

# Energiåtervinning av brännbar fraktion från fragmentering av metallhaltigt avfall –Steg 2

Marianne Gyllenhammar (Stena Metall AB) Kent Davidsson (SP) Torbjörn Jonsson, Jesper Pettersson (HTC, Chalmers) Anders Victorén, Hans Andersson (Metso Power AB) Christoffer Widén (Lidköpings Värmeverk AB)



# Energiåtervinning av brännbar fraktion från fragmentering av metallhaltigt avfall – Steg 2

# Energy recovery of combustible fraction from fragmentation of metal scrap – Phase 2

Marianne Gyllenhammar (Stena Metall AB) Kent Davidsson (SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut) Torbjörn Jonsson, Jesper Pettersson (HTC, Chalmers) Anders Victorén, Hans Andersson (Metso Power AB) Christoffer Widén (Lidköpings Värmeverk AB)

> Projektnummer WR-23 Februari 2010

WASTE REFINERY SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut Box 857, 501 15 Borås www.wasterefinery.se wasterefinery@sp.se ISSN 1654-4706

## Förord

Detta projekt är utfört av Stena Metall AB, Metso AB, SP, HTC och Lidköping Värmeverk inom ramen för Waste Refinery.

Ett varmt tack vill vi rikta till alla personer som har bidragit till projektets utförande. Förutom författarna finns många personer inom respektive organisation som har sett till att allt har fungerat. Framförallt skall personalen, både anställd och inhyrd, vid Lidköpings Värmeverk ha ett stort tack för att anläggningen kördes så fantastiskt bra under försöken. Utan Ert engagemang i projektet hade det inte gått att genomföra försöken! Vi skickar ett extra tack till Roger Lindström med flera på Visby Reningsverk som fixade så att vi kunde använda slam i våra försök.

Göteborg februari 2010

## Sammanfattning

Deponiförbudet för organiskt avfall har gjort att fler returbränslen har kommit ut på bränslemarknaden. Ett bränsle som hittills mestadels har deponerats är SLF (shredder light fraction, fluff) som är ett avfall som kommer från återvinning av metallhaltigt material. P.g.a. avfallets högre klor- och metallinnehåll, jämfört med hushållsavfall, så kunde ökade beläggnings- och korrosionsproblem förväntas. Projektets uppgift var att undersöka om sameldning med rötslam, som i andra projekt visat sig vara positivt, kan reducera dessa problem. Syftet med projektet var också att se hur SLF påverkar beläggningar och korrosion i anläggningen.

I detta projekt har SLF sameldats med normalt avfall i Lidköpings 20 MW bubblande fluidiserad bädd med och utan rötslam. Tre förbränningsförsök har gjorts:

- **Ref** Referensfall (normalt bränsle = 50% hushållsavfall/50% verksamhetsavfall).
- F1 Försök 1 (75% normalt bränsle, 21% SLF och 4 % rötslam)
- F2 Försök 2 (77 % normalt bränsle och 23% SLF)

Bränsleblandningarna är angivna på energibas.

Exponering av korrosions- och beläggningssonder gjordes vid sondyttemperaturer mellan 280 och 420 °C under de sista 24 h av de tre dagar långa testperioden för varje försök. Under samma 24 h dokumenterades driften och provuttag av bränsle, aska och rökgas gjordes.

Resultaten visar tydligt att slam initialt kan minska beläggnings- och korrosionsproblemen vid förbränning av SLF. Det blir mindre mängd beläggning och den är mindre korrosiv med inblandning av 4% slam i en bränslemix med avfall och SLF (försök F1). Samförbränning av drygt 20% SLF med normalt avfall ökar initialt mängden beläggningar och även dess korrosivitet (försök F2).

Projektet visar inte på en entydig förklaring till slammets goda effekt utan det kan ha flera orsaker som, i överensstämmelse med tidigare projekt [2][3][4], kan vara slammets innehåll av svavel, aluminiumsilikater och hög askmängd samt eventuellt även dess innehåll av fosfor. Slammets svavel binder alkali som sulfat som fastnar på tuber eller förs med ut som flygaska. Aluminiumsilikater kan binda alkali i föreningar med hög smältpunkt och föras ut som flyg- eller bottenaska. Den högre askhalten som slam medför gör att kladdiga partiklar kan fastna på askpartiklarna och föras ut ur pannan i stället för att fastna på tuberna i pannan. Slammets innehåll av fosfor återfinns i askorna (ej botten) och i beläggningar nedströms de värmeöverförande ytorna i anläggningen.

Ökad tubtemperatur (280 till 420 °C) ökar den initiala korrosionen. Resultaten indikerar klorinducerad korrosion i alla körfall vid alla temperaturer på det låglegerade materialet 16Mo3. Inga eller mycket låga halter av koppar, bly och zink detekterades nära tubmetallytans korrosionfront på 16Mo3. Med anledning av detta förväntas inte dessa ämnen ha någon stor inverkan på korrosionsangreppet.

Beläggningsmängden minskar och klorhalten i beläggningen ökar ju längre bak i anläggningen längs rökgasstråket man kommer. Alkalimängden minskar i beläggningarna

efter konvektionsdelen av pannan jämfört med före konvektionsdelen trots att klorhalten ökar. Dessa resultat gäller för samtliga försök.

Askmängden in med bränslet ökade 38% vid tillförsel av slam och SLF (försök F1) och 19% vid samförbränning med endast SLF (försök 2). De ökade askmängden med bränslet in ger ökad kostnad för han tering av bottenaska och vändschaktsaska. De analyser som gjorts i detta projekt visar inte på att askorna behöver annat avnämarställe än vad som används idag. Den torra rökgasreningsutrustningen hanterade variationerna i emissioner så att alla villkor i tillståndet kunde uppfyllas.

Nyckelord; Avfall, SLF, rötslam, korrosion, beläggningar

## Summary

More recovered fuels have been put on the fuel market since the landfill ban of organic wastes was implemented. SLF (shredder light fraction = fluff) which is a waste from recovery of metal scrap has mostly been put on landfill until now. Due to high chlorine and metal content in this fuel there is a risk of increased deposit and corrosion problems in incineration plants. This project investigated if co-combustion with sewage sludge could reduce these problems. The purpose of the project was also to document the influence of SLF when it comes to deposits and corrosion in an incineration plant.

