

Askans betydelse för rötslams goda samförbränningsegenskaper

Davidsson, K.¹, Gustafsson, G.², Herstad Svärd, S.³,
Jones, F.¹, Niklasson, F.¹, Ryde, D.¹

¹ SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

² Borås Energi och Miljö

³ WSP Kraft & Värme

Askans betydelse för rötslams goda samförbränningsegenskaper

The importance of ash for the favourable properties of sewage sludge in co-firing

Davidsson, K.¹, Gustafsson, G.², Herstad Svärd, S.³, Jones, F.¹, Niklasson, F.¹,
Ryde, D.¹

¹ SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

² Borås Energi och Miljö

³ WSP Kraft & Värme

Projektnummer WR-38

År: 2012

WASTE REFINERY

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Box 857, 501 15 Borås

www.wasterefinery.se

wasterefinery@sp.se

ISSN 1654-4706

Sammanfattning

Avloppsslam har visat sig ha mycket positiva egenskaper vid samförbränning med svåra bränslen. Slammet motverkar beläggningar och korrosion som uppstår p.g.a. bränslets innehåll av klor och alkali. Orsakerna till slammets goda egenskaper är dess innehåll av svavel, fosfor och aluminiumsilikater. Även dess höga askhalt har diskuterats som positiv i det att flygaskan skulle utgöra en stor yta för alkaliklorid att kondensera på vilket skulle hindra kloriden att nå t.ex. överhettartytor. Askkan kan också ha en eroderande effekt som blåstrar bort beläggningar. Det föreliggande projektet syftar till att pröva hypotesen att slammaskans stora yta motverkar beläggningens bildning. Härvid har försök gjorts med syntetiskt avfallsbränsle varav en del dopats med inerta partiklar i form av aluminiumoxid. Försöken gjordes i en bubblande fluidbäddreaktor i labbskala. Beläggningssonder uppsamlade beläggningar under förbränning av odopat och dopat bränsle och beläggningarna analyserades kemiskt och jämfördes. Resultatet visar att de inerta partiklarna inte har någon effekt på mängden hårt sittande beläggning. I den aktuella labuppställningen hamnade de i stor utsträckning på läsidan av beläggningssonden och låg kvar p.g.a. gravitation men de kunde lätt avlägsnas vilket gjordes före kemisk analys. Beläggningarnas klorinnehåll minskade marginellt vid försök med bränsle med inerta partiklar. Sammantaget kan slammets innehåll av inerta partiklar inte förklara slammets positiva egenskaper annat än i mycket ringa omfattning. Försök gjordes också med avfallspelletts dopade med torkat avloppsslam. De försöken visade slammets väldigt positiva egenskaper: beläggningen minskade drastiskt och likaså dess klorinnehåll. Olika slam har olika bra egenskaper. Föreliggande resultat visar att man inte skall välja avloppsslam för förbränning efter hur mycket aska det innehåller utan snarare göra bedömningen baserad på innehållet av svavel, fosfor och aluminium.

Nyckelord: samförbränning, avloppsslam, svavel, aska

Summary

Sewage sludge has been shown to have positive properties during cofiring with difficult fuels. The sludge mitigates deposition and corrosion which occur because of the fuels content of chlorine and alkali. The reason for the positive properties of sludge are its content of sulphur, phosphorus and aluminium silicates. Its high content of ash has also been discussed because the fly ash would constitute a large surface for alkali chlorides to condensate on and thereby avoid condensation on e.g. superheater surfaces. The ash could also blast the surface and thereby keeping them clean. The present project aims at testing the hypothesis that the ash in the sludge mitigates the deposition. Tests have been performed with synthetically produced waste pellets of which some were doped with inert particles in form of aluminium oxide. The tests were done in a lab-scale bubbling fluidised bed. Deposit probes collected deposits during the combustion of doped and un-doped waste pellets, and the deposits were chemically analysed. The result shows that the inert particles do not have any effect on the amount of hard attached deposits. The particles ended up on the lee side of the probe where they deposited because of gravitation, but they could be easily removed. The remaining deposit was analysed and the effect of inert particles was a small decrease of the content of chlorine. Tests were also performed with pellets doped with sludge. In this case the amount of deposit and its content of chlorine decreased significantly. Different sewage sludges have different properties. The present results show that sludge for cofiring should not be chosen for its amount of ash but rather for its content of sulphur, phosphorous and aluminium.

Keywords: cofiring, sewage sludge, sulphur, ash

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	PROBLEMBESKRIVNING	1
1.2	SYFTE OCH MÅL	2
1.3	AVGRÄNSNINGAR	2
2	BAKGRUND	3
3	MATERIAL OCH METODER	4
3.1	BRÄNSLEN	4
3.2	FÖRSÖKSANLÄGGNINGEN	5
3.3	BELÄGGNINGSSONDEN	8
3.4	GENOMFÖRANDE	9
3.5	AVVIKELSER FRÅN ANSÖKAN	10
3.6	ICP-MS MÄTNINGAR AV ALKALIMETALLER I RÖKGAS	11
4	RESULTATREDOVISNING	13
4.1	NYCKELTAL	13
4.2	RÖKGASER	14
4.3	BELÄGGNINGAR	17
4.4	KORROSION	22
4.5	ICP-MS	22
5	RESULTATANALYS	26
5.1	ALLMÄNT OM FÖRSÖKENS KVALITET	26
5.2	INERTA PARTIKLAR	26
5.3	SLAMTILLSATS	27
5.4	SVAVELDIOXID	27
5.5	FÖRHÖJD LUFTFAKTOR I BOTTEN	27
5.6	BÄDDTEMPERATUR	27
6	SLUTSATSER	28
7	REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING	29
8	LITTERATURREFERENSER	30

Bilagor

A	RECEPT PÅ SYNTETISKT AVFALL (VIKT-%)
B	SPÅRÄMNINGEN I SLAMPELLET
C	DRIFTDATA
D	MASSBALANS ÖVER ICP-MS GASUTSUGSYSTEM
E	DETALJERADE PROCEDURER FÖR ANLÄGGNINGEN

1 Inledning

1.1 Problembeskrivning

Beläggningar som bildas i förbränningsanläggningar skapar problem eftersom de minskar värmeöverföringen och även kan innehålla korrosiva ämnen som sliter på ståltuber och andra ytor. Avfallsbränslen är mer komplicerade än andra bränslen på grund av den heterogena sammansättningen och den höga halten av oorganiska komponenter. Flera studier som har gjorts under de senaste decennierna har visat att bränslets sammansättning är en avgörande faktor vid förbränning och att det har en betydande inverkan på förekomsten av beläggningar och korrosion.[1][2] Höga nivåer av alkalimetaller och klor är vanligt förekommande i avfall och tillsammans bildar de klorhaltiga beläggningar på värmeväxlande ytor. Bildningen av beläggningar orsakar lägre verkningsgrad och leder till ett ökat behov av underhåll. Beläggningar som utgörs eller delvis består av oorganiska komponenter i kombination med klor är dessutom kända för att orsaka svår korrosion av överhettare vid höga temperaturer vilket avsevärt förkortar deras livslängd. För att minimera dessa problem används i dag betydligt lägre ångtemperaturer i avfallspannor än i pannor som drivs med fossila bränslen.[3] Flera studier har påvisat positiva resultat på bland annat beläggningsskikt och/eller korrosion när slam använts som additiv.[4][5][6][7][8] En av de möjliga mekanismerna som ger det positiva resultatet med slam är slammets höga askhalt som resulterar i hög partikelkoncentration i rökgasen. Gasformiga föreningar kan kondensera på den stora partikelytan, och därigenom hindras att bilda beläggningar på värmeväxlande ytor.[6] Denna hypotes har dock aldrig verifierats eller studerats under kontrollerade former.

Rötslam från reningsverk har i flera studier visat sig att kunna reducera agglomerings- och beläggningsskiktproblematiken i FB-pannor. De positiva effekterna har bl.a. förklarats med tillsatsen av svavel och fosfor, som återfinns i slammets, men också av att slammets medför en ökad askkoncentration i rökgaserna och därmed också en ökad yta för beläggningsskikt bildande ämnen att kondensera på. Det senare är än så länge en hypotes, men i dagsläget står det redan klart att svavlet inte ensamt förklarar slammets goda egenskaper som additiv.[6][9] I syfte att förstå vad i rötslam som ger positiva effekter så avser detta projekt att ge en första inblick i den tillgängliga partikelytans betydelse för beläggningsskikt bildningen i kylda rökgaskanaler.

Genom att studera bildningen av beläggningar i laboratorieskala under förbränning av bränsle dopat med inerta partiklar, undersöks hur den extra yta de inerta partiklarna medför påverkar beläggningstillväxten utan att blanda in andra effekter. Partiklarna kan också avlägsna beläggningar medelst erosion. För att skilja effekten av ökad kondensationsyta från erosion studeras beläggningens fördelning över beläggningssondens yta. Exempelvis tyder en ojämn beläggning som är tunnast på vindsidan på att den utsatts för erosion. Därutöver studeras inverkan av parametrar såsom olika förbränningstemperaturer, syrehalt, och tillsats av svavel. På lång sikt ökar kunskapen om slammets verkan möjligheterna till en förlängning av stålyornas livslängd och eventuellt en ökad ångtemperatur. Bränslet är syntetisk avfallspellet, vilket visserligen är ett avsteg från situationen i en avfallsförbränningsanläggning, men har fördelen av att bränslet är homogent och konstant vilket underlättar analysen av resultaten. Detta avfall görs dessutom i två versioner: en med inblandning av inerta partiklar i form av aluminiumoxidpulver (Al_2O_3), och en med

inblandning av torkat avloppsslam. Genom att studera både referensfall, där avfallen förbränns som det är, och fall med olika förbränningstemperaturer, varierad syrehalt samt tillsats av svavel, kan beläggningarnas kemi och tillväxthastighet relateras till komponenterna i avfallet.

Målgruppen är anläggningsägare som använder sig av eller har intentionen att i framtiden använda sig av slam som additiv.

1.2 Syfte och mål

Det huvudsakliga målet med projektet är att pröva hypotesen att avloppsslam vid förbränning ger upphov till en stor yta, i form av inerta flygaskpartiklar, på vilken kaliumklorid och andra ämnen som orsakar beläggingsproblem kan kondensera.

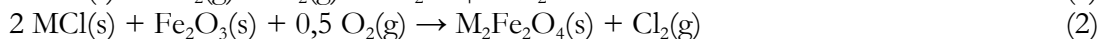
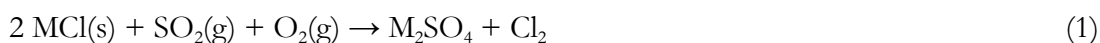
Ett annat mål är att identifiera vilka ytterligare försök som behövs för att förklara vilka slam som är bäst lämpade att använda som additiv.

1.3 Avgränsningar

Projektet avser endast pannor av typen fluidbädd.

2 Bakgrund

Avfallsbränslen är komplicerade på grund av den heterogena sammansättningen och den höga halten av oorganiska komponenter. Vid förbränning frigörs alkalimetaller från bränslet och blir tillgängliga för kemiska reaktioner.[9] De huvudsakliga reaktionsvägarna bestäms av tillgången av svavel och klor men även av asksammansättningen. Korrosiva beläggningar kan bildas på värmeväxlande ytor och skada stålet.[10][11] Det har föreslagits att fri Cl_2 bildas i ACl-beläggningar [10][11][12][13][14] (där A är antingen en alkalimetall) på ytor när vattenfri sulfatering sker inuti beläggningarna genom reaktion (1). Om Fe_2O_3 finns närvarande, som på en överhettartub, bildas fritt Cl_2 genom reaktion (2). Den fria Cl_2 korroderar ytmaterialet genom att bilda metallklorider. Den bildade FeCl_2 kan oxideras till Fe_2O_3 , som är en av de ingående komponenterna i reaktion (2), som skapar en kontinuerlig cykel som förbrukar metallytan.



Förekomsten av svavel har en betydande inverkan på bildandet av alkaliklorider. Genom att reagera med vattenånga och med alkalimetaller bildar svavel alkalisulfater och HCl enligt reaktion (3).



Sulfateringsreaktionen kan ske med både SO_2 och SO_3 , men reaktionen med SO_3 är flera storleksordningar snabbare.[12][15] Dessutom kan förekomsten av järn katalysera oxidation av SO_2 till SO_3 . [15] Alkalisulfater är mindre korrosiva för ytor som innehåller järn och krom (som metallerna i en överhettare) och är därför att föredra jämfört med klorider.[16] Dock är det visat att reaktion (4) konkurrerar med reaktion (3) som är beroende av kalciumhalten i bränslet.[17] Svavel reagerar i första hand med kalcium och det innebär att ett högt kalciuminnehåll i bränslet kommer att gynna reaktion (4), vilket lämnar mindre svavel tillgängligt för reaktion (3).



Många beläggingsstudier finns tillgängliga för förbränning av biomassa.[18][19][20] Inom Waste Refinery har beläggningar från avfallsförbränning analyserats inom projekt WR01 (Svavelrecirkulation) [21] och projekt WR19 (Sänkt bäddtemperatur – Etapp 2) [22]. I andra studier [4][5][6][7][8] har slam haft en framträdande roll och slammets egenskaper har studerats.

3 Material och metoder

3.1 Bränslen

Tre typer av bränslen användes: pellets av syntetiskt avfall, pellets av syntetiskt avfall med inblandning av inerta partiklar, och pellets av syntetiskt avfall med inblandning av torkat avloppsslam. De kallas Refpellets, IPpellets respektive Slampellets. Bränsleanalyser återfinns i Tabell 1. Tillverkningen utgick från ett recept på syntetiskt avfall som erhållits från Umeå Universitet,[23] och som modifierades något. Därutöver tillverkades en sats med ca 9 vikt-% inerta partiklar i form av Al_2O_3 -pulver, och en sats med ca 10 vikt-% torkat avloppsslam. Recepten på bränslena återfinns i Bilaga A. Ingredienserna vägdes upp manuellt och blandades portionsvis i en stor Fejmertblandare. Blandningarna kördes sedan till Sweden Power Chippers AB i Ljungby där pellets pressades i en av deras enklare utrustningar. Bilder från tillverkningen återfinns i Bilaga A. Det syntetiska avfallet är sammansatt så att det skall likna ett genomsnittligt avfall. Fördelen med ett syntetiskt avfall är att de stora variationerna i innehållet, som vanligt avfall uppvisar, elimineras.

Tabell 1. Bränsleanalyser. Spårelementanalys för avfallspellets med slam återfinns i Bilaga B.

