt. Generellt kan sägas att Ca ökar och K och Si minskar vid inblandning av träbränslen. Detta kan ses i analyser på bottenaskor, beläggningar, flygaskor och detta får anses vara positivt m.a.p. askrelaterade driftproblem med halm som referens.

Från de olika askfraktioner som analyserats påvisar bottenaskan den största skillnaden vilket bekräftas via de kemiska analyserna på aska/slagg samt även den okulära besiktningen av eldstaden som visar att askan är väsentligt mer porös och mjuk vid inblandning av trä/bark. Förutom en ren utspädningseffekt finns även en effekt när halmaskans Si-K-baserade asksmälta övergår till att innehålla mer Si-Ca-baserade faser.

Beläggningstillväxten på de kylda sondaerna reduceras vid inblandning av trä och bark och effekten blir störst i de fall där 50 % träbränsle blandats in med en halvering av beläggningen som följd. En tydlig ökning Ca samt en minskning av K i beläggningarna kan ses i alla försök.

Baserat på de danska erfarenheterna så bör de anläggningsägare som funderar på att introducera halm i sin panna även överväga att installera extra vattensotblåsare i eldstadsväggarna samt vid ev. screen-tuber. Ytterligare modifieringar av bottenaskutmatningen bör tas i åtanke samt att även elektrofiltret kan komma att behöva extra kulsotning och/eller slagor/vibratorer.

Baserat på resultaten från både bottenaskans karaktär och beläggningsbildningshastighet så är rekommendationen för svenska anläggningar, som är designade för träbränslen, att en lägre inblandning av halm än den som gjorts i detta projekt görs inledningsvis. Det askrelaterade driftsproblem som får anses ge upphov till den största begränsningen är beläggningsbildningen, och det är denna som i praktiken reducerar halminblandningsgraden till mellan 15-25 vikt-%.

Nyckelord: askrelaterade driftsproblem, beläggningsbildning, alkali, sameldning, pulverförbränning

Executive Summary

The use of straw in pulverised fuel-fired boiler is great technical challenge, especially when it comes to dealing with problems from slagging and fouling. Introduction of straw in the fuel mix of Swedish boilers will most likely be done by co-firing of woody biomass with straw, and this can provide a means to reduce the (well-documented) problems with fouling and slagging from straw. The project will focus on the faith of alkali metals (K and Na) as well as studies on the slagging and fouling propensity in pulverised fuel-fired boilers when straw is co-fired with woody biomass.

A total of 5 different fuel mixtures has been fired in a 150 kW pilot-scale pulverised fuel-fired burner: (i) straw 100 %, (ii) straw/bark 50/50 %, (iii) straw/bark 75/25 % (iv) straw/wood 75/25 % (v) straw/wood 50/50 % (wt-%). The adding of woody biomass to straw has in all of the above-mentioned cases had some positive effect. In general, in all of the ash deposits, an increase in the concentration of Calcium (Ca) has been observed as well as a decrease in the concentrations of Potassium (K) and Silicon (Si). These general trends should be considered as a positive when combustion of straw is considered.

Out of all ash deposits collected in the furnace, the characteristics of the bottom ash displayed the largest (positive) change and visual inspections and chemical analysis of the bottom ash showed that the ash had become more porous and contained more Calcium as more woody biomass was introduced in the fuel mix.

The deposit build-up rate on the air cooled probes was reduced when more woody biomass was co-fired with straw. The reduction was highest in the trial where 50% woody biomass was used and the most apparent changes in composition could be seen in Calcium (increase) and Potassium (decrease).

Danish experiences from introducing straw in pulverised fuel-fired boiler indicate that extra soot-blowers should be considered at the furnace walls and in connection to screen-tubes (if any). In addition, the bottom ash hopper and ash conveying from the electrostatic precipitator may need to be modified to cope with when a high slagging propensity fuel such as is co-firing.

For Swedish power plants owners interested in introducing straw in the fuel mix, it is recommended to start with lower straw co-firing than those presented in this project. Based on the characteristics of the bottom ash and deposits on air-cooled probes (550 °C) a co-firing ration of 15-25 wt-% straw is initially recommended.

Keywords: co-combustion, pulverised fuel combustion, straw, deposit formation, slagging, fouling, alkali

Innehållsförteckning

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INLEDNING | 1 |
| 1.1 | BAKGRUND | 1 |
| 1.2 | BESKRIVNING AV FORSKNINGSSOMRÅDET | 1 |
| 1.3 | FORSKNINGSUPPGIFTEN OCH DESS ROLL INOM FORSKNINGSSOMRÅDET | 3 |
| 1.4 | MÅL OCH MÅLGRUPP | 3 |
| 2 | METOD OCH UTFÖRANDE | 4 |
| 2.1 | BRÄNSLEN OCH BRÄNSLEBLANDNINGAR | 4 |
| 2.2 | FÖRBRÄNNINGSFÖRSÖK I 100 kW PULVERRIGG | 7 |
| 2.2.1 | <i>Generella driftsvillkor</i> | 7 |
| 2.2.1 | <i>Pulverbrännaren</i> | 9 |
| 2.2.2 | <i>Förbränningskammaren</i> | 11 |
| 2.3 | GAS- OCH PARTIKELPROVTAGNING | 11 |
| 2.4 | PROVTAGNING AV SLAGG, BOTTENASKA, FLYGASKA OCH BELÄGGNINGAR | 12 |
| 2.5 | KARAKTÄRISERING AV PRODUCERADE ASK-, SLAGG, PARTIKEL- OCH BELÄGGNINGSPROVER | 13 |
| 3 | RESULTATREDOVISNING | 14 |
| 3.1 | GENERELLA KOMMENTARER KRING DRIFTFÖRHÅLLANDENA UNDER FÖRSÖKEN | 14 |
| 3.2 | SLAGGBILDNING | 14 |
| 3.3 | BELÄGGNINGAR OCH BELÄGGNINGSTILLVÄXT | 19 |
| 3.4 | FLYGASKA | 23 |
| 3.5 | PARTIKELBILDNING | 25 |
| 3.5.1 | <i>Totalstofsmätningar</i> | 25 |
| 3.5.2 | <i>Impaktormätningar</i> | 25 |
| 4 | LITTERATURSTUDIE AV DANSKA ERFARENHETER FRÅN SAMELDNING MED HALM | 30 |
| 4.1 | INLEDNING | 30 |
| 4.2 | ANLÄGGNINGSMODIFIERINGAR OCH ERFARENHETER FRÅN AMV 2 | 30 |
| 5 | RESULTATANALYS | 34 |
| 5.1 | DRIFTFÖRHÅLLANDEN OCH PROVTAGNINGSMETODIK | 34 |
| 5.2 | BRÄNSLEVAL OCH BRÄNSLEPREPARERING | 34 |
| 5.3 | SLAGG PÅ BRÄNNARKONA OCH BOTTENASKA | 35 |
| 5.4 | BELÄGGNINGAR OCH FLYGASKA | 36 |
| 5.5 | PARTIKELBILDNING | 37 |
| 5.6 | JÄMFÖRELSE MOT ÅMAGERVERKET | 37 |
| 6 | SLUTSATSER | 38 |
| 7 | REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING | 39 |
| 8 | FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGSPROJEKT | 40 |
| 9 | LITTERATURREFERENSER | 41 |

Bilagor

A SEM/EDS- ANALYSER

B XRD- ANALYSER

C DANISH EXPERIENCES FROM CO-FIRING OF STRAW AND WOODS

B BRÄNSLEANALYSER OCH VALVBILDNINGSTEST

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Enligt Värmeforsks bränslehandbok är potentialen för halm i Sverige mellan 7 – 10 TWh per år, vilket får anses vara tillräckligt för att täcka de behov som några av de större svenska pulvereldade anläggningar kan tänkas ha. Jordbrukets totala bidrag till biobräslemarkanden i Sverige är ca 1,5 TWh/år (ca 1 % av totala biobräsleanvändningen), och den halm som används i dag motsvarar endast en mindre del av den tillgängliga halmen^[1]. Både tillgången på, samt erfarenheterna av att elda olika typer av träbränslen är stor i Sverige, och kombinationen av halm och trä får därför anses vara ett intressant alternativ för framtida el- och värmeproduktion. Eftersom halm är en restprodukt från spannmålsodling så har den fördelar gentemot andra åkergrödor, framför allt då den inte konkurrerar om åkermarksareal på samma sätt. För att på sikt lyckas med att introducera halm som huvudbränsle i svenska kraftvärmeverk så måste osäkerheten kring askrelaterade driftproblemen undersökas utifrån svenska förutsättningar. En ökad förståelse för potentialen i sameldning av halm och trä medför att anläggningarna får incitament till att anpassa sig till detta nya åkerbränsle, vilket på sikt leder till besparingsmöjligheter på bränsleinköp.

I dag finns det ett antal kraftvärmeverk i Danmark som eldar halm, bl a Vattenfalls anläggning på Amagerverket i Köpenhamn (sameldning med kol och trä) samt i DONG Energy's anläggning i Studstrup (sameldning med kol). Vattenfall har ytterligare en biobräsleanpassad pulvereldad panna som tas i drift under 2009 på Amagerverket. Anläggningen kommer att vara anpassad för ren bioeldning av halm- och/eller träpellets samt även för stenkol^[2]. Halmanvändningen för el- och värmeproduktion i Danmark bedöms överstiga 1000 000 ton/år under 2008/2009. Trots att det finns en bred erfarenhet kring halmeldning från Danmark så finns fortfarande ett tydligt behov av fortsatta utvecklingsinsatser inom flera områden, bl.a. beläggings- och slaggbildning orsakade av alkali, kisel, klor och studier av olika svaveladditiv för reduktion av korrosion samt även utveckling av nya typer av SCR-katalysatorer^[3]. Den befintliga anläggningen på Amagerverket är en gammal oljepanna som blivit konverterad till pulvereldning, först till kol och sedan till halm. En liknande utveckling har skett på flera svenska oljepannor, då oftast ombyggnad först till kol och därefter trä- eller torvpulver. Vid ren halmeldning uppstår stundtals mycket svåra askrelaterade driftsproblem i form av hårda beläggningar på kritiska delar i eldstaden. Konsekvenserna blir att frekvensen av rengöringsinsatser är relativt hög och därmed också oönskade produktionsbortfall, vilket snabbt minskar ekonomin vid halmeldning^[4]. När sameldning av halm- och träpellets i samma panna genomförts har det visat sig att beläggings-/slaggingsproblemen minskar dramatiskt, och drifttiden mellan eldstadsrengöringarna ökar upp till fyra gånger.

1.2 Beskrivning av forskningsområdet

Rostpannor, pulvereldade pannor och fluidiserade bäddpannor har olika förutsättningar att elda energigrödor där av bl a halm^[5]. I ett europeiskt perspektiv så används framförallt pulvereldade kolanläggningar för kraft-/kraftvärmeproduktion varvid en introduktion av åkerbränslen till dessa anläggningar (t ex halm) skulle kunna ge ett

signifikant bidrag till EU:s omställning mot kraftigt ökat användande av förnybara bränslen. Halmens bränsleegenskaper är välkända och dokumenterade, bl a i Värmeforsks bränslehandbok^[6]. Tidigare danska studier har visat att halm från stråsådesslagen vete, korn och råg har relativt lika elementsammansättning så när som på vetealm som hade något högre kiselhalt^[7]. Rapsstrået har något lägre kiselhalt och högre kalciumhalt än ovanstående halmsorter. Halm har höga klor-, kalium- och kiselhalter varvid svåra driftstörningar/-kostnader p.g.a. slaggning, beläggingsbildning och korrosion ofta är att förvänta vid hög andel halm. Fokus på de danska FoU-projekt på halm har mestadels varit på korrosion och materialtekniska frågor, vilka finns sammanfattade i tidigare värmeforsksprojekt^[8]. Ur en anläggningsägares synvinkel är lösningar på dessa bränslespecifika problem högt prioriterade för att halm på ekonomiska grunder skall kunna introduceras i bränslemixen.

Mest erfarenhet rörande samtidig el- och värmeproduktion från energigrödor är samlad runt halmförbränning kanske främst för att den danska regeringen relativt tidigt ställde krav på att halm skulle introduceras till bränslemixen vid elproduktion^[9]. När halm eldas i kraftvärmeanläggningar uppstår dock ofta stora problem med slagg/påslag och korrosion, det senare speciellt vid ångtemperaturer över 450°C. En del danska anläggningar har därför specialanpassat sig för halm, bl a begränsat sina överhettartemperaturer till max 450°C genom att placera överhettarsektionen längre bak i pannsystemet^[10]. Detta ger dock påtagligt lägre elutbyte. Vissa anläggningar har valt att satsa på motståndskraftigare material. Detta visar att det genom ombyggnation och modifieringar av anläggningar går att reducera driftrelaterade askproblem vid halmeldning, men intresset för de svenska kraftverken borde primärt vara att kunna introducera halm utan större och kostsamma modifieringar. Vidare är de flesta av de danska erfarenheterna av halm baserat på rosteldning, vars förutsättningar kan skilja sig markant jämfört med bl a pulvereldning och förbränning i fluidiserande bäddar. Svenska pulvereldade anläggningar finns bl a i Stockholm (Jordbro, Fittjaverket, Norrenergi), Uppsala, Västerås, Enköping och Helsingborg. Halmens låga asksmältpunkt medför dock att temperaturen i rostpannor inte bör överstiga 800-900°C för att undvika svåra slaggingsproblem. Detta går att uppnå vid låg rosterbelastning^[11].

För att minska avlagrings- och beläggingsproblematiken i några av de danska rosteranläggningar har man designat överhettarsektionen parallellt med rökgasflödet. Båda ovanstående åtgärder ger något minskat elutbyte för anläggningarna. Vid förbränning av balad halm på rost är det dessutom svårt att få en jämn förbränning av bränslet vilket leder till variationer i ångproduktion, -temperatur, emissioner vilket också försvårar möjligheterna till hög elproduktion. (Rostpannor tål vanligen högre fukthalt än fluidbäddar). Halmeldning i fluidbäddar skapar väldigt svåra problem med bäddagglomerering och defluidisering och bäddmaterialdeponering även vid relativt låga inblandningsgrader^[12-13]. Ett flertal arbeten har visat på möjligheterna att minimera uppkomsten av askrelaterade driftsproblem i form av bl a beläggingsbildning och korrosion genom att använda sig av olika bränslemixer samt svavelbärande additiv. Tidigare utförda studier har även föreslagit molförhållanden för S/Cl i bränslet på minst en faktor 4 för att uppnå försumbara klorhalter i beläggningarna och därmed eliminera risken för korrosion^[14]. Även olika lerminerall, ^[15-18] bl a kaolin har visat sig kunna användas för att fånga in (sorption) kalium och/eller höja smältpunkten hos den bildade askan vid biobränsleförbränning och därmed minska såväl beläggings- som korrosionsproblematiken. Kaolin och liknande lermineraller såväl som svavel återfinns i

bl.a. kol^[19] varvid sameldning av kol och halm har visat sig kunna reducera uppkomsten av askrelaterade driftsproblem såsom bäddagglomerering,^[20-21] beläggning/bildning/korrosion.^[22-24]

1.3 Forskningsuppgiften och dess roll inom forskningsområdet

Flertalet kontrollerade undersökningar rörande effekter av sameldning kol/halm halm/övrig biomassa med relevans mot pulvereldning har utförts i mer renodlade labuppställningar, t.ex. TGA/DTA analyser, genomströmningsreaktorer, ”drop tube furnaces” etc, för dedikerad mekanistisk förståelse över de kemiska förlopp som ligger bakom t ex kaliumabsorption till olika lermineral och/eller sulfatisering av KCl. Labskaleförsök med sameldning mellan torv och halm har indikerat att man kan elda upp till 70 vikts-% halm tillsammans med torv utan att riskera ökade beläggningssproblem i överhettarregionen^[25]. Dessa försök ger grundläggande förståelse till varför sameldning av halm med kol samt halm och torv har tydliga effekter men utifrån dessa försök är det svårt att kunna bestämma vilka inblandningsgrader av halm i olika typer av träbränslen som är praktiskt möjliga med utgångspunkt mot uppkomsten av askrelaterade driftsproblem vid pulvereldning. Fördjupande studier på uppkomsten av askrelaterade driftsproblem vid varierande inblandningsgrader av olika träbränsle i halm saknas dock för pulvereldning i anläggningar anpassade för träbaserade bränslen, detta är här detta projekt tar vid.

1.4 Mål och målgrupp

Projektets målsättning är att beskriva hur alkalirelaterade driftsproblem påverkas när trä och bark tillförs vid halmpulverförbränning, samt att beskriva de bakomliggande mekanismerna varför olika halm/trä/bark- blandningar påverkar askans avsättning i förbränningssystemet. Målsättningen är att hitta inblandningsgrader som i slutändan minskar problem med beläggningar och korrosion vid halmeldning i pulverform och därmed ge förutsättning till högre ångdata och förbättrad elverkningsgrad. En litteraturstudie av Danska erfarenheter från halmpulverförbränning sammanställs och tillsammans med förbränningsförsöken kan förhoppningsvis inblandningsgrader och driftsstrategier motiveras.

Projektet riktar sig dels till anläggningsägare och dels till halmproducenter där:

- Anläggningsägare och elproducenter får kunskap om effekterna av sameldning mellan halm/trä/bark- bränslen och hur detta påverkar förbränningsprocessen.
- Halmproducenter får bättre och stabilare avsättning för sina restprodukter.

2 Metod och utförande

Energitekniskt Centrum har byggt upp en anläggning för att kunna utföra förbrännings- och förgasningsförsök på bibränslen. Både gas, pulver och vätskeformiga bränslen kan förbrännas i anläggningen som är flexibel och anpassad för försök i 50- 300 kW området. I detta projekt har anläggningen nyttjats för att studera hur olika trä, halm och barkinblandningar påverkar askans avsättning och sammansättning nedströms förbränningsprocessen.

2.1 Bränslen och bränsleblandningar

Tre olika bibränslen har använts inom projektet: (i) vetehalm levererat från Danmark, (ii) bark från Mönsterås samt (iii) trä (tall/gran, 50/50) från Norrbotten. Samtliga bränslen har levererats i pelletsform. Bränslenas har analyserats med avseende på kemisk sammansättning Si, Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Ti, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Nb, Ni, Pb, S, Sc, Sn, Sr, V, W, Y, Zn, Zr (enligt ICP-AES, ICP-SFMS) och Cl (enligt SS- 18 71 54). Fukthalt analyserades (enligt SS 18 71 70), askhalt (enligt SS- 18 71 71) och värmevärde (enligt SS-ISO 1928). Se Tabell 1 för en översiktlig bränsleanalys.

Tabell 1. Bränsleanalys av bark, halm och trä.

Table 1. Fuel analysis of elements bark, straw and wood.

| Element | Bark | Halm | Trä | Enhet |
|--------------------------------|------|-------|-------|----------|
| Kol, C | 52,5 | 47,2 | 50,9 | % TS |
| Väte, H | 5,7 | 5,8 | 6,2 | % TS |
| Syre, O | 41,7 | 46,5 | 42,9 | % TS |
| Kväve, N | 0,4 | 0,8 | 0,08 | % TS |
| Klor, Cl | 0,02 | 0,42 | 0,01 | % TS |
| Svavel, S | 0,05 | 0,13 | <0,01 | % TS |
| Värmevärde (LHV, effektivt) | 18 | 17,3 | 19,2 | MJ/kg TS |
| Torrsubstans | 90,4 | 92,1 | 93 | % |
| Askhalt | 3,7 | 4,8 | 0,3 | % |
| SiO ₂ | 0,85 | 1,76 | 0,03 | % TS |
| Al ₂ O ₃ | 0,18 | 0,02 | 0,01 | % TS |
| CaO | 1,19 | 0,51 | 0,10 | % TS |
| Fe ₂ O ₃ | 0,06 | 0,01 | <0,01 | % TS |
| K ₂ O | 0,25 | 1,32 | 0,04 | % TS |
| MgO | 0,12 | 0,14 | 0,01 | % TS |
| MnO | 0,06 | 0,00 | 0,01 | % TS |
| Na ₂ O | 0,05 | 0,06 | <0,01 | % TS |
| P ₂ O ₅ | 0,10 | 0,15 | <0,01 | % TS |
| TiO ₂ | 0,01 | <0,01 | <0,01 | % TS |

I projektet har sex stycken förbränningsförsök utförts med utgångsmaterialen halm, trä och bark. Bränslena vägdes noggrant och blandats manuellt. Förbränningsförsök med följande bränsleblandningar baserat på viktbasis har genomförts, halm 100 %, halm/bark

50/50 % halm/bark 75/25 %, halm/trä 75/25 %, halm/trä 50/50 %. För blandningen halm/bark 50/50 genomfördes två försök.

I Tabell 2 redovisas en beräknad bränslesammansättning för de olika bränslemixerna utifrån bränsleanalysen i Tabell 1. I Tabell 2 visas enbart de askbildande elementen i bränsleaskan och värdena är dessutom normaliserade och uttryckta i mol-% baserat på bränslemixernas bränsleask-sammansättning (d.v.s. per kg bränslemix) m a p de askbildande huvudelementen. Denna beräknade sammansättning för de olika bränslemixerna kommer i resterande delen av rapporten att refereras till som bränsleaska. För tydlighetens skull redovisas även den analyserade sammansättningen för 100 % bark och 100 % halm. I Figur 1 visas även dessa data grafiskt. För att underlätta utvärdering visas även askhalterna i de olika bränslemixerna relativt den för 100 % halm i Tabell 3. Noterbart är att askhalten nära halveras när 50 % trä blandas in i halm.

Tabell 2. Beräknad bränslesammansättning för de i projektet använda bränslemixerna (molprocent, av askbildande huvudelement i bränsleaskan).