In this project SLF has been co-combusted with normal waste with and without sewage sludge in the 20 MW bubbling fluidized bed boiler in Lidköping. Three combustion tests have been performed:

- **Ref** Reference test (normal fuel mix = 50% household waste/50% industrial waste).
- F1 Test 1 (75% normal fuel mix, 21% SLF and 4% sewage sludge)
- F2 Test 2 (77% normal fuel mix and 23% SLF)

The fuel mix is specified as percentage of energy content.

The tests lasted 3 days and during the last 24 hours corrosion and deposit probes were exposed inside the boiler. The surface temperatures of the corrosion probes were 280, 350 and 420 °C in each test. At the same time as the probes were exposed the boiler operation was followed and samples of fuel, ash and flue gas were taken.

The results clearly show that sewage sludge initially decreases the deposit and corrosion problems at SLF combustion. Lower amounts of deposits were measured and the deposits were less corrosive when 4% of sewage sludge was added to the fuel mix with normal waste and SLF (F1). Co-combustion of more than 20% SLF and wastes (F2) increase initially the amount of the deposits and the deposits were also initially more corrosive. Long-term consequences are not investigated in this project.

The project has not shown a distinct explanation why sewage sludge gives these good effects. Several possible causes, as shown in earlier projects [2][3][4], could be the content of sulphur, aluminium silicates, the high ash content and also the content of phosphorous. The sulphur reacts with the alkaline to sulphates and will be deposited as non corrosive deposits on tubes or go out as fly ash. The aluminium silicates and alkaline can form compounds with high melting temperatures and will leave the boiler as bottom or fly ash. The higher amount of ash in sludge can result in that sticky particles stick to the ash particles and are transported out with the flue gas without being deposited on tubes in the boiler. Phosphorous was found in the ashes (not bottom ash) and in the deposits down stream the convection pass.

Increased tube temperature (280 to 420 °C) increased the initial corrosion. The results indicate chlorine induced corrosion in all tests at all temperatures on the low alloy steel 16Mo3. No or very low content of cupper, lead and zinc were detected close to the corrosion front on the tube metal surface on 16 Mo3. Due to this these elements will not be expected to affect the corrosion attacks.

The deposits decrease and the chlorine content in the deposits increase downstream the convection pass in comparison to upstream the convection pass. The alkaline content in the deposits decreased despite of the increase of chlorine. These results were shown in all tests.

The ash content in the fuel into the boiler increased by 38% when adding sludge and SLF. When SLF was co-combusted with normal fuel the ash content in the fuel mix increased 19%. This higher ash content in the fuel will increase the cost of ash handling of the bottom ash and the empty pass ash. The analyses made in this project do not show other than that the ashes can be sent to the same places as used for the normal fuel ashes. The dry flue gas cleaning device could successfully handle the variation of emissions as to fulfill the requirements of the permission.

Key words; Waste, SLF, sewage sludge, corrosion, deposits

## Innehållsförteckning

1	1 INLEDNING		1
	1.1 1.2 1.3 1.4	Problemdiskussion Problemformulering och mål Avgränsningar Förkortningar	1 1 2 2
2	В	AKGRUND	3
3	N	IATERIAL OCH METODER	4
	3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6	Försöksplan och försöksbenämning Anläggningsbeskrivning Lidköping värmeverk panna 5 Doserutrustning för slam Försöksprocedur Bränslen Provtagning och analys	4 4 6 7 8 9
4	R	ESULTATREDOVISNING	16
	<ul> <li>4.1</li> <li>4.2</li> <li>4.3</li> <li>4.4</li> <li>4.5</li> <li>4.6</li> </ul>	Driftdata Kontrollbesiktning Askanalyser Beläggningsanalyser Gasmätningar Korrosionstester	16 18 20 24 27 28
5	R	ESULTATANALYS	45
	5.1 5.2 5.3 5.4 5.5 5.6 5.7	Driften Bränsle- och rökgasanalyser Askanalyser Beläggningar Korrosionsanalyser Emissioner Sammanfattning	45 45 45 46 47 48 48
6	S	LUTSATSER	49
7	R	EKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING	50
	7.1 7.2	Rekommendationer Förslag till fortsatt forskningsarbete	50 51
8	L	ITTERATURREFERENSER	52

## Bilagor

#### BILAGA A: BERÄKNING AV FLÖDET AV NORMALT AVFALL+SLF I FÖRSÖK F1

#### BILAGA B: BRÄNSLEANALYSER OCH INFLÖDET AV GRUNDÄMNEN

#### BILAGA C: EMISSIONSMÄTNING VID PROVELDNING I PANNA 5

#### BILAGA D: ASKSAMMANSÄTTNING

#### BILAGA E: ANRIKNINGSKVOTER

#### BILAGA F: BILDER AV RINGAR FRÅN BELÄGGNINGSSONDERNA

## 1 Inledning

### 1.1 Problemdiskussion

Fragmenteringsprodukter som är brännbara (>10 %ts TOC) får enligt svensk lagstiftning ej längre deponeras utan måste material- eller energiåtervinnas. Den brännbara fraktionen från upparbetning av metallhaltigt avfall, SLF (shredder light fraction), innehåller en hel del metaller och har en relativt hög klorhalt. Av denna orsak har det funnits oro för att bränslet skall ge beläggningsproblem och korrosionsproblem i förbränningsanläggningar. Avfallet har eldats tillsammans med annat avfall i mindre mängd (<5-10% SLF på energibas) vid olika anläggningar i Europa, men mycket lite har blivit publicerat.

Eftersom rötslam har visat sig positivt vid samförbränning med andra klor- och alkalirika bränslen så var idén med detta projekt att se om samförbränning med rötslam kunde minska de förväntade ökade beläggningarna som kunde erhållas vid förbränning med SLF. På det sättet skulle högre andel SLF kunna förbrännas utan att riskera driftproblem i pannan.