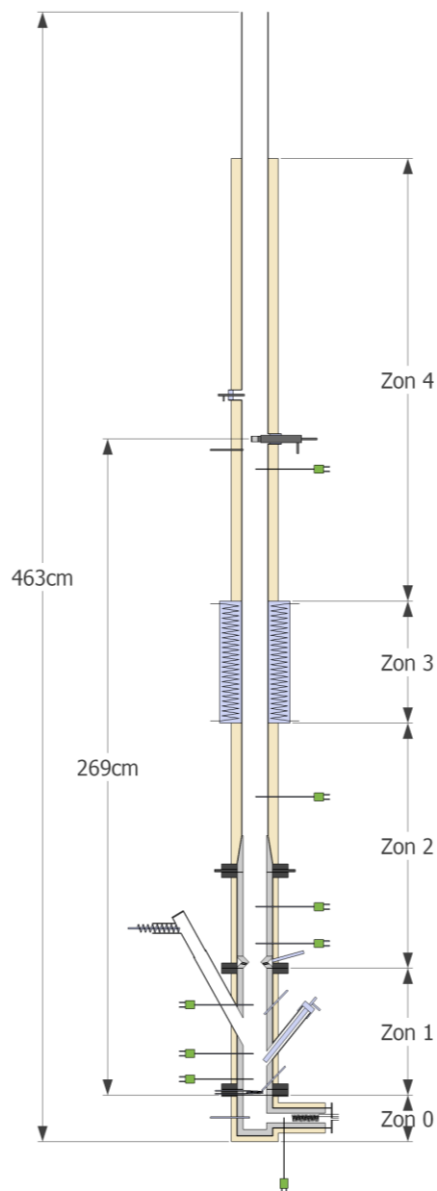
Table 1. Fuel analyses. Trace elements for the synthetic waste with sludge is found in Appendix B.

	Syntetiskt avfall	Syntetiskt avfall med inerta partiklar	Syntetiskt avfall med slam
Beteckning	Refpellets	IPpellets	Slampellets
fukt (%)	11,7	9,9	11,1
aska (%TS)	11,0	21,0	12,4
kol (%TS)	48,5	44,4	49,0
väte (%TS)	6,5	5,9	6,6
kväve (%TS)	1,9	1,8	2,9
svavel (%TS)	0,13	0,11	0,22
syre, differens (%TS)	30,7	25,6	28,8
klor (%TS)	1,2	1,1	1,0
kalorimetriskt värmevärde, konst. volym (MJ/kg TS)	21,22	19,34	21,46
effektivt värmevärde, konst. tryck (MJ/kg TS)	19,8	18,07	20,04
aluminium (% TS)	0,64	5,90	0,88
kisel (% TS)	3,34	3,19	2,92
järn (% TS)	0,08	0,11	0,54
titan (% TS)	<0,01	<0,01	
mangan (% TS)	<0,01	<0,01	<0,01
magnesium (% TS)	0,04	0,03	0,07
kalcium (% TS)	1,10	0,98	1,22
barium (% TS)	<0,01	<0,01	<0,01
natrium (% TS)	0,33	0,32	0,28
kalium (% TS)	0,11	0,12	0,13
fosfor (% TS)	0,02	<0,01	0,31

Det leder i sin tur till bättre kontrollerade experiment. Det syntetiska avfallet karakteriseras av något lägre ask- och fukthalt än vanligt avfall. Vidare innehåller det mer klor och mindre svavel. I övrigt påminner det om ett typiskt avfall.[24] Tillsatserna av Al_2O_3 respektive slam har en utspädningseffekt med ca 10 %. I det förra fallet ökar naturligtvis aluminiuminnehållet och därmed askan markant medan det vid slam tillsats sker en ökning av innehållet av järn, aluminium och framför allt fosfor.

3.2 Försöksanläggningen

Anläggningen visas schematiskt i Figur 1.

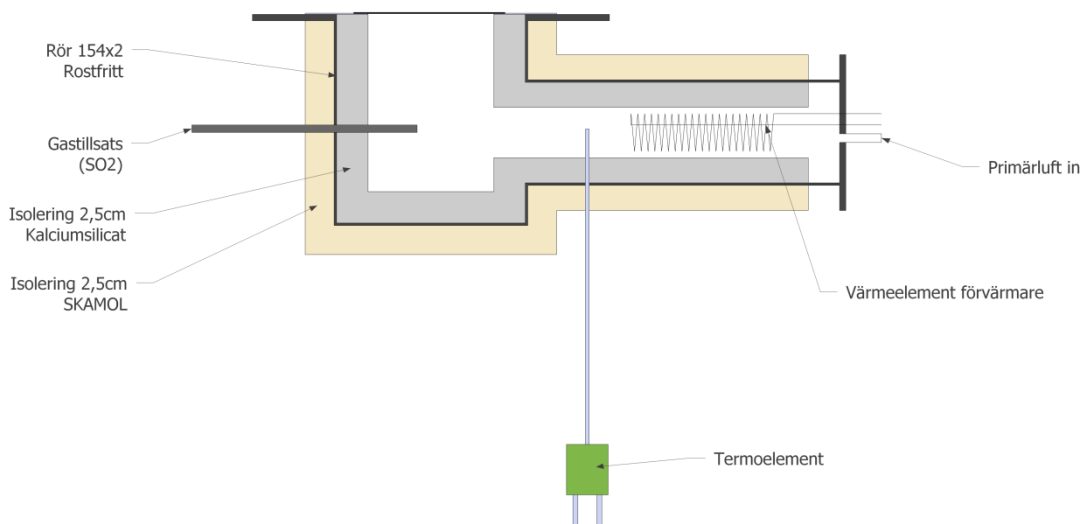


Figur 1. Schematisk bild av försöksanläggningen.

Figure 1. Schematic of the test rig.

Anläggningen för förbränningsförsöken, kallad Sintran, består i stort sätt av ett lodrätt rör indelat i zoner samt bränslematning och enheter för styrning och reglering.

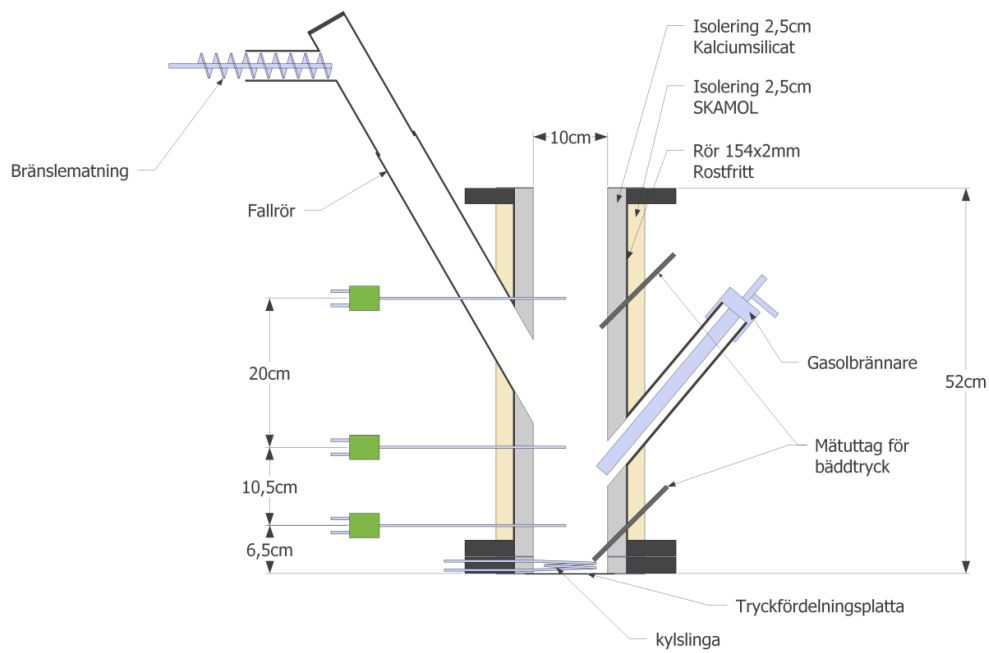
Zon 0 visas schematiskt i Figur 2, och består av en elektrisk förvärmare för primärluften, som även är mediet för fluidiseringen av sandbädden. Lufttemperaturen från förvärmaren styrs från en överordnad reglering för att hålla bäddtemperaturen konstant via en Eurothermregulator. Här sker även eventuell gastillförsel av SO_2 .



Figur 2. Schematisk bild av zon 0.

Figure 2. Schematic of zone 0.

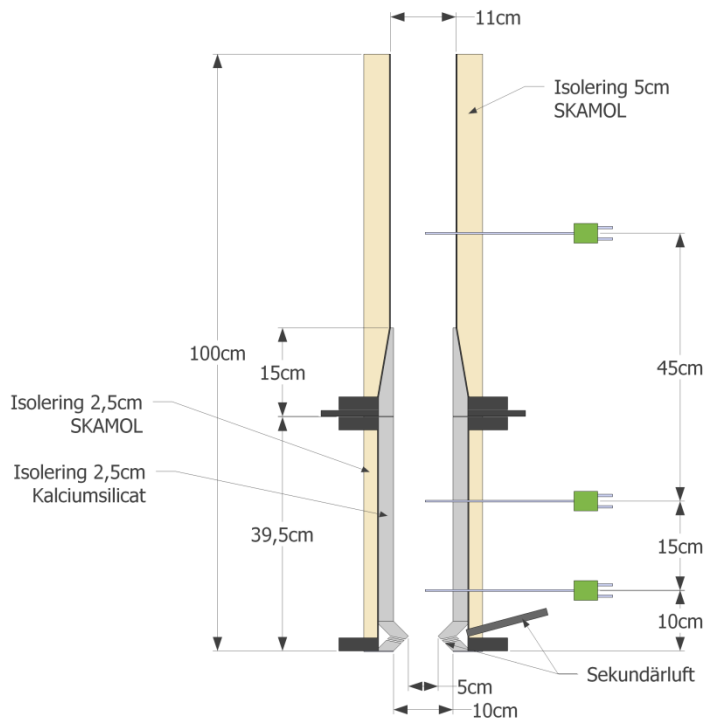
Zon 1 visas schematiskt i Figur 3, och är den primära förbränningszonen med fluidiserad sandbädd och bränsletillförsel. Sandbädden vilar på en flödesfördelarplatta i legerat 253MA stål. Plattan är 1mm tjock har 109st små hål på vardera 1 mm diameter. Ovanpå plattan ligger ett finmaskigt nät för att förhindra att sanden går igenom hålen. Vid en volym på 500 ml sand blir höjden på sandbädden ca 6,5 cm i icke fluidiserat tillstånd, och 8-11cm vid fluidisering. Bränslet matas in med en matarskruv och trillar ner i sandbädden via fallröret. Gasolbrännaren tillsammans med förvärmaren används vid uppstart innan bränslet matas in. Sandbäddens kylslinga består av ett rostfritt rör i en kort spiral. Kylmediet är luft blandat med vatten där flödena justeras manuellt med nålventiler för att få ett lämpligt arbetsområde på förvärmarens automatiska reglering av bäddtemperaturen. Till kylslingan är en ångkondensator (ej med på bild) kopplad för att återkondensera ångan som bildas genom kylslingan.



Figur 3. Schematisk bild av zon 1.

Figure 3. Schematic of zone 1.

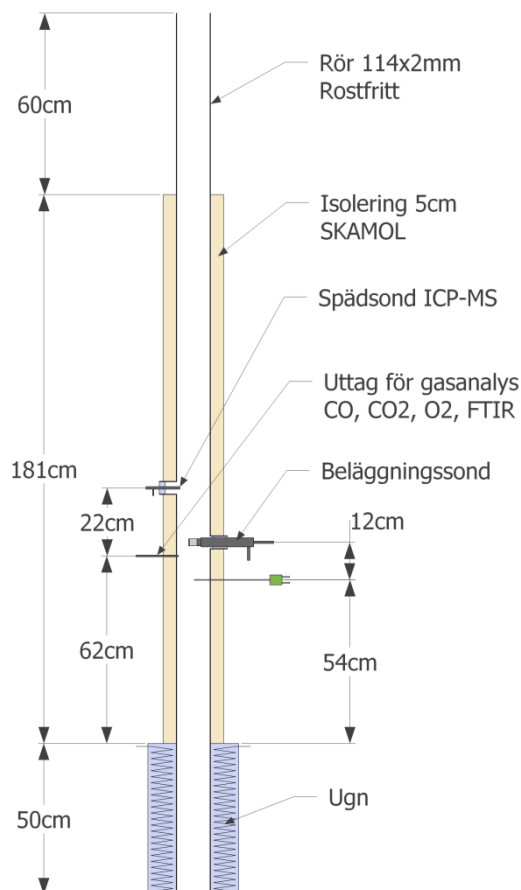
Zon 2 visas schematisk i Figur 4, och avser fribordet med sekundärluftstillförel.



Figur 4. Schematisk bild av zon 2.

Figure 4. Schematic of zone 2.

Zon 3 och 4 visas schematiskt i Figur 5. Ugnen används för att förlänga uppehållstiden i fribordet. Temperaturen på röret i ugnen regleras till 850°C.



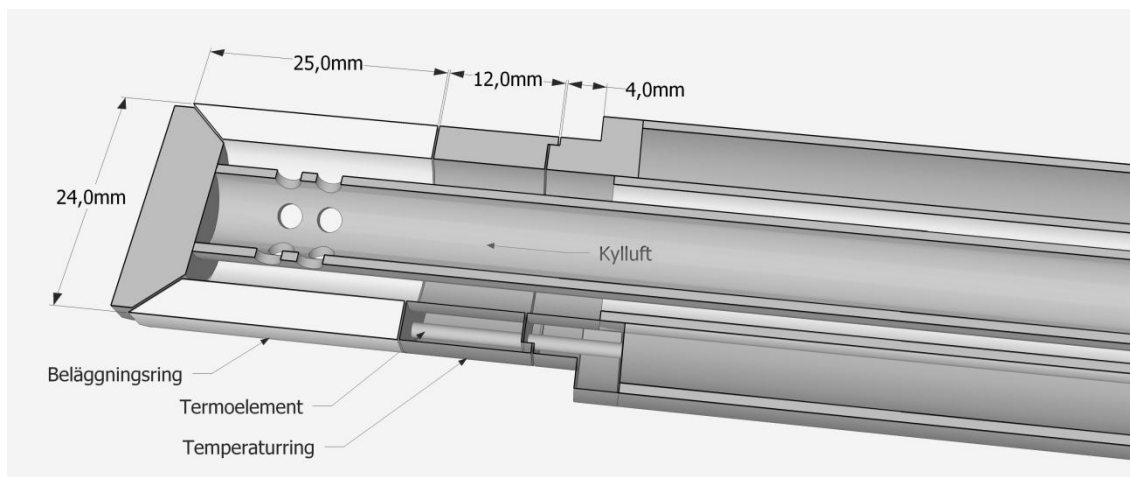
Figur 5. Schematisk bild av zon 3 och 4.

Figure 5. Schematic of zone 3 and 4.

Primär och sekundärluft styrs med massflödesregulatorer av märket Aalborg, modell GFC57, 0-200 L/min. Bränslematningen består av en sluten bränslebehållare med en skruv som matar in bränslet till fallröret. Bränsleflödet styrs av rotationshastigheten på skruven, och denna regleras manuellt via en steglös utväxling. Skruvens utformning och storleksfördelningen på bränslet gör att bränsleflödet varierar över tid. Pellets tenderar dessutom att komma i sjök om flera stycken. Bränsleflödet justeras därför manuellt i små steg mot en önskad syrehalt i rökgaserna på ca 5% över hela mätperioden.

3.3 Beläggningssonden

Beläggningssonden värms av rökgaserna och temperaturregleras med hjälp av tryckluft som kyler beläggningssonden till en definierad temperatur av 435 °C som är en vanlig temperatur på överhettarytor i avfallförbränningsanläggningar. Temperaturen mäts med ett termoelement placerat i en intilliggande ring med samma diameter. Regleringen sker i en separat styrenhet med regulatorstyrd luftventil. Beläggningssonden är tillverkade av 253MA-legering. En schematisk skiss visas i Figur 6.