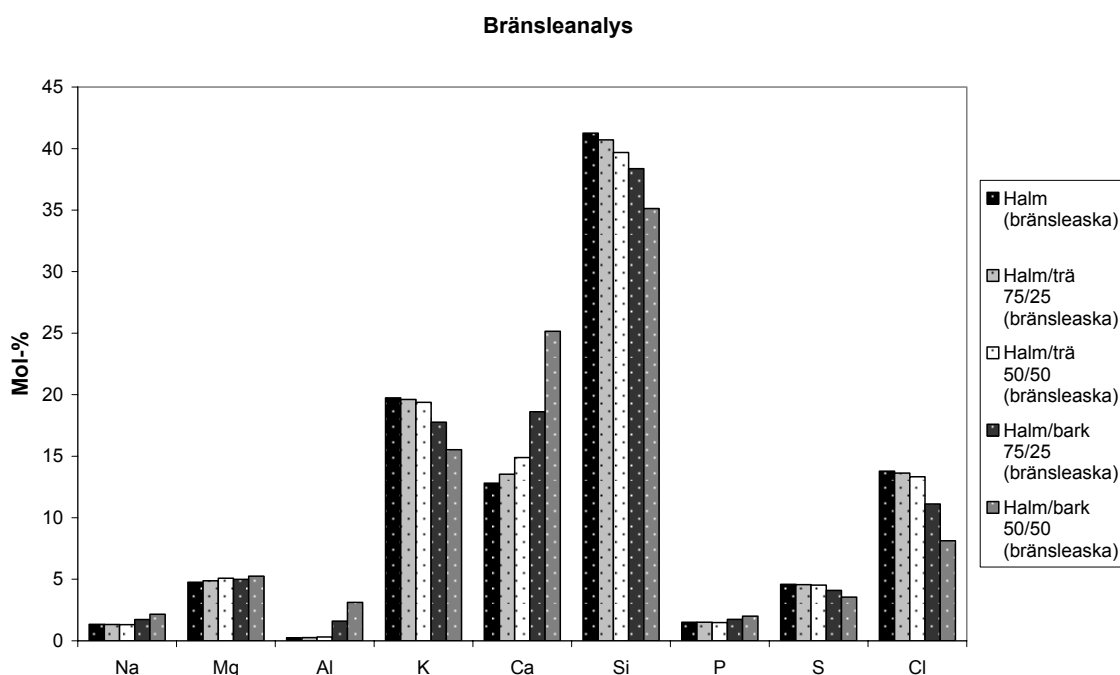
Table 2. Fuel composition for the different fuel mixtures used in the project (mole-% of main ash forming element I the fuel ash).

| | 100 % halm | 75/25 halm/trä | 50/50 halm/trä | 75/25 halm/bark | 50/50 halm/bark | 100 % trä | 100 % bark |
|--------------------|------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-----------|------------|
| Askhalt (%) | 4,8 | 3,67 | 2,55 | 4,53 | 4,25 | 0,3 | 3,7 |
| Si | 41,2 | 40,6 | 39,5 | 38,1 | 34,6 | 12,1 | 26,4 |
| Al | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 1,6 | 3,6 | 1,5 | 6,6 |
| Ca | 12,8 | 13,5 | 14,8 | 18,5 | 24,8 | 48,5 | 39,7 |
| Fe | 0,1 | 0,10 | 0,1 | 0,4 | 0,78 | 0,5 | 1,5 |
| K | 19,7 | 19,6 | 19,3 | 17,6 | 15,3 | 12,5 | 9,5 |
| Mg | 4,8 | 4,8 | 5,1 | 4,9 | 5,2 | 10,3 | 5,7 |
| Mn | 0,1 | 0,1 | 0,23 | 0,4 | 0,8 | 3,5 | 1,6 |
| Na | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,7 | 2,1 | 0,8 | 3,1 |
| P | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,7 | 2,0 | 0,9 | 2,5 |
| Ti | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,04 | 0,07 | 0,6 | 0,1 |
| S | 4,6 | 4,6 | 4,5 | 4,1 | 3,5 | 3,4 | 2,1 |
| Cl | 13,8 | 13,56 | 13,3 | 11,0 | 8,0 | 5,4 | 0,8 |

Tabell 3. Askhalten i bränslemixerna angivet i procent och normaliserat mot askhalt halm 100 %.

Table 3. Ash content in the different fuel mixtures expressed as percent of the ash content for 100% straw.

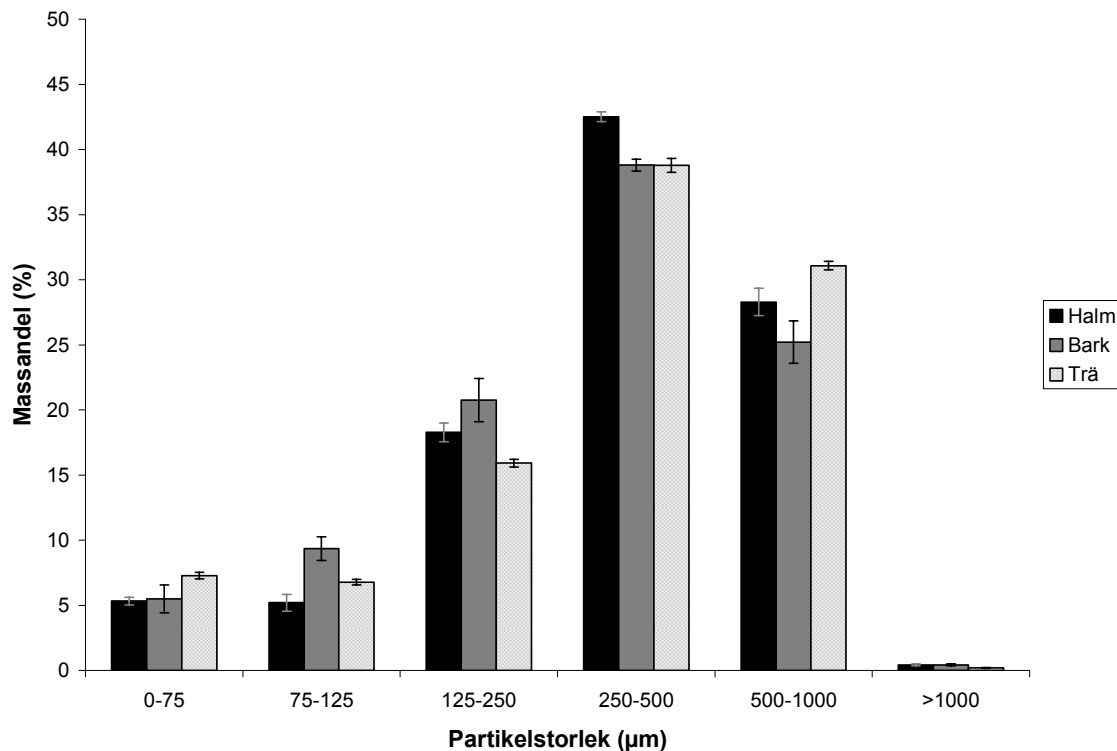
| 100 halm | 75/25 halm/trä | 50/50 halm/trä | 75/25 halm/bark | 50/50 halm/bark |
|----------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 100 | 77 | 53 | 94 | 89 |



Figur 1. Beräknad bränslesammansättning för de olika bränslemixerna (normerade data uttryckt i mol-% av askbildande huvudelement i bränsleaskan).

Figure 1. Calculated fuel composition for the different fuel mixtures used in the project (mole-%, of main ash forming elements in the fuel ash).

Bränslena sönderdelades med en hammarkvarn (Bipro 4b) och sållstorlek på Ø 1,25- 1,5 mm. Därefter blandades bränslemixerna manuellt i 100 liters-tunnor. Bränslet har siktats med en siktapparat ”Frisch analysett 3” under 15 minuter med amplitud 1,5 mm för att bestämma dess partikelstorleksfördelning. De använda sållen är 1,0; 0,5; 0,25; 0,125; 0,075 och 0 mm. I en pulverbrännare styrs bränslets förbränningshastighet till stor del av bränslets partikelstorleksfördelning. Det kan även antas att de producerade askfraktionerna kommer att påverkas av partikelstorleksfördelning. För att reducera inverkan av bränslets storleksfördelning gentemot de askrelaterade driftsproblem som kan kopplas till de olika bränslemixerna lades därför stor vikt vid att uppnå likadana pulverstorleksfördelningar för de olika bränslena. I Figur 2 visas den partikelstorleksfördelning som användes för halm, bark och trä.



Figur 2. Partikelstorleksfördelning för det halm-, bark- och träbränsle som användes i projektet.

Figure 2. Particle size distribution of straw, bark and wood.

För att jämföra de olika bränslenas egenskaper med avseende på valvbildningstendens har valvbildningsförsök utförts för att bestämma bränslenas flytbarhet^[27]. Metoden bygger på att 2000 ml pulver fylls i trattar som har samma lutning och vinkel. Däremot finns det trattar med olika diametrar i botten. Trattar med öppningsdiametrar från 60-115 mm har nyttjats. Trattarna placeras i ett stativ med en lucka som placeras i botten på tratten. Denna lucka håller pulvret i tratten och när den öppnas kan pulvret rinna ut. Luckan öppnas hastigt och pulvret har då chans att rinna ut i ett uppsamlingskärl. För att en viss diameter skall få godkänt i metoden krävs fem stycken lyckade försök i rad. Bilaga 4 visar detaljerade resultat på bränsleanalyser, valvbildningstendenser.

2.2 Förbränningsförsök i 100 kW pulverrigg

2.2.1 Generella driftsvillkor

En stor vikt fästes vid att genomföra alla förbränningsförsök under liknande driftförhållanden, nedan redovisas de generella förhållanden vid varje försök.

Förbränningskammaren värms med hjälp av en elektrisk luftförvärmare tills keramiken blir ca 250°C därefter startas en oljebrännare med EO1 och förvärmad förbränningsluft.

När temperaturen i keramiken är 850- 900°C stängs oljan av och ersätts med önskad pulverblandning.

Under hela förbränningsförsöken eftersträvades att hålla 100 kW effekt vilket motsvarar ca 20-22 kg bränsle/timme. Totalt luftflöde var 1750 liter/minut vilket ger en luftfaktor på ca 1,18. Inställningarna på de fyra luftregistren var 150, 300, 600 och 700 liter/minut för transport-, primär-, sekundär- och tertiär luftregistret. Detta ger en fördelning som motsvarar 8,6, 17,1, 34,3 och 40 % av den totala förbränningsluften. I Tabell 4 visas rökgaskompositionen med avseende på O₂, CO, NO etc.

Tabell 5 visar de temperaturer som uppmättes vid varje försöks slutfas, vilket oftast är den maximala temperatur som mäts under försöket. Figur 3 visas en typisk trend över temperaturerna under ett försök (här exemplifierat i förbränningsförsök med halm/trä 50/50).

Tabell 4. Medelvärde av emissioner under provtagning av totalstoff och partikelstorleksfördelning.

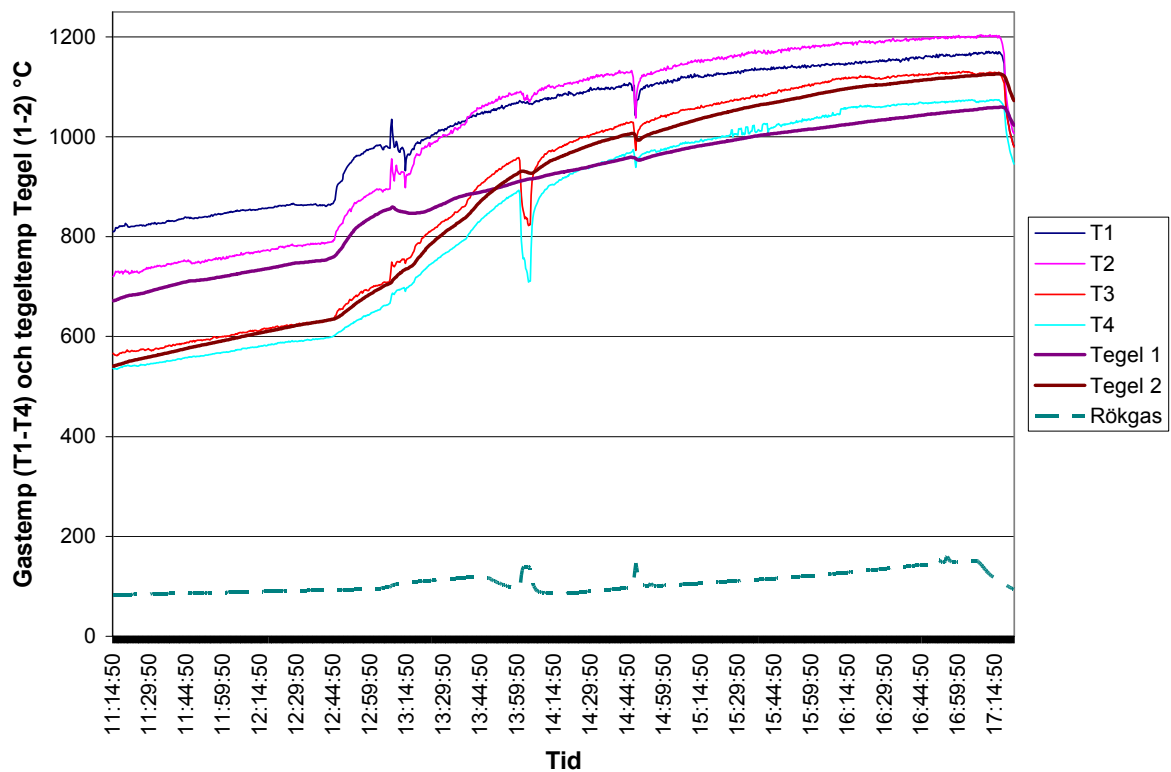
Table 4. Average values for gaseous emission during measurements of dust and particles.

| Bränslemix | O ₂ medelvärde (%) | CO (ppm) | NO (ppm) | HCl (ppm) | SO ₂ (ppm) |
|---------------------|-------------------------------|----------|----------|-----------|-----------------------|
| 50 % halm 50 % bark | 6,5 | 1 | 217 | - | 7 |
| 100 % halm | 3,3 | 3 | 166 | 13 | 58 |
| 50 % halm 50 % trä | 3,2 | 17 | 94 | 4 | 17 |
| 75 % halm 25 % trä | 2,9 | 30 | 95 | 19 | 38 |
| 75 % halm 25 % bark | 3,9 | 3 | 137 | 8 | 22 |

Tabell 5. Sluttemperaturer (gas & keramik) vid de olika förbränningsförsöken.

Table 5. Final temperatures at the different combustion trials.

| Bränsleblandning | Sluttemperatur (gas) °C | Sluttemperatur (keramik) °C |
|---------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 50 % halm/50 % bark | 1230 | 1125 |
| 100 % halm | 1190 | 1090 |
| 50 % halm/50 % trä | 1190 | 1125 |
| 75 % halm/25 % trä | 1225 | 1165 |
| 75 % halm/25 % bark | 1185 | 1085 |
| 50 % halm 50 % bark | 1161 | 1070 |



Figur 3. Typiska temperaturkurvor för gaser och tegel infodring.

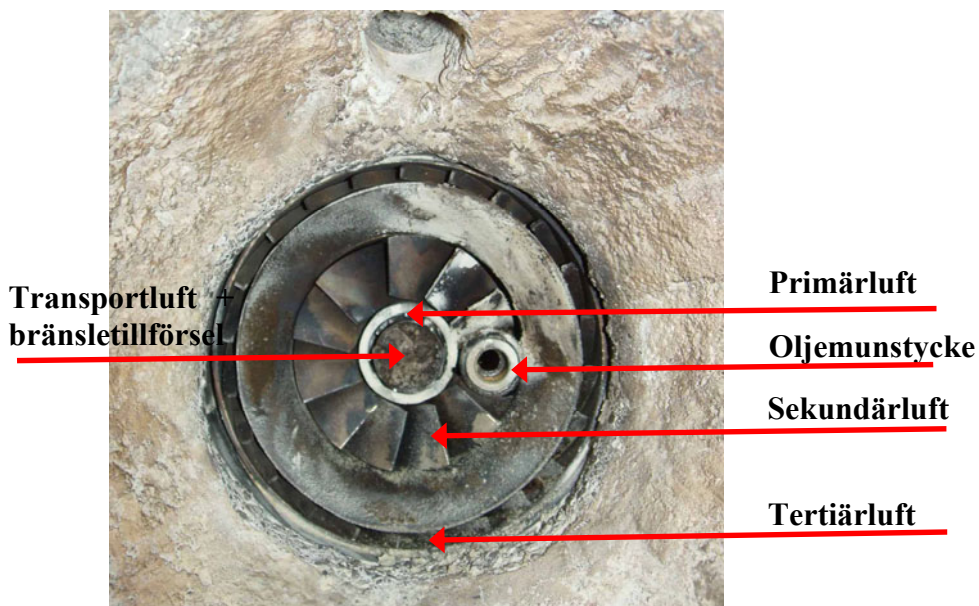
Figure 3. Typical temperature trends for flue gas and ceramic insulation.

2.2.1 Pulverbrännaren

Pulverbrännaren är tillverkad av VTS och därefter modifierad av ETC. Pulverbrännarens utlopp består av fyra luftregister:

- Zon 1: bränsle och transportluft vilka utgör ca 9 % av all luft.
- Zon 2: primärluft, säkerställer god flamstabilitet. Denna utgör ca 17 % av all luft.
- Zon 3: sekundärluft skapar den starkaste rotationsrörelsen och utgör ca 34 % av total luftmängd.
- Zon 4: tertiärluft vilken används för att ”justera” flamlängden. Utgör ca 40 % av all tillförd förbränningsluft.

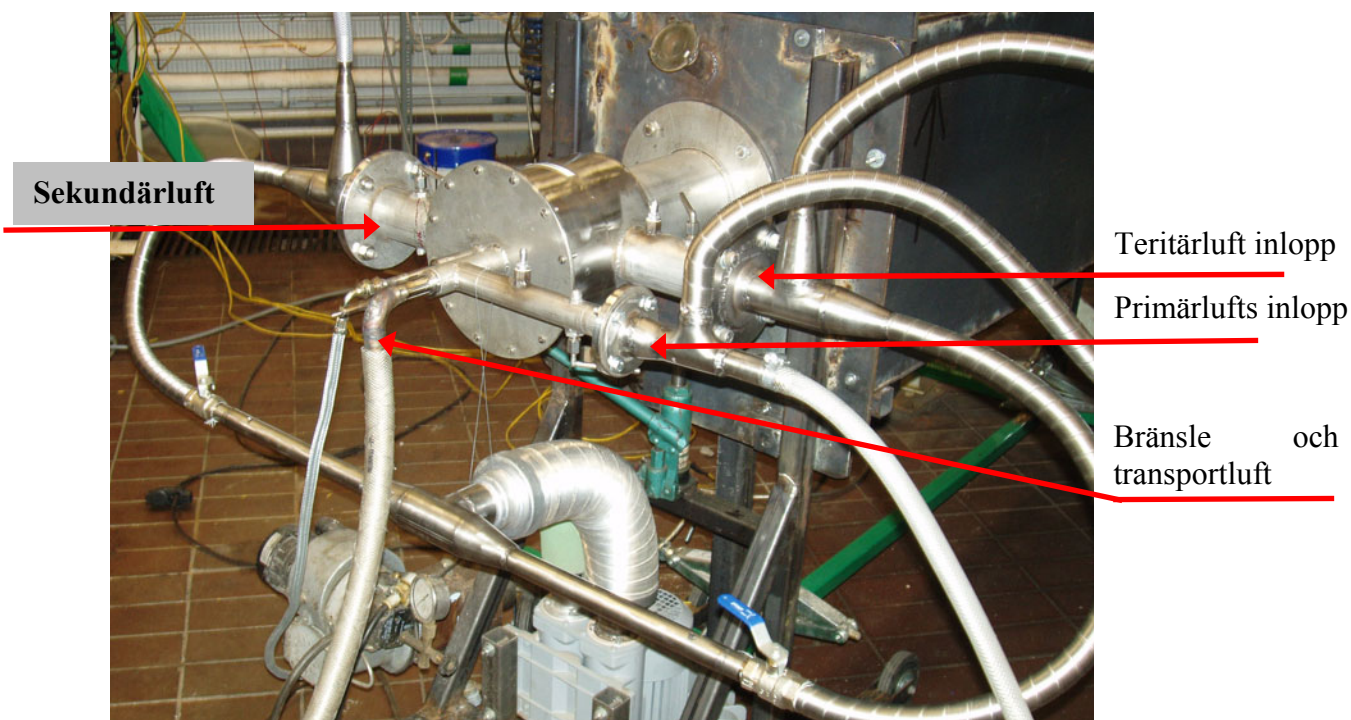
Brännaren med de olika luftregistren visas i Figur 4 och Figur 5.



Figur 4. Front vy av pulverbrännaren med olika luftregistrer.

Figure 4. Front view of the powder burner.

Bränslet tillförs tillsammans med transportluft med en hastighet på 10- 15 m/s. Pulvret blandas inne i förbränningskammaren tillsammans med luften från de övriga luftregistren.

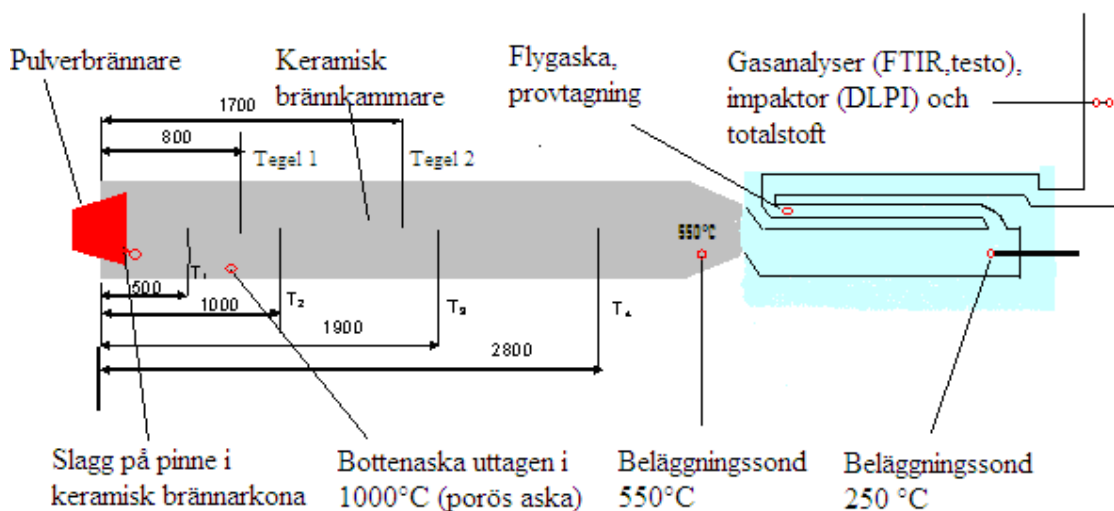


Figur 5. Multifuel brännare för vätska och pulver.

Figure 5. Multi fuel burner for liquids and powders.

2.2.2 Förbränningskammaren

Tvärsnittsgeometrin i förbränningskammaren är nästan kvadratisk (550×550 mm) förutom att taket är upphöjt och välvt 50 mm. Förbränningskammarens längd är 3300 mm och är försedd med ett antal mätuttag (markerade med M, S och T) vilket används för att kunna mäta gaser, temperaturer och ta partiklar. Figur 6 visar en schematisk skiss på positionerna för temperatur och övriga mätpunkter under försöken. Mätningen görs på sju olika ställen med termoelement (typ K) som loggas var 20:e sekund. Fyra av termoelement är placerade i förbränningskammaren och mäter gasfas (T1 – T4), två stycken är inborrade i tegelinfodringen och ett är placerat i rökgaskanalen direkt efter pannan. Förbränningskammaren är byggd för att vara flexibel och kunna efterlikna verkliga processer. T.ex. kan olika sonder, sensorer, additiv, NO_x-reducerande ämnen och dylikt tillsättas och testas i försöksserier under kontrollerande former. Bland annat har förbränningskammaren i vissa försök delats upp i två zoner, en förgasningszon och en förbränningszon. Förbränningskammaren är konstruerad med 3-mm stålplåt och isolerad med fyra lager värmeisolerande material. De två yttersta lagren är 50 mm tjocka och består av "Super-isol". Direkt bakom hotface teglet sitter ett 50 mm tjockt lager av "Fiberfrax Duraboard MD". Hotface-lagret som möter flammorna består av en bränd keramik "Alporit AP26 LI" sten som är 115 mm tjockt. Mellan stålplåten och det yttersta lagret finns en luftspalt på 10 mm.