Projektet visar på de möjligheter och risker som kan finnas vid samförbränning av SLF.

### 1.2 Problemformulering och mål

Den övergripande målsättningen var att öka mängden SLF för energiåtervinning utan risk för ökade beläggnings- och korrosionsproblem.

Målet var att visa:

- effekten av sameldning med en relativt hög inblandning av SLF i normalt avfall
- om sameldning med rötslam kan minska riskerna för beläggning och korrosion vid inblandning av SLF i en avfallspanna.
- var eventuella beläggningsproblem uppstår vid sameldning med SLF med eller utan rötslam. Dessutom ta reda på vilka ämnen som förkommer i beläggningarna vid 280, 350 °C och 420 °C metalltemperatur.
- hur askekonomin blir för de ökade askmängderna och förändrade innehåll som erhålls med inblandning av rötslam och/eller SLF.

Följande frågeställningar skulle belysas;

- Vilka korrosionsmekanismer är aktiva då endast avfall eldas? Hur påverkas dessa mekanismer med ökad metalltemperatur?
- Hur påverkas korrosionsangrepp av att SLF samförbränns tillsammans med avfall?
- Ger tillsatsen av SLF upphov till beläggningar med en sammansättning som skiljer sig ifrån då endast avfall förbränns?
- Vilken roll spelar tungmetaller (Pb, Sn, Zn, Cu) i beläggningarna för korrosionsförloppet? Hur påverkas tungmetallrelaterade korrosionsangrepp av olika materialtemperaturer?
- Hur påverkas uppbyggnaden av beläggningar av att rötslam tillsätts bränslemixen? Hur inverkar förändringarna i beläggningens sammansättning på korrosionen?

Möjligt resultat av projektet är att en ny bränslefraktion för produktion av energi blir tillgänglig på marknaden, vilket samtidigt innebär minskad deponering av SLF.

Resultat från experimenten är intressanta för anläggningsägare som behöver utöka sitt bränslesortiment. Resultaten kan även användas av panntillverkare för att modifiera designen av nya anläggningar för att passa ett större bränslespann.

## 1.3 Avgränsningar

Projektet testar endast en inblandningsmängd (ca 20%) av SLF och rötslam (ca 4%) (energi%).

Testerna görs i en fluidbäddpanna och resultaten kan inte direkt appliceras för alla typer av förbränningsanläggningar.

Exponeringstiden för korrosionssonderna är 24 h, vilket innebär att det är endast initial korrosion som undersöks.

## 1.4 Förkortningar

SLF Shredder light fraction, vilket är den lätta avfallsfraktionen över 1 mm från återvinning av metallhaltigt avfall (bilar, kommunskrot oc									
	verksamhetsskrot) Allmänt kallat fluff								
ASR	Automotive shredder residue=lättavfall från återvinning av bilar								
Ref	Referensfallet (normalt bränsle)								
F1	Försök 1 (21% SLF + 4% rötslam + 75% normalt bränsle)(energi%)								
F2	Försök 2 (23% SLF + 77% normalt bränsle) (energi%)								
SP	Sveriges Tekniska Forskningsinstitut								
HTC	High Temperatur Corrosion Center på Chalmers Tekniska								
	Hogskola								
KME	Konsortiet för Materialteknik för termiska Energiprocesser								
FB-panna	Fluidiserad bäddpanna								
CFB	Cirkulerande fluidiserad bädd								
TOC	Total organic carbon								
%ts	% torr substans								
S	Svavel								
Cl	Klor								
Ca	Kalcium								
Р	Fosfor								
SEM	Svepelektronmikroskopi								
BSE	Bakåtspridda elektroner								
EDX	Energidispersiv röntgenfluorescens								
XRD	Röntgendiffraktion								

#### 2 Bakgrund

I steg 1 av rubricerat projekt [1] visade termodynamiska beräkningar att höga halter av blyoch, till viss del, zinkklorider kan bildas vid förbränning av SLF. Tillsammans med halter av alkaliklorider som är jämförbara med halter för en normal avfallspanna finns risk för beläggningar och korrosion i förbränningsanläggningar. Tidigare erfarenheter har visat att rötslam kan ha lindrande effekt på beläggningsbildning vid klor- och alkalirika bränslen [2][3][4]. I steg 1 gjordes termodynamiska beräkningar med rötslam sameldat med SLF och normalavfall från Borås. Resultatet av beräkningarna visade inte på någon effekt av att blanda i rötslam. Det bör dock påpekas att alla parametrar som kan vara positiva med rötslam, såsom innehåll av zeoliter och fosfor samt hög askhalt inte kan simuleras i beräkningsprogrammet.

De teoretiska beräkningarna (då allt bly och zink räknades som reaktivt) i steg 1 visade att det blev förhöjda halter av bly- och zinkklorider vid samförbränning med SLF. De visade dock att vid en inblandning av max 20% (på energibas) tillsammans med normalt avfallsbränsle typiskt för Boråspannorna (med eller utan rötslam) så blev inte salterna speciellt mycket högre än vid förbränning av normalt avfall. Då blyklorider och zinkklorider kondenserar vid en lägre temperatur än alkaliklorider kan beläggningsproblem och ev. korrosionsproblem förväntas i de lägre temperaturområdena i pannan när halterna är höga av dessa klorider.

I litteraturen finns ett antal studier där samförbränning med avfall från återvinning av bilar (ASR=automotive shredder residue) och annat metallhaltigt avfall i kommersiella anläggningar har utretts [3][5][6]. Oftast har samförbränning till 5-10% inblandning gjorts med liten påverkan på driften som konsekvens. Reforsk [6] har dock gjort en utredning där 20% SLF samförbrändes i en rosterpanna. Inga förhöjda emissioner eller driftstörningar noterades men viss förhöjning av klororganiska föreningar i rökgasen och ökad metallhalt i askor uppmättes. Avfallsanläggningen i Würtzburg i Tyskland har under längre tid eldat ASR med 5% inblandning men även kört tester med högre inblandning (24-31% på vikt) [5]. Resultaten från dessa körningar med hög inblandning visade ingen inverkan på pannans drift eller på emissioner från anläggningen. CO-emissionen minskade och verkningsgraden ökade (p.g.a. ASRs höga värmevärde). Tungmetallinnehåll i rågas ökade och tungmetaller som zink, bly, tenn, antimon och kobolt ökade främst i vändschaktsaska och cyklonaska. Dessa askor får troligen tas om hand på samma sätt som filteraskan från en avfallsanläggning. Mätning av beläggningar och korrosion på pannytor gjordes inte i någon av dessa projekt.