Figur 6. Schematisk skiss som visar detalj av beläggningssonden i genomskärning.

Figure 6. Cross section of the deposit probe. The light-coloured part is the steel ring.

3.4 Genomförande

3.4.1 Parametrar och försöksmatris

Försöksmatrisen med beteckningar och definierande parametrar återfinns i Tabell 2. Repeterade försök betecknas med tillägget a, b o.s.v. De tre bränslena förbrändes vid bäddtemperaturerna 670 respektive 820 °C. För att spara tid så utfördes två beläggningsmätningar i direkt följd med Ref670c+d, Ref820b+c, Slam670b+c samt Slam820b+c. För försöksfallen med inerta partiklar gick inte detta att göra eftersom den ackumulerade mängden aska i bädden och fribordet skulle bli för stor. Luftfaktorn var $1,34 \pm 0,5$. I de flesta försök var kvoten mellan primär- och sekundärluft ca 1. I två försök vid 820 °C gjordes en omfördelning av tillflödet av förbränningsluft så att mer luft tillfördes som primärluft varvid kvoten blev ca 5,5. SO₂ tillsattes i två koncentrationer. Detta gjordes dels med Refpellets och dels med IPpellets.

Tabell 2. Försöksmatris.

Table 2. Test matrix.

Beteckning	Bäddtemp °C	Drift	Bränsle	Additiv
Ref670	670		Refpellets	
Ref820	820		Refpellets	
IP670	670		IPpellets	
IP820	820		IPpellets	
Slam670	670		Slampellets	
Slam820	820		Slampellets	
OxRef820	820	oxiderande ^a	Refpellets	
OxIP820	820	oxiderande ^a	IPpellets	
LågSO ₂ Ref820	820		Refpellets	SO ₂ ^b
HögSO ₂ Ref820	820		Refpellets	SO ₂ ^c

Beteckning	Bäddtemp °C	Drift	Bränsle	Additiv
LågSO ₂ IP820	820		IPpellets	SO ₂ ^b
HögSO ₂ IP820	820		IPpellets	SO ₂ ^c

^a Luften omfördelades från sekundär till primär så att luftfaktorn höjdes i bädden.

^b SO₂(g) tillfördes med primärluften i form av 5 dm³ 1990 ppm SO₂ i N₂/min.

^c SO₂(g) tillfördes med primärluften i form av 10 dm³ 1990 ppm SO₂ i N₂/min.

3.4.2 Procedur

Försöken startar med att värma upp friboardsugnen och sandbädden i reaktorn. Sekundärluftflödet regleras till ca 50 l/min. Sandbädden fluidiseras med primärluft, ca 70 l/min, och värms först med enbart förvärmaren, därefter med gasolbrännaren för att nå en bäddtemperatur på 820 °C. Primärluftflödet till fluidiseringen är initialt lite högre än under själva beläggningsmätningen för att blåsa bort de finaste sandpartiklarna som annars ackumuleras i förträngningen vid sekundärluftintaget. Friboardet renblåses på den fina sanden med ett tryckluftsmunstycke några gånger, och därefter sänks fluidiseringen till ca 50 l/min. Uppvärmningen av reaktor fortgår under ca 30 min, och därefter startas bränslematningen som regleras manuellt så att en syrehalt på ca 5 % uppnås i rökgaserna. Samtidigt behålls eller sänks bäddtemperaturen enligt försöksmatrisens definierade värde. Detta startar en tidssekvens:

- Under 1 timma: fortsatt uppvärmning av reaktor och stabilisering av förbränning.
- Därefter under 45 minuter: provtagning med beläggningssond (med ev. en repetition).
- Därefter efter 15 minuter: uttag av sandbäddprov.
- Avsvalning och avstängning av anläggningen.

Beläggningsringen fotograferas, placeras i en plastbehållare och läggs i exsickator. Efter ett dygn sker en första utvägning och när alla prover i försöksmatrisen är utförda görs ytterligare en utvägning där löst sittande material separeras från provet enligt metod beskriven i bilaga E. Ringarna skickas därefter på kemisk analys. Efter kemisk analys placeras ringarna åter i exsickator och vägs senare ut igen med tillhörande plastbehållare för att uppskatta graden av korrosion.

För detaljerad arbetsordning och metodbeskrivningar se bilaga E.

3.5 Avvikelser från ansökan

Projektgruppen beslutade i några fall att avvika från ansökan.

- I stället för att använda normalt avfall så valdes att tillverka ett syntetiskt avfall. Detta berodde på att ingen som ville mala och pellettera avfall kunde uppbringas.
- I stället för att dopa avfallspelletts med inaskat slam dopades pellets med torkat slam. Tanken var att slammets aska kan jämföras med de inerta partiklarna. Skillnader i beläggningar erhållna med inerta partiklar och inaskat slam kan då härledas till skillnader mellan dessa. Dessa skillnader kan dock vara av många slag (sammansättning, fördelning mellan flyg- och bottenaska, partikelform, total yta, porositet) och det inaskade slammets egenskaper kan påverkas av hur det tillverkas.

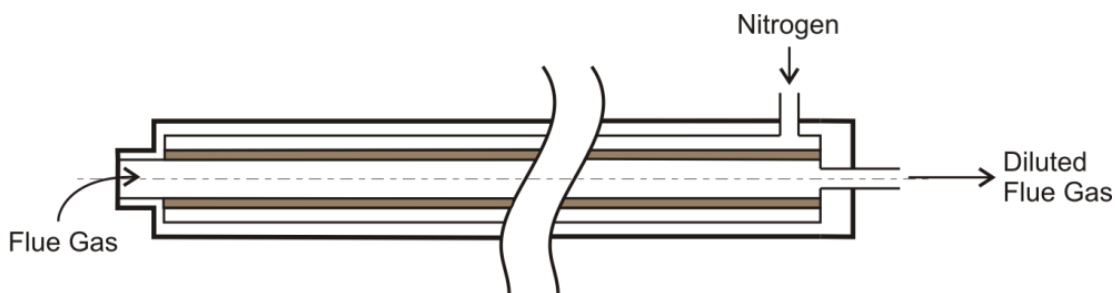
Dopning med inaskat slam bedömdes därför inte ge någonting. Förbränning av avfall dopat med torkat slam visar om försöken i den relativt lilla anläggningen ger upphov till de positiva effekter som slam har visat sig ha i stora anläggningar. På detta sätt bildas också askan i den aktuella anläggningen på ett naturligt sätt; d.v.s. genom den termiska nedbrytningen av bränslet.

- I stället för att genomföra försök under reducerande förhållanden valdes att göra försök med förändrad luftkvot men bibehållen luftfaktor. Bakgrunden är att primär- och sekundärluft i referensförsöken utgjorde ungefär 50 % var av totalluften som ger en luftfaktor på ca 1,4. Det gör att man i bädden i reaktorn redan har reducerande förhållanden. Det fanns inga skäl att sänka denna ytterligare.
- Inga försök med tillskott av HCl genomfördes. Det fanns redan i referensförsöken tillräckligt höga halter av HCl i rökgasen. Istället genomfördes försök med två nivåer av tillskott av SO₂.

3.6 ICP-MS Mätningar av alkalimetaller i rökgas

För att i någon mån kunna följa alkaliavgången on-line användes vid något av försöken ICP-MS (Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry) enligt en på SP utvecklad metod.

Rökgas sögs ut från förbränningsreaktorn från ett uttag (Figur 5) nära det hål som användes för beläggningssonderna. För detta ändamål användes en spädsond i vilken rökgasen kyls samtidigt som den späds av tillförd kvävgas, se Figur 7. Alkalimetaller i gasfas kondenserar i sonden till små partiklar när gasen kyls. Samtidigt medför spädningen minskad risk för att små partiklar krockar och bildar agglomerat (större partiklar) innan de stelnar. Eftersom spädgasen tillförs rökgasen genom yttre mantelytan (ett poröst metallrör) ansamlas minimalt med beläggningar i spädsonden.

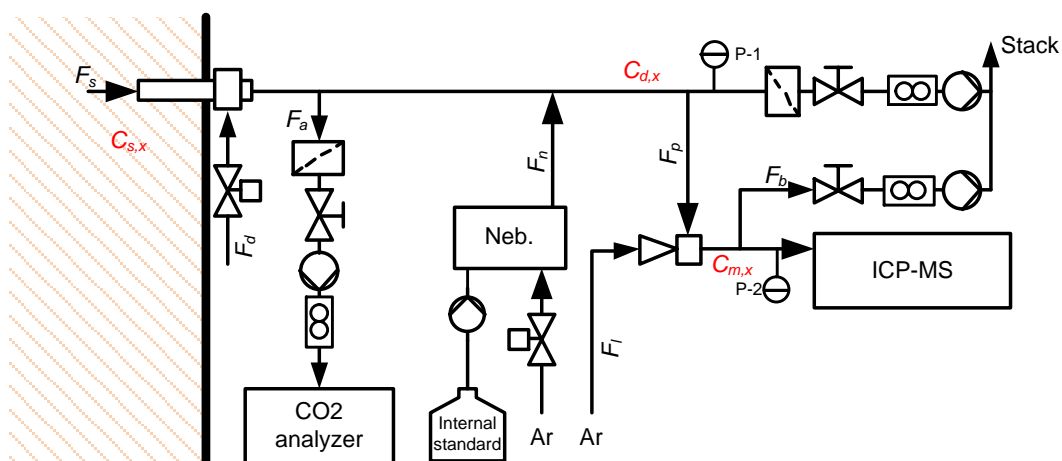


Figur 7. Skiss på spädsond.

Figure 7. Schematic of the dilution probe.

Flödet genom spädsonden drivs av en rökgaspump, se Figur 8. Ett flöde av den utspädda rökgasen avleds till en CO₂-analysator. Denna uppmätta CO₂-koncentration kvoteras med den uppmätta koncentrationen i rökgasen för att beräkna spädfaktorn. Till den utspädda rökgasen tillförs sedan ett konstant flöde av en aerosol innehållandes en intern standard till ICP-MS instrumentet. Vid dessa försök användes rubidium som intern standard. Detta ämne användes för att det är en alkalimetall och därmed förväntas ha liknande egenskaper i plasmata som natrium och kalium. En annan viktig faktor för valet av intern standard är att det inte förekommer naturligt i bränslet i någon större omfattning.

Från det utspädda rökgasflödet sugas en delmängd ut med hjälp av en ejektorpump som drivs av ett argonflöde. Ejektorpumpen valdes för att undvika rörliga delar i kontakt med rökgasen innan den når ICP-MS instrumentet. Det krävs dock ett relativt högt flöde av argon för att driva ejektorpumpen under de tryckförhållanden som råder i systemet. Summaflödet av argon och rökgas genom ejektorn ($F_l + F_p$ i Figur 8) är högre än plasmat klarar av att hantera i ICP-MS instrumentet. Därför avleddes ett delflöde (F_b) mellan ejektorpumpen och instrumentet.



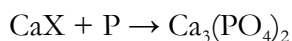
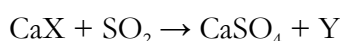
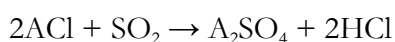
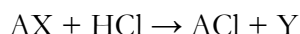
Figur 8. Schematisk bild av systemet för mätning av alkalimetaller i rökgasen med ICP-MS.

Figure 8. Schematic of the measurement system for alkali metals.

4 Resultatredovisning

4.1 Nyckeltal

Ingående flöden av bränslen och eventuella additiv kan beskrivas i termer av nyckeltal som på ett enkelt sätt visar förutsättningarna för vissa kemiska reaktioner. Nyckeltalen baseras på ingående substansmängder av olika ämnen som är av vikt för beläggnings- och korrosionsproblematiken. De kemiska reaktionerna är



, där A är en alkalimetall, X och Y är godtyckliga formelenheter. Formlerna är inte balanserade annat än med avseende på de i nyckeltalen ingående ämnena. Aluminium kan bilda en rad olika föreningar med alkali varför nyckeltalet med aluminium inte kan tolkas stökiometriskt.

Nyckeltalen visas i Tabell 3.

Tabell 3. Nyckeltal för ingående substansmängdsflöden.

Table 3. Ratios of the inflow of amounts of substance.

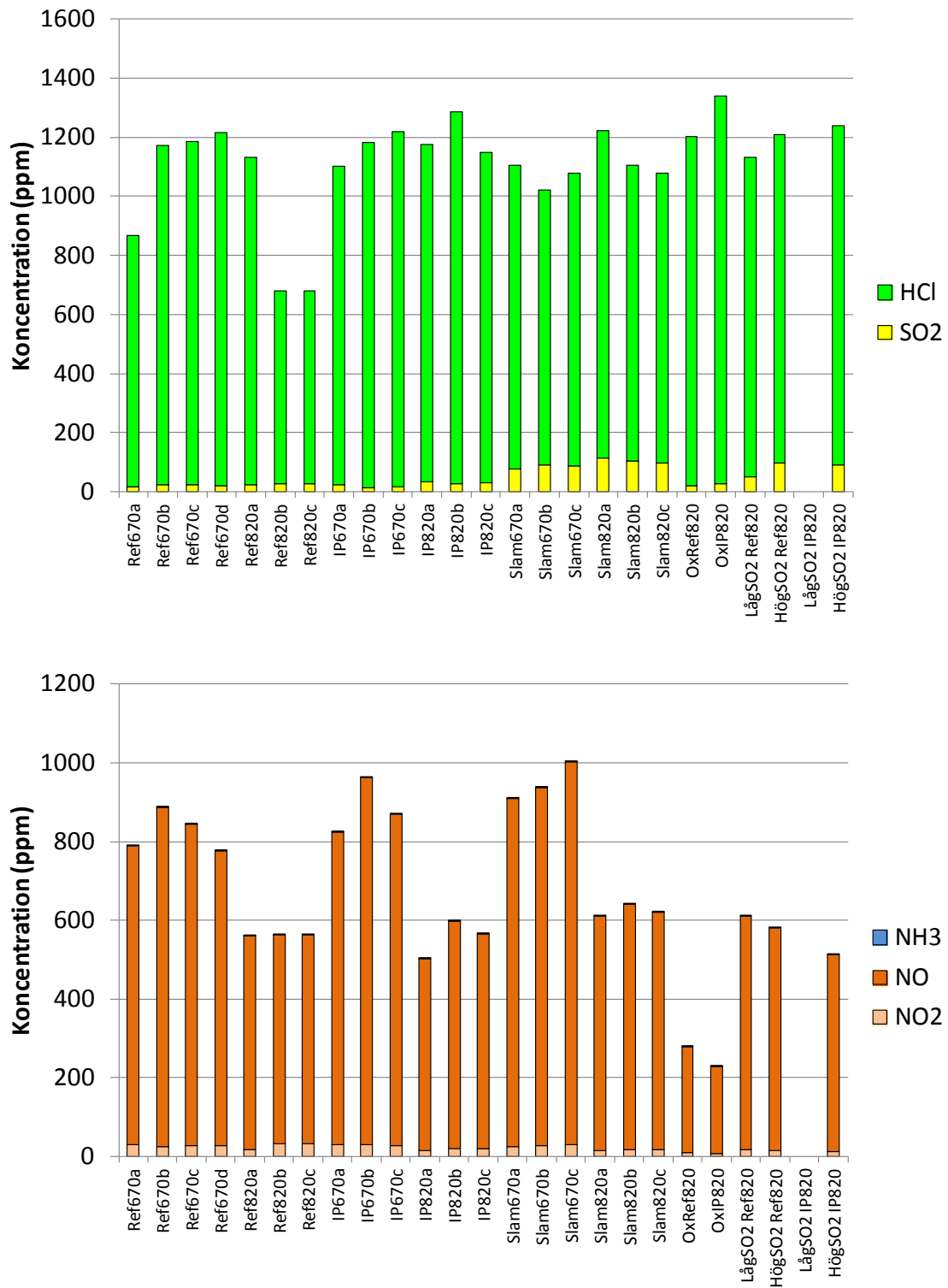
Försök	Ca/ (S+1,5P)	Cl/ (Na+K)	2S/ (K+Na)	(2S+3P)/ (Na+K)	2S/ Cl	(2S+3P)/ Cl	Al/ (Na+K)
Ref670a	5.48	1.97	0.47	0.59	0.24	0.30	1.38
Ref670b	5.48	1.97	0.47	0.59	0.24	0.30	1.38
Ref670c	5.48	1.97	0.47	0.59	0.24	0.30	1.38
Ref670d	5.48	1.97	0.47	0.59	0.24	0.30	1.38
Ref820a	5.48	1.97	0.47	0.59	0.24	0.30	1.38
Ref820b	5.48	1.97	0.47	0.59	0.24	0.30	1.38
Ref820c	5.48	1.97	0.47	0.59	0.24	0.30	1.38
IP670a	5.69	1.83	0.40	0.51	0.22	0.28	12.87
IP670b	5.69	1.83	0.40	0.51	0.22	0.28	12.87
IP670c	5.69	1.83	0.40	0.51	0.22	0.28	12.87
IP820a	5.69	1.83	0.40	0.51	0.22	0.28	12.87
IP820b	5.69	1.83	0.40	0.51	0.22	0.28	12.87
IP820c	5.69	1.83	0.40	0.51	0.22	0.28	12.87
Slam670a	1.40	1.82	0.89	2.82	0.49	1.55	2.10
Slam670b	1.40	1.82	0.89	2.82	0.49	1.55	2.10
Slam670c	1.40	1.82	0.89	2.82	0.49	1.55	2.10
Slam820a	1.40	1.82	0.89	2.82	0.49	1.55	2.10