Figur 6. Schematisk bild över förbränningskammaren med positioner för termoelement och provuttag. Alla måttangivelser är i mm.

Figure 6. Illustration of the combustion chamber displaying the positions of the thermocouples and sampling location. All dimensions in mm.

2.3 Gas- och partikelprovtagning

Gas- och totalstoff provtogs i rökgaskanalen direkt efter pannan som kyler rökgaserna. Förbränning av pulver startade när temperaturen i keramiken (800 mm nedströms pulverbrännaren) var 850- 900 °C.

Det instrument som användes vid emissionsmätning var ett Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR, av fabrikatet MBS. Instrumentet mäter, CO, CO₂, O₂, H₂O, HCl, NO, NO₂ och SO₂. Dessutom har ett handinstrument med kemiska celler, TESTO XL 350 använts som mäter CO, NO, O₂, SO₂ och rökgastemperatur samt beräknar CO₂ och NO_x. Samtliga emissioner har loggats var 20:e sekund.

Totalstoffprov provtogs isokinetiskt i rökgaskanalen vid 100°C liknande standardmetoden (SS-EN 13284-1). Vid mätningen samlades rökgaserna på uppvärmda kvartsfilter, för att senare kunna analyseras med SEM/EDS och XRD. Filterplattorna vägs före och efter provtagning med en 5 decimalers våg (Mettler Toledo) varefter plattorna sparas i exikator inför analys.

För att bestämma partiklarnas storleksfördelning i rökgaserna användes en 13-steps lågtrycksimpaktor från Dekati Ltd. Impaktorn storleksfördelar partiklarna efter deras aerodynamiska diameter i intervallet 0,03- 10,3 µm. Provtagningen utfördes i rökgaskanalen efter pannan vid en rökgastemperatur på 100°C. Provtagningssondens diameter var anpassad för att uppnå isokinetiskt förhållanden vid provtagningen. Provtagning med totalstoff och impaktor startade när ugnens keramik var 960°C i en referenspunkt (tegel 1). Provtiden för totalstoff ca 20 minuter. Impaktorprovtagning sker under en väldigt kort tid på grund av halmens höga andel fina partiklar. För att förhindra kondensation av vatten värmdes impaktorn till 150°C före provtagningen. Partiklarna fastnar på substratplattor av aluminium. Partiklarna som samlades upp på impaktorplatta nr 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9 och 10 har analyserats i ett SEM/EDS (elektronmikroskop med rönkendetektor) med avseende på utseende och kemisk sammansättning. Platta 2- 4 "finmoden" har en storleksfördelning mellan 0,063- 0,191 µm. Platta 6- 8 har en storleksfördelning mellan 0,507- 1,338 µm. De större partiklarna "Grovmoden" platta 9- 11 har en storleksfördelning mellan 2,124- 5,545 µm.

2.4 Provtagning av slagg, bottenaska, flygaska och beläggningar

Ett 8 mm keramiskt rör som består av 99,5 % SiO₂ placerades i pulverbrännarens keramiska kona, uppgiften var att fånga aska/slagg som senare kan analyseras. Den bildade beläggningen skrapades av efter varje förbränningsförsök och sparades i exikator inför analys med SEM/EDS och XRD. För att få ut bottenaska ur eldstaden öppnades en lucka i sidan av eldstaden (mellan position T1 och T2 i Figur 6) och bottenaska skrapades ut.

För att försöka få likvärdigt exponerad bottenaska togs endast toppen av den askhögen som bildats. Provtagningen gjordes när keramiken i eldstaden hade en temperatur på ca 1000°C för att kunna analysera aska som exponerats likvärdigt.

För att mäta beläggningens bildning och dess uppbyggnadshastighet användes en luftkyld sond för att simulera en pannrör i en verklig anläggning. Det är viktigt att poängtera hur den beläggning som samlats har byggts upp, i detta fall på en rengjord metallring där beläggningstillväxten troligtvis inte är linjär med tiden utan kan förmodas avta något med att beläggningen växer till. Utrustningen har automatiskt justerbar kylning för att uppnå önskad temperatur. Temperaturen kan regleras inom den önskade temperaturen ± 5 grader. Två sonder som är kylda till 250 °C respektive 550 °C på provsondens ytor användes i försöken. Sonden som är 550 °C är placerad 500 mm

nedströms T4 och 250 °C sonden placerades i pannan som kylv rökgaserna (se Figur 6). För att eftersträva likvärdiga temperaturer under den tid som sönerna exponerades monterades dessa in när en referenstemperatur i keramiken (position 1) var 1000°C och exponeras därefter i ca två timmar. Den heta sonden kyls för att simulera temperaturen på en verklig överhettare och kyls till 550°C på ytan. Under denna tid ökade omgivningstemperatur linjärt från 760- 840 °C vid den varma sonden. Den kalla sonden var kyld till 250°C för att simulera konvektionsdelar i ett verkligt pannsystem. Under provtiden minskade omgivningstemperaturen för den kalla sonden linjärt från 540-500°C. Efter mätningarna togs sönerna ut och de löstagbara provringarna vägdes före och efter försöken. Genom att räkna viktökningen och mäta area på provringarna kan beläggningstillväxten för den specifika bränslmixen räknas fram. De samlade beläggningarna skrapades därefter av från provringarnas vind och läsida (sidan mot och från gasströmmens riktning) för att kunna analyseras med SEM/EDS och XRD. Under tiden före analys förvarades ringarna i exikator. Flygaska togs ut från pannas 2:a drag, se Figur 6. Detta prov sparades i exikator före analys. Samtliga flygaska från hela pannan skrapades ut från pannan då den svalnat, dvs. dagen efter förbränningsförsöket. Pannan rengjordes noggrann och spolades ren med vatten varpå den torkades torr inför nästkommande försök.

2.5 Karaktärisering av producerade ask-, slagg, partikel- och beläggningsprover

Efter alla förbränningsförsök har slagg från brännarkona, bottenaska, flygaska, beläggning från provringar, totalstofffilter och impaktorplattor analyserats med avseende på elementsammansättning med hjälp av ett Philips XL30 elektronmikroskop (SEM) utrustat med röntgendetektor (EDS). Samtliga bottenaskor, slaggar, beläggningar, flygaskor och totalstofffilter har analyserats med 4¹ stycken areaanalyser för att få statistik på analyserna. Askorna har sedan analyserats som tre grupper med hjälp av röntgendiffractionsinstrument (XRD). Diffractionsmönstret utvärderas med en kommersiell programvara från Bruker och en PDF2-databas används för att identifiera olika fasers sammansättning hos de olika askfraktionerna. De askfraktioner som bildat glas, d.v.s. amorft material, kan inte identifieras i XRD-analysen. Slaggen i bottenaskan klassas enligt en fyrgradig skala som tagits fram inom forskningsprojekt på ETC^[28]. Sintringsgraden för bottenaskor och slagg har studerats visuellt och klassificerats enligt följande kriterium:

Kategori 1: Mycket lätt sintrad aska som faller sönder vid beröring.

Kategori 2: Något sintrad aska som håller ihop vid beröring men bryts mycket enkelt isär. Det går fortfarande att enkelt urskilja en kornstruktur i materialet.

Kategori 3: Sintrad aska som fortfarande går att bryta isär. Man kan visuellt urskilja enskild kornstruktur men askan har dock börjat få en slagglignande struktur där smält material (glas) kan urskiljas visuellt.

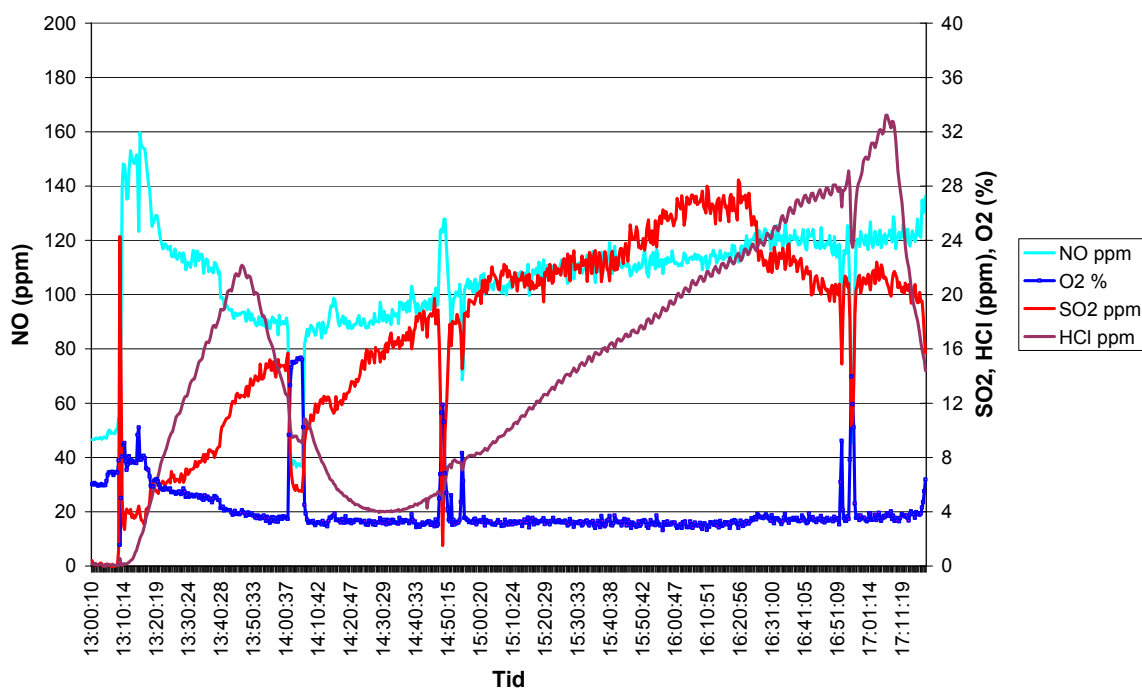
Kategori 4: Totalt sintrad aska som inte går att brytas isär för hand. Askan är sammansmält till större block (slag). Ingen enskild kornstruktur går att urskilja visuellt.

¹ I det första försöket med halm/bark 50/50 % gjordes endast 1 areaanalys per askfraktion. Vid det andra försöket med halm/bark 50/50 analyserades enbart bottenaska och slagg på brännarkona, och då med 4 stycken areaanalyser med hjälp av SEM/EDS.

3 Resultatredovisning

3.1 Generella kommentarer kring driftförhållandena under försöken

En trend som uppmärksammats vid samtliga förbränningsförsök är att SO₂, HCl- och NO_x- värdena ökar ju längre tid man eldat, detta kan troligtvis kopplas till kemiska reaktioner och att ugnen blir långsamt varmare allteftersom. Dock är nivåerna mycket låga se Tabell 4. Figur 7 visar en typisk trend för emissionerna vid de genomförda försöken, här exemplifierat av försöket med halm/trä 50/50.



Figur 7. Emissioner vid förbränningsförsök 50 % halm/50 % trä.

Figure 7. Gaseous emissions during combustion of 50 % straw/50 % wood.

3.2 Slaggbildning

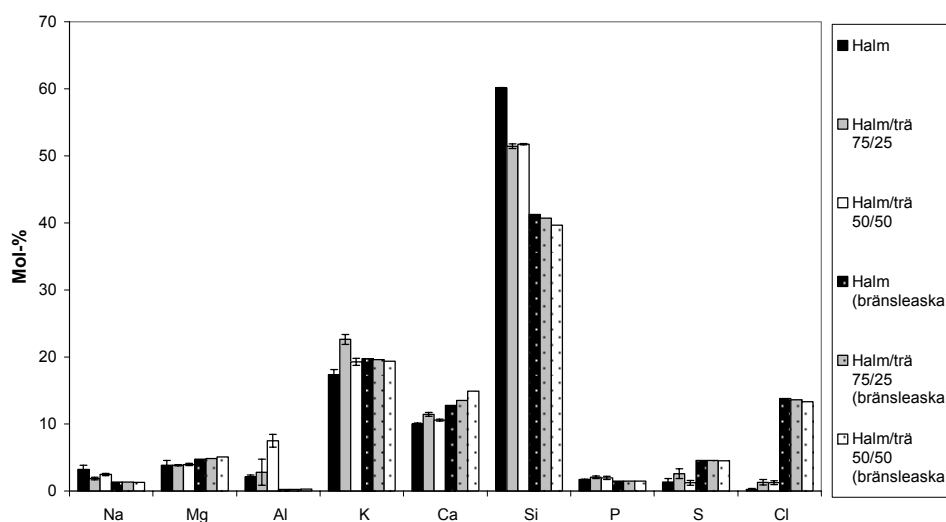
Tabell 6 beskriver hur de olika bränslemixerna bildar aska och beläggning nedströms förbränningskammaren. Värdena har normerats till gram aska per 100 kg tillfört bränsle för att kunna jämföra de olika bränslena. Tabell 6 visar slagg som har bildats på förbränningskonan, andelen bottenaska och hur stor del av denna som bildat klumpformig beläggning samt dess hårdhetsgrad, Figur 6 visar vart dessa askor och beläggning avsatts. Den amorfa (glasartade) andelen av askan, vilket i detta fall beskriver sintringsgraden på beläggningen, är markant vid förbränningsförsöken i 100 % halm fallet men vid inblandning av trä och halm sjunker denna andel markant. Klassning av detta beskrivs i kapitel 2.5.

Tabell 6. Beläggingsbildning vid olika positioner i förbränningsanläggningen.

Table 6. Slagging tendencies in the combustion chamber.

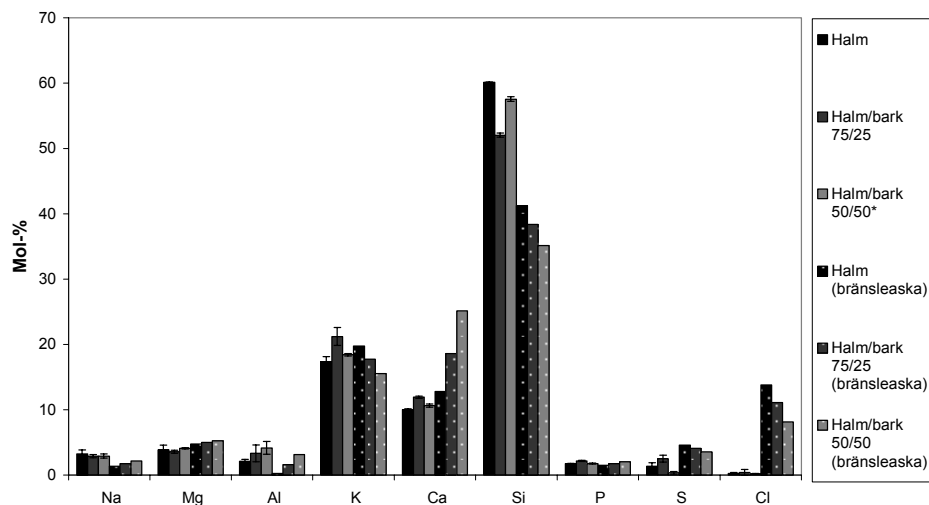
| Bränslemixer | Slagg på brännarkona (g) | Bottenaska (gram/100kg bränsle) | Varav slagg i bottenaska (g) | Sintringsgrad på beläggning (1-4) |
|---------------------|--------------------------|---------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 50 % halm 50 % bark | 11 | 389 | 265 | 2 |
| 100 % halm | 24 | 496 | 496 | 4 |
| 50 % halm 50 % trä | 4,2 | 48 | 27 | 2 |
| 75 % halm 25 % trä | 10 | 139 | 84 | 3 |
| 75 % halm 25 % bark | 18 | 461 | 356 | 2 |

Slagningstendensen i förbränningskonan har varierat mellan eldningarna men en trend är att det vid höga halminblandningar (>75 %) framträder en tydlig glasartad tunn hinna av smält aska på konan. Vid högre trä- och barkinblandningar är glasningen mindre tydlig men i vissa partier på brännkonan märks smältan tydligt. Elementarsammansättningen på slaggen på brännarkonan, vilken visas i Figur 8 och Figur 9. För jämförbarhetens skull så har en (teoretisk) bränsleaska lagts in i figurerna, de prickiga staplarna i figuren. För kalium kan en svag ökning ses vilket är tvärtemot vad bränsleaskan indikerar. Vidare är ökningen av kalciumkoncentrationen något mindre påtaglig än vad bränsleaskan visar för ökad andel bark i halm. I Tabell 7 redovisas resultat från XRD-analys på slaggen. Från tabellen kan ses att de Ca-Si-baserade identifierade faserna CaSiO_3 (wollastonit) och $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ (Mervinit) ökar med ökad trä- och barkinblandning.



Figur 8. SEM/EDS-analys av slagg på brännarkonan för halm och trä.

Figure 8. SEM/EDS analysis of slag/deposits on the burner taps for straw and bark.



Figur 9. SEM/EDS-analys av slagg på offerpinne placerad i brännarkonan vid förbränning av halm och bark.

Figure 9. SEM/EDS analysis of slag/deposits on an offer anode in the burner taps for straw and bark.

Tabell 7. XRD-analys på slagg från halm/bark och halm/trä.

Table 7. XRD analysis on slag from the burner taps from straw and bark.

| Slagg på kona | Halm: 100%*,*** | Halm/Trä: 75/25*,** | Halm/Trä: 50/50*,** | Halm/Bark: 75/25*,** | Halm/Bark: 50/50*,** |
|--|--------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| SiO ₂ (kvarts) | 49 | 14 | 11 | 29 | 36 |
| (Na/K)AlSi ₃ O ₈ (fältspat) | 35 | | | 10 | 13 |
| KCl (sylvit) | | 8 | | | |
| K ₂ SO ₄ (arkanit) | | 34 | | 13 | 4 |
| Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH) (apatit) | | 6 | | 8 | |
| Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂ (merwinit) | | 4 | | 3 | |
| MgSiO ₃ (enstatit) | | | 17 | | |
| CaSiO ₃ (wollastonit) | 17 | 28 | 24 | 33 | 33 |
| SiO ₂ (kristobalit) | | 3 | 10 | | 8 |
| Al ₂ O ₃ (korund) | | | | | 2 |
| Al _{2.3} Si _{0.7} O _{4.85} (mullit) | | 3 | 38 | 4 | 4 |
| Summa | 101 | 100 | 100 | 100 | 100 |

* Minst en signifikant närvarande fas kan inte identifieras

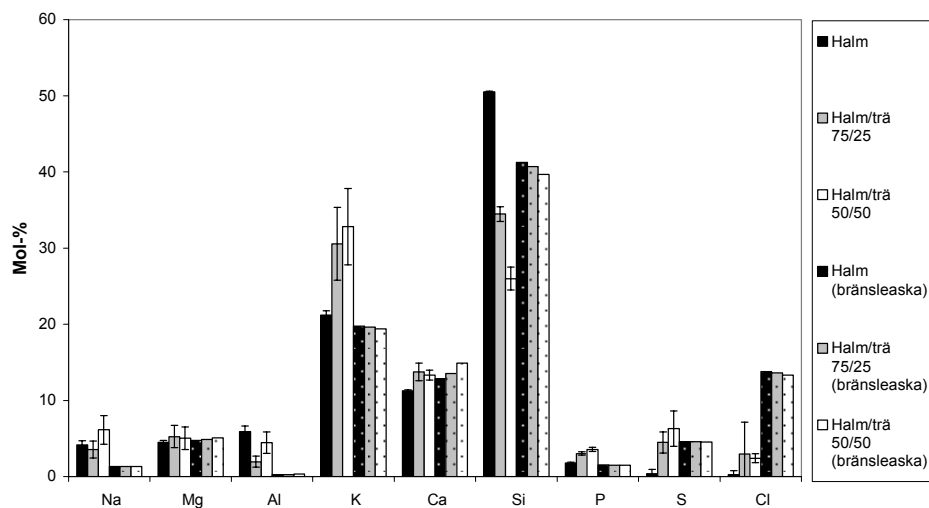
** för lite prov för identifiering med XRD

*** Stor (-viss) del amorft mtrl.

I Figur 10 och Figur 11 visas elementarsammansättning hos den (porösa) bottenaskan som avsatts i brännkammaren vid förbränning av halm med trä- och barkinblandning. Värdena är normerade i mol-%. För jämförbarhetens skull så har en (teoretisk)

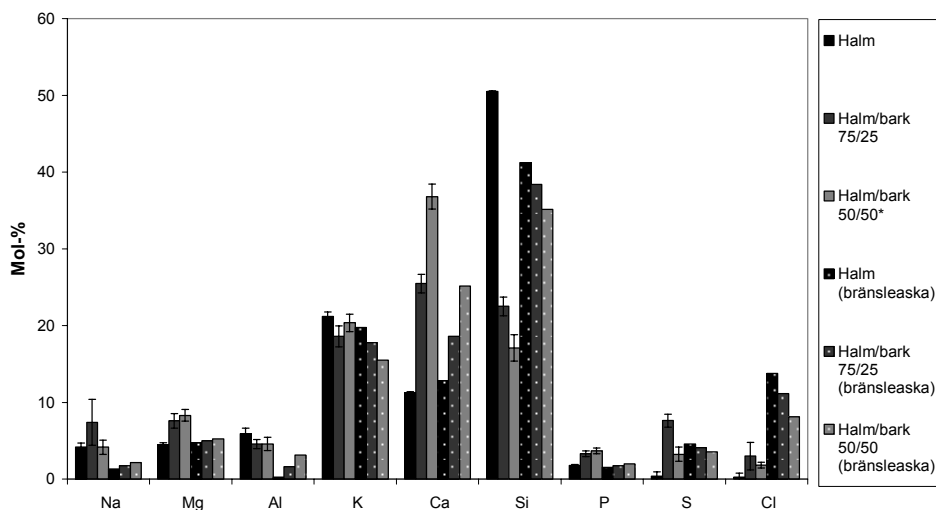
bränsleaska lagts in i figurerna, se de prickiga staplarna i figuren. Elementarsammansättningen på bottenaskan domineras av K, Ca, Si och Cl, dock finns relativt höga koncentrationer av Na, Mg, P och S. En markant ökning av koncentrationen av kalcium kan ses vid ökad barkinblandning. Vid ökad träinblandning uppstår dels en ökning av kaliumkoncentrationen och dels en tydlig minskning av kiselkoncentrationen. Av grafen framgår att kaliumkoncentrationen i bränsleaskan vid ökad träinblandning borde minska något, men de experimentella data visar alltså på en motsatt trend. Vid ökad inblandning av bark i halm så blir det tydligt att kalciumkoncentrationen ökar markant, och det omvända gäller för kisel. I Tabell 7 redovisas resultat från XRD-analys på bottenaskan. Med referens till sintringsgradsklassificering i Tabell 6 så kan det anses rimligt att bottenaskan för halm, samt och eventuellt också den för halm/trä 75/25, består till största delen av amorft material (glas). Detta gör att de i XRD-analysen identifierade faserna endast utgör en liten del av den totala bottenaskan. En ökning av Ca- och Ca-Si-baserade faser såsom CaO, CaCO₃ och Ca₃Mg(SiO₄)₂ (merwinit) kan ses vid ökad bark- och träinblandning. Noterbart är även att Ca-K-baserade faser som de s.k. dubbel- och trippelkarbonaterna CaK₂(CO₃)₂ och Ca₂K₂(CO₃)₃ framträder vid halm/trä 50/50.