## 3 Material och metoder

#### 3.1 Försöksplan och försöksbenämning

Tre förbränningsförsök utfördes. Varje försök kördes i 3 dygn för att uppnå en drift, så nära stationärt tillstånd som möjligt. Under det sista dygnet exponerades beläggnings- och korrosionssonder, och rökgasanalyser och askuttag utfördes, se utförligare beskrivning nedan i kapitel 3.6. Driften följdes och dokumenterades.

Mellan försök F1 och F2 kördes pannan i två veckor med normalt bränsle för att minska risken för minneseffekter av rötslam.

Referensfall, benämnes Ref:

Bränslet bestod av normalt bränsle för Lidköpings värmeverk, vilket är ca 50% hushållsavfall och 50% verksamhetsavfall. Referensfallet kördes den 29-30/4 2009.

Försök 1, benämnes F1:

Bränslet bestod av en bränslemix bestående av 75% normalt bränsle plus 21% SLF och 4 % rötslam (% på energibas). Försöket kördes den 7-8/5, med start bränslemix den 5/5 2009.

Försök 2, benämnes F2:

Bränslet bestod av en bränslemix bestående av 77 % normalt bränsle + 23% SLF (% energibas). Försöket kördes den 28-29/5, med start bränslemix den 26/5 2009.

Benämningarna Ref, F1 och F2 kommer att användas genomgående i rapporten.

#### 3.2 Anläggningsbeskrivning Lidköping värmeverk panna 5

Förbränningsförsöken har utförts vid Lidköpings Värmeverk i en 20 MW bubblande FBpanna för fast hushålls- och verksamhetsavfall. Figur 1 visar en schematisk bild av pannan med kringutrustning. Pannan är en ångpanna (mättad ånga 40 bar) av självcirkulationstyp där förbränningsdelen är utrustad med en bubblande fluidiserande bädd (BFB) och bäddmaterialet består av färsksand (Rådasand) samt till en viss andel grövre bränsleaska. Normalt styrs pannan genom att operatören ställer in en fast effekt vilken upprätthålls genom rätt förhållande mellan totalluftsmängd och bränsleinmatning.

Genom att hålla ett visst luftöverskott kan optimal förbränning erhållas trots varierande bränslekvalitet. Förbränningsluften delas upp i primärluft och överluft. Primärluften tillförs genom dysor under bädden vilket ger god omblandning och skapar en fluidisering av sandbädden (1 i Figur 1). Bäddmaterial matas ut från bädden i form av bottenaska. En god fluidisering är en viktig förutsättning för att upprätthålla god förbränning och bra miljödata. Med de asymmetriska näsorna i gashalsen där överluften (sekundärluft, tertiärluft och tvärluft) tillförs (se siffran 1 i Figur 1), upprätthålls en god förbränning med låga emissioner av CO och NO<sub>x</sub>. Förbränning enligt denna princip och eldstadsutformning kallas för Advanced Combustion Zone (ACZ). Rökgaserna lämnar sedan eldstaden och strömmar nedåt i tomschaktet till vändschaktet där aska också matas ut. Efter att

rökgaserna passerat vändschaktet kyls de i konvektionsdelen genom strömning förbi tubpaket (2 i Figur 1). Därefter vänder rökgaserna nedåt igen och passerar ekonomisern (3 i Figur 1). Grövre flygaskpartiklar avskiljs i cyklonen medan de finare avskiljs i slangfiltret.



- Figur 1. Schematisk skiss av Lidköpings Värmeverk AB bubblande fluidbäddpanna. 1: eldstad med bubblande bädd, 2: konvektionsdel, 3: ekonomiser, 4: bränsledoserare och cellmatare, 5: reaktor för rökgasrening med släckt kalk och aktivt kol. A-E är mät- och provtagningspunkter
- Figure 1. Schematic drawing of the bubbling fluidized bed boiler at Lidköping Värmeverk AB.
  1: furnace with bubbling bed, 2: convection area, 3: economizer, 4: fuel dosing feeder and rotary vane feeder, 5: flue gas cleaning device with hydrated lime and active carbon. A-E is the measuring and sampling positions.

Under sekundärluftsregistren recirkuleras rökgaser till förbränningsrummet för att skapa än bättre omblandning med sänkt temperatur och lägre O<sub>2</sub>-innehåll, så att bildning av NO<sub>x</sub> minskas. För ytterligare NO<sub>x</sub>-reducering sprayas ammoniak in i eldstaden (SNCR).

Bränslet transporteras till pannan via en varvtalsstyrd doserare (4 i Figur 1). För att erhålla ett stabilt bränsleflöde används en aktivatorvals samt en avrivarvals. Bränslet passerar sedan cellmataren (kontant hastighet) som har till uppgift att förhindra gaser och gnistor att nå bränsleinmatningssystemet. Därefter sprids bränslet via bränslestupet ut i eldstaden över hela bottenbäddytan. Detta för att skapa en gynnsam förutsättning att få en optimal omblandning av bränsle med luft. Som spridningsmedium används recirkulerade rökgaser.

Över eldstadens näsor är en stödbrännare monterad. Denna säkerställer att rökgastemperaturen är minst 850 °C i minst 2 sekunder och därmed uppfylls kravet för avfallsförbränning.