Försök	Ca/ (S+1,5P)	Cl/ (Na+K)	2S/ (K+Na)	(2S+3P)/ (Na+K)	2S/ Cl	(2S+3P)/ Cl	Al/ (Na+K)
Slam820b	1.40	1.82	0.89	2.82	0.49	1.55	2.10
Slam820c	1.40	1.82	0.89	2.82	0.49	1.55	2.10
OxRef820	5.48	1.97	0.47	0.59	0.24	0.30	1.38
OxIP820	5.69	1.83	0.40	0.51	0.22	0.28	12.87
LågSO2 Ref820	3.43	1.97	0.82	0.93	0.42	0.47	1.38
HögSO2 Ref820	2.49	1.97	1.18	1.29	0.60	0.65	1.38
LågSO2 IP820	3.49	1.83	0.72	0.83	0.40	0.45	12.87
HögSO2 IP820	2.49	1.83	1.06	1.16	0.58	0.63	12.87

Klor finns i överskott i förhållande till alkali i alla försök vilket innebär att drivkraften att bilda alkaliklorider är stor. Detta förhållande – även om det inte alltid är överskott – är ett av huvudproblemen med avfallsbränslen. Svavel, som konkurrerar med klor om alkali, finns i underskott i förhållande till klor och alkali i de flesta försök, och kan därmed inte omvandla alkalikloriden till sulfat i särskilt stor omfattning. Fosfor har visat sig omvandla alkaliklorider till fosfat [9] men det råder ändå underskott på svavel och fosfor i förhållande till klor. Undantaget är försöken med Slampelletts. Det är också överskott på kalk i förhållande till svavel och fosfor i alla försök vilket bör leda till bildning av CaSO_4 och $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Det minskar mängden tillgängligt svavel och fosfor för omvandling av alkaliklorid. Det torde vara överskott på aluminium i försöken med IPpellets. Å andra sidan är ju Al_2O_3 tämligen inert. Störst överskott är det annars i försöken med Slampelletts. Sammantaget är förutsättningarna goda för bildning av alkaliklorider och därmed beläggning i alla försöken. Med hänsyn till kemiska reaktioner så bör man få minst problem med klorinnehållande beläggning i försöken med Slampelletts. Om hypotesen att de inerta partiklarna kan utgöra kondensationsyta är korrekt så bör även försöken med IPpellets ge relativt små problem.

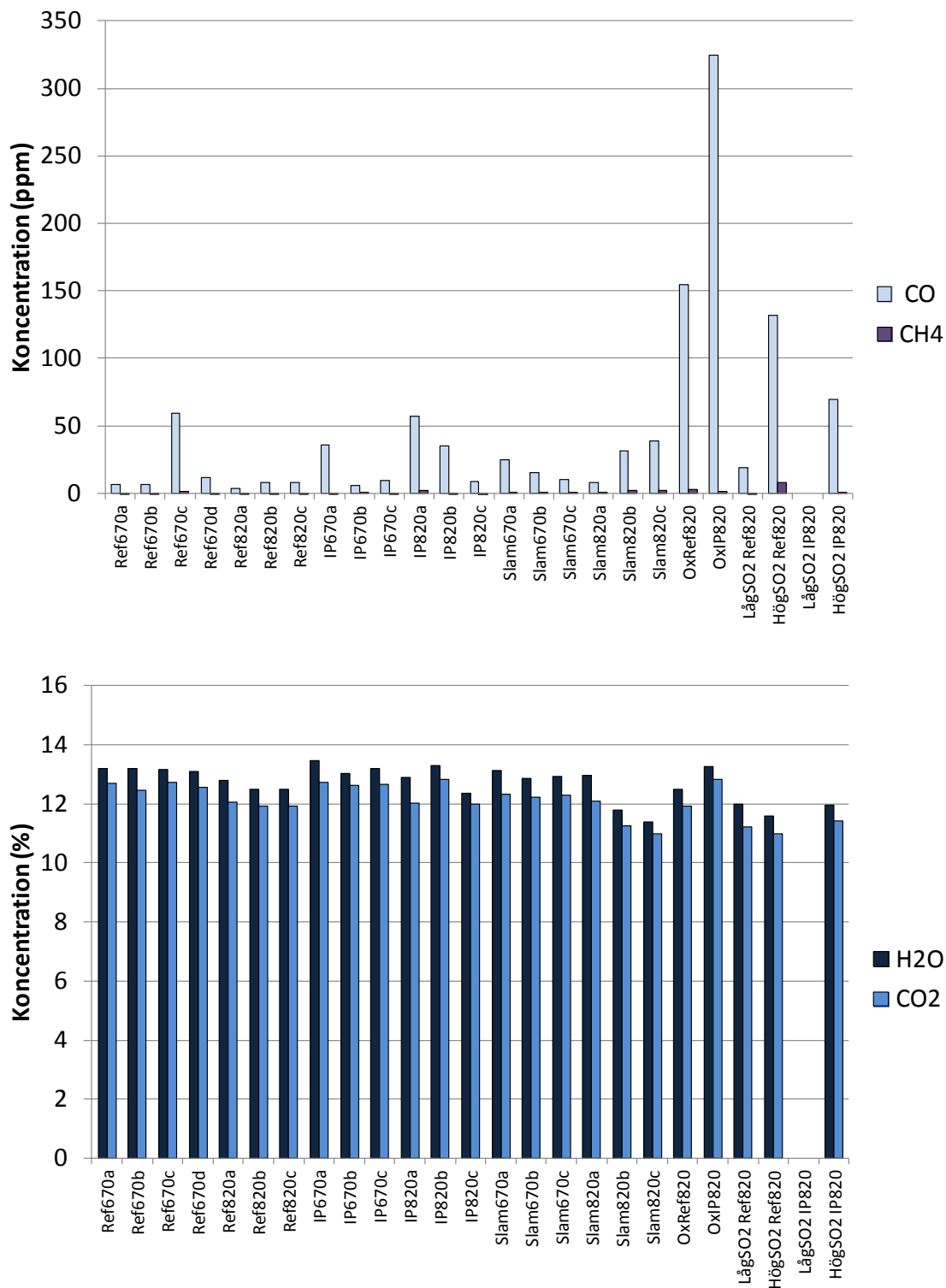
4.2 Rökgaser

I Figur 9 och Figur 10 visas rökgassammansättningen för ett antal gaser i de olika försöken. HCl finns i stora koncentrationer i alla försök. SO_2 är högre i försöken med Slampelletts och när SO_2 tillsatts. Den höga tillsatsen av SO_2 ger upphov till ungefär samma koncentration SO_2 som vid eldning av Slampelletts. NO_x -bildningen är större vid den lägre av bäddtemperaturerna medan omfördelningen av primärluften har en minskande effekt.



Figur 9. Rök-gassammansättning uppmätt med FTIR i zon 4.

Figure 9. Composition of flue gas in zone 4.



Figur 10. Rök-gassammansättning uppmätt med FTIR i zon 4.

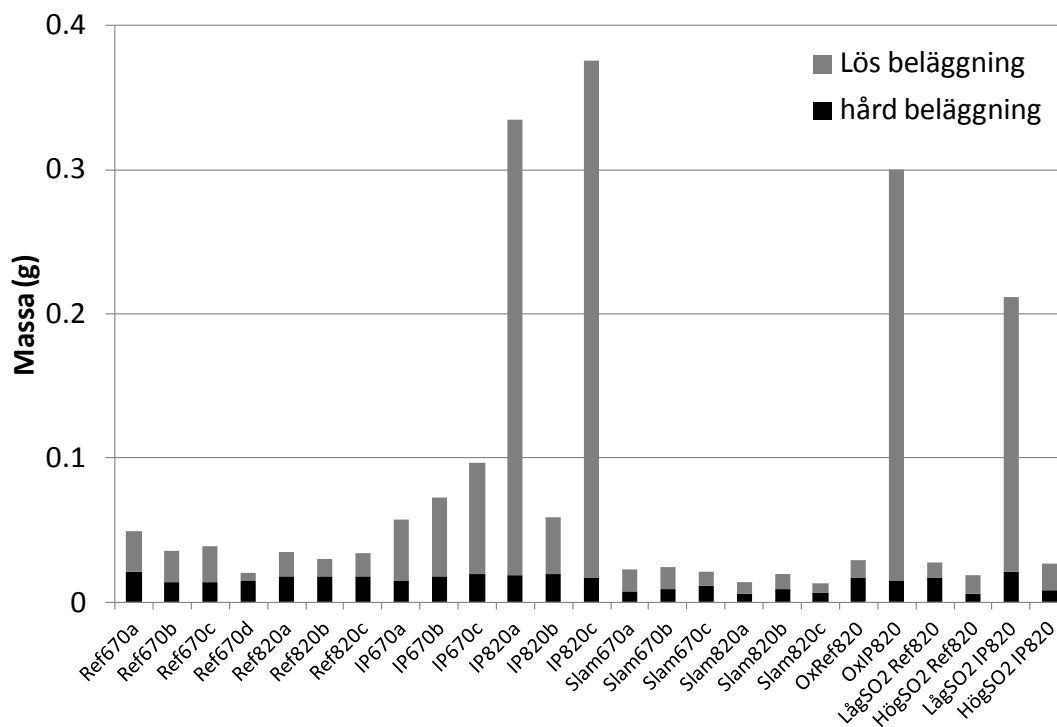
Figure 10. Composition of flue gas in zone 4.

4.3 Beläggningar

Beläggningarnas massa och sammansättning redovisas nedan.

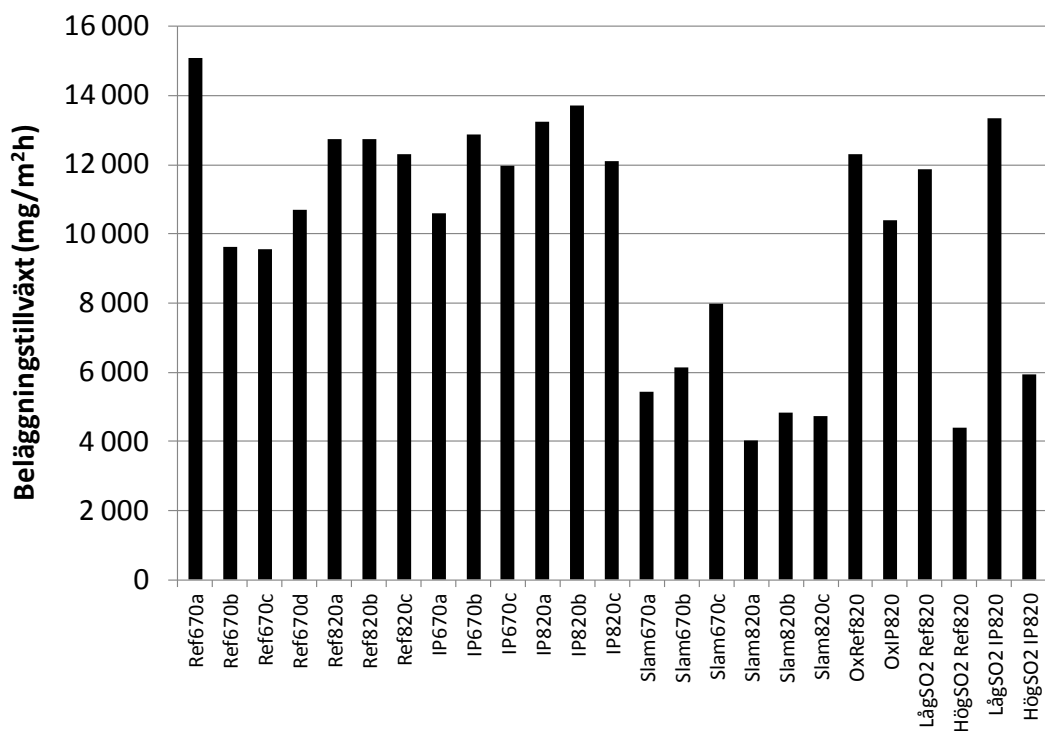
4.3.1 Massa

Massan beläggning visas i Figur 11. I de flesta fall bestod beläggningen av en betydande del väldigt löst sittande stoft. Detta gäller särskilt beläggningarna från försöken med IPpellets. I en storskalig anläggning kan man utgå ifrån att sådant stoft med lätthet skulle avlägsnas med sotningen varför det är av mindre intresse för beläggnings- och korrosionsproblematiken. Det är också svårt att hantera löst sittande beläggningar; de tenderar att lossna när sonden tas ut och när beläggningsringen avlägsnas. En del av den variation i massa som man kan se mellan driftmässigt likartade försök kan troligen förklaras av sådana förluster. Massan hårt sittande beläggningar visas tydligare i Figur 12. Variationen i massa hårt sittande beläggning mellan driftmässigt likartade försök är betydligt mindre. Vid förbränning av Slampellets och vid den högre tillsatsen av SO₂ är beläggningstillväxten ungefär hälften av den i de övriga fallen. Inerta partiklar, bäddtemperaturen, syrehalten och den lägre tillsatsen av SO₂ tycks inte ha någon effekt på tillväxten av denna beläggning.



Figur 11. Massa beläggning uppdelad i hårt och löst sittande.

Figure 11. Mass of hard and loosely attached deposits.