Slaggprover från Amagerverket i Danmark har analyserats med SEM/EDS analys. På grund av stora osäkerheter i viken bränslemix som användes vid perioden då slaggprovet togs så redovisas dock inte dessa data i rapporten.



Figur 10. SEM analys på bottenaska från halm och trä.

Figure 10. SEM analyze of bottom ash from straw and wood.



Figur 11. SEM-analys på bottenaska från halm och bark.

Figure 11. SEM analysis of bottom ash from straw and bark.

Tabell 8. XRD-analys på bottenaska halm/trä och bark.

Table 8. XRD analysis on bottom ash from straw and bark.

| Bottenaska | Halm: | Halm/Trä: | Halm/Trä: | Halm/Bark: |
|--|-----------|-----------|-----------|------------|
| | 100%*,*** | 75/25*,** | 50/50*** | 75/25*,** |
| SiO ₂ (kvarts) | 4 | 12 | | 16 |
| (Na/K)AlSi ₃ O ₈ (fältspat) | | | | 6 |
| KCl (sylvit) | | 25 | | |
| CaO (lime) | | 4 | 24 | 22 |
| MgO (periklas) | | 10 | 4 | 6 |
| Ca(OH) ₂ (portlandit) | | | | 2 |
| CaCO ₃ (kalcit) | | | 4 | 18 |
| CaK ₂ (CO ₃) ₂ | | | 18 | |
| Ca ₂ K ₂ (CO ₃) ₃ | | | 7 | |
| K ₂ SO ₄ (arkanit) | | 7 | | 6 |
| K ₃ Na(SO ₄) ₂ (aftitalit) | | 8 | | 1 |
| Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH) (apatit) | | 11 | | 9 |
| KAlSi ₂ O ₆ (leucit) | 96 | | 15 | 3 |
| Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂ (merwinit) | | 8 | | 8 |
| SiO ₂ (kristobalit) | | 10 | 29 | 2 |
| Fe ₂ O ₃ (magem./hematit) | | 4 | | |
| Summa | 100 | 99 | 101 | 99 |

* Minst en signifikant närvarande fas kan inte identifieras

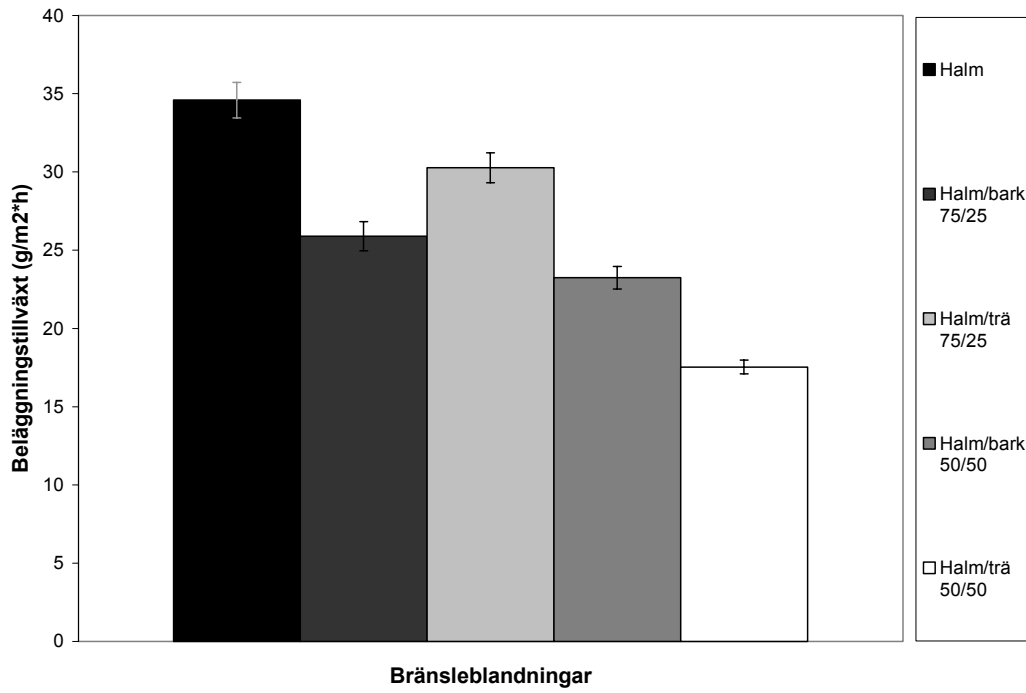
** för lite prov för identifiering med XRD

*** Stor (-viss) del amorft mtrl. glas?

3.3 Beläggningar och beläggningstillväxt

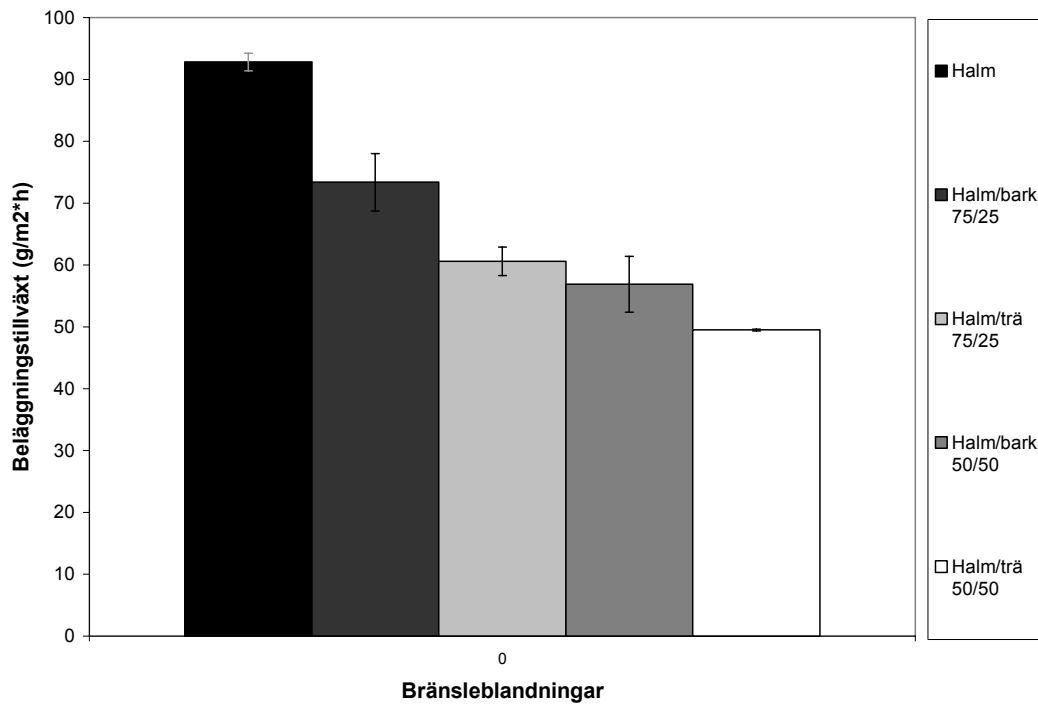
I alla försök har beläggingsbildningen minskat med ökad trä- och barkinblandning. Den beläggning som byggdes upp på 250°C sonden (som har en omgivande rökgastemperatur på ca 510°C) tillväxer med en hastighet på 20 - 30 g/cm²*h, se Figur 12. Noterbart är att beläggningstillväxten på 250°C sonden vid 25 % träinblandning inte reduceras nämnvärt mycket. Däremot reduceras beläggningen väsentligt, ungefär med hälften om träinblandningen ökas till 50 %. Kompositionen på beläggningarna vid 25 % inblandning av bark och trä skiljer sig åt endast på andelen Ca och Si, där halm/bark 75/25 uppvisar dels en något högre Ca (bl.a. som CaO) och dels en något lägre Si än halm/trä 75/25. Se bilaga 2 och 3 för övriga resultat från SEM/EDS- och XRD-analyserna.

För 550°C sonden (som har en omgivande rökgastemperatur på ca 810°C) är beläggningstillväxten 50 - 90 g/cm²*h, se Figur 13. Figuren visar även att beläggningstillväxten verkar avta linjärt med ökad inblandning av träbränsle. Vidare kan även ses att en 25 % -ig barkinblandning resulterar i en beläggningstillväxt som är jämförbar med den för 100 % halm men att det för en 50 % -ig inblandning av bark resulterar i en reduktion av beläggningstillväxten med ca ¼ del. Några enkla tester med att lösa upp beläggningarna från sonderna i vatten visar att samtliga beläggningar har mycket låg löslighet <2 %. Generellt så domineras vindsidan på bägge beläggningssonderna av Si, K, Ca och Cl medan läsidorna av sonderna domineras av K och Cl. En generell trend för både lä- och vindsidorna är andelen kalcium ökar speciellt vid inblandning av bark samt att både kalium- och klorkoncentrationerna minskar kraftigt med ökad trä- och barkinblandning. I Figur 14 och Figur 15 visas sammansättningen för den 550-gradiga beläggningssondens vindsida. För jämförbarhetens skull så har en (teoretisk) bränsleaska lagts in i figurerna (se de prickiga staplarna). I Tabell 9 och Tabell 10 visas en XRD-analys av den 550-gradiga beläggningssondens vind- och läsida. För vindsidan så ses generellt en ökning av Ca och Ca-Si-baserade faser såsom CaO (lime) och Ca₃Mg(SiO₄)₂ (merwinitt) samt en ökning av andelen SiO₂ (kristoballit) vid ökad trä- och barkinblandning. Noterbart är att det vid halm/trä 75/25 finns ca 3 ggr mer K₂SO₄ jämfört med halm/bark 75/25. Läsidan domineras av KCl och K₂SO₄. Se bilaga 2 och 3 för övriga resultat från SEM/EDS- och XRD-analyserna.



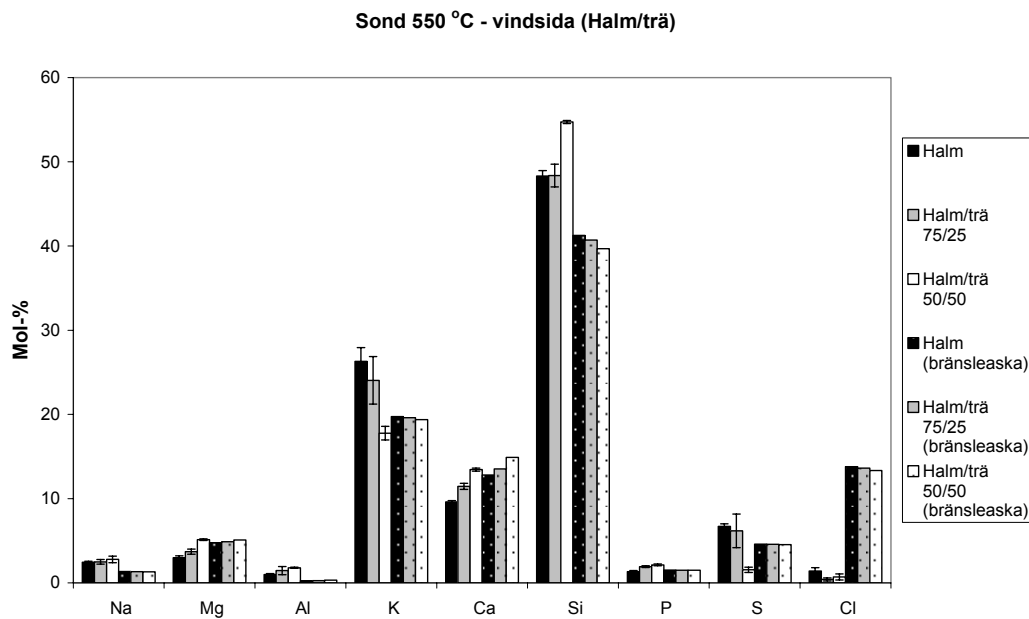
Figur 12. Beläggningstillväxt vid kylld sond 250°C.

Figure 12. Deposits on rings at cooled probe 250°C.



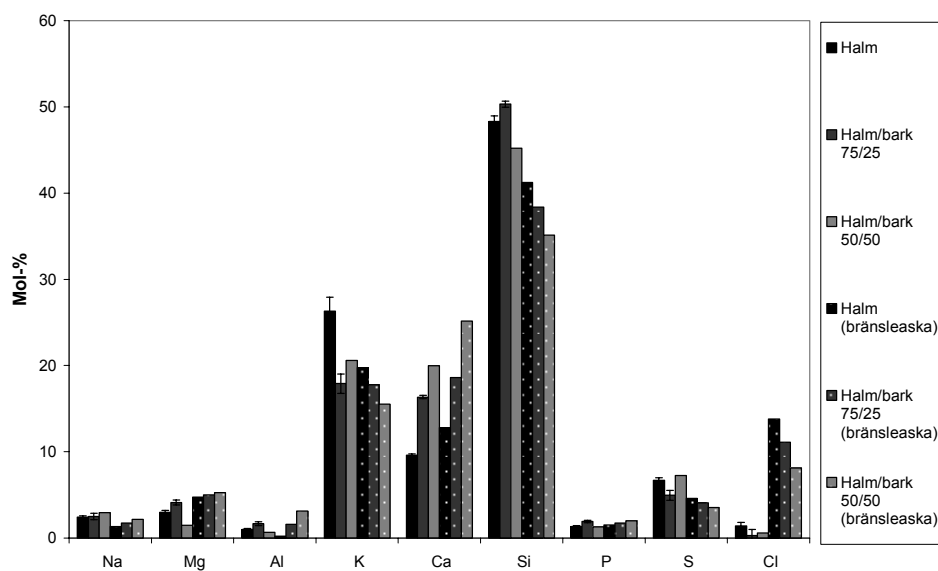
Figur 13. Beläggningstillväxt vid kylld sond 550°C

Figure 13. Deposits on rings at cooled probe 550°C.



Figur 14. SEM/EDS-analys på vindsidan på beläggningssond (550°C) för halm och trä.

Figure 14. SEM/EDS analysis for windward side of the deposit probe (550°C) for straw and wood.



Figur 15. SEM/EDS-analys på vindsidan på beläggningssond (550°C) för halm och bark.

Figure 15. SEM/EDS analysis for windward side of the deposit probe (550°C) for straw and bark.

Tabell 9. XRD-analys på vindsida av beläggningssond (550°C).

*Table 9. XRD analysis on windward side of the deposit probe (550°C).***Beläggings-****sond, 550 °C****vindsida**

| | Halm: 100%*** | Halm/Trä: 75/25*** | Halm/Trä: 50/50*** | Halm/Bark 75/25*** |
|---|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| SiO ₂ (kvarts) | 11 | 10 | 13 | 13 |
| (Na/K)AlSi ₃ O ₈ (fältspat) | | 11 | 10 | 15 |
| KCl (sylvit) | 8 | | 2 | 1 |
| CaO (lime) | | 1 | | 2 |
| MgO (periklas) | | 1 | | |
| CaSO ₄ (anhydrit) | | | | 7 |
| K ₂ SO ₄ (arkanit) | 50 | 34 | 5 | 11 |
| K ₃ Na(SO ₄) ₂ (aftitalit) | 1 | | | |
| Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH) (apatit) | | 6 | 16 | 9 |
| Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂ (merwinit) | 10 | 8 | 19 | 13 |
| SiO ₂ (kristobalit) | 19 | 29 | 35 | 28 |
| Summa | 99 | 100 | 100 | 99 |

* Minst en signifikant närvarande fas kan inte identifieras

** för lite prov för identifiering med XRD

*** Stor (-viss) del amorft mtrl.

*Tabell 10. XRD-analys på läsida av beläggningssond (550°C).**Table 10. XRD analysis on leeward side of the deposit probe (550°C).***Beläggings-****sond, 550C, lä**

| | Halm: 100%*** | Halm/Trä: 75/25 | Halm/Trä: 50/50*** | Halm/Bark 75/25*** |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| KCl (sylvit) | | 57 | | 78 |
| K ₂ SO ₄ (arkanit) | | 22 | | 13 |
| K ₃ Na(SO ₄) ₂ (aftitalit) | | | | 3 |
| Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH) (apatit) | | | | 2 |
| Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂ (merwinit) | | | | 3 |
| Fe ₂ O ₃ (maghem./hematit) | | 20 | | |
| Summa | | 99 | | 99 |

* Minst en signifikant närvarande fas kan inte identifieras

** för lite prov för identifiering med XRD

*** Stor (-viss) del amorft mtrl. glas?

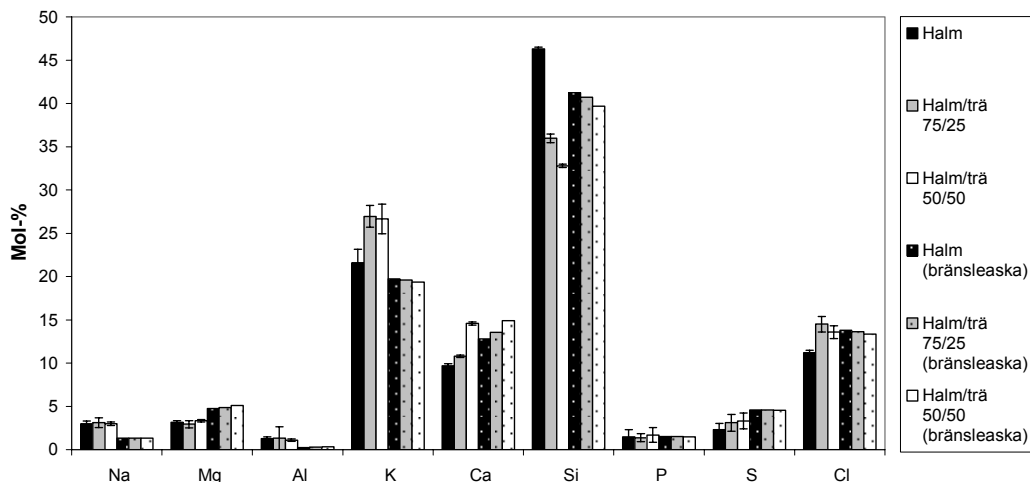
3.4 Flygaska

Den flygaska som har analyserats kommer från pannans 2:a drag, se Figur 6. Pannan rengjordes noggrant mellan varje försök för att undvika kontaminering från tidigare förbränningsförsök. I Tabell 11 redovisas hur flygaskan har avsatts normaliserat till 100 kg tillfört bränsle. I Figur 16 och Figur 17 visas SEM-analys för de genererade flygaskan. För jämförbarhetens skull så har en (teoretisk) bränsleaska lagts in i figurerna (se de prickiga staplarna). Noterbart är att halm/bark genererar en flygaska som innehåller främst Si, K, Ca och Cl med mindre koncentrationer av S, Mg, Na och P (2-5 mol-%). Generella trender för både trä- och barkinblandning är att andelen kalcium ökar medan andelen kisel minskar. XRD analyserna visar att KCl-faserna minskar från 55 till 35 mol-% vid inblandning av trä och bark och att faser som innehåller kalcium, t.ex. CaO (lime) och $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ (Mervinit), ökar något, se Tabell 12.

Tabell 11. Mängden flygaska efter förbränningsförsök normerat till gram aska per 100 kg bränsle.

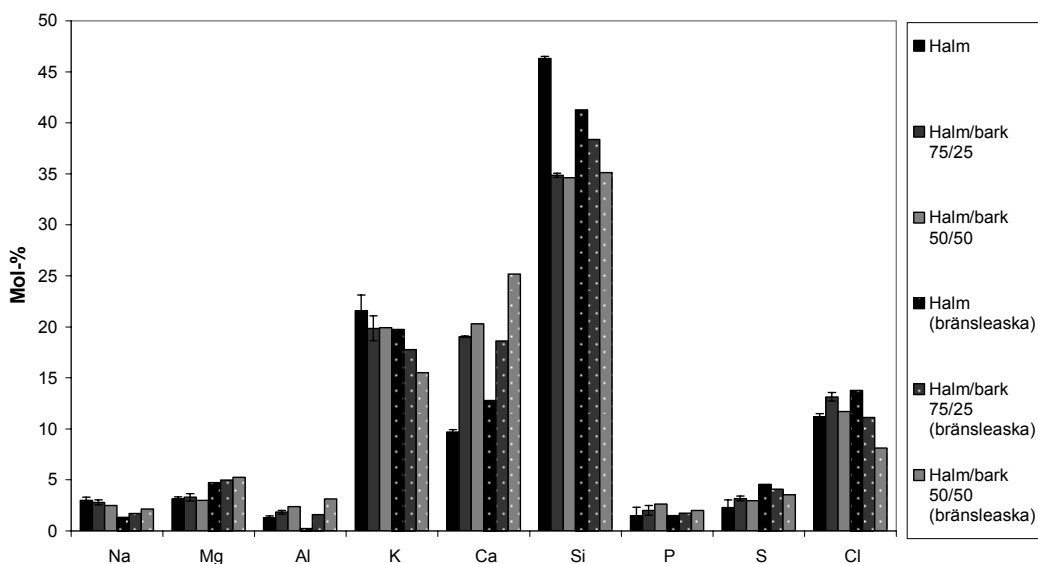
Table 11. Amount of fly ash generated, expressed in grams per 100 kg fuel

| Bränslemix | Flygaska (gram aska/100 kg bränsle) |
|-------------------|--|
| Halm/bark 50/50 | 666 |
| 100 % halm | 488 |
| Halm/trä 50/50 | 235 |
| Halm/trä 75/25 | 415 |
| Halm/bark 75/25 | 332 |



Figur 16. SEM-analys på flygaska från halm och trä.

Figure 16. SEM analysis of fly ash from straw and wood.



Figur 17. SEM-analys på flygaska från halm och bark.

Figure 17. SEM analysis of fly ash from straw and bark

Tabell 12. XRD-analys på flygaska från halm och bark.