Efter pannan renas rökgaserna i ett flertal steg. Först blandas rökgaserna med släckt kalk vilket binder de sura komponenterna (HCl, SO<sub>2</sub>, HF) och aktivt kol som reducerar eventuella dioxiner (5 i Figur 1) i den torra rökgasreningen (slangfilter). Efter filtret leds rökgaserna genom en fyllkroppsskrubber. Här återvinns energin i rökgaserna Man kan (alternativt) för att minska deponi- och kalkkostnaderna i den torra rökgasrening, utföra slutrening av gaserna i skrubben. Skrubbern reducerar då sura föroreningar, ammoniak, stoft och tungmetaller till utsläppsvärden istället.

### 3.3 Doserutrustning för slam

På grund av praktiska svårigheter att ta emot och dosera blött slam, byggdes en doserutrustning upp med en del som matade torrt slampulver/pellets och en del som sprayade in vatten till bränsleströmmen.

Design av systemet byggde på den aktuella pannlasten 20 MW och slampellets med torrhalt 95 % och en inblandning på 3 % av pannans effekt. Doseringen skulle då bli 550 kg slam och 1173 kg vatten per timma. Systemet byggdes upp så att mängderna skulle följa de eventuella lastvariationer som kunde uppträda på pannan under försöksperioden.

Slampelletsen levererades i storsäckar om ca 1 m<sup>3</sup>. Några representativa säckar vägdes och kördes med lämpligt varvtal på doserskruven för kalibrering. Det teoretiska utgångsvärdet visade sig stämma bra med verklighetens resultat. Energiandelen slam av utgående pannlast konstanthölls.

För doseringen av slampellets användes en cylindrisk högt placerad ficka på ca 1,5 m<sup>3</sup>. I botten på denna fanns en doserskruv som matade slampelletsen till ett stup som lade pulvret på toppen av den doserade bränslesträngen av avfall/SLF. Se Figur 2.

Storsäckarna med pellets lyftes med en befintlig travers upp och placerades på toppen av dosersilon där de skars av på ett knivkors. I dosersilons övre del fanns en stoftavsugningsstos med slang till en fläkt som höll undertrycket i fickan och blåste denna luft in i totalluftintaget till pannan. Med denna lösning uppstod ingen dålig odör runt hanteringen.

I pannstupet under cellmataren monterades 7 st spraydysor där vattnet tillsattes. Mängden vattendimma hölls i proportion till slampelletsmängden via varvtalet på doserskruven. En automatisk reglerkrets ändrade då utslaget på en proportionalventil efter en beräknad kapacitetskurva.

Efter diverse problem med fallande och varierande vattenförsörjning under intrimning av utrustningen, löstes detta inför teststarten och rätt avpassad vattenmängd kunde doseras under hela testperioden.



Figur 2. Slamdoseringssystem

Figure 2. Sludge feeding system.

#### 3.4 Försöksprocedur

I Figur 3 visas en tidskala med de viktigaste händelserna kring ett försök. Askprover togs vid tre tidpunkter. I F1 och F2 togs först ett nollprov innan bränslemixen ändrades. I alla försök togs ett prov strax före försöket (f-prov) och ett strax innan det avslutads (e-prov). Vid varje askprovtagning togs aska från de fyra aktuella positionerna (se avsnitt 3.6.2). Försöket startades i och med att beläggningssonderna och korrosionssonderna sattes in på sina respektive positioner (se avsnitt 3.6.3 och 3.6.4). De exponerades under hela försöket (24 timmar) som avslutades i och med att de togs ut.



- Figur 3. Tidsskala med olika händelser i anslutning till ett försök. f = tidpunkt strax före försökets början, e = tidpunkt strax före försökets slut
- Figure 3. Time schedule with the different events connected to the tests. f = the time right before the start of the test, e = the time right before the end of the test.

F1 och F2 genomfördes med två veckors mellanrum då pannan eldades med normalt avfall för att eventuella minneseffekter av slameldningen skulle vara borta.

#### 3.5 Bränslen

Tre typer av bränslen användes: normalt avfall, SLF och avloppsslam;

- **Normalt avfall** behandlades inte på något sätt utan eldades på samma sätt som man gör när det inte är försök. Det består av ungefär 50% hushållsavfall och 50% industriavfall.
- SLF (shredder light fraction), allmänt kallat fluff, är en restfraktion från återvinning av metallskrot. Metallskrot (bestående av lika delar skrot från bilar, verksamhetsskrot och skrot från kommunens återvinningscentraler) matas in i fragmenteringsanläggningen och går igenom en hammarkvarn. Därefter "dammsugs" den lätta fraktionen (fluff) upp via en stor cyklon, siktas i flera fraktioner för att effektivare bortsortera metall över magneter. Fluffen innehåller mycket organiskt material (trä, textil, plast och gummi) och en del metaller som har trasslats in i tygbitar och stoppning. Även kabelbitar hakar sig fast i det lätta materialet. Trots att fraktionen innehar relativt hög askhalt (35-45%ts) är värmevärdet högt eftersom materialet innehåller mycket plast. SLF består av den lätta fraktionen från fragmenteringsanläggningen som är siktat på >15 mm, d.v.s. de riktigt små partiklarna är bortsorterade. SLF från Stena Recyclings anläggning i Halmstad har använts vid försöken.

- Det **avloppsslam** som användes vid försöken var rötat och torkat slam från Visby reningsverk Torkat slam användes eftersom anläggningen inte hade någon pump som kunde mata in vått slam och det var en enklare (och billigare) lösning att ordna en doserare av torrt slam än att sätta dit en pump. Rötslammet levererades i storsäck och doserades med doserskruv direkt ner i stupet in till pannan där avfallsblandningen av normalt avfall och SLF tillfördes. För att efterlikna dosering av vått slam tillfördes vatten i pannstupet i mängd sådan att den motsvarade dosering av vått slam, se kapitel 3.3. Dosering av vått slam är det som är mest troligt att använda vid kontinuerlig drift och de flesta andra försök, bl.a. i [2], som gjorts med rötslam har gjorts med vått slam. Dessutom är förekomsten av torkat slam mycket begränsad varför en jämförelse med vått slam gjordes för att få svaren från projektet mer generella. Avloppsslammets analys kan påverkas av var slammet tas ifrån och vilken kemikalie som slammet blivit fällt med. Valt slam innehöll de aktiva substanser som man i andra rapporter rapporterat som viktiga.