Figur 12. Tillväxt av hårt sittande beläggning.

Figure 12. The growth of hard attached deposit.


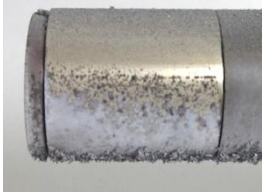

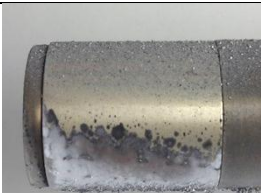









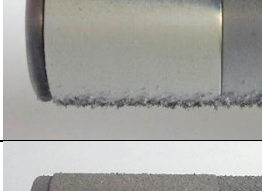




4.3.2 Fördelning över ytan

Gasströmmen träffar ringen från undersidan och gasriktningen verkar skapa tydliga skillnader i var partiklar och korrosion fördelas över ringens yta. Korrosion sker främst på undersida – dvs i impaktionsriktningen – och mest med Refpellets och IPPellets. På undersidan formas skägglignande påväxter av partiklar, dessa försvinner senare till stor del vid separation av löst stoft. På ovansidan lägger sig lösa större partiklar, och ytan under dessa har ingen eller ringa beläggning. Det är främst bränsle med inerta partiklar som kan ge drivor med löst stoft ovanpå ringen.

Tabell 4 och Tabell 5 visar bilder på belägningsringarna grupperade för varje försöksserie. De mörka delarna är i huvudsak korrosion. Effekten kan i vissa fall skönjas under en vit eller gråaktig beläggning.




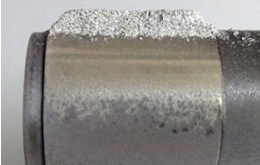


Tabell 4. Bilder som visar på fördelningen av stoft och korrosion över ringarnas yta. Ringarna ses från sidan; d v s rökgasströmmen har kommit nerifrån i bilden.

Table 4. Photos of the deposits.

Beteckning	b	c	d
Ref670			
Beteckning	a	b	c
Ref820			
IP670			
IP820			
Slam670			
Slam820			

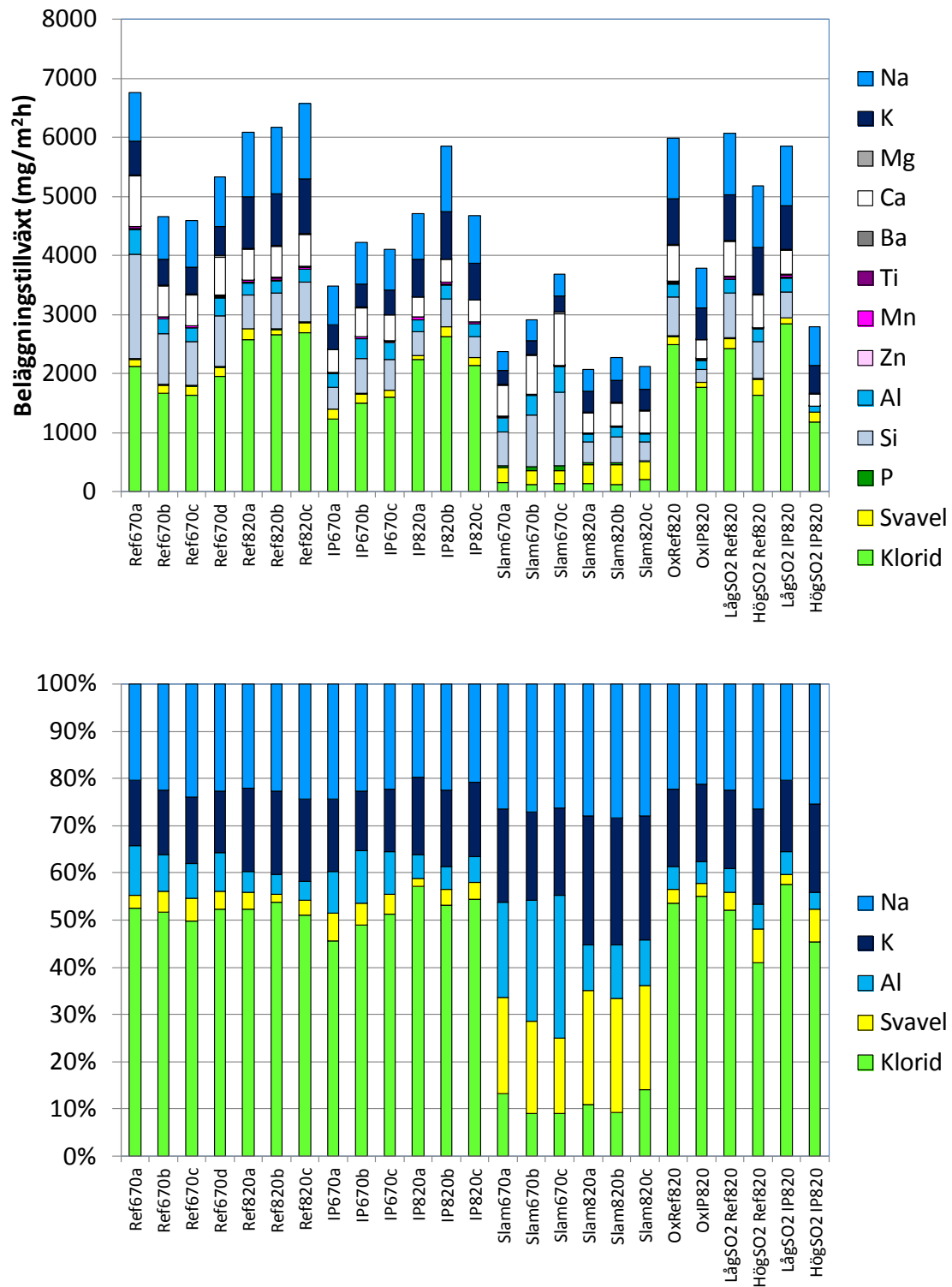
Tabell 5. Bilder som visar beläggningen för övriga fall.

Table 5. Photos of the deposits in the other experimental cases.

	Oxiderande	Låg SO ₂	Hög SO ₂
Ref820			
IP820			

4.3.3 Sammansättning

Tillväxten och sammansättningen av de viktigaste grundämnena i beläggningarna visas i Figur 13. Järn har exkluderats för att inte korrosionsprocesser skall påverka resultatet. Vidare är inte kol och syre med i analysen. Sammantaget får detta effekten att summan av de redovisade ämnena blir mindre än den vägda massan. Tydligast är effekten av slam, som ger ett betydligt lägre kloridinhåll i beläggningen. Även massan av alkalimetaller minskar medan massan svavel ökar. Den högre tillsatsen av SO₂ uppvisar mindre klorid tillväxt men den är betydligt större än i försöken med slamdotat bränsle. Inerta partiklar tycks ha en liten men begränsad effekt på klorid- och alkalitillväxten jämfört med referensbränslet. En bäddtemperatur på 820 °C ger något högre klorinnehåll i beläggningarna än 670 °C. Denna skillnad finns inte i försöken med slampellet. Den relativa sammansättningen är ganska likartad i alla försök utom slampörsöken, som innehåller mindre andel klor och större andel svavel, fosfor och aluminium.

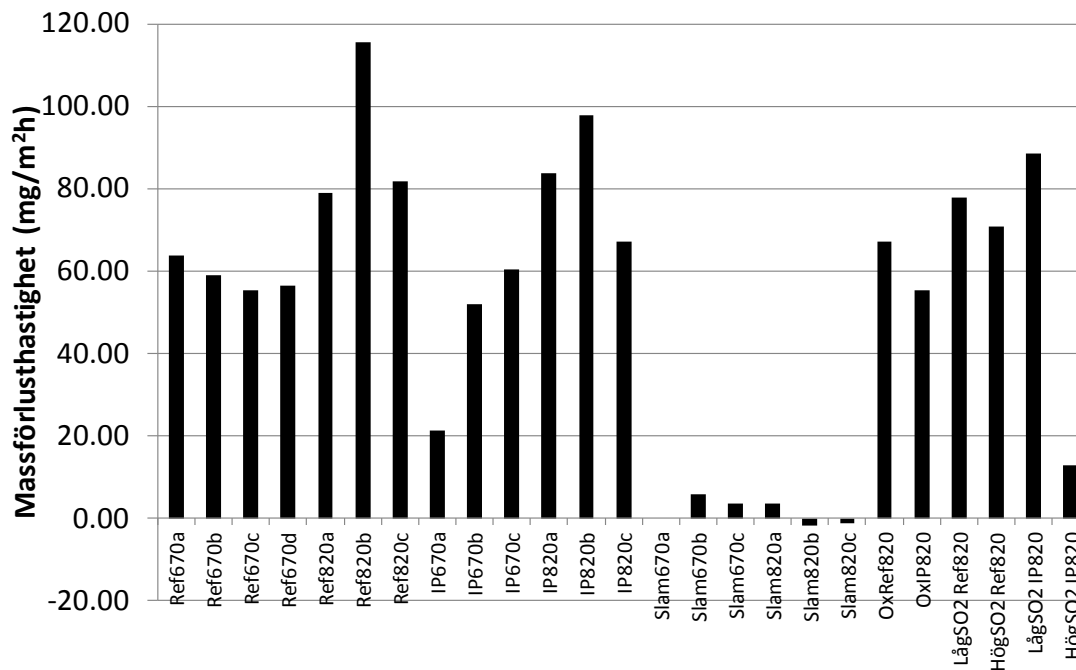


Figur 13. Beläggningarnas tillväxt och sammansättning i de olika försöken. Järn har uteslutits och syre och kol är inte med i den kemiska analysen.

Figure 13. The growth and composition of the deposits in the different tests. Iron has been excluded, and oxygen and carbon are not included in the chemical analysis.

4.4 Korrosion

Stålringens massförändring kan tas som ett mått på korrosionen. Massförändringen per tids- och ytenhet visas i Figur 14.



Figur 14. Förändringen av beläggningsringarnas ursprungliga massa och massa efter att belaggningsringarna avlägsnats.

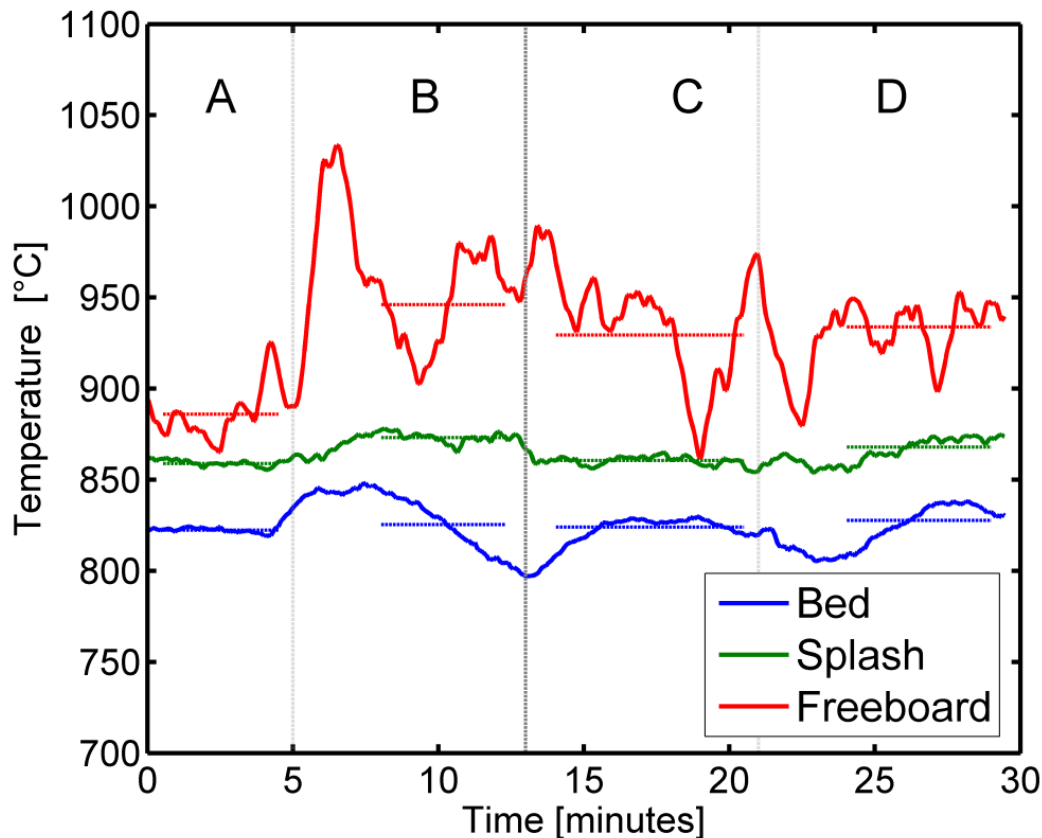
Figure 14. The difference between the initial mass of the steel rings and the mass after removal of the deposits.

4.5 ICP-MS

Gasutsugssystemet är en aning instabilt. Utformningen beror på strävan efter att tillföra provgasen till ICP-MS-instrumentet utan att passera rörliga delar eller kapillärer som tenderar att sätta igen. Det finns fortfarande en del arbete med att utveckla systemet för att erhålla mer kontroll. Plasmata är känsligt för variationer i tryck och flöden och slocknar ganska lätt. Därför erhöles inte några långa tidsserier utan avbrott.

Under försöken med ICP-MS inkopplad förbrändes referensbränslet. Förutom ordinarie förbränningsluft tillfördes även periodvis ett flöde (ca 12 lpm) av en blandning som innehöll 2000 ppm SO₂ blandat med nitrogen. För att studera dess inflytande slogs detta flöde av och på flera gånger i följd, i tidsperioder på mellan 5 och 10 minuter. Ett exempel på en sekvens med fyra perioder, benämnda A-D, redovisas nedan. I första och tredje perioden (A och C) tillsätts SO₂ i primärluften, men inte under perioderna B och D. Under hela sekvensen hölls bränsleskruvens varvtal konstant, men det förekommer ändå vissa okontrollerade variationer i bränsleflödet. Under försöken hölls primär- och sekundärluftsflöden konstant och i det närmaste lika stora. Bränsleskruvens varvtal hölls också konstant. Baddtemperaturen reglerades mot 820 °C, men vissa okontrollerade

variationer förekommer ändå, se Figur 15. I figuren indikerar de vertikala grå linjerna tidpunkter för förändrad tillförsel av SO₂. För varje testperiod (A-D) beräknades medelvärden av driftparametrar under de tider som indikeras med horisontella linjer i figuren. För att undvika stort inflytande av omställningsförlopp och en kortare driftstörning (i början av period B) användes inte hela perioderna för medelvärdesbildningen. Medelvärden av några utvalda driftparametrar ges i Tabell 6.



Figur 15. Temperaturer i reaktorn under försöken med ICP-MS. Blå) i bädden; Grönt) över bädd, och Rött) över sekundärluft.

Figure 15. Temperatures in reactor during tests with ICP-MS. Blue) In bed, Green) over bed and C) over secondary air inlet.