Table 12. XRD analysis on fly ash from straw and bark.

| Flygaska | Halm: | Halm/Trä: | Halm/Trä: | Halm/Bark |
|--|------------|------------|-----------|------------|
| | 100%*** | 75/25*** | 50/50 | 75/25*** |
| SiO ₂ (kvarts) | 12 | 11 | 6 | 8 |
| (Na/K)AlSi ₃ O ₈ (fältspat) | | | | 3 |
| KCl (sylvit) | 57 | 46 | 40 | 36 |
| CaO (lime) | | 3 | 6 | 14 |
| MgO (periklas) | | 4 | 4 | 4 |
| CaCO ₃ (kalcit) | 3 | | 4 | 5 |
| K ₂ SO ₄ (arkanit) | 9 | 11 | 10 | 5 |
| K ₃ Na(SO ₄) ₂ (aftitalit) | 4 | 6 | 4 | |
| Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH) (apatit) | 6 | 8 | 8 | 13 |
| Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂ (merwinit) | 9 | 12 | 17 | 12 |
| Summa | 100 | 101 | 99 | 100 |

* Minst en signifikant närvarande fas kan inte identifieras

** för lite prov för identifiering med XRD

*** Stor (-viss) del amorft mtrl. glas?

3.5 Partikelbildning

3.5.1 Totalstofsmätningar

Totalstoffshalten varierar kraftigt mellan försöken, se Tabell 13. Vid samtliga försök minskade totalstoffshalten vid inblandning av trä- och barkbränslen. Det skall dock poängteras att ett normalt värde vid pulvereldning med rent träpulver ligger på ca 80 mg/Nm³ vid 6 % O₂. (tidigare opublicerade data från ETC). I dessa försök är samtliga halter över 500 mg/Nm³, vilket indikerar att stofthalten ökat markant jämfört med rent träbränsle. Stoffet består av 85- 90 % av K och Cl, därefter finns S och Na. XRD-analysen visar att stoffet domineras av tre olika faser, KCl (sylvit), K₂SO₄ (arkanit) och K₃Na(SO₄)₂ (aftitalit), se bilaga 2 och 3.

Tabell 13. Totalstoffhalt samt medelvärdet av O₂ under provtagning.

Table 13. Particle matter and oxygen content during trial

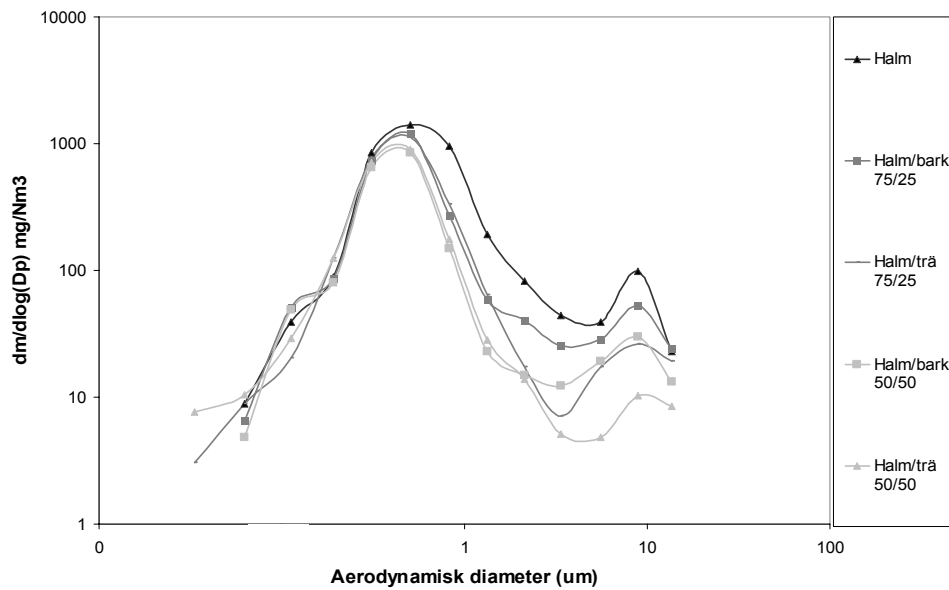
| Bränslemix | Totalstoff (mg/Nm ³ vid 6 % O _{2,t,g}) | O ₂ medelvärde (%) |
|---------------------|--|----------------------------------|
| 50 % halm 50 % bark | 542 | 6,5 |
| 100 % halm | 877 | 3,3 |
| 50 % halm 50 % trä | 430 | 3,2 |
| 75 % halm 25 % trä | 584 | 2,9 |
| 75 % halm 25 % bark | 547 | 3,9 |

3.5.2 Impaktormätningar

Resultat från impaktormätningar redovisas i Figur 18. Masskoncentrationen av partiklar mindre än 1 µm är i storleksordningen 88-97 % för samtliga försök. Vid 100 % halmeldning var andelen partiklar < 1 µm 87-88 % och med trä- och barkinblandning 94-97 %. Skillnaden kan förklaras av att trä- och bark genererar en låg mängd alkali

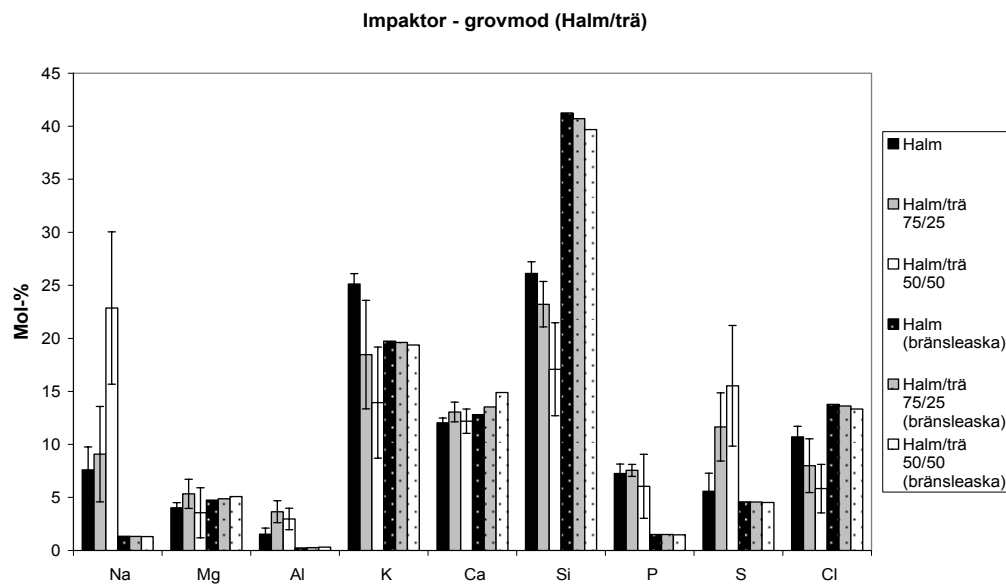
men samtidigt en liten andel större partiklar. Det bör dock tilläggas att i pannans konventionsdelar, tuber sedimenterar en del av de grövre partiklarna varpå andelen grovmod i impaktorn är relativt låg. De finaste partiklarna (finmoden) platta 2-4 med cut off på 0,63 – 0,191 μm samt plattor 6-8 med cut off på 0,507 – 1,338 μm för halm/träblandningarna domineras till största del av K och Cl, vilka tillsammans utgör ca 90 mol-%, resterande fördelas på Na och S. För halm/barkblandningarna kunde ett något mindre K- innehåll skönjs, men i övrigt noterades inga koncentrationsförändringar vid ökad trä- och barkinblandning på plattor 2 till 8. Vid ökande träinblandning kan en svagt ökande koncentration av kalium ses, vilket är tvärtemot bränsleanalysen. Samma gäller för både trä- och barkbränsleinblandning med avseende på svavelkoncentrationen. XRD-analysen på impaktorproverna från platta 2 till 8 domineras av KCl och K_2SO_4 och inga tydliga trender syns vid ökad inblandning av trä- och barkbränsle, se Tabell 14 och Tabell 15.

De grövre partiklarnas (från impaktorplatta 9-11 eller 2,124 – 5,545 μm) elementarsammansättning domineras av Na, K, Ca, Si, S och Cl samt även P och Mg. En kraftig ökning av både Na och S kan ses vid inblandning av både trä- och barkbränsle. Kalium- och kiselkoncentrationen minskar mycket när barkinblandningen ökas. Osäkerheterna i dessa mätdata, vilket ges av felstaplarna som motsvarar +/- en standardavvikelse, är dock relativt stora, se Figur 19 och Figur 20. För jämförbarhetens skull så har en (teoretisk) bränsleaska lagts in i figurerna (se de prickiga staplarna). Ingen XRD finns för de grova partiklarna.



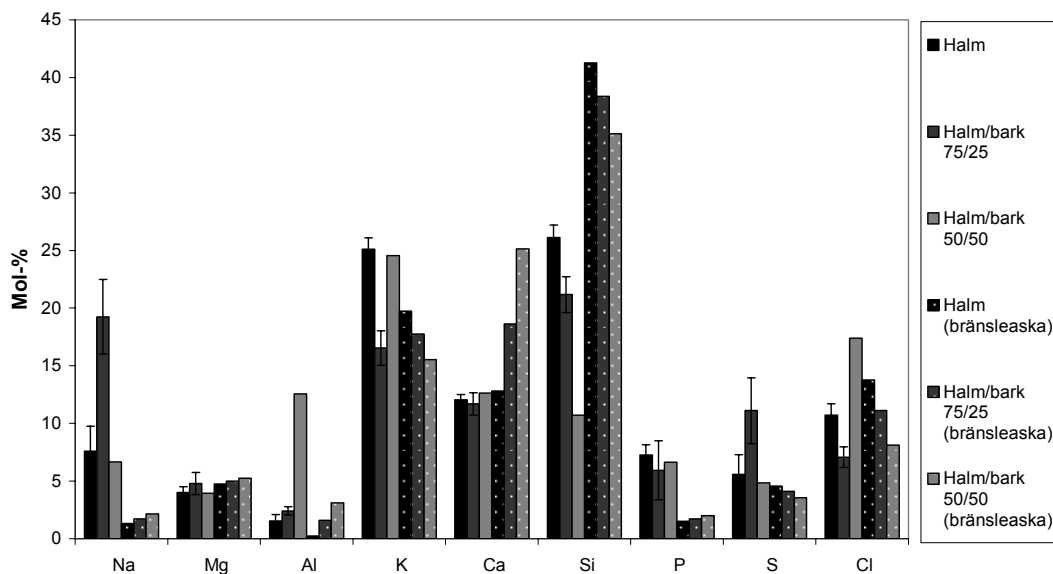
Figur 18. Partikelstorleksfördelning i rökgaser.

Figure 18. Particle size distribution of flue gas.



Figur 19. SEM/EDS-analys på grovmoden (2,124 – 5,545 μm) från halm och trä

Figure 19. SEM/EDS analysis on the coarse fraction (2,124 – 5,545 μm) for straw and wood



Figur 20. SEM/EDS-analys på grovmoden (2,124 – 5,545 μm) från halm och bark.

Figure 20. SEM/EDS analysis on the coarse (2,124 – 5,545 μm) for straw and bark.

Tabell 14. XRD-analys på impaktorns finmod (platta nummer 3,4 och 5).

Table 14. XRD analysis on impactor plates 3, 4 and 5.

| Impaktor finmod (3,4,5) | Halm: | Halm/Trä: | Halm/Trä: | Halm/Bark |
|--|-------|-----------|-----------|-----------|
| | 100 % | 75/25 | 50/50 | 75/25 |
| KCl (sylvit) | 78 | 78 | 72 | 75 |
| K ₂ SO ₄ (arkanit) | 13 | 14 | 20 | 16 |
| K ₃ Na(SO ₄) ₂ (aftitalit) | 9 | 7 | 8 | 10 |
| Summa | 100 | 99 | 100 | 101 |

Tabell 15. XRD-analys på impaktorns platta nummer 6 och 7

Table 15. XRD analysis on impactor plates 6 and 7.

| Impaktor plattor (6 och 7) | Halm: | Halm/Trä: | Halm/Trä: | Halm/Bark |
|--|-------|-----------|-----------|-----------|
| | 100 % | 75/25 | 50/50 | 75/25 |
| KCl (sylvit) | 84 | 86 | 77 | 81 |
| K ₂ SO ₄ (arkanit) | 10 | 10 | 18 | 12 |
| K ₃ Na(SO ₄) ₂ (aftitalit) | 5 | 4 | 6 | 6 |
| Summa | 99 | 100 | 101 | 99 |

Som ett stöd i analysen så har beräkningar på hur stor andel av bränslets kalium som förflyktigas genomförts baserat på impaktordata. Denna typ av ”massbalansberäkningar” kan användas som stöd i resonemanget kring kaliums

volatilitet vid sameldning med halm och trä- och barkbränslen, d.v.s. om kalium tenderar att bli mer volatilt (och därmed kunna mätas i impaktorn) eller om kalium hålls kvar i slagg, bottenaska och beläggningar tidigare i eldstaden (närmare brännaren).

Beräkningar visar att andelen ”bränsekalium” som återfinns i impaktorn, och som därför kan anses ha varit i gasfas tidigare i eldstaden, minskar något med ökad inblandning av trä- och barkbränsle. Detta är en indikation på bränsekalium tenderar att bindas upp och fastna i tidigare i eldstaden i något större utsträckning när trä- och barkbränsle sameldas med halm. Då beräkningarna är baserade på en impaktormätning per bränsemix skall resultat endast ses som indikativt, och det bör även understrykas att effekten av trä och bark på kaliums volatilitet är relativt liten. Resultatet ger dock ett visst stöd till tidigare påvisade resultat där beläggingsbildningshastigheten visat sig minska med ökad inblandning av trä- och barkbränslen.

4 Litteraturstudie av Danska erfarenheter från samledning med halm

4.1 Inledning

Detta kapitel fokuserar på danska erfarenheter av samledning mellan halm- och träbränslen, primärt baserat på pulvereldningsteknik. Materialet i detta kapitel är hämtat från en mer omfattande generell litteraturstudie om dansk halmeldning, och denna studie återfinns i sin helhet i appendix 3 (på engelska).

I litteraturen finns rapporterat att 13 olika kraftvärme- och värmeverk i Danmark använder halm i sin normala bränslemix, och flertalet av dessa är baserade på rosteldningsteknik (t.ex. Masnedø, Måbjerg). Den största samlade erfarenheten av samledning med halm i pulverform kommer från de danska anläggningar som normalt använder kol som bränsle, t.ex. Studstrupverket, och dessa erfarenheter finns beskrivna i tillgänglig litteratur ^[26-27]. Bland pulvereldade panntyper så finns mest erfarenhet av samledning mellan halm- och träbränslen från panna #2 (AMV 2) på Vattenfalls anläggning Amagerverket i Köpenhamn, och resterande delen detta kapitel fokuserar därför på erfarenheterna från just denna anläggning.

4.2 Anläggningsmodifieringar och erfarenheter från AMV 2

Redan 2003 konverterades AMV2 till att kunna elda en mix av kol och halm/biomassa. I Tabell 16 visas de anpassningar som gjordes på AMV2 för att kunna ta in halm/biomassa i bränslemixen.

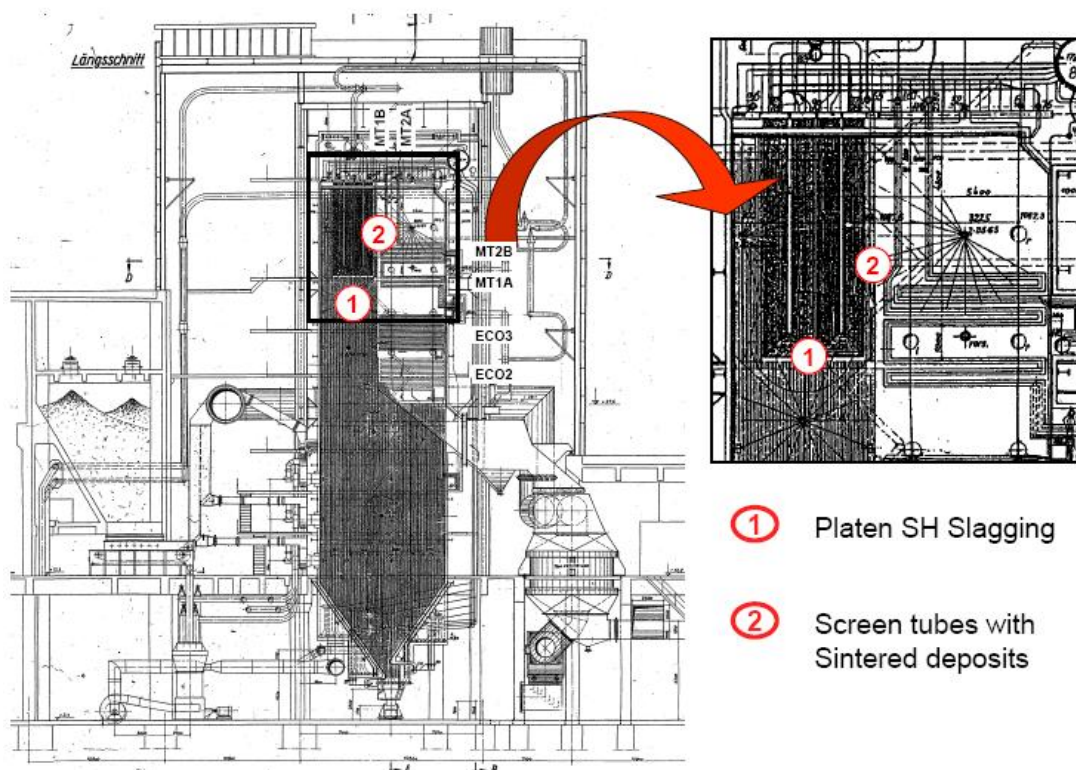
Tabell 16. Modifieringar på AMV 2 för anpassning till halm- och träbränslen

Table 16. Modifications made at AMV 2 for adaptation to straw and wood fuels

| Parameter /komponent | Före konvertering till halm/trä | Efter konvertering till halm/trä |
|----------------------|--|---|
| Panneffekt (MWel) | 143 | ~70% av den för kol/olja |
| Bränslen | Kol, eldningsolja | Kol, eldningsolja, halm, trä |
| Ångdata | 540 °C och 141 bar | 480 °C och 120 bar |
| Brännare | 12 (3x4) st låg-NOx-brännare (front wall-fired)) | Brännarna återanvändes men modifierades genom att minska längden på fastbränslelansen |
| Kvaranläggning | 3 st kolkvarnar från Loesche (LM 16) | Kvarnarna återanvändes men modifierades bl.a. genom att: (i) inloppsdiаметer ökades (ii) bär/primärluftsflödet i vertikal flödesriktning (iii) nya skruv- och cellmatare |
| Luftförvärmning | 2x regenerativ | Oförändrat |
| Rökgasrening | Elektrofilter | Oförändrat |

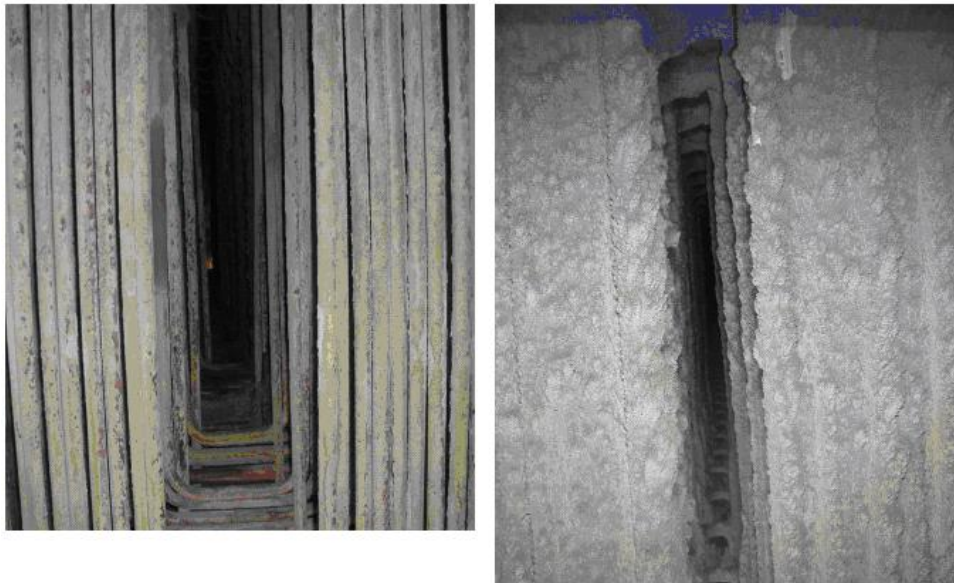
Erfarenheterna från den första tidens halmeldning från AMV 2 sammanfattas nedan:

- Pannan startades med eldningsolja och fastbränsle introducerades efter att andra kvarnen startats
- Stora problem med påslag på överhettare och screen-tuber, se Figur 22 och Figur 23. Överhettarna har en omgivande rökgestemperatur på 800-900°C och en materialtemperatur på 540°C. Screen-tuberna har en omgivande rökgestemperatur på 700°C och en materialtemperatur på 350°C.
- Överstora halmbränslepartiklar brann/glödde i pannbotten vilket orsakade problem med slagning i bottenaskutmatningen
- Rökgestemperaturen steg från 130 °C till 170 °C under den första drifttiden
- Ökade stoftemissioner genom skorstenen. Orsaken var den ökade rökgestemperaturen vilket försämrade verkningsgraden på elektrofiltret



Figur 21. Områden där problem med beläggningar uppstod efter att halmbränsle introducerats vid AMV 2 – överhettare (1) och screentuber (2)

Figure 21. Boiler regions where problems with deposits and sintering were observed at AMV 2 when straw was introduced - platen super heaters (1) and screen tubes (2)



Figur 22. Beläggningar på överhettarna före (vänster) och efter (höger) halmeldning

Figure 22. Deposits on the plate super heaters before (left) and after (right) firing with straw dust



Figur 23. Beläggningar på screen-tuberna före (vänster) och efter (höger) halmeldning

Figure 23. Deposits build-up on screen tubes in the 2:nd boiler pass before (left) and after (right) firing with straw dust

Från Figur 22 och Figur 23 förstår man att problemen med askrelaterade driftproblem inledningsvis var mycket stora. För att råda bot på dessa problem genomfördes ytterligare ett par anläggningsmodifieringar:

- Vattensotblåsare installerades i anslutning till eldstadsväggarna

-
- Sotblåsning installerades nära screen-tuberna
 - Tvärsnittsarean på bottenaskutmatningen ökades
 - Elektrofiltret utrustades med kulsotning och slagor/vibratorer

Ovanstående modifieringar möjliggjorde kontinuerlig drift på halm i ca 2 veckor utan behov av rengöringsstopp. För att ytterligare öka på antalet drifttimmar mellan varje rengöringsstopp genomfördes försök där halm sameldades med träbränslepellets. Erfarenheterna från denna sameldning var mycket positiva och möjliggjorde kontinuerlig drift i ca 1 månad mellan varje rengöringsstopp. AMV 2 togs ur drift 2008/2009 och ersattes med den nybyggda AMV 1 vilken designats för att kunna gå på full panneffekt såväl olja och kol som biomassa - primärt halm och trä.

5 Resultatanalys

5.1 Driftförhållanden och provtagningsmetodik

För att möjliggöra en jämförelse av askrelaterade driftproblem för respektive bränslmix är det viktigt att driftförhållanden och provtagningsmetodik kan utföras med en bra repeterbarhet. T.ex. så får de anses vara mycket viktig att ta ut de olika askfraktionerna vid likvärdiga temperaturerna för att få jämförbara resultat.