Normalt avfall + SLF blandades på asfaltsplanen utanför pannan. Det gjordes genom att en traktorskopa normalt avfall och en skopa SLF vägdes och blandades så att inblandningen av SLF blev ca 20%. Bränslet gick sedan via en kvarn över en magnet in till pannan. Bränslet var på så vis relativt bra blandat när det nådde pannan.

I försöken med avloppsslam ( vatten + pelleterat torrt slam) tillfördes detta pannan i ett flöde som var ca 4% (energibas) vid sidan av normalt avfall + SLF. Vatten tillfördes så att slammet totalt motsvarade ca 70%- igt vått avloppsslam.

#### 3.6 Provtagning och analys

#### 3.6.1 Bränsleprover

Bränsleprover på avfall och avfall+SLF togs ut från transportbandet innan det föll ner i stupet innan bränsledoseraren in till pannan. Prov togs ut varje eller varannan timme under försökens gång. Ca 100 liter samlades in. Detta prov skickades till lab där det maldes och kvarterades enligt metod för provtagning av fasta heterogena bränslen [7]. Bränsleprov på slam togs också ut under provets gång med samma frekvens men i betydligt mindre mängd då slammet var pelleterat och relativt homogent.

Bränslena analyserades m.a.p. värmevärde, brännbara fraktionens sammansättning samt huvudkomponenter och spårämnen i askan. Resultatet av analysen framgår av Tabell 11 i Bilaga B.

#### 3.6.2 Askprover

Askprover togs från bottenaska efter sikt, vändschaktet, cyklonen och slangfiltret. Tidpunkter och positioner för provtagningen framgår av Tabell 1.

Tabell 1. Provbeteckningar för askprover från olika försök, positioner och tidpunkter.

Table 1. Naming of ash samples from the different tests, positions and times.

Position	Ref	F1	F2
Bottenaska	Ref <sub>f</sub> B	F1 <sub>0</sub> B	F2 <sub>0</sub> B
	Ref <sub>e</sub> B	$F1_fB$	F2 <sub>f</sub> B
		F1 <sub>e</sub> B	F2 <sub>e</sub> B
Vändschakt	Ref <sub>f</sub> V	F1 <sub>0</sub> V	F2 <sub>0</sub> V
	Ref <sub>e</sub> V	$F1_{\rm f}V$	$F2_{\rm f}V$
		F1 <sub>e</sub> V	F2 <sub>e</sub> V
Cyklon	Ref <sub>f</sub> C	F1 <sub>0</sub> C	F2 <sub>0</sub> C
	Ref <sub>e</sub> C	F1 <sub>f</sub> C	F2 <sub>f</sub> C
		F1 <sub>e</sub> C	F2 <sub>e</sub> C
Slangfilter	Ref <sub>f</sub> F	F1 <sub>0</sub> F	$F2_0F$
	Ref <sub>e</sub> F	$F1_{f}F$	$F2_{f}F$
		F1 <sub>e</sub> F	F2 <sub>e</sub> F

Anm.  $_0$  = före ändring av bränslemix

 $_{\rm f}$  = strax före start av försök

 $_{e}$  = strax före avslutat försök

B = Bottenbädd

V = Vändschakt

C = Cyklon

F = Slangfilter

Askproverna analyserades med avseende på kemiskt innehåll, se Bilaga D.

#### 3.6.3 Beläggningssonder

Positioner för beläggningssonder visas i Figur 4. Beläggningssonder (luftkylda sonder med stålring på vilken beläggning samlades) var placerade i eldstaden (A i Figur 4), vändschaktet (B i Figur 4) och nedströms konvektionsdelen (C i Figur 4). Rökgastemperturen vid positionen i vändschaktet var ca 540-590 °C och nedströms konvektionsdelen ca 300-350 °C.

Sonderna i eldstaden och nedströms konvektionsdelen tillhandahölls av Metso Oy. Yttemperaturen på dessa sonder var inställda på 280 °C. Sonden i vändschaktet tillhandahölls av Chalmers (HTC) och var utrustad med tre stålringar inställda på 280, 350 och 420 °C. Alla sonder var instuckna ca 1,5 m från innerväggen så att ev. störningar som kunde uppstå nära väggen skulle vara tillräckligt små. Ringarna exponerades i 24 timmar. Därefter togs de ut och förvarades torrt tills beläggningarna analyserades m.a.p. vikt och kemisk sammansättning.

Den ursprungliga tanken var att ringarna i eldstaden skulle vara belagda med ett centimetertjockt lager kiselkarbid. En sådan placerades i eldstaden under Ref-försöket. Det visade sig dock att när den skulle tas ut var beläggningen+kiselkarbiden så tjock att den skadades under själva urtagandet. Efter att ha bedömt det som för svårt att hantera denna typ av ring så beslutades att använda stålringar av samma slag som uppströms ekonomisern. Därför saknas beläggningsanalyser från eldstaden i Ref. Ringar med kiselkarbid sattes in i eldstaden strax efter F1 och F2 i endast 2h med förhoppningen att beläggningstillväxten genom vägning eftersom den kemiska analysen troligen försvåras av kiselkarbiden. Ringen i F1 fick då negativ beläggningstillväxt, troligen beroende på att kiselkarbiden initialt varit fuktig. Inför F2 torkades kiselkarbiden i ugn vid 105 °C och beläggningstillväxten kunde mätas.

Ett annat problem som gäller alla ringar som varit placerade i eldstaden är att kylningen av sonderna inte räckte till för att hålla yttemperaturen på stipulerade 280 °C. Temperaturen har hos stålringarna, som varit exponerade i 24 timmar, inledningsvis ökat upp till ca 330 °C för att sedan falla tillbaka och slutligen hamna i närheten av 280 °C. Detta mönster kan bero på att sonden isoleras av beläggningar, och inte behöver så mycket kylning mot slutet av försöket. Temperaturfluktuationen under försöken gjorde att beslut fattades att inte göra om mätningen i Ref.