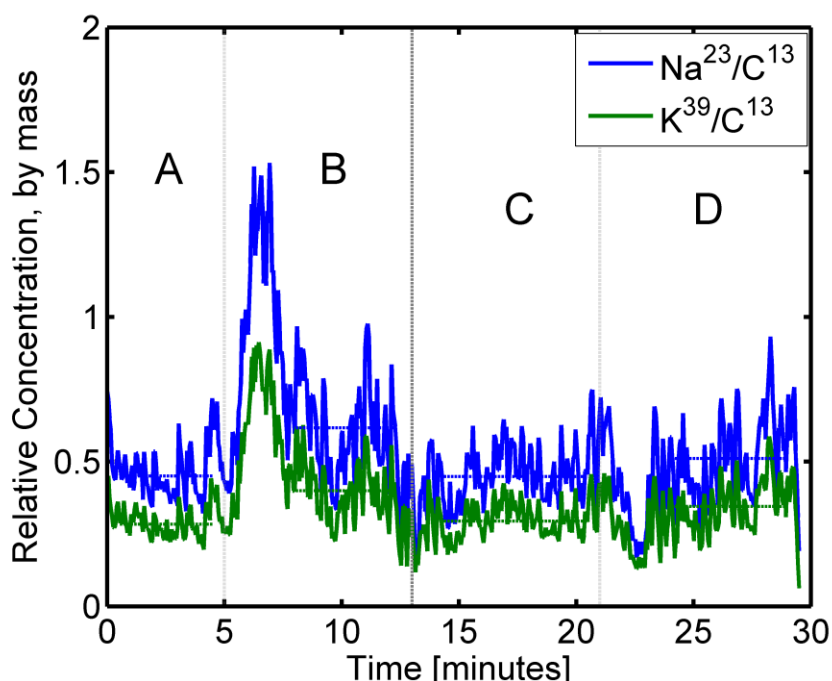
Tabell 6. Driftparametrar under försökssekvensen med ICP-MS.

Table 6. Reactor conditions during test sequence with ICP-MS.

Tidsperiod	Tillförd SO ₂ /N ₂ -blandning	O ₂ Rökgas Vol. % tg	CO ₂ Rökgas Vol. %, vg	Temp. Bädd	Temp Fribord
A	12	5,9	10,3	822	886
B	0	6,0	12,0	825	946
C	12	5,7	10,9	824	929
D	0	5,9	12,2	828	934

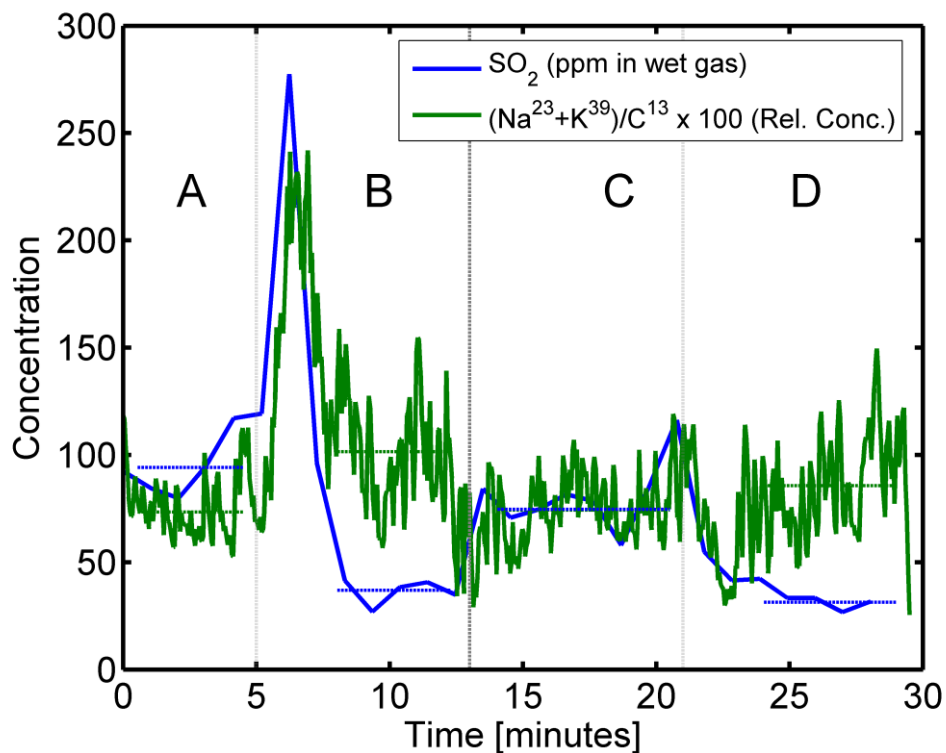
Under samma tidsperiod som i Figur 15 uppmättes relativa koncentrationer alkali (instrumentet mäter isotoperna Na^{23} och K^{39}) i rökgasen enligt Figur 16, där de skalats mot intern standard och mot mängden C^{13} i rökgasen för att eliminera effekter av förändrad luftfaktor (se Appendix C för detaljer). Skalningen mot C^{13} eliminerar även risken av att resultaten skulle ha påverkats av eventuellt varierande spädfaktor (f_{sf} i ekvation (2)). Från figuren framgår att det uppmättes högre halter av natrium än kalium i rökgasen. Alkalimängden kan jämföras mot uppmätta koncentrationer av SO_2 i rökgasen i Figur 17, och dessa värden har skalats upp en faktor 100 för att underlätta jämförelsen. Som visas i Tabell 7 var halten av SO_2 i rökgasen i medeltal 42 ppm under period (B och D) och 81 ppm under perioder (A och C). Å ena sidan blev det nästan en fördubbling av SO_2 i rökgasen när SO_2 tillfördes primärluften, men i jämförelse med HCl-koncentrationer på drygt 1000 ppm är det ändå relativt låga halter SO_2 i rökgasen. Figur 17 illustrerar också att alkalimängden i rökgasen minskar i medeltal med drygt 20 % när SO_2 tillförs primärluften. Effekten kommer snabbt, nästan omedelbart efter tillförseln.

Gasen som tillförs primärluften med ett flöde av ca 12 l/min innehåller 2000 ppm SO_2 . Samtidigt tillförs ca 100 l/min förbränningsluft. Detta ger att i den totalt tillförda "luften" är koncentrationen SO_2 över 200 ppm. Detta kan jämföras med ökningen av SO_2 i rökgasen som blev ca 40 ppm. Denna skillnad tyder på att större delen av tillförd SO_2 reagerar i reaktorn, antagligen med kalcium och alkalimetaller. Härvid bildas bl a alkalisulfat av alkaliklorider varvid klorid bildar HCl. På den redan från början höga koncentrationen av HCl kan dock ingen ökning av denna skönjas.



Figur 16. Detekterad mängd alkalimetaller i rökgasen (Natrium - blå linje, Kalium - Grön linje), relativt detekterad mängd C^{13} i gasen. SO_2 tillfördes reaktorn under perioderna A och C.

Figure 16 Detected amounts of alkali metals in flue gas (Sodium – blue line, Potassium – Green line), relative to detected C^{13} in the gas. SO_2 was added during intervals A and C.



Figur 17. Detekterad mängd alkali (Na+K, grön linje) jämfört mot uppmätt koncentration SO_2 i rökgasen (FTIR, blå linje).

Figure 17. Detected amount of alkali metals (Na+K, green line) compared to concentration of SO_2 in the flue gas (FTIR, blue line).

Tabell 7. Medelvärden under markerade tidsperioder i Figur 16 och Figur 17.

Table 7. Average values during marked intervals in Figur 16 and Figur 17.

Tidsperiod	SO_2 (ppm)	HCl (ppm)	$\text{Na}^{23}/\text{C}^{13}$	$\text{K}^{39}/\text{C}^{13}$
A	88	1033	0,45	0,29
B	51	1183	0,62	0,40
C	75	1102	0,45	0,30
D	34	1205	0,52	0,35

5 Resultatanalys

5.1 Allmänt om försökens kvalitet

Driften av reaktorn var ej i alla delar specificerad vid projektets början utan har modifierats efter hand av projektgruppen. Noggrann dokumentering av procedurer och nyckelparametrar ger goda förutsättningar för jämförbara försök inom projektet och för att upprepa vid annat tillfälle. Rökgassammansättningen (Figur 10) visar att H₂O och CO₂ har ungefär samma koncentration i alla försök. Halten CO har oftast varit låg vilket tyder på god förbränning. I några försök är halten CO något förhöjd utan att nå oroväckande nivåer. Omfördelningen av förbränningsluften påverkar CO starkt men det är en effekt som beror just på omfördelningen och inte på bränslefel eller andra felkällor, och får därför betraktas som ett resultat. Det verkar också som att den högre tillsatsen av SO₂ inverkar på halten CO. Det är heller inget fel utan kan vara en effekt av de reaktionsmekanismer som är i omlopp i rökgasen men det ligger utanför projektet. Sammanfattningsvis är försöken jämförbara i den meningen att inga andra skillnader mellan försöken än de avsedda fått påverka resultatet. Slutsatserna baseras alltså på att effekterna av en variation av driftinställningen skall vara större än spridningen mellan olika fall med samma driftinställningar.

I projektet har själva bränslet och separation av lös och hård beläggning från stålringarna utvecklats. Ett syntetiskt avfallsbränsle utgör en förutsättning för att göra ett laborieförsök i föreliggande skala. Det visade sig svårt att få tag på kommersiella avfallspelletts men även om pellets till skillnad från opelleterat avfall är lätt att hantera så blir variationen mycket större vilket gör resultaten svårtolkade. I föreliggande projekt har finfördelade ingredienser omblandats noga varför man kan vara helt säker på att bränslevariationer inte orsakat resultatet. Klorhalten i bränslet var något för hög jämfört med normalt avfall. Det gjorde att de planerade försöken med förhöjd HCl-halt inte kunde motiveras. Försöken med IPpellets resulterade i stor mängd löst sittande beläggning. Projektgruppen beslöt att inte ta med denna beläggning eftersom den troligen bestod mest av Al₂O₃. Härvid utvecklades ett instrument (Figur 21) för att separera beläggningarna på ett repeterbart sätt.

Från LågSO₂ IP820 saknas rökgasdata. Dessa raderades av FTIR:ens dator.

5.2 Inerta partiklar

Tillsatsen av inerta partiklar orsakar en lös beläggning på ovansidan (läsidan) av beläggningssonderna. Troligen har denna bildats genom sedimentation i de gasvirvlar som bildas på baksidan av sonden. En större del av innehållet i dessa beläggningar bör alltså vara Al₂O₃. Beläggningen bedöms vara lätt att avlägsna med ordinarie sotning om den skulle uppstå i en storskalig panna. Mängden hård beläggning påverkas inte av tillsatsen av inerta partiklar annat än genom sin fördelning över sondens yta. Den hårda beläggningen återfinns företrädesvis på undersidan (vindsidan) av sonden vilket tyder på att transportmekanismen är impaktion. Avsaknaden av hård beläggning på läsidan kan bero på att den lösa beläggningen skyddar ytan. Tillväxten av klorid och alkali i beläggningar minskar jämfört med eldning av Refpellets. Aluminiumtillväxten ökar inte, varför detta inte är en utspädningseffekt. Därför kan inte uteslutas att de inerta partiklarna har effekten att utgöra kondensationsyta för alkaliklorid i rökgasen och därmed hindra dess kondensation

på beläggningssonden. Effekten är i så fall relativt liten. Deras inverkan att genom erosion avlägsna redan bildad beläggning tycks vara försumbar eftersom erosionen i så fall borde vara störst på vindsidan. Här är den hårda beläggningen emellertid tjockare än den är på sidorna av tuben (mellan vind- och läsida) där den ibland inte återfinns alls.

5.3 Slam tillsats

Slampelletsen medför mycket lägre klorid- och alkalitillväxt än de övriga bränslena och driftsbetingelserna. Detta är förväntat och har visats tidigare med slam tillsats i fluidbäddförbränning.[9] Nyckeltalen visar att det förmodligen är en kombination av svavel- och fosforinnehållet som ger denna effekt: $Ca/(S+1,5P)$ är relativt låg och $(2S+3P)/(Na+K)$ är hög. Man kan dock inte utesluta att slammets innehåll av aluminium i form av silikater också bidrar genom att binda alkali eftersom $Al/(Na+K)$ är högre än försöken utan IPPellets. Trots bränslets höga koncentration av klor blir alltså beläggningar och – som det tycks – korrosion relativt begränsade.

5.4 Svaveldioxid

Trots att rökgaserna vid den högre doseringen av SO_2 innehöll lika mycket SO_2 som vid förbränning av slampartiklar, så innehöll beläggningarna betydligt mindre sulfat och betydligt mer klorid. Om svavlet i slammet mestadels bildar SO_2 vid förbränning, vilket får anses troligt, är orsaken till slammets goda egenskaper ur beläggningssynpunkt i dessa experiment, inte i första hand dess svavelinnehåll. Ändå minskar tillförsel av SO_2 mängden alkali som är mätbar för ICP-MS (Figur 17). Nyckeltalen (Tabell 3) visar att tillsatsen av SO_2 var för låg för att undantränga klorid. Det är sannolikt att en betydligt högre tillsats hade fått tydlig effekt. Försöken med Slampelletsen skiljer sig från de andra med avseende på fosfor- och aluminiumtillförseln om man bortser från aluminium i de inerta partiklarna. Fosfor och/eller aluminiumföreningarna i slammet bidrar alltså högst avsevärt till slammets effekt i dessa experiment.

5.5 Förhöjd luftfaktor i botten

Omfördelningen av luftfaktorn hade ingen tydlig effekt med Refpellets. Med IPPellets erhöles en beläggning med mindre tillväxt av de flesta av de analyserade elementen. Tillväxten av beläggningens massa var dock inte lika mycket lägre. Det kan bero på att en förhöjd luftfaktor i botten ger upphov till mer oxider som återfinns i beläggningarna.

5.6 Baddtemperatur

Baddtemperaturen påverkar inte beläggningstillväxten på ett signifikant sätt. Även tillväxten av olika ämnen är opåverkad annat än möjligen vid eldning av IPPellets då tillväxten av klorid och alkali är större och tillväxten av aluminium är något mindre vid 820 °C.

6 Slutsatser

Resultaten från försöken i detta projekt visar att

- de positiva effekterna av att samförbränna med rötslam inte förklaras med ökad mängd partiklar. En viss minskning av mängden beläggningar kunde påvisas vid inblandning av inerta partiklar men effekten var ganska liten.
- den ökade partikelkoncentrationen hade i dessa försök ingen eroderande effekt på beläggningarna.
- dosering av samma mängd svavel, genom tillsats av SO₂, som tillfördes med rötslam, visade tillsammans med framräknade nyckeltal att svavel inte ensamt kan förklara rötslammets positiva effekter.
- det troligtvis är en kombination av svavel, fosfor och aluminium som ger den positiva effekten på mängden beläggningar och klorinnehållet i beläggningar vid samförbränning av rötslam.
- svavel och fosfor reagerar inte bara med alkali utan även med kalcium. Det innebär att mängden svavel och fosfor som är tillgänglig för att reagera med alkali minskar. Genom att studera en kombination av olika nyckeltal kan man få en uppfattning av om det finns svavel och/eller fosfor i tillräcklig mängd för att ersätta klor i alkaliföreningar. Ett annat sätt är att göra jämviktsberäkningar men det har inte ingått i detta projekt.
- bäddtemperaturen och luftfaktorn i bädden har liten eller ingen påverkan på beläggningstillväxten.