Driftförhållandena för de olika förbränningsförsöken varierade något vad gäller syrekonzentration i rökgaser och sluttemperatur på både gaser och ugnens keramik. Den högsta syrekonzentrationen var 7,6 vol-% det första försöket med halm/bark 50/50 medan den lägsta koncentrationen på 3,4 vol-% fanns vid halm/trä 75/25. Trots en skillnad på nästan 4 vol-% så görs bedömningen att detta ej bör påverka resultatens jämförbarhet med avseende på askkemin. Trenden för samtliga förbränningsförsök är att syrehalten tenderar att minska något allt eftersom förbränningsförsöket pågår. Likaså stiger NO_x, SO₂ och HCl- värdena varpå försöket pågår. NO_x ökningen som successivt ökar beror troligtvis på en termisk mekanism medan SO₂ och HCl kan bero på något ändrad kemisk sammansättning på gasemissionerna. Vid förbränning i hög temperatur kan låga halter av fosfor reagera och bilda kaliumfosfater vilket kan frigöra mer HCl och SO₂.

Den största variationen på den keramiska ugnens sluttemperatur mellan de olika försöken var ca 60 °C. Motsvarande största spridningen i keramikens sluttemperatur var ca 95 °C där den högsta temperaturen, 1165 °C, fanns vid halm/trä 75/25 och den lägsta, 1070 °C, fanns vid andra försöket (replikatet) på halm/bark 50/50. Värt att nämnas är att sluttemperaturerna påverkas av totala tiden för varje försöksserie och denna varierade något mellan de olika försöken. I projektet kan provtagningsmetodiken för de olika askfraktionerna anses vara likvärdig för alla bränslmixar, t.ex. skrapades slaggen ut vid en keramiktemperatur på ca 1000 °C (d.v.s. inte sluttemperaturen) och alla försök och impaktormätningar gjordes vid en rökgastemperatur på 100 °C. Beläggningssondernas provringar exponerades under ca 2 timmar, vilket kan anses vara en något för kort tid i storskalig miljö. I labförsök kan det vara acceptabelt men det finns alltid en liten risk att beläggning faller av sonderna när dessa tas ut från eldstaden vilket noggrant kontrollerades för att undvika osäkerheter.

5.2 Bränsleval och bränslepreparering

Valet av att samelda halm med bark och trä gjordes dels utifrån de (positiva) danska erfarenheterna från sameldning mellan halm och trä och dels med målet att studera hur ett typiskt svensk bränsle med mer aska och kalcium, d.v.s. bark, kunde påverka de positiva effekterna ytterligare. Baserat på ursprungsbränslena (halm, bark och trä) så kunde följande trender förväntas i de olika bränslmixarnas askor: Si, Cl och K minskar i koncentration medan Ca ökar kraftigt men även att Na och P ökar något vid ökad inblandning av bark- och träbränsle. En jämförelse mellan den olika halmen/trä- och halm/bark-mixarna visar att klor- och svavelkoncentrationerna är på liknande nivåer (mg/kg TS) för alla bränslmixar. Barkmixarna har dock mer än dubbelt så mycket

kalcium, uttryck i mg/kg TS, än när trä används. Vidare är koncentrationen av både Si och K mellan 1,5 – 2 ggr högre, uttryck i mg/kg TS, när bark används. Detta visar att betydligt mer askbildande ämnen matas in i eldstaden med halm/bark jämfört med halm/trä. I samtliga fall ger dock 100 % halm den största tillförseln av askbildande ämnen till eldstaden.

En jämförelse av kompositionen på den halm, - bark- och träbränsle som användes i detta projekt med litteraturdata (Värmeforsks bränslehandbok) visar att alla bränslen har representativa askhalter för halm, bark och trä. Den i projektet använda barken har dock en väsentligt högre koncentration av Si, Al, K och Na än de nivåer som finns givet i litteraturreferensen (värmeforsks bränslehandbok). Det träbränsle som användes följer bränslehandboken förutom ett lite högre Ca- innehåll och något lägre Si-halt.

För att underlätta utvärdering och jämförbarhet gällande bränslemixarnas askkemi är det viktigt ha en liknande partikelstorleksfördelning på de pulveriserade bränslena, detta då det påverkar hur snabbt ett bränsle brinner i flammen. Bränslena som levererades i pelletsform sönderdelades med en hammarkvarn. Under malningsförsöken så märktes tydliga skillnader på energibehovet för att sönderdela halm bark och träpellets, men trots detta så visar partikelstorleksanalysen att bränslen med en liknande storleksfördelning kunde produceras. Övriga observationer på bränslena är att de har en olikartad partikelstruktur. Bark har en rundare partikelstruktur medan trä och speciellt halm har en nålformad partikelform. Det sistnämnda bidrar till att valvbildningstendensen minskar och bulkdensiteten ökar.

5.3 Slagg på brännarkona och bottenaska

Utöver att analysera slaggens och bottenaskans element- och fas-sammansättning så görs även en okulärbesiktning av förbränningsugnen efter varje förbränningsförsök. Det som tydliggörs mest från den okulära analysen är att bottenaskan under och framför pulverbrännaren har högre porositet och en mjukare slagg vid högre inblandningsgrader. Noterbart är att vid förbränningsförsöket med 50/50 halm/bark löste bottenaskan upp en 10 mm mycket hård smälta från tillfälle då 100 % halm hade förbränts. Upplösningen var så markant att den keramiska förbränningsugnen var helt fri från smälta exakt där högen med aska från halm/bark försöket legat. Detta anses ej ha påverkat analysresultatet för bottenaskans elementarsammansättning då endast en delmängd av denna skrapades ut från ”toppen av bottenaskhögen” som bildats i eldstaden. Resultatet i sin helhet gör att sintringsgraden sänks från en 4 (totalt sintrad aska) till nivå 3 och 2 då trä- och barkbränslen blandas in i halm. Den lägsta sintringsgraden återfinns vid de högre inblandningsgraderna.

Den förväntade utspädningen av halmaskan var tydligast för bottenaskan, och då vid inblandning av bark. Kraftigaste koncentrationsändringarna fanns i kalcium (som ökade) och kisel (som minskade) vid ökad trä- och barkinblandning.

XRD-analysen visade också tendenser att askans sammansättning ändras från ett Si-K-baserat system till ett där Ca-Si-baserade faser förekommer i större utsträckning, speciellt då två nya faser i form av dubbel- och trippelkarbonaterna $\text{CaK}_2(\text{CO}_3)_2$ och $\text{Ca}_2\text{K}_2(\text{CO}_3)_3$ kan ses. Dessa karbonater har en positiv påverkan för att höja askans smälttemperatur vilket är positivt när man eldar med halm som har lägre

asksmälttemperatur. I kombination med en minskad mängd aska som tillförs eldstaden är det också detta resultat som förklarar att askan bildar mindre och porösa beläggningar. Bottenaskans sammansättning och karaktäristik påverkades positivt vid ökad inblandning av bark- och träbränslen.

För en svensk anläggning, där man utgår från trä/barkbränsle som referens, borde det i praktiken vara möjligt att hantera en uppåt 50 vikts-% halm i bränslemixen utan att få alltför svår sintring av slagg i bottenaska (mängden avsatt bottenaska/slagg kommer dock att öka).

5.4 Beläggningar och flygaska

Trenderna visar att en minskad beläggningstillväxt med ökad andel trä och barkinblandning var tydlig för alla förbränningsförsök. Vid 25 % inblandning av både trä och bark blev beläggningstillväxten på 250 °C sonden minst för barkmixen (halm/bark 75/25) medan en 25 % träinblandning ger något mindre reduktion på beläggningstillväxten. När 50 % inblandning av trä och bark tillförs blir effekten ännu starkare än än inte dubbleras. Kompositionen på beläggningarna vid båda fallen är relativt lika, dock har halm/bark-fallet en något mindre andel av KCl och något högre andel CaO, och detta kan vara en förklaring till att halm/bark uppvisar en lägre beläggningstillväxt.

För 550 °C ger en 25 % träinblandning större reduktion i beläggningstillväxten än barkinblandning. Vid 50 % -iga inblandningsgrader är skillnaderna mellan trä och bark mindre än de 25 % -iga. Den högsta reduktionen gav halm/trä 50/50 som för både 550 °C och 250 °C nära på halverade beläggningstillväxten. Kompositionen på beläggningarna vid 25 % inblandning av bark och trä skiljer sig åt endast på andelen Ca och Si, där halm/bark 75/25 uppvisar dels en något högre Ca och dels en något lägre Si än halm/trä 75/25. Kombination av en minskad mängd aska som tillförs eldstaden och den ökade andelen kalcium i askan får fungera som förklaring till de positiva effekterna på beläggningstillväxt vid 550 °C som har påvisats för inblandning av bark och trä i halm. Sammansättningen av askan ändras i och med att trä och bark blandas in men effekten får anses vara en ren utspädningseffekt då ingen indikation på att nya och mer stabila faser (med högre smälttemperaturer) bildats. Samma resonemang kan antas gälla vid en jämförelse av effekterna mellan bark och trä, men här har halm/bark mer alkali än halm/trä och detta medför en högre beläggningstillväxt vid 550 °C.

Jämfört med de beläggningar som är förväntade med rent träbränsle och/eller rent barkbränsle (vilket alltså ej eldats i detta projekt) så får beläggningstillväxten, trots att den reducerats med inblandning av både trä och bark, anses vara relativt hög. Om man antar att beläggningstillväxten avtar linjärt med ökat trä/bark-inblandning borde det i praktiken innebära att en halminblandning mellan 15-25 vikt-% kan vara av intresse för en svensk anläggning designad för trä/barkbränslen m.a.p. beläggningstillväxt.

Det skall dock nämnas att beläggningstillväxt i detta projekt har exponerats under två timmar långa mätserier, vilket för en verklig pannanläggning kan anses som mycket kort. Mätningar av beläggningstillväxt kan också i storskalig miljö, pannor innehålla vissa osäkerheter som, t.ex. att beläggning delvis kan lossna från beläggningstillväxten men även att tillväxthastigheten sannolikt inte är linjär med tiden. I detta projekt har beläggning byggts upp från en ren beläggningstillväxt, varpå tillväxten under så kort tid kan vara högre. Detta gör att beläggningstillväxtdata skall tolkas med dessa osäkerheter i

åtanke. Vid demontering av provringarna noterades dock att hela beläggningstillväxten fanns med och att inte skalning av prov inträffat.

Flygaskan domineras av Si, K, Cl och Ca vid både trä- och barkinblandning. Kaliumkoncentrationer ökar med träinblandning medan den minskar om bark blandas in i halmen. Andelen Ca-baserade faser som CaO (lime) och $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ (mervinit) och i flygaskan ökar, speciellt vid barkinblandningen vilket är positivt då dessa föreningar vanligtvis är porösare och har lägre vidhäftningsförmåga på panntuber.

5.5 Partikelbildning

Totalstoffkoncentrationen minskade från ca 870 mg/Nm^3 för 100 % halm (vid 6 % O_2) till nivåer mellan $430 - 580 \text{ mg/Nm}^3$ för de olika trä- och barkinblandningarna.

Från resultatet framgår att koncentrationen av partiklar i impaktorns grovmod reduceras kraftigare än koncentration av Na+K i ingående bränsle med ökad inblandning av trä och bark. Då Na och K kan antas vara de element som utgör största delen av de fina partiklar som genereras vid förbränning av biobränslen så är detta en indikation på att både Na och K binds upp/reagerar tidigare i eldstaden när bark och trä sameldats med halm (jämfört med enbart halm) och bidrar därför mindre till det som mäts/fångas upp i impaktorn. Detta är en del till reducerad beläggingsbildning.

De partiklar som fångas upp i en impaktor kan förmodas ha varit i gasfas i den heta förbränningsdelen vilka senare återkondenserar och kan fastna som beläggning i pannans konvektiva delar. Impaktorplatta nr 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9 och 10 har först analyserats i SEM. Platta 2- 4 "finmoden" har en storleksfördelning mellan $0,063 - 0,191 \mu\text{m}$. Platta 6- 8 har en storleksfördelning mellan $0,507 - 1,338 \mu\text{m}$. De större partiklarna "Grovmoden" platta 9- 11 har en storleksfördelning mellan $2,124 - 5,545 \mu\text{m}$.

För att bestämma partiklarnas storleksfördelning i rökgaserna användes en 13-steps lågtrycksimpaktor från Dekati Ltd. Impaktorn storleksfördelar partiklarna efter deras aerodynamiska diameter i intervallet $0,03 - 10,3 \mu\text{m}$. Provtagningen utfördes i rökgaskanalen efter pannan vid en rökgastemperatur på 100°C . Provtagningssondens diameter var anpassad för att uppnå isokinetiskt förhållanden vid provtagningen. Impaktorn värmdes till 150°C före provtagningen

5.6 Jämförelser mot Amagerverket

I Amagerverket uppstod en hård beläggning i och kring screentuberna som har en ångtemperatur på ca 350°C . Omgivningstemperatur i detta område är ca $700 - 800^\circ\text{C}$ vilket är något lägre än de temperaturer som vi exponerat den heta sonden för. I den okulära besiktningen som gjordes efter varje försök noterades att i fallet 100 % halm fanns en sintrad beläggning på denna tubs vindsida. Beläggningen är sintrad i botten och grovt granulär med något hård struktur. För de övriga bränslemixerna återfinns inte denna sintring på den heta sondens vindsida.

6 Slutsatser

Inblandning av träbränslen har vid samtliga försök haft någon positiv effekt. Generellt kan sägas att en koncentrationsökning av Ca och en koncentrationsminskning av K och Si kan ses bottenaska, beläggningar och flygaska (på mol-% basis). Detta positivt för askrelaterade driftproblem med rent halm som referens. I det stora hela kan de skillnader i askans sammansättning påstås vara en mer eller mindre tydlig utspädningseffekt.

Från de sex olika askfraktioner som analyserats påvisar bottenaskan den största skillnaden vilket bekräftas via de kemiska analyserna på aska/slagg men även den okulära besiktningen visar att askan är väsentligt mer porös och mjuk. Förutom en ren utspädningseffekt finns även vissa tendenser till att halmaskans Si-K-baserade asksmälta övergår till att innehålla mer Si-Ca-baserade faser. Detta märks tydligast i bottenaskan vid inblandning av bark.

Beläggningstillväxten på de kylda sänderna reduceras vid inblandning av trä och bark och effekten blir störst i de fall där 50 % träbränsle blandats in med en halvering av beläggningen som följd. Jämfört med de beläggningar som är förvänta med rent träbränsle och/eller rent barkbränsle (vilket alltså ej eldats i detta projekt) så får beläggningstillväxten, trots att den reducerats med inblandning av både trä och bark, anses vara relativt hög. Beläggningens karaktär har förändrats till att bli mer porös vilket kan bero på ökningen av Ca (mol-%) samt minskningen av K (mol-%) i beläggningarna. Detta är ett resultat som kan ses i alla försök med inblandning av trä eller bark.

Totalstoftsnivåerna sjunker från ca 1000 mg/Nm³ vid 6 % O₂ t.g till ca 450 mg/Nm³ vid 6 % O₂ t.g 50 % inblandning av trä och bark.

Rökgasernas partikelstorleksfördelning består till mer än 88 % av partiklar < 1 µm, dessa partiklar består främst av K och Cl samt en låg andel S och Na (mol-%). Koncentrationen av Cl minskas vid inblandning av bark och trä.

Andelen flygaska minskar när trä- bark tillsätts eftersom en större del binds upp i bottenaskan. En minskad total askhalt på grund av utspädningseffekten ger också ett bidrag till minskad flygaska.

De danska erfarenheterna visar på att underhållet på en halmeldad anläggning är omfattande. De områden som varit mest utsatt är konvektionsdelar där tuber och värmeväxlarpaket helt sätter igen. Under ett försök med 50 % träinblandning kunde drifttiden förlängas med 3 veckor. Från 1 vecka med halm till ca 4 veckor i samma anläggning. För att förlänga drifttid och undvika stopp varje vecka med halm installerades extra vattensotblåsare i eldstadsväggarna samt vid screen-tuberna. Vidare ökades tvärsnittarean på askutmatningen i botten och elektrofiltret utrustades med kulsoining samt slagor och vibrator.

7 Rekommendationer och användning

Följande rekommendation baserar sig på de försök och analyser som har gjorts i projektet.

Att blanda in bark eller träbränsle i halm gav alltid någon form av positiv verkan. Mestadels visar sig detta i en mindre sintrad slagg i bottenaskan men även minskad beläggningstillväxt. I detta projekt har 100 % halm fått stå som referens och detta är något som inte är riktigt representativt för svenska anläggningar. I en svenska pulvereldad anläggning skulle man rimligtvis utgå från 100 % träbränsle som referens och utifrån det tillsätta stegvis mer och mer halmbränsle. Baserat på resultaten från både bottenaskans karaktär och beläggningsbildningshastighet så är en lägre inblandning av halm än den som gjorts i detta projekt att rekommendera. Det askrelaterade driftsproblem som får anses ge upphov till den största begränsningen är beläggningsbildningen, och det är denna som i praktiken reducerar halminblandningsgraden till mellan 15-25 vikt-%. Storskaliga pannor som har designats mot halm bör med fördel kunna eldas med en 50 % trä eller barkinblandning, medan pannor med träbränslen som grunddesign rekommenderas att man börjar med 15-25 % halminblandning beroende på vilket rökgasreningssystem man har.

Baserat på de danska erfarenheterna så bör de anläggningsägare som funderar på att introducera halm i sin panna även överväga att installeras extra vattensotblåsare i eldstadsväggarna samt vid eventuella screen-tuber. Ytterligare modifieringar av bottenaskutmatningen bör tas i åtanke samt att även elektrofiltret kan komma att behöva extra kulsotning och/eller slagor/vibratorer.

8 Förslag till fortsatt forskningsarbete

För att använda resultaten från projektet är arbetsgruppen mycket intresserade av att hitta referensanläggningar där halm kan introduceras och där ett Etapp 2 projekt kan utgöra mätningar i storskaliga anläggningar. I Etapp2 ska man följa upp och rapportera dessa resultat och rön. En mindre mätserie med 15-25 % halminblandning och rent trä borde genomföras för att täcka in de missade luckor som finns inom pulvereldning med halm och träbränslen.

9 Litteraturreferenser

- [1] Forsberg, M., m.fl., Jordbruket som leverantör av åkerbränsle till storskaliga kraftvärmeverk – fallstudie Värtan, 2007, JTI-rapport 361
- [2] Vattenfall A/S (Danmark), webbsida, http://www.vattenfall.dk/www/vf_dk/vf_dk/916035vores/916053vatte/916711vores/916729amage/index.jsp, citerad 2008-02-06
- [3] Berg, M. et al, (Vattenfall A/S, Thermal Power), “Biomass and secondary fuels in Denmark, history and perspective”, VGB-konferensen “Power plants in competition 2007”, 25-26 april 2007, Hamburg
- [4] Berg, M. et al. Experience with Straw Dust Firing at Amager 2, VGB PowerTech 5/2007 p. 93-95
- [5] Berg, M. et al ”Förstudie sammanställning och syntes av kunskap och erfarenheter om grödor från åker till energiproduktion, SVF 1009, 2007, ISSN 1653-1248
- [6] Strömberg, B., Bränslehandboken, 2005, Värmeforsk, SVF-911
- [7] Sander, B., 1997. Properties of Danish Biofuels and the Requirement for Power Production. Biomass & Bioenergy, 12, 177-183
- [8] Henderson, P. m-fl., Kunskapsläget beträffande högtemperaturkorrosion i ångpannor för biobränsle och avfall, 2006, Värmeforskrapport 992
- [9] Williams R; Project 1.1 – Technology Assesement for Biomass Power Generation – UC Davis, Task 1.1 Draft Final Report, October, 2004
- [10] Nikolaisen L; Straw Energy Production – Technology – Environment Economy, The Centre for Biomass Technology, Köpenhamn, 1998
- [11] Hering T; Stroh- und Ganzpplanflanzenverbrennung am Biespiel der Strhheizwerke Schkölen un Jena, Biomasse Tautenhain maj 2001, 114-126
- [12] Sörensen L H; Straw-fired Combined Heat and Power Plant“, Gulzower Fachgesspräche Band 17 Energetische Nutzung von Stroh, Ganzflanzengetreide und weiterererer halmgutartiger Biomasse Tautenhain, maj 2001, 103-113
- [13] Experimental studies on bed agglomeration during fluidized bed combustion of biomass fuels, PhD Thesis, Umeå University, 1999
- [14] Lin W.; Dam-Johansen, K., In Agglomeration in fluidized bed combustion of biomass-Mechanisms and co-firing with coal, Proc Int. Conf. Fluid Bed Combustion 15th, 1999, pp1188-1191
- [15] Henderson P, Ifwer K, Stålenheim A, Montmegomery M, Högberg J & HJörnhede A, Kunskapsläget beträffande högtemperaturkorrosion I ångpannor för biobränsle och avfall, Värmeforsk 992 december, 2006
- [16] Ivarsson; E. Nilsson, C., Smälttemperaturer hos halmaskor med respektive utan tillsatsmedel, Special Report 153, Swedish University of Agricultural Sciences, department of Farm buildings (1998)
- [17] Steenari, B. M., Lindqvist, O. Biomass and Bioenergy, 1998, 14, 67-76

-
- [18] Wilén, C. Staahlberg, P. Sipila, K.; Ahokas, J. *Energy Biomass and Wastes*, 1987, 10, 469-484
- [19] Turn, S. Q. et al., A review of sorbent materials for fixed bed alkali getter systems in biomass gasifier combined cycle power generation applications, *Journal of the Institute of Energy*, 71, 1998, 163-177
- [20] Raask, E, *Mineral Impurities In Coal Combustion*, 1985
- [21] Nordin, A. Öhman, M. Skrifvars, B-J. Hupa, M. Agglomeration and defluidization in FBC of biomass fuels - Mechanisms and measures for prevention. (1996), In *Applications of advanced technology to ash-related problems in boilers*. Ed. Baxter, L., DeSollar, R., Plenum Press, NY, pp 353-366.
- [22] Lin W.; Dam-Johansen, K., In *Agglomeration in fluidized bed combustion of biomass-Mechanisms and co-firing with coal*, Proc Int. Conf. Fluid Bed Combustion 15th, 1999, pp 1188-1191.
- [23] Heinzl, T. et al. Investigation of slagging in pulverized fuel co-combustion of biomass and coal at a pilot-scale test facility, *Fuel Processing Technology* 54, 1998, 109-125
- [24] Baxter, L. Biomass-coal co-combustion: opportunity for affordable renewable energy, *Fuel* 84, 2005, 1295-1302
- [25] Zheng Y. et al, As transformation during co-firing coal and straw, 2007, *Fuel*, 86, 1008-1020
- [26] Theis, M. et al. Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels. Part 1: Deposition rates, *Fuel*, 85, maj 2006, 1125 – 1130
- [27] Paulrud S; “Upgraded biofuels-effects of quality on processing, handling characteristics, combustion and ash melting”, Unit of Biomass Technology and Chemistry, Swedish Univ. of Agricultural Sciences, Umeå, 2004
- [28] Öhman M, Hedman H, Inverkan av låginblandning av additiv vid förbränning av stamvedspelletts för motverkande av slagging i eldningsutrustningen, STEM P13674-1, 2003