Sammanfattningsvis finns alltså analyserade beläggningar från alla tre positionerna (A-C i Figur 4) i F1 och F2, medan det i Ref endast finns ringar från B och C. Beläggningarna på ringarna analyserades med avseende på vikt och det kemiska innehållet.



- Figur 4. Schematisk bild av del av panna 5. A: position i eldstaden för beläggningssond. B: position i vändschakt för beläggnings- och korrosionssonder, C: position uppströms ekonomisern för beläggningssond, och D: position nedströms primärekonomisern för mätning av gasfas HCl och SO<sub>2</sub>.
- Figure 4. Schematic image of a part of boiler 5. A: position of deposit probe in furnace, B: position of deposit and corrosion probes before conventional area, C: position of deposit probe before economizer, and D: position of gas phase measuring of HCl and SO<sub>2</sub> after the primary economizer.

#### 3.6.4 Korrosionstester

Korrosionssonden var placerad i vändschaktet (B i Figur 4) och var utrustad med vägda provringar. Ringarnas temperatur hölls på 280 °C, 350 °C och 420 °C. Sonden var instucken ca 1,5 m från innerväggen för att minimera störningar. Ringarna exponerades i 24 timmar och förvarades därefter torrt tills beläggningarna och korrosionsprodukter analyserats.

#### 3.6.4.1 Materialbeskrivning

Tre järnbaserade material valdes för korrosionssonden. Ett låglegerat ferritiskt samt två austenitiska rostfria stål testades för att kunna studera effekten av både järn- och kromoxidbildande stål i de olika försöken. Ett av de rostfria stålen användes enbart som beläggningssond. En översikt över de provade materialen, inklusive standardbeteckning och typiska kemiska sammansättningar, ges i Tabell 2.

Material	% C	% Cr	% Ni	% Mo	%Mn	För analyser med:
16Mo3	0,12	0	0	0,3	0,6	SEM
304L	< 0,030	18,5	10	-	1,4	XRD
310	0.22	24.9	19.2	0.34	1 55	Kemiskt innehåll

Tabell 2. Provmaterialens sammansättning (i viktsprocent). Alla materialen är järnbaserade.

 Table 2.
 The different test materials and their composition (wt %). All material are iron based.

Legeringarna som använts beskrivs nedan:

- 16Mo3 är ett låglegerat ferritiskt stål som vanligtvis används i bio- och avfallseldade pannor vid materialtemperaturer upp till 425 °C. Materialet är ett lågprisalternativ.
- 304L är ett vanligt austenitiskt rostfritt stål legerat med krom och nickel. Det har huvudsakligen använts i svartlutsförgasningspannor.
- 310 är ett höglegerad austenitiskt Fe-Cr-Ni-legering. Materialet användes i projektet enbart som beläggningssond.

#### 3.6.4.2 Korrosionssonden

Figur 5 visar en schematisk bild av korrosionssonden. På den isotermiska sonden monterades nio prover (tre provmaterial vid varje temperatur) i den ordning som visas i bilden vid varje exponeringstillfälle. Temperaturen mättes med hjälp av ett termoelement som monterades under metallgodset på 304L provet och riktades mot rökgasen. Sonderna kyldes med tryckluft som kontrollerades med en PID-regulatorstyrd ventil. Proverna bestod av ringar med diametern 48 mm, längden 33 mm och godstjockleken 2,7 mm.



- Figur 5. Schematisk bild av korrosionssonden. Nio prov testades vid varje försök, tre temperaturer och tre material vid varje temperatur.
- Figure 5. Schematic drawing showing the corrosion probe. Nine samples were run during each exposure, three temperatures and three materials at each temperature.

#### 3.6.4.3 Provpreparering

Före exponering sköljdes provringarna med aceton och tvättades sedan i etanol i ultraljudsbad. Alla provringar vägdes och förvarades i plastburkar fram till monteringen på sonden.

#### 3.6.4.4 Korrosionsanalyser

Efter exponering inspekterades provringarna optiskt och vägdes, vilket gav en indikation om mängden beläggningar samt beläggningens färg, tjocklek och vidhäftning. Beläggningsanalys gjordes av beläggningen på samtliga 310-prover vilket gav information om vad som fanns i beläggningen och i vilka mängder. Beläggning och korrosionsprodukter skrapades av på samtliga 304L-prov och analyserades med XRD. Detta gav information om vilka faser som finns i beläggnings- och korrosionsprodukterna. Utvalda 16Mo3-prover göts in i epoxi, kapades och slipades för att kunna studera beläggnings- och korrosionsprodukter i tvärsnitt. Dessa tvärsnitt analyserades sedan med SEM/EDX, vilket gav information om var de olika elementen och faserna fanns i beläggnings- respektive korrosionsprodukterna. All analys skedde på ringens läsida om inget annat anges.

#### 3.6.4.4.1 Röntgendiffraktion

För att bestämma de kristallina faserna i och under beläggningen utfördes röntgendiffraktion (XRD) på beläggningen från alla 304L-prov. Beläggnings- och korrosionsprodukterna skrapades av provringarna och finfördelades sedan med hjälp av en mortel. Här användes både vind och läsidan för att få med så mycket beläggnings- och korrosionsprodukter som möjligt. Det finfördelade materialet analyserades sedan med 8° infallsvinkel i en Grazing Incidence geometri (GI-XRD). Amorfa/icke-kristallina föreningar går inte att detektera med XRD och den undre detektionsgränsen är beroende av vilka faser som finns, men är typiskt några volymprocent.

#### 3.6.4.4.2 Elektronmikroskopi

Utvalda 16Mo3-ringar göts in i epoxi och kapades i en precisionssåg. Den kapade sidan slipades med 220, 500, 1000, 2400 och 4000 SiC-papper och polerades med 1 µm diamantpasta. All kapning och slipning utfördes på tre prov med slipmedel utan närvaro av vatten. Då analyserna ändå visade påverkan på vattenlösliga föreningar utfördes slipningen helt torrt på de två sista proven (F2, 280°C och 350°C). De slipade tvärsnitten analyserades med hjälp av svepelektronmikroskopi (SEM). Upplösningen och skärpedjupet i ett SEM är mycket högre än i ett vanligt ljusmikroskop. Vidare kan man få information om sammansättningen genom att avbilda med hjälp av bakåtspridda elektroner (BSE) eller att detektera röntgenstrålning. Antalet detekterade BSE elektroner i en punkt avspeglar ett genomsnitt av atomnumren på elementen i den analyserade punkten (volymen) på provet, d.v.s. områden med tyngre element reflekterar fler BSE elektroner och avbildas då som ljusare områden.