7 Rekommendationer och användning

Resultaten visar att sameldning med avloppsslam har mycket positiva egenskaper och att de inte i stor utsträckning beror på slammets stora innehåll av aska. Föreliggande resultat visar alltså att man inte skall välja avloppsslam för förbränning efter hur mycket aska det innehåller utan snarare göra bedömningen baserad på innehållet av svavel, fosfor och aluminium. Då skall man bedöma det totala bränslets sammansättning; d v s slammet tillsammans med avfallet. Ur beläggningssynpunkt är det fördelaktigt med höga halter svavel, fosfor och aluminium och låga halter alkali och klor.

Vidare studier av slams egenskaper vid samförbränning bör fokusera på

- bränsemixens totala sammansättning med avseende på nyckelkomponenterna kalium, natrium, kalcium, svavel, klor, fosfor och aluminium.
- vilka faktorer som påverkar slammets sammansättning av kalcium, svavel, klor, fosfor och aluminium.
- slamdoseringstekniker och då i synnerhet vid förbränning på rost.

8 Litteraturreferenser

- [1] Uberoi, M., Punjak, W.A., Shadman, F.; "The Kinetics and Mechanism of Alkali Removal from Flue Gases by Solid Sorbents" *Prog. Energy Combust. Sci.* 16 (1990) pp. 205-211
- [2] van Lith, S.C., Jensen, P.A., Frandsen, F.J., Glarborg, P.; "Release to the Gas Phase of Inorganic Elements during Wood Combustion. Part 2: Influence of Fuel Composition" *Energy & Fuels* 22 (2008), pp. 1598–1609
- [3] Nielsen, H.P. Frandsen, F.J., Dam-Johansen, K., Baxter, L.L.; "The implications of chlorine-associated corrosion on the operation of biomass-fired boilers" *Progress in Energy and Combustion Science* 26 (2000) 283–298
- [4] Davidsson, K., Eskilsson, D., Gyllenhammar, M., Herstad Svärd, S., Kassman, H., Stenaari, B.M., Åmand, L-E.; "Åtgärder för samtidig minimering av alkalirelaterade driftproblem" *Värmeforskrapport nr 997* (2006)
- [5] Gyllenhammar, M., Herstad Svärd, S., Davidsson, K., Stenaari, B.M., Folkesson, N., Pettersson, J., Svensson, J.E., Boss, A., Johansson, L., Kassman, H.; "Åtgärder för samtidig minimering av alkalirelaterade driftproblem, Etapp 2" *Värmeforskrapport nr 1037* (2008)
- [6] Åmand, L-E., Leckner, B., Eskilsson, D., Tullin, C. "Deposits on heat transfer tubes during co-combustion of biofuels and sewage sludge" *Fuel* 85 (2006) pp. 1313-1322
- [7] Elled, A-L.; "Co-combustion of Biomass and Waste Fuels in a Fluidised Bed Boiler – Fuel synergism" PhD thesis, Chalmers University of Technology, Department of Energy and Environment (2008) ISBN 978-91-7385-139-8
- [8] Pettersson, A.; "Characterisation of Fuels and Fly ashes from Co-Combustion of Biofuels and Waste Fuels in a Fluidised Bed Boiler –A Phosphorus and Alkali Perspective" PhD thesis, Chalmers University of Technology, Department of Energy and Environment (2008) ISBN 978-91-7385-174-9
- [9] Herstad Svärd, S., Åmand, L.-E., Bowalli, J., Öhlin, J., Steenari, B.-M., Pettersson, J., Svensson, J.-E., Karlsson, S., Larsson, E., Davidsson, K., Bäfver, L., Almark, M.; "Ramprogram - Åtgärder för samtidig minimering av alkalirelaterade driftproblem, Etapp 3", *Värmeforsk rapport nr 1167* (2011)

-
- [10] Karlsson, A., Möller, P.J., Johansen, V.; “Iron steel corrosion in a system of O₂, SO₂ and alkali chloride. The formation of low melting point salt mixtures.” *Corrosion Science* 30 (1990) pp. 153-158.
- [11] Grabke, H.J., Reese, E., Spiegel, M., “The effects of chlorides, hydrogen chloride and sulfur dioxide in the oxidation of steels below deposits” *Corrosion Science* 37 (1995) pp. 1023–1043
- [12] Aho, M., Ferrer, E.; “Importance of coal ash composition in protecting the boiler against chlorine deposition during combustion of chlorine-rich biomass” *Fuel* 84 (2004) pp. 201-212
- [13] Makkonen, P.; “Artificially intelligent and adaptive methods for prediction and analysis of superheater fireside corrosion in fluidised bed boilers” PhD thesis, Lappeenranta University of Technology (1999) ISBN 951-764-375-6
- [14] Aho, M.; “Reduction of chlorine deposition in FB boilers with aluminium-containing additives” *Fuel* 80 (2001) pp. 1943-1951
- Scandrett, L. A., Clift, R.; “The thermodynamics of alkali removal from coal-derived gases” *Journal of the Institute of Energy* (1984), pp. 391-397
- [15] Warnqvist, B., Norrström, H.; “Chlorides in the recovery boiler and a mechanism for chloride removal”, *Tappi Journal* vol 59 (1976) pp. 89-91
- [16] Nielsen, HP., Frandsen, FJ, Dam-Johansen, K.; “Lab-Scale Investigations of High Temperature Corrosion Phenomena in Straw-Fired Boilers” *Energy & Fuels* 13 (1999) pp. 1114-1121
- [17] Furmisky, E., Zheng, L.; “Quantification of chlorine and alkali emissions from fluid bed combustion of coal by equilibrium calculations” *Fuel Processing technology* 81 (2003) pp. 7-21
- [18] Theis, M., Skrifvars, B-J., Hupa, M., Tran, H.; “Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels. Part 1: Deposition rates” *Fuel* 85 (2006) pp. 1125-1130.
- [19] Theis, M., Skrifvars, B-J., Hupa, M., Tran, H.; “Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels. Part 2: Deposit chemistry” *Fuel* 85 (2006) pp. 1992-2001.
- [20] Theis, M., Mueller, C., Skrifvars, B-J., Hupa, M., Tran, H.; “Deposition behaviour of model biofuel ash in mixtures with quartz sand. Part 3: Experimental data” *Fuel* 85 (2006) pp. 1970-1978.

- [21] Andersson, S., Blomqvist, E., Bäfver, L., Claesson, F., Davidsson, K., Froitzheim, J., Karlsson, M., Pettersson, J., Steenari, B-M., Minskad pannkorrosion med svavelrecirkulation, Waste Refinery-rapport, WR-07, 2010
- [22] Niklasson, F., Pettersson, A., Claesson, F., Johansson, A., Gunnarsson, A., Gyllenhammar, M., Victorén, A., Gustavsson, G.; "Sänkt bäddtemperatur i FB-pannor för avfallsförbränning – Etapp 2" Waste Refinery-rapport WR-19, 2010
- [23] Konversation med Phan Duong Ngoc Chau, Kemi, Umeå Universitet
- [24] Gyllenhammar, M., Davidsson, K. Jonsson, T., Pettersson, J., Victorén, A., Andersson, H., Widén, C.; "Energiåtervinning av brännbar fraktion från fragmentering av metallhaltigt avfall - Steg 2" Waste Refinery-rapport WR-23, 2010

A Recept på syntetiskt avfall (vikt-%)

	Syntetiskt avfall	Syntetiskt avfall med inerta partiklar	Syntetiskt avfall med slam
papper	32.69	29.72	29.71
polyeten	10.02	9.11	9.11
polyvinylklorid	0.53	0.48	0.48
torv	5.27	4.79	4.79
sågspån	13.08	11.89	11.89
mjöl	15.82	14.38	14.38
gelatin	8.44	7.67	7.67
olja	5.27	4.79	4.79
sand	2.64	2.40	2.40
silica gel	3.16	2.88	2.88
kaolin	1.79	1.63	1.63
CaCl ₂ •6H ₂ O	0.77	0.70	0.70
NaCl	0.53	0.48	0.48
Al ₂ O ₃	0	10	0
avloppsslam	0	0	10

Bilder på tillverkningen



Figur 18. Blandaren.

Figure 18. The mixer.



Figur 19. Material till avfallspellets blandas.

Figure 19. The material for the waste pellets is mixed.



Figur 20. Färdiga pellets.

Figure 20. Newly made pellets.

B Spårämnen i Slampellet

Spårämne	Halt
koppar (mg/kg TS)	58
vanadin (mg/kg TS)	4
krom (mg/kg TS)	5
kobolt (mg/kg TS)	2
nickel (mg/kg TS)	4
zink (mg/kg TS)	83
bly (mg/kg TS)	2
kadmium (mg/kg TS)	<0,3
molybden (mg/kg TS)	<2
arsenik (mg/kg TS)	<3

C Driftdata

Beteckning	Temp. Bädd av	Temp. bädd ö1	Temp. bädd ö3	Temp. frib n	Temp. frib ö3	Temp. frib ö5	Temp. uttag	Temp. sond	Tryck v	Primärluft	Sekundärluft	Primärluft/sekundärluft	CO	CO ₂	o2	Luftfaktor
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	Pa	l/min	l/min	-	ppm	%	%	-
Ref670a	670	769	789	936	917	805	628	437	774	49.7	50.7	1.0	9	14.4	4.6	1.28
Ref670b	670	783	762	929	923	805	614	439	699	51.0	48.8	1.0	9	14.1	4.9	1.31
Ref670c	670	783	772	934	924	802	616	441	721	50.9	49.2	1.0	36	14.4	4.8	1.30
Ref670d	670	770	774	894	913	801	631	437	766	50.6	49.9	1.0	17	14.2	5.0	1.31
Ref820a	820	879	880	935	920	814	624	442	698	51.6	48.0	1.1	6	13.5	5.3	1.34
Ref820b	820	881	870	960	936	804	630	442	689	50.5	48.9	1.0	29	13.5	5.2	1.33
Ref820c	821	872	860	945	959	832	637	444	732	50.5	48.8	1.0	1388	13.3	5.2	1.33
IP670a	670	765	778	900	941	827	630	441	783	49.7	50.6	1.0	51	14.0	4.7	1.29
IP670b	670	781	748	890	925	817	632	442	715	50.6	50.9	1.0	8	13.8	5.0	1.31
IP670c	670	771	769	903	945	821	619	441	720	50.7	49.7	1.0	36	13.5	4.7	1.29
IP820a	820	856	885	935	925	815	638	443	804	52.1	48.1	1.1	30	13.4	5.5	1.35
IP820b	819	863	860	988	967	827	629	440	735	50.4	49.7	1.0	61	13.1	4.8	1.30
IP820c	820	858	850	935	907	794	639	438	682	51.4	48.0	1.1	41	12.8	5.8	1.38
Slam670a	670	757	761	927	913	793	628	440	790	49.7	50.6	1.0	34	13.8	4.9	1.31
Slam670b	670	775	754	928	915	787	622	440	712	51.1	49.7	1.0	44	13.3	5.0	1.31
Slam670c	670	738	735	909	933	810	632	439	779	51.1	49.9	1.0	37	13.4	4.8	1.30
Slam820a	820	876	857	929	904	801	632	441	639	52.2	47.9	1.1	13	13.5	5.2	1.33
Slam820b	820	861	851	937	921	816	642	442	701	51.3	47.8	1.1	74	13.3	5.1	1.32
Slam820c	820	855	855	861	908	816	637	443	746	51.3	47.9	1.1	39	13.1	5.4	1.34
OxRef820	821	846	895	844	859	761	636	441	733	77.0	13.9	5.5	209	13.1	5.4	1.35
OxIP820	821	840	905	898	903	816	665	442	803	76.2	13.8	5.5	375	13.0	5.3	1.34
LågSO2 Ref820	820	868	858	921	908	804	635	443	624	50.4	50.3	1.0	41	12.1	5.5	1.35
HögSO2 Ref820	820	862	885	927	909	811	641	443	690	50.2	50.3	1.0	180	11.3	5.4	1.35
LågSO2 IP820	820	855	855	967	936	816	627	440	711	51.3	48.0	1.1	24	12.3	5.2	1.33
HögSO2 IP820	818	851	853	962	938	827	642	444	682	51.0	47.6	1.1	106	11.5	5.2	1.33

D Massbalans över ICP-MS gasutsugsystem

Nomenklatur

F_s	Flöde av provgas
F_d	Spädflöde till sond
F_l	Spädflöde till ejektor, Drivflöde Argon till ICP-MS
F_p	Provgasflöde till ejektor
F_n	Bärgasflöde från nebuliser
C_{rx}	Koncentration av x i reaktor
$C_{d,x}$	Koncentration av x flöde efter ejektor
$C_{m,x}$	Koncentration av x i gas till ICP-MS
S_x	Massbaserat signalvärde från ICP-MS

Massbalans över spädsond och ejektor ger

$$C_{s,x}F_s = C_{d,x}(F_s + F_d + F_n) \quad (1)$$

Med avsikt att förkorta följande ekvationer införs spädfaktorn f_{s1}

$$f_{s1} = \frac{F_s + F_d + F_n}{F_s} = \frac{C_{r,x}}{C_{d,x}} \quad (2)$$

I praktiken är flödet F_s okänt, därför beräknas f_{s1} från uppmätta koncentrationer av CO_2 i reaktorn och i den utspädda gasen:

$$f_{s1} = \frac{C_{r,\text{CO}_2}}{C_{d,\text{CO}_2}} \quad (3)$$

På samma sätt ger en massbalans nästa utspädningsfaktor som

$$f_{s2} = \frac{C_{d,x}}{C_{m,x}} = \frac{F_p + F_l}{F_p} \quad (4)$$

Kvoten mellan koncentrationerna i ursprunglig rökgas och in till ICP-MS blir

$$\frac{C_{s,x}}{C_{m,x}} = f_{s1}f_{s2} \quad (5)$$

Mätningen med ICP-MS genomfördes med följande steg

1. Nollnivå (=bakgrund). Under nollnivåtester sugas luft i systemet istället för rökgas. Som intern standard används bara en lösning med Rb. Detta ger nollnivåsignaler för ämne x som $S_{x,0}$ samtidigt som signalen för Rb är $S_{Rb,0}$.

2. Referensnivå. Interna standarden byts till en lösning som innehåller lika höga koncentrationer av ämnen som analyseras som Rb, fortfarande med luft i systemet. Detta ger referenssignaler $S_{x,Ref}$ och $S_{Rb,Ref}$.
3. Mätning. Under mätningen av rökgas tillförs återigen enbart Rb som intern standard. Eftersom känsligheten för instrumentet kan driva något över tiden skalas uppmätta signaler (S_x) mot Rb signalen i samma tidpunkt (S_{Rb}).

Denna metod ger att koncentrationen av ämne x i gasen in till ICP-MS:en beräknas från signalvärden enligt

$$C_{m,x} = \frac{\frac{S_x}{S_{Rb}} - \frac{S_{x,0}}{S_{Rb,0}}}{\frac{S_{x,Ref}}{S_{Rb,Ref}} - \frac{S_{x,0}}{S_{Rb,0}}} C_{x,Ref} \quad (6)$$

Tyvärr är inte $C_{x,ref}$ känd, trots att flödet till nebulisatorn är känt, eftersom bara en lite del av tillförd standardlösning bildar tillräckligt små droppar för att följa med gasflödet ända fram till instrumentet. Koncentrationerna i rökgasen uppskattas sedan med spädfaktorerna, enligt ekvation (5).