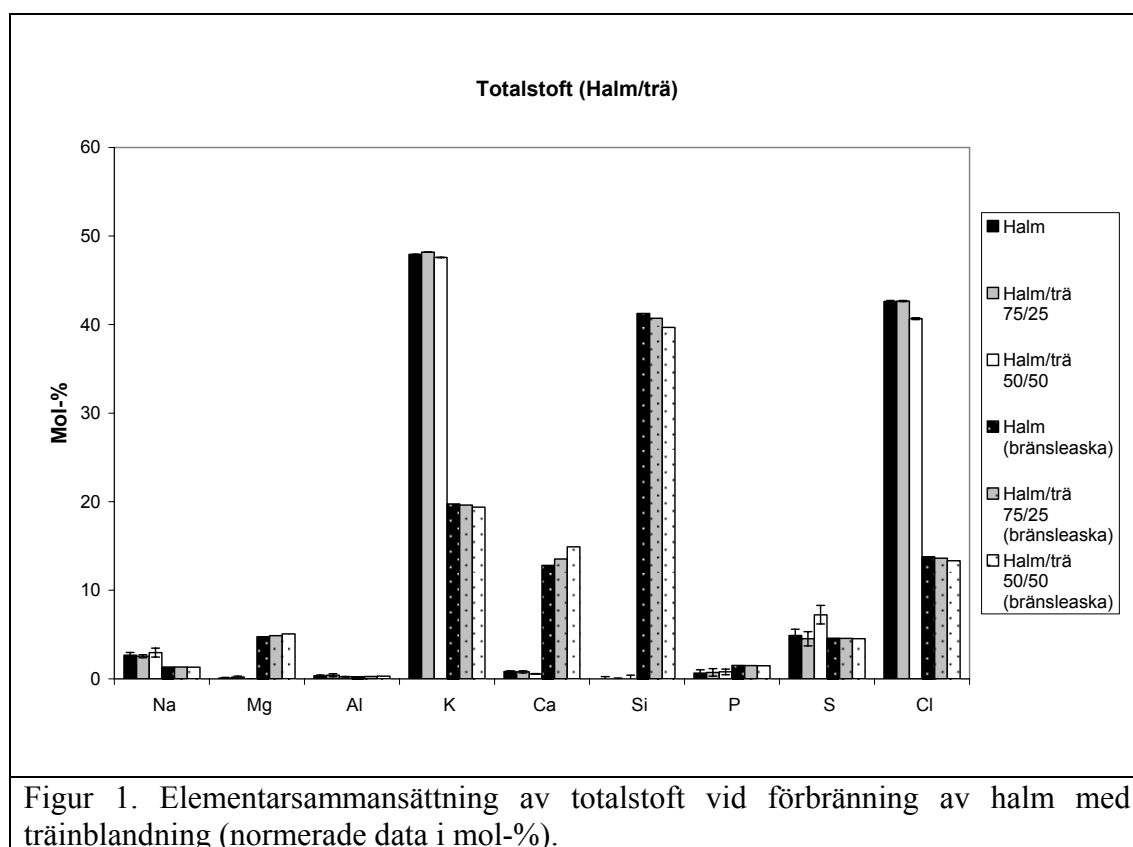
Bilagor

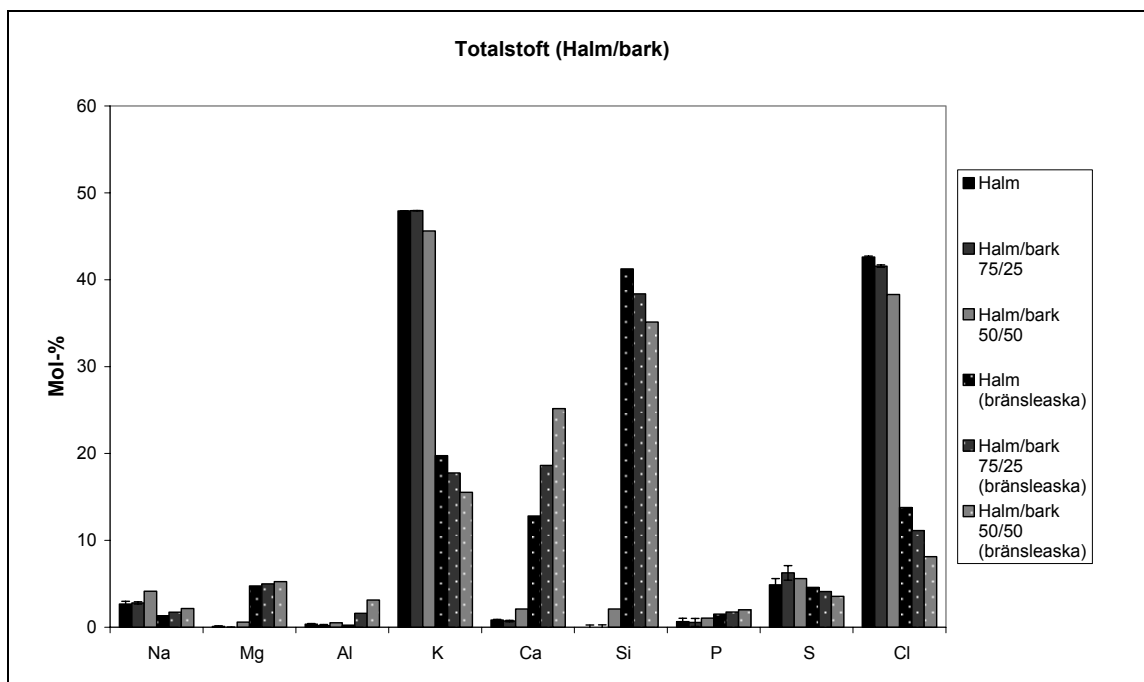
A SEM/EDS- analyser

I bilaga A redovisas SEM/EDS-data på de olika askfraktionerna i mol-%. En teoretisk bränsleaska (baserat på bränslets torrsubstans uttryckt i mol-%) visas också i alla figurer.

Totalsoft

Sammansättningen på totalstoftanalysen, se figur 1 och 2, domineras av K, Cl, S och Na, dock skedde inga större förändringar skedde i elementarkompositionen när trä- och/eller barkinblandningen ökade. Noterbart är att svavelkoncentrationen visar en svagt ökande trend vid ökad inblandning av både trä- och barkbränsle, trots att bränsleaskanalysen indikerar att S bör minska.

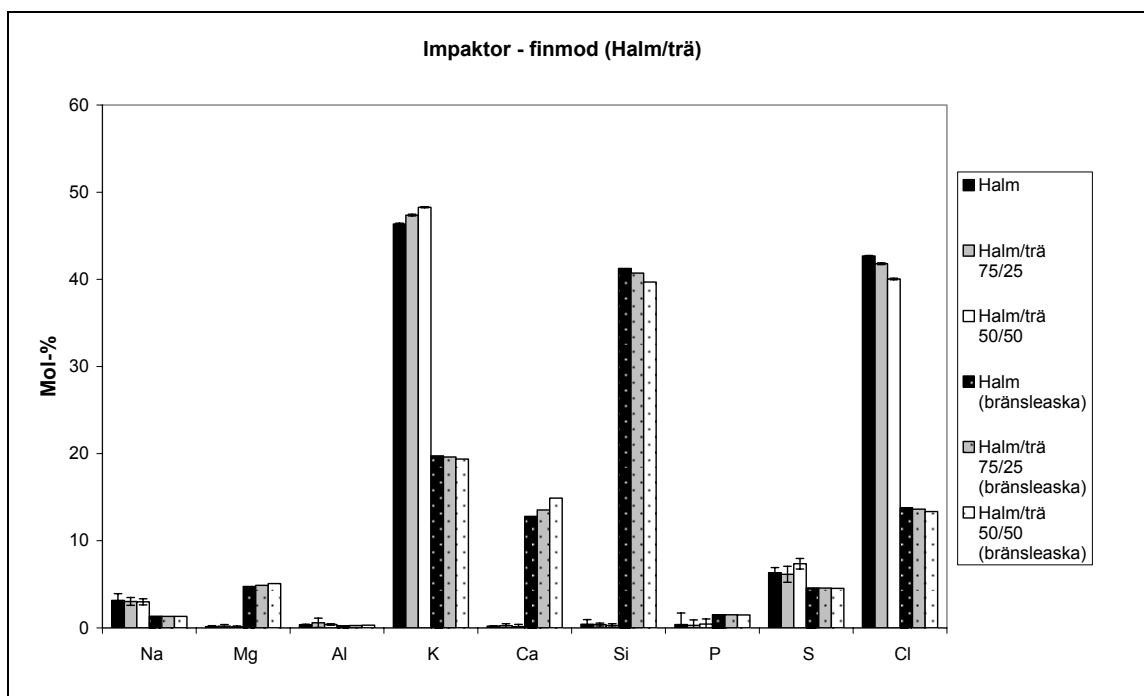




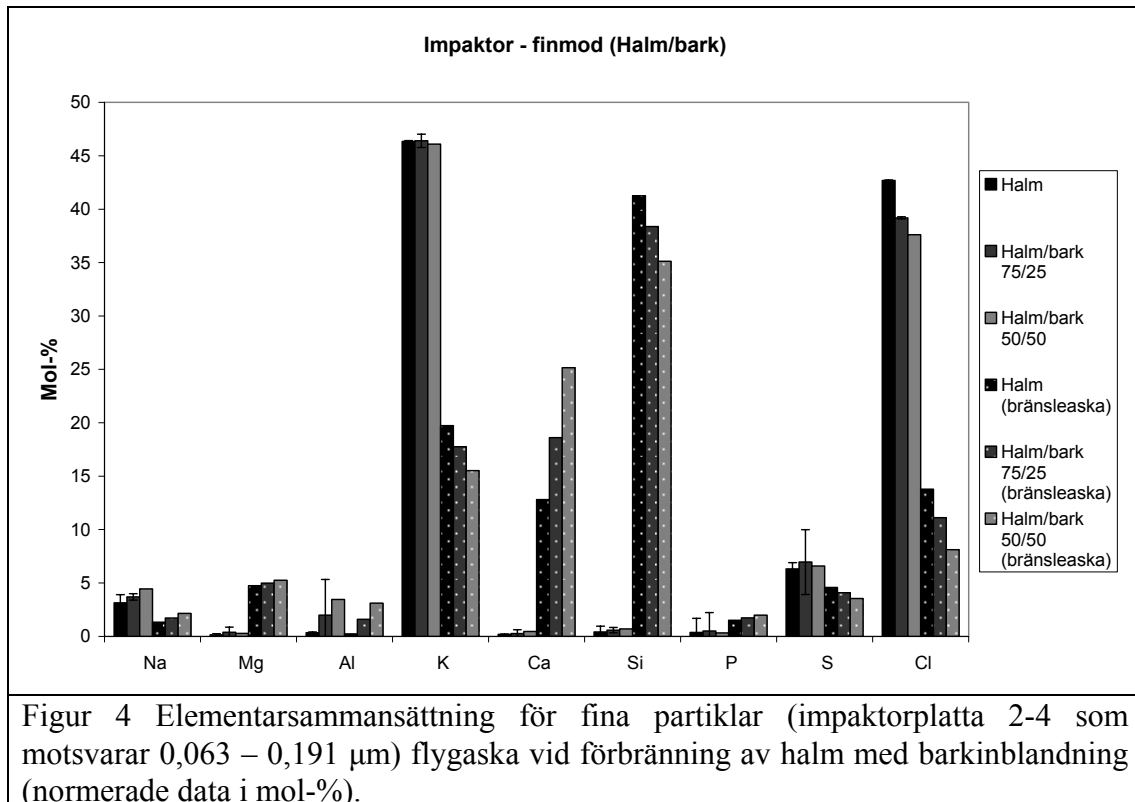
Figur 2. Elementarsammansättning av totalstoff vid förbränning av halm med barkinblandning (normerade data i mol-%).

Impaktor - finmod

De fina partiklarna (0,063 – 0,191 μm) domineras av K, Cl, S och Na, se figur 3 och 4. Inga tydliga trender eller större koncentrationsförändringar kan noteras vid ökad trä- och barkinblandning. Vid ökande träinblandning kan en svagt ökande koncentration av kalium ses, vilket är tvärtemot vad bränsleaskanalysen visar. Samma gäller för både trä- och barkbränsleinblandning med avseende på svavelkoncentrationen.

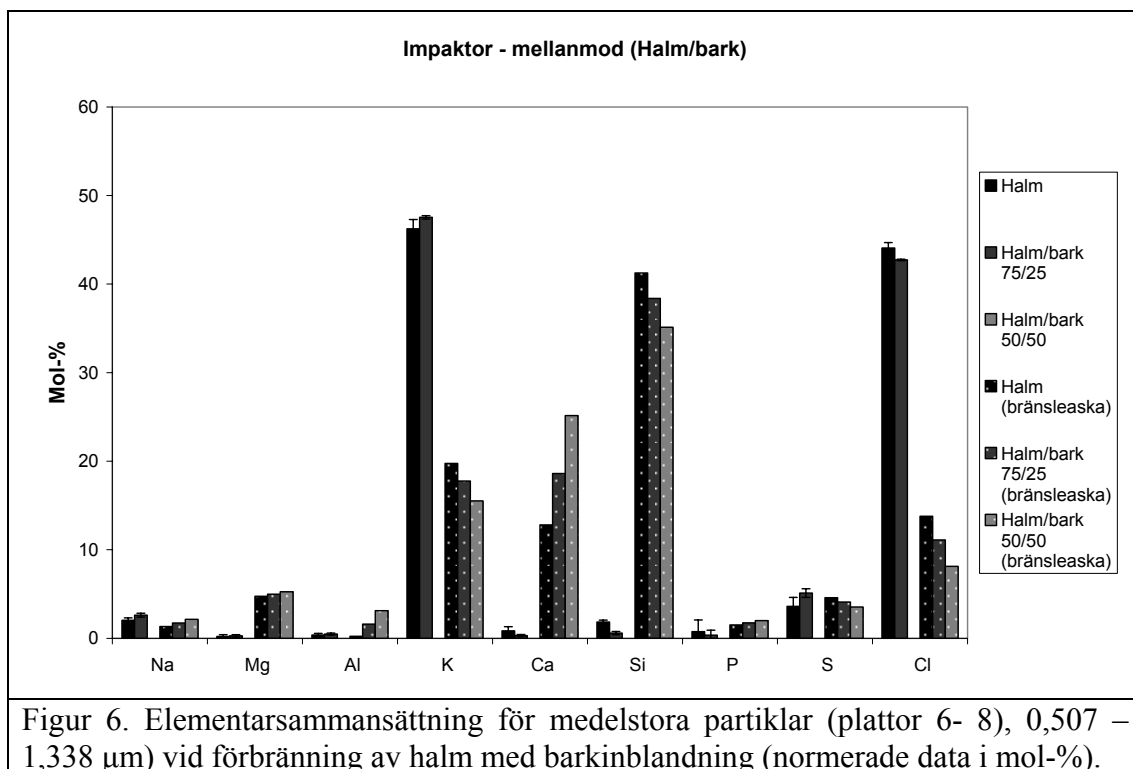
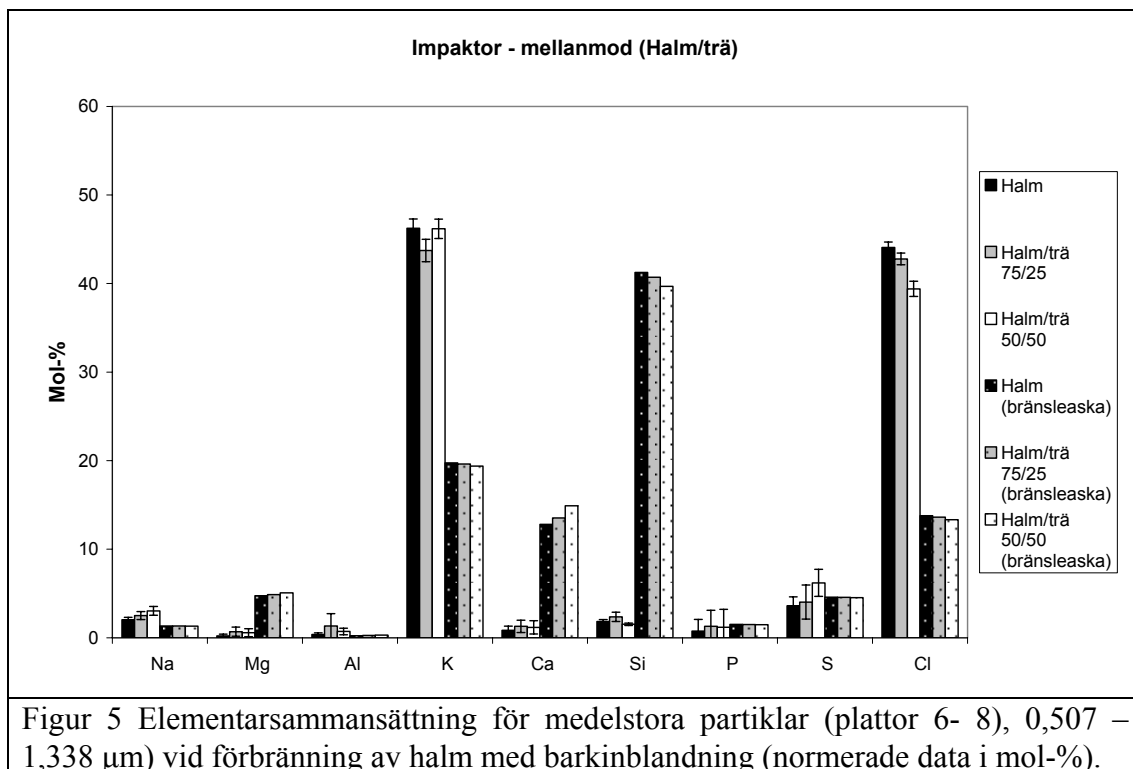


Figur 3 Elementarsammansättning fina partiklar (plattor 2-4, 0,063 – 0,191 μm) flygaska förbränning av halm med träinblandning (normerade data i mol-%).



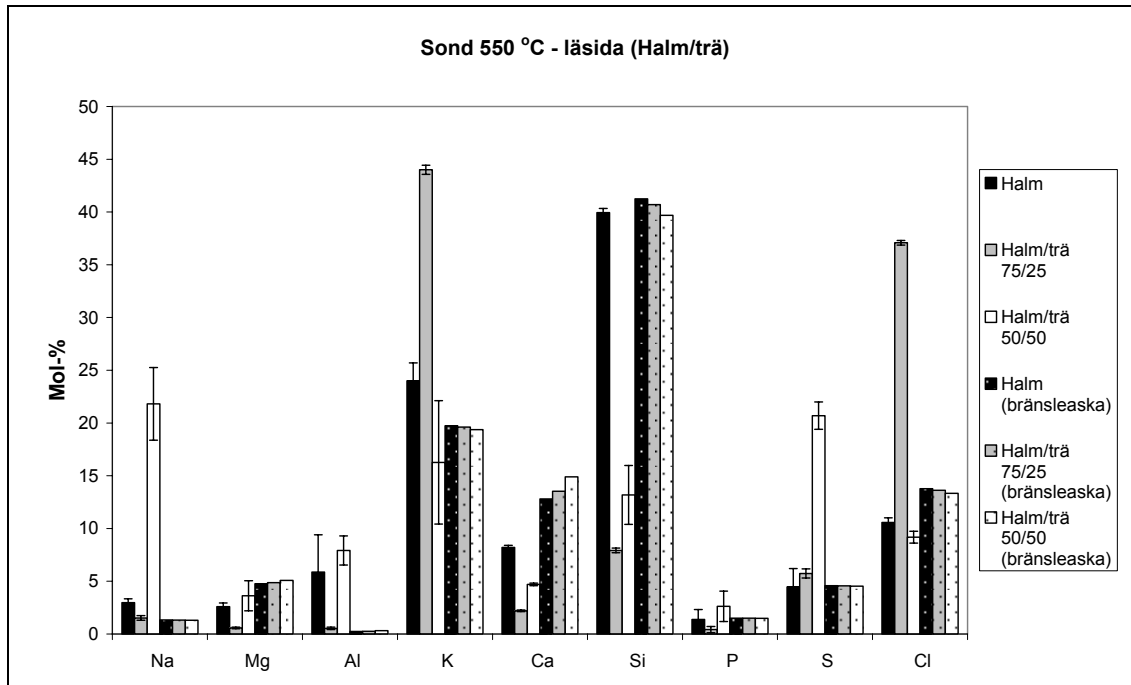
Impaktor

Den mellanstora partikelfractionen samlas på platta 6 till 8 (0,507 – 1,338 μm) och utgörs till största del av K, Cl och S, se figur 5 och 6. En svag koncentrationsminskning av klor kan ses vid ökad träinblandning, i övrigt kan inte några större skillnader ses för de olika bränslemixarna.

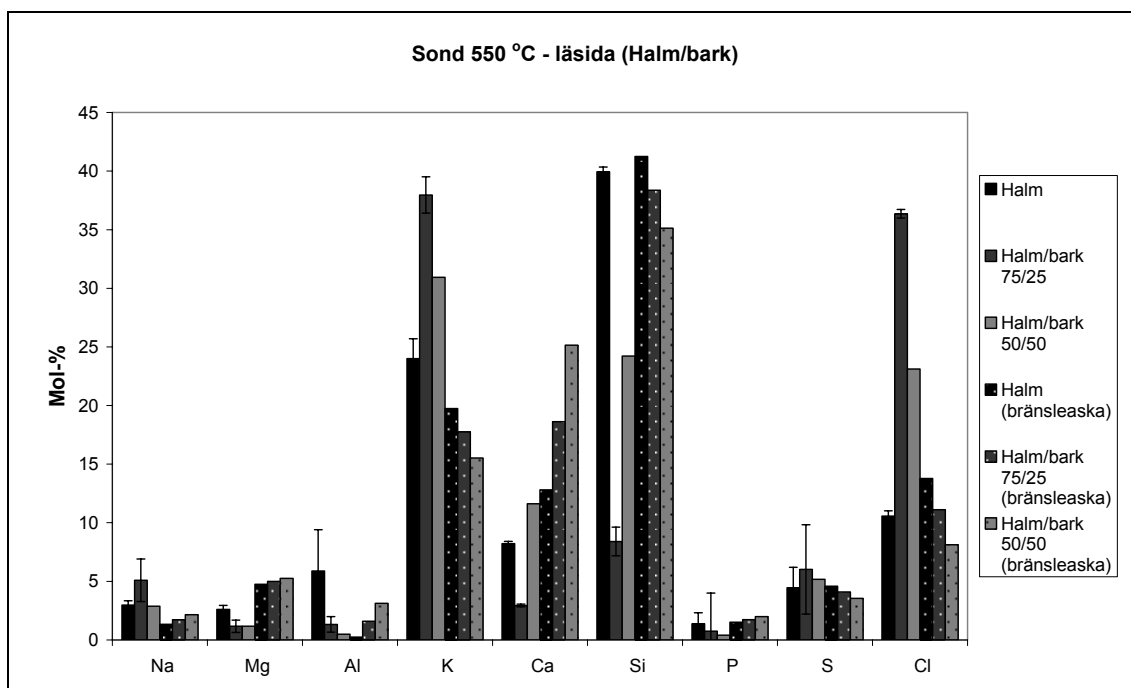


Beläggningssond 550 °C - läsida

Beläggningar på den kylda (550 °C) beläggningssondens läsida består till största del av K, Na, Ca, Si, S och Cl se figur 7 och 8. Stora skillnader mellan de båda halmeldningarna finns, speciellt för K, Ca, Si, Cl och Mg.