När SO_2 tillförs reaktorn sker det i en gasblandning som utgörs till 99,8 % av kväve. Detta flöde späder ut rökgasen och sänker dess syrekoncentration, även om flödena av luft och bränsle hålls oförändrade. Eftersom bränsleflödet trots allt varierar är det önskvärt att kunna beräkna hur stort bränsleflödet varit under en viss tidsperiod. Detta eftersom uppmätt innehåll i rökgasen lämpligen skalas mot tillfört bränsleflöde. När bara luft och bränsle tillförs reaktorn beräknas bränsleflödet enligt vanliga metoder. Först beräknas luftfaktorn (m), till exempel från uppmätt syrehalt i torr rökgas ($O_{2,t}^{meas}$) med sambandet:

$$m = 1 + \frac{g_{0,t}}{l_{0,t}} \frac{O_{2,t}^{meas}}{(21 - O_{2,t}^{meas})} \quad (7)$$

Där $l_{0,t}$ och $g_{0,t}$ är stökiometriska luft- och rökgasmängder som beräknas från en bränsleanalys. Om torr luft tillförs reaktorn ges sambandet mellan bränsleflöde och tillfört luftflöde ($L_{v,t}$) från

$$\dot{B} = \frac{L_{v,t}}{m l_{0,t}} \quad (8)$$

Där L_v är inställd (känd) driftparameter. I fallet då även en inert gas tillförs förbränningsreaktorn gäller inte längre ekvation (7), utan m kan istället beräknas från

$$m = \frac{21 + \left(\frac{g_{0,t}}{l_{0,t}} - 1\right) O_{2,t}^{meas}}{21 - \left(\frac{R_v}{L_{v,t}} + 1\right) O_{2,t}^{meas}} \quad (9)$$

Där R_v är flödet av tillförd inert gas. Denna ekvation gäller under förutsättning att R_v varken innehåller syre eller brännbara gaser. För att sedan relatera en uppmätt koncentration (C_x) till bränsleflödet kan följande samband användas:

$$\varepsilon_x = \frac{G_v}{\dot{B}} C_x = \left[g_0 + (m - 1)l_{0,t} + \frac{R_v}{\dot{B}} \right] C_x \quad (10)$$

I vilket ε_x är kvoten mellan uppmätt mängd av ämne "x" i rökgasen och tillförd mängd bränsle. Som alternativ kan denna kvot beräknas från uppmätt koncentration av CO_2 i gasen enligt

$$\varepsilon_x = g_{0,t} \frac{C_{\text{CO}_2,t}^0}{C_{\text{CO}_2,t}} C_x \propto \frac{C_x}{C_{\text{CO}_2,t}} \quad (11)$$

Där $C_{\text{CO}_2,t}^0$ är stökiometrisk koncentration och $C_{\text{CO}_2,t}$ är uppmätt. Detta uttryck visar att ε_x är proportionellt mot kvoten $C_x/C_{\text{CO}_2,t}$ under förutsättning att bränslets sammansättning inte varierar.

Under försöken med ICP-MS fanns tyvärr inte utrymme för en kvantitativ kalibrering av metoden, utan enbart relativa mängder kan redovisas. Istället för att kvota uppmätta alkalikoncentrationer mot beräknat bränsleflöde användes kolisotopen C^{13} som också detekterades med ICP-MS. Detta förfarande visade sig ge god överensstämmelse med användandet av ekvation (10), men var betydligt enklare och eliminerar osäkerheter som uppkommer från olika tidsfördröjningar för olika mätinstrument. Den mängd C^{13} som detekteras i ICP-MS instrumentet kommer nästan uteslutande från CO_2 i rökgasen. Isotopen C^{13} utgör ca 1,1 % av allt vanligt förekommande kol. Att denna isotop använts istället för den mer vanligt förekommande isotopen C^{12} beror på att detektorns känslighet justerats för att kunna detektera små mängder alkalimetaller. De mycket högre mängderna C^{12} fick detektorn att böttna. Alkalikoncentrationer skalade mot C^{13} ger en kvot proportionell mot den i ekvationerna (10) och (11).

E Detaljerade procedurer för anläggningen

Procedur för drift och provtagning med beläggningssond på Sintran. Proceduren startas företrädesvis tidigt på morgonen.

Förutsättningar innan försökets start är:

- Beläggningsring(ar) är tvättad och har legat i exsickator i minst ett dygn.
- En eller två sonder som är rengjorda.
- Reaktorn är rengjord och tömd på aska och sand.
- Bränslebehållaren är uttömd.
- Reaktor är avsvältnad (max 100 °C).

Nedan följer arbetsproceduren:

1. Ugn till fribordet ställs in på 850 °C
2. Gasanalysvagn för CO, CO₂ samt O₂ startas, med instrument och kylare.
3. Ugn till pump och filter för gasanalys till FTIR startas och ställs på 190 °C
4. Temperaturen på FTIR-instrumentets båda zoner höjs i steg till 174 °C
5. Datalogger startas med en fördefinierad mätmall.
6. 500ml baskarpsand, typ B35 fylls på i röret för gasolbrännare ner i reaktorn.
7. Gasolbrännaren placeras i rörmyningen (ej tänd).
8. Förslut reaktorns fallrör för bränsle med en tejpbit.
9. Primär och sekundärluftflöde ställs på 70 resp. 50 l/min.
10. Öppna ventilerna för kylvatten till ångkondensatorn.
11. Höj bäddtemperaturen till 820 °C på regulatorns panel.
12. Fyll i ca 5kg nytt bränsle i bränslemataren.
Placera en hink vid bränslematarens mynning.
Slå på bränslemataren och använd den som en kvarn.
Väg ut och notera bränslemängden.
Häll tillbaka bränslet i bränslemataren.
Montera bränslemataren på reaktorns fallrör.
13. Vänta tills bäddtemperaturen stigit till ca 400 °C
14. Öppna huvudventiler för gasolgas.
15. Ta ur gasolbrännaren, öppna gasolventilen och tillhörande luftventil, tänd vid brännarens mynning med en tändare. Kontrollera att lågan är spetsig och blåaktig.
Placera tillbaka brännaren i reaktorns rörmyning.
16. Kontrollera att temperaturen i bädden stiger till 820 °C.
17. Öppna nålventilen för kylvatten till kylslangan i bädden och justera den manuellt så att bäddtemperaturen kan regleras av förvärmaren. Försök att sikta in kylvattenflödet så att förvärmaren reglerar temperaturen på primärluften runt 400 °C.
Genom att öppna vattenflödet lite så regleras förvärmarens temperatur upp.
Genom att stänga vattenventilen lite så regleras förvärmarens temperatur ner.
18. Förbered beläggningssonden och montera en ny invägd ring. Placera sonden i förvärmningsröret på den övre delen av Sintran. Koppla in luftslang och termoelement till uttag på regulatorlådan samt logger. Kontrollera att sondens regulator är inställd på 435 °C.
19. Renblås sanden som flyger upp till sekundärkammaren:
Skruva ur båda synglasen till sekundärkammaren.

- Tag ut termoelement samt isoleringsplugg i sondhålet som sitter 50 cm över synglasen.
- Tag tryckluftslangen med renblåsningsmunstycket och för in det i sondhålet och rikta munstycket uppåt och blås kraftigt med luft under ca 20 sek.
- Sätt tillbaka synglas, termoelement med plugg
20. Vänta några minuter, upprepa därefter proceduren och renblås en gång till.
 21. Sänk primärluftflödet till 50 l/min.
 22. Kontrollera om det fortfarande flyger sand i sekundärkammaren. Vid behov upprepa renblåsningen i punkt 19 ytterligare en gång.
 23. Kalibrera CO/CO₂ instrument.
 24. Kontrollera att FTIR Frequency- och Align- program visar ok.
 25. Starta FTIR loggning med renluft.
 26. När temperaturen vid uttaget för beläggningssonden överstiger 500 °C:
Behåll eller sänk bäddtemperaturen enligt definierat värde i försöksmatrisen.
Starta bränslematning och vrid matningsdoseringen till 1,5.
Notera tiden för detta.
 27. Kontrollera temperaturen i bädden och vid behov justera kylvattnet enligt punkt 14.
 28. Efter någon minut när syrehalten minskar till 5 %, stäng av gasolbrännare och tillhörande luftventil. Syrehalten stiger därmed, för att efter några minuter åter sjunka tillbaka.
 29. När syrehalten understiger 5 % justera bränslematningen till ca 1,45.
 30. Försök därefter styra syrehalten runt 5 % genom att försiktigt öka eller minska bränsletillförseln.
 31. När förbränningen har stabiliserats slå på gaspumpen till FTIR instrumentet och koppla om anslutningen från renluft till rökgaser in till FTIR.
 32. Under följande timma från det att bränslematningen startades kontrollera regelbundet att bäddtemperatur ligger runt definierat värde och syrehalt i rökgaserna ligger runt 5 %. Justera vid behov.
 33. Kontrollera att temperaturen vid uttaget för beläggningssonden överstiger 600°C
 34. Flytta beläggningssonden från förvärmningsröret till hålet för. beläggningssmätning.
 35. Flytta ev. nästa sond till förvärmningshålet och koppla in på regulator.
 36. Fortsätt att kontrollera att bäddtemperatur ligger runt definierat värde och att syrehalt i rökgaserna ligger runt 5 %. Justera vid behov.
 37. Efter 45 minuter tas sonden försiktigt ut från sondhålet och läggs att svalna.
 38. Vänta 15 minuter.
 39. Upprepa ev. punkt 34-38 för nästa sond.
 40. Ta ett sandbäddprov:
Stäng av bränslematningen.
Ta fram rörkolven som är avsedd för avkylning av sanden.
Öppna kvävgasflödet till rörkolven.
Ta ut gasolbrännaren ut reaktorn.
Stick ner skopan för sanduttag i röret för gasolbrännaren.
Lyft upp två skopor med sand och håll ner i rörkolven.
Placera tillbaka gasolbrännaren i röret.
 41. Stäng av kylvattnet till kylslangan i bädden.
 42. Sänk värmen till 0 på ugnen till fribordet.
 43. Ställ regulatorn för bäddtemperatur på 0.

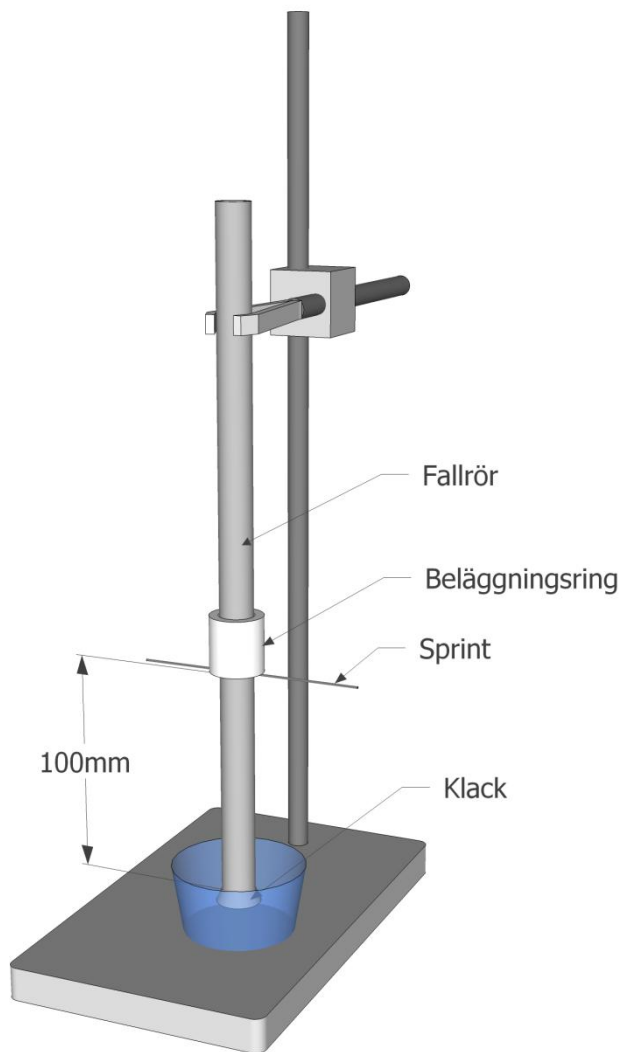
44. Montera loss bränslemataren från reaktorn och mata ut resterande bränsle till en hink. Väg ut och notera den kvarvarande bränslemängden.
45. Låt bädden och beläggningssonden svalna.
46. Stäng av primär och sekundärluft.
47. Stäng ventilerna för kylvatten till ångkondensatorn.
48. Fotografera beläggningsringen.
49. Avmontera beläggningsringen försiktigt och placera den i avsedd burk tillsammans med det lösa stoftet som eventuellt ligger på ringen.
50. Blås ut askan som ligger i fribordet enligt proceduren i punkt 19.
51. Skrapa bort ev. aska i fallröret och brännarröret med en sotviska.
52. Dammsug ut sanden i reaktorn via bränslematningsröret. Vid behov blås samtidigt med tryckluftsmunstycket för att få ut all sand och aska.
53. Rengör sond med slipduk och lätt fuktat papper.

Procedurer för hantering av beläggningsringar för provtagning beskrivs nedan.

1. Initialt tvättas ringarna rena i ultraljudsbad med isopropanol.
2. Dom torkas och placeras i exsickator minst ett dygn.
3. Någon timma innan mätning tas en ring ut från exsickatorn och vägs in gravimetriskt tillsammans med en tillhörande märkt plastbehållare utan lock.
4. Ringen monteras på en rengjord sond utan att beröra ringytan.
5. Efter utförd mätning och efter att sonden svalnat avmonteras ringen och placeras i plastbehållaren. Under detta moment hålls plastbehållaren under ringen hela tiden för att samla upp ev. löst sittande stoft. Detta görs försiktigt utan att beröra beläggningssytan på ringen.
6. Ett plastlock skruvas på plastbehållaren med en skumlist mellan lock och ring som förankrar ringen.
7. Ringen tillsammans med plastbehållare placeras i exsickator.

Procedur för separering av löst respektive hårt sittande stoft på beläggningsringarna. Detta moment utfördes efter att hela provtagningsmatrisen var slutförd. Se Figur 21 för uppställning.

1. Beläggningsring med plastbehållare tas ut från exsickator.
2. Locket skruvas av och ring tillsammans med plastbehållare vägs ut igen för att notera ev. förändring av totalvikten.
3. Ringen träs försiktigt på ett fallrör, utan att någon del berör beläggningssytan. Ringens fasade ände skall vara mot fallrörets klack.
4. En sprint förs in i hålet på fallröret och ringen förs ända fram till sprinten.
5. Fallröret med ring och sprint placeras lodrätt i ett stativ så nederdelen på fallröret är placerat i plastbehållaren.
6. Drag ut sprinten så att ringen faller ner 100mm och slår emot klacken på fallröret. Det lösa stoftet skakas då av och faller ner i plastbehållaren.
7. Tag plastbehållaren och håll det lösa stoftet till en ny behållare och spara för ev. framtida analys.
8. Rengör plastbehållaren med en lätt isopropanolfuktad servett.
9. För ringen försiktigt tillbaka till plastbehållaren, väg ut och notera vikten.
10. Sätt på tillhörande lock med skumlist och placera tillbaka i exsickator.



Figur 21. Skiss på uppställning för separering av löst stoft från beläggningarringarna.

Figure 21. The set up for separating loosely attached deposits from the steel rings.



WASTE REFINERY

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
Box 857, 501 15 Borås
wasterefinery@sp.se
www.wasterefinery.se