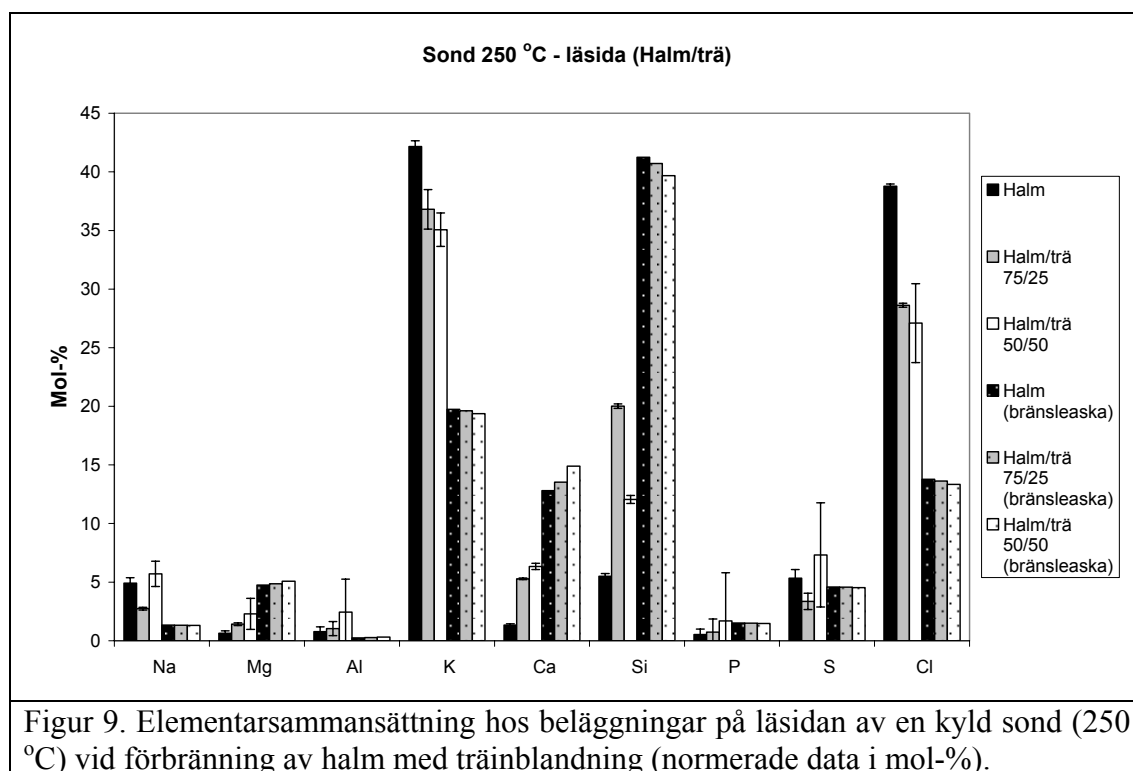
Figur 7. Elementarsammansättning hos beläggningar på läsidan av en kyld sond (550 °C) vid förbränning av halm med träinblandning (normerade data i mol-%).

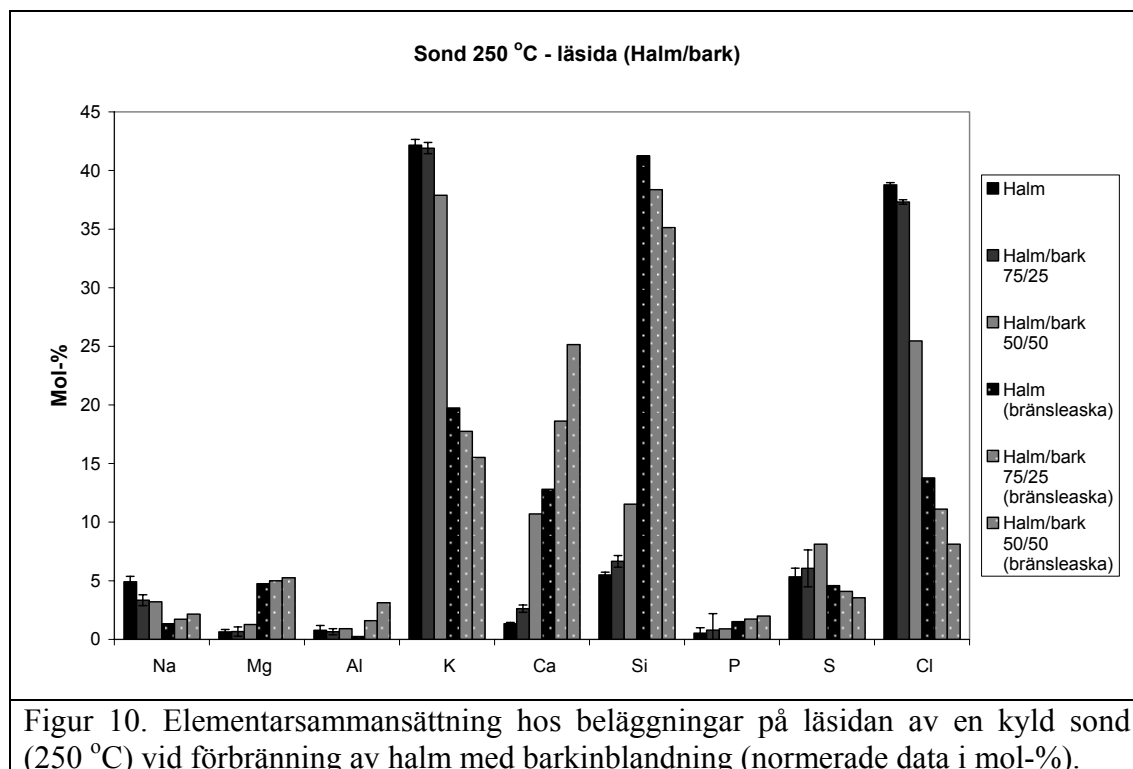


Figur 8. Elementarsammansättning hos beläggningar på läsidan av en kyld sond (550 °C) vid förbränning av halm med barkinblandning (normerade data i mol-%).

Beläggningssond 250 °C – läside

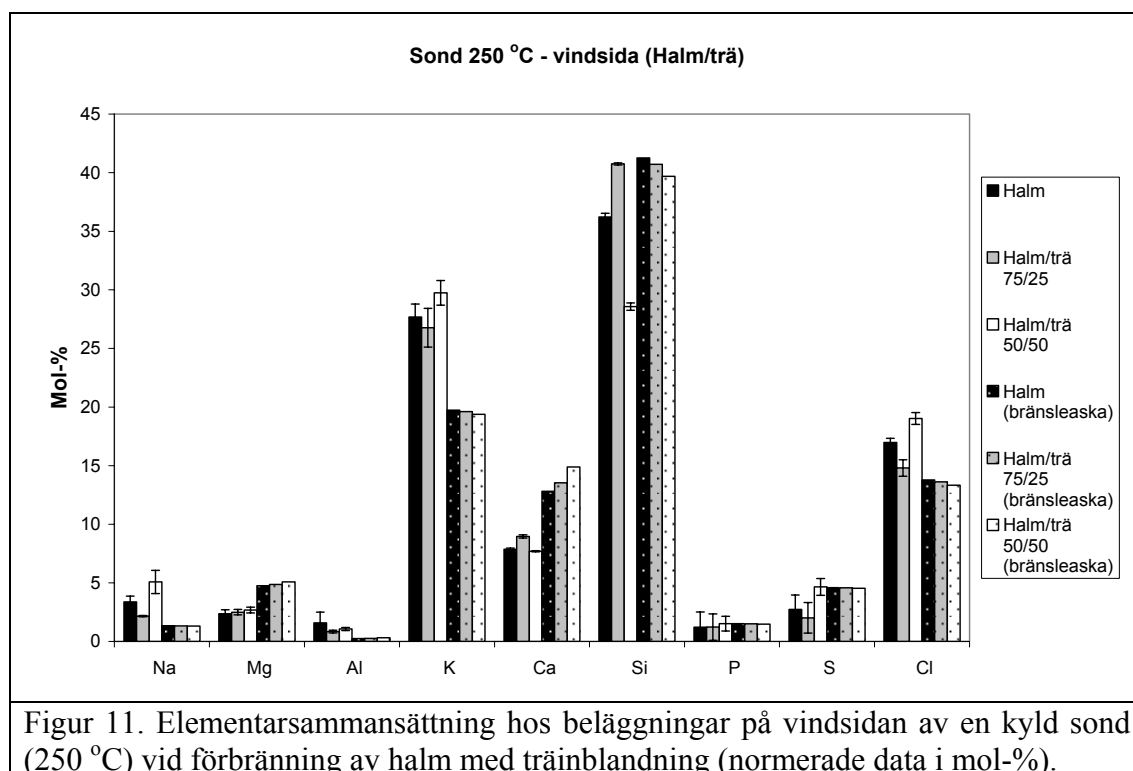
Kompositionen hos den kylda (250 °C) beläggningssondens läside domineras av K Si, Cl, men även Na, Ca och S finns i relativt höga koncentrationer, se figur 9 och 10. Både kalium- och klorkoncentrationerna minskar kraftigt med ökad träinblandning, och en liknande trend finns för ökad barkinblandning, dock är den mindre påtaglig. Kalciumnivåerna ökar markant med ökning av både trä- och barkinblandning. Kiselkoncentrationen visar på en stark ökning med ökad träinblandning, vilket, om än något svagare, också kan ses vid ökad barkinblandning. Den sistnämnda trenden går tvärtemot den teoretiska bränsleaskans kiselnivå, vilken minskar ökad trä- och barkinblandning.

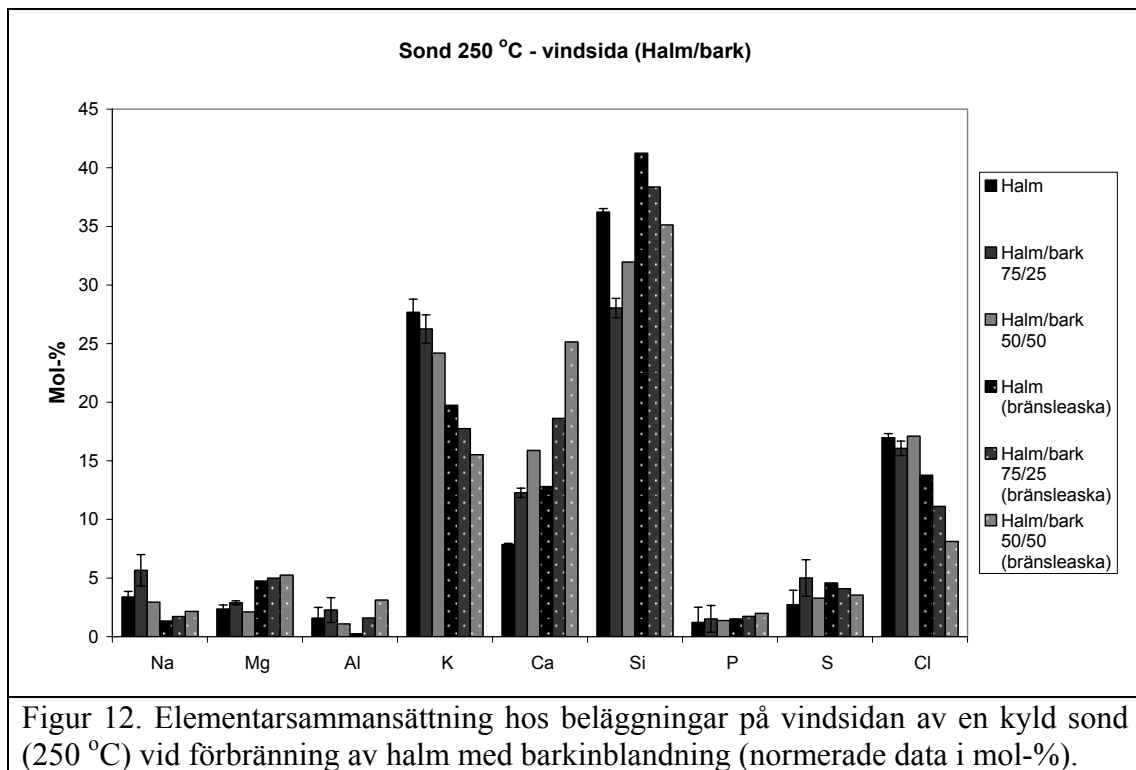




Beläggningssond 250 °C – vindsida

Sammanställningen hos den kylda (250 °C) beläggningssondens vindsida domineras av K, Ca, Si, Cl, men även Na, Mg och S finns i relativt höga koncentrationer, se figur 11 och 12. En ökning av kalciumnivåerna kan ses vid ökad barkinblandning, men i övrigt kan inga tydliga trender ses.





Figur 12. Elementarsammansättning hos beläggningar på vindsidan av en kyld sond (250 °C) vid förbränning av halm med barkinblandning (normerade data i mol-%).

B XRD- analyser

I bilaga B redovisas XRD-data på de olika askfraktionerna för 100 % halm samt för olika inblandningar av bark och trä. Data är angivet i vikts-%.

| Impaktorplattor 3, 4 och 5 (finmod) | | | | |
|--|----------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| | Halm: 100 % | Halm/Trä: 75/25 | Halm/Trä: 50/50 | Halm/Bark: 75/25 |
| KCl (sylvit) | 78 | 78 | 72 | 75 |
| K ₂ SO ₄ (arkanit) | 13 | 14 | 20 | 16 |
| K ₃ Na(SO ₄) ₂ (aftitalit) | 9 | 7 | 8 | 10 |
| Summa | 100 | 99 | 100 | 101 |

| Impaktorplattor 6 till 8 | | | | |
|--|----------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| | Halm: 100 % | Halm/Trä: 75/25 | Halm/Trä: 50/50 | Halm/Bark: 75/25 |
| KCl (sylvit) | 84 | 86 | 77 | 81 |
| K ₂ SO ₄ (arkanit) | 10 | 10 | 18 | 12 |
| K ₃ Na(SO ₄) ₂ (aftitalit) | 5 | 4 | 6 | 6 |
| Summa | 99 | 100 | 101 | 99 |

| Beläggnings- sond, 550C, läsida | | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|
| | Halm: 100%*** | Halm/Trä: 75/25 | Halm/Trä: 50/50*** | Halm/Bark: 75/25*** |
| KCl (sylvit) | | 57 | | 78 |
| K ₂ SO ₄ (arkanit) | | 22 | | 13 |
| K ₃ Na(SO ₄) ₂ (aftitalit) | | | | 3 |
| Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH) (apatit) | | | | 2 |
| Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂ (merwinit) | | | | 3 |
| Fe ₂ O ₃ (maghem./hematit) | | 20 | | |
| Summa | | 99 | | 99 |

* Minst en signifikant närvarande fas kan inte identifieras
 ** för lite prov för identifiering med XRD
 *** Stor (-viss) del amorft mtrl. glas?

| Beläggings- sond, 250C, läsida | Halm: | Halm/Trä: | Halm/Trä: | Halm/Bark: |
|---|-------|-----------|-----------|------------|
| | 100 % | 75/25 | 50/50 | 75/25 |
| SiO ₂ (kvarts) | | 2 | | |
| KCl (sylvit) | 85 | 78 | | 79 |
| K ₂ SO ₄ (arkanit) | 6 | 9 | | 11 |
| K ₃ Na(SO ₄) ₂ (aftitalit) | 9 | 6 | | 10 |
| Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH) (apatit) | | 4 | | |
| Summa | 100 | 99 | | 100 |

* Minst en signifikant närvarande fas kan inte identifieras
 ** för lite prov för identifiering med XRD
 *** Stor (-viss) del amorft mtrl. glas?

| Beläggings- sond, 250C, vindsida | Halm: | Halm/Trä: | Halm/Trä: | Halm/Bark: |
|--|-------|-----------|-----------|------------|
| | 100 % | 75/25*** | 50/50 | 75/25 |
| SiO ₂ (kvarts) | 8 | 12 | 7 | 8 |
| KCl (sylvit) | 68 | 59 | 60 | 53 |
| CaO (lime) | | 2 | | 11 |
| MgO (periklas) | | 3 | | 3 |
| K ₂ SO ₄ (arkanit) | 10 | 6 | 11 | 4 |
| K ₃ Na(SO ₄) ₂ (aftitalit) | 8 | 4 | 7 | 6 |
| Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH) (apatit) | | 5 | 7 | 7 |
| Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂ (merwinit) | 6 | 9 | 8 | 9 |
| Summa | 100 | 100 | 100 | 101 |

* Minst en signifikant närvarande fas kan inte identifieras
 ** för lite prov för identifiering med XRD
 *** Stor (-viss) del amorft mtrl. glas?

C DANISH EXPERIENCES FROM CO-FIRING OF STRAW AND WOODS

Se separat bilaga

D Bränsleanalyser och valvildningstest

I bilaga D redovisas data på de använda bränslena som levererats i pelletsform

Tabell 1 Analys på nyttjade bränslen.

| Element | Bark | Halm | Trä | Enhet |
|-------------------------------|-------------|-------------|------------|--------------|
| Kol, C | 52,5 | 47,2 | 50,9 | % TS |
| Väte, H | 5,7 | 5,8 | 6,2 | % TS |
| Syre, O | 41,7 | 46,5 | 42,9 | % TS |
| Kväve, N | 0,4 | 0,8 | 0,08 | % TS |
| Klor, Cl | 0,02 | 0,42 | 0,01 | % TS |
| Svavel, S | 0,05 | 0,13 | <0,01 | % TS |
| Värmevärde(LHV, effektivt) | 18 | 17,3 | 19,2 | MJ/kg TS |
| Torrsubstans | 90,4 | 92,1 | 92,6 | % |
| Askhalt | 3,7 | 4,8 | 0,3 | % |

Bränsleanalys

| Ämne | Enhet | Bark | Halm | Träpellets |
|--------------------------------|----------|--------|--------|------------|
| TS | % | 90,4 | 92 | 92 |
| Aska 550°C | % TS | 3,7 | 4,8 | 0,3 |
| SiO ₂ | % TS | 0,847 | 1,76 | 0,0255 |
| Al ₂ O ₃ | % TS | 0,18 | 0,0173 | 0,0052 |
| CaO | % TS | 1,19 | 0,51 | 0,0954 |
| Fe ₂ O ₃ | % TS | 0,0634 | 0,01 | 0,0025 |
| K ₂ O | % TS | 0,246 | 1,32 | 0,0414 |
| MgO | % TS | 0,123 | 0,136 | 0,0145 |
| MnO | % TS | 0,0614 | 0,0037 | 0,0087 |
| Na ₂ O | % TS | 0,0515 | 0,0587 | 0,0018 |
| P ₂ O ₅ | % TS | 0,0963 | 0,152 | 0,0047 |
| TiO ₂ | % TS | 0,0057 | 0,0011 | 0,0016 |
| Summa | % TS | 2,9 | 4 | 0,2 |
| As | mg/kg TS | 0,233 | <0,8 | <0,1 |
| Ba | mg/kg TS | 126 | 22,3 | 7,78 |
| Be | mg/kg TS | <0,02 | <0,03 | <0,002 |
| Cd | mg/kg TS | 0,566 | 0,0935 | 0,0301 |
| Co | mg/kg TS | 0,372 | 0,0219 | 0,0387 |
| Cr | mg/kg TS | 3,34 | 0,793 | 0,195 |
| Cu | mg/kg TS | 3,65 | 1,86 | 0,732 |
| Hg | mg/kg TS | 0,0296 | <0,01 | <0,01 |
| Mo | mg/kg TS | 0,264 | <0,3 | <0,02 |
| Nb | mg/kg TS | <0,2 | <0,3 | <0,02 |
| Ni | mg/kg TS | 1,2 | 0,145 | <0,06 |
| Pb | mg/kg TS | 1,14 | 0,11 | 0,0716 |
| S | mg/kg TS | 471 | 1260 | 57,1 |
| Sc | mg/kg TS | 0,0991 | <0,06 | <0,004 |
| Sn | mg/kg TS | <0,03 | <0,03 | <0,03 |
| Sr | mg/kg TS | 41 | 15,9 | 4,45 |
| V | mg/kg TS | 0,622 | 0,14 | 0,0136 |
| W | mg/kg TS | <2 | <3 | <0,2 |
| Y | mg/kg TS | 0,282 | <0,1 | <0,008 |
| Zn | mg/kg TS | 124 | 5,96 | 12,5 |
| Zr | mg/kg TS | 2,89 | 0,819 | 0,0796 |

Pelletsarna har sönderdelats med hammarkvarn till lämplig storleksfördelning på pulver, siktdiameter 1,25 och 1,5 mm har använts. Pulverbränslena uppvisar något olika egenskaper vad gäller flytbarhet/rinnbarhet vilket i sin tur påverkar inmatning av pulver till brännaren. Detta kontrolleras genom en metod där man använder trattar som har samma lutning/vinkel på sidorna men olika öppningsdiameterar i botten. 2000ml pulver läggs försiktigt i tratten med en stängningsanordning i stängt läge. Pulvret måste rinna ut fem gånger i rad för att uppnå godkändnivå. I tabell 2 nedan markeras ett godkänt försök med x och ett misslyckat med ett -.

Tabell 2 Resultat från flödestester.

| Flödestest | Oppning 60 (mm) | Oppning 70 (mm) | Oppning 80 (mm) | Oppning 85 (mm) | Oppning 105 (mm) | Oppning 115 (mm) |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| Bränsle | | | | | | |
| Halm, försök 1 | - | - | - | - | x | x |
| Halm, försök 2 | - | - | - | - | - | x |
| Halm, försök 3 | - | - | - | - | x | x |
| Halm, försök 4 | - | - | - | - | x | x |
| Halm, försök 5 | - | - | - | - | - | x |
| Trä, (stamved), 1 | - | - | - | x | | |
| Trä, (stamved), 2 | - | x | x | x | | |
| Trä, (stamved), 3 | - | - | - | x | | |
| Trä, (stamved), 4 | - | - | x | x | | |
| Trä, (stamved), 5 | - | - | x | x | | |
| Bark, försök 1 | x | | | | | |
| Bark, försök 2 | x | | | | | |
| Bark, försök 3 | x | | | | | |
| Bark, försök 4 | x | | | | | |
| Bark, försök 5 | x | | | | | |

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeknisk forskning och utveckling. Forskningsprogrammet är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem.

Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrin
- Övrig industri

VÄRMEFORSK SAMARBETAR MED
STATENS ENERGIMYNDIGHET

VÄRMEFORSK SERVICE AB

101 53 Stockholm

Tel 08-677 25 80

Fax 08-677 25 35

www.varmeforsk.se

Beställning av trycksaker

Fax 08-677 25 35