Provets kemiska sammansättning analyserades i SEM med hjälp av Energidispersiv röntgenfluorescens (EDX). EDX-elementkartor visar fördelningen av olika element i bilden. Dessa kartor kompletterades med kvantifiering av sammansättningen i de olika områdena. Kvantifiering ger den kemiska sammansättningen i det analyserade området med en noggrannhet som beror på sammansättningen, d.v.s. lättare element ger större osäkerhet i kvantifieringen. Detta har tagits hänsyn till i tolkningen av resultaten. Den laterala upplösningen vid analys och avbildning beror på accelerationsspänningen och sammansättning, men är typiskt 0,5  $\mu$ m för BSE och 1  $\mu$ m för EDX vid 20kV (som använts vid samtliga analyser).

#### 3.6.5 Gasanalys rågas (HCl och SO<sub>2</sub>)

Mätning av rökgasens koncentration av HCl och SO<sub>2</sub> gjordes nedströms primärekonomisern (D i Figur 4). Två mätningar gjordes under varje försök. Mätningen är utförd enligt Värmeforsk mäthandbok [14] och går till enligt följande: provgasen sugs ut genom ett kvartsfilter som sitter i en uppvärmd (180 °C) filterhållare. Provgasen passerar sedan en lösning där HCl och SO<sub>2</sub> binds kemiskt med 0,1 M NaOH (aq) respektive 0,3 % H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Lösningen är placerad i ett isbad för att kyla provgasen. Provtiden var 2 timmar. Lösningen analyseras sedan varvid en genomsnittskoncentration över provtiden erhålls.

#### 3.6.6 Gasanalys rengas

Mätning av emissioner i enlighet med kontrollprogrammet för anläggningen gjordes i rökgaskanalen efter panna, position E i Figur 1. Mätningen gjordes före rökgaskondenseringen eftersom den är gemensam för alla tre pannor på anläggningen. Genom dosering av kalk och aktivt kol uppströms filtret styrdes HCl till under 10 mg/Nm<sup>3</sup> torr gas vid 11% O<sub>2</sub> in till rökgaskondenseringen.

Mätningen utfördes av ÅF-Kontroll och mätningarna gjordes under 6 timmar i varje försök (Ref, F1 och F2) under det dygn som försöken pågick, se Bilaga C.

## 4 Resultatredovisning

### 4.1 Driftdata

Bränsleflöden är beräknade utifrån lasten. I F1 beräknades flödet av normalt avfall+SLF utifrån lasten och ett känt slamflöde, se Bilaga A. Riktvärdet för blandningen normalt avfall och SLF var 4:1 vilket gav 21% SLF i F1 och 23% SLF i F2 (energibas). Viktmässigt blev inblandningen 15% SLF i F1 och 20% i F2, se Tabell 3. Riktvärdet för slaminblandning i F1 var 3% men det blev 4% (energibas).

#### Tabell 3. Beräknade bränsleflöden och andel av varje bränsle i försök 1 och 2.

Eläda	Försök 1				Försök 2							
Flode	ton/h	%	ton ts/h	%	MW	%	ton/h	%	ton ts/h	%	MW	%
Avfall	4,9	62	3,4	67	16,9	75	5,4	80	3,6	75	16,5	77
SLF <sup>b</sup>	1,2	15	1,1	22	4,6	21	1,4	20	1,2	25	5,1	23
Rötslam <sup>a</sup>	1,8	23	0,5	11	0,9	4	-	-	-	-	-	-

Table 3. Calculated fuel flows and parts of each fuel in test 1 and test 2.

<sup>a</sup> Flöde av rötslam och vatten så att det motsvara rötslam med ca 70% fukthalt

<sup>b</sup> Värdena för inblandningen av SLF i normalt avfall skall ses som värde ±5% p.g.a. att blandningen skedde med traktorskopa på gården.

Driftdata loggades var tionde sekund under försöken. Medelvärden och standardavvikelser för de viktigaste parametrarna återges i Tabell 4.

Lasten och rökgastemperaturerna t.o.m. mätpunkten nedströms konvektionsdelen har varit stabil i de tre försöken. Undantaget är temperaturen nedströms primärekonomisern och ammoniakflödet i F2. Troligtvis beror temperaturnedgången på en felmätning av temperaturen då temperaturerna nedströms denna punkt inte påverkats under samma tidsperiod. Ammoniakdoseringen har ökat under den senare delen av försöket. Detta påverkar halterna av ammoniak och NO<sub>x</sub>. Det kan möjligen ha en indirekt mindre påverkan på beläggningar och korrosionen, men beläggningssonderna anses ändå vara jämförbara. Bäddtemperaturen i F1 var konstant under drygt halva försöket (ca 850 °C) men de sista 10 timmarna sjönk temperaturen till i medel 820 °C.

	Ref			F1	F2				
	normalt avfall		normalt avfall+		normalt avfall+SLF				
			SLF	+slam					
	Medel-	standard-	Medel-	standar-	Medel-	standar-			
Parameter	värde	avvikelse	värde	avvikelse	värde	avvikelse			
last (beräknad) [MW]	20,0	0,9	20,2	0,45	19,6	0,84			
flöde normalt avfall	4,8ª	-	-	-	-	-			
[ton ts/h]									
flöde normalt avfall+SLF	-	-	4,5ª	-	4,8ª	-			
[ton ts/h]									
flöde slam [ton ts/h]	-	-	0,54	-	-	-			
bottenbädd [°C]	854	11	833	21	853	12			
eldstad ovan blåsbord[°C]	964	31	957	16	975	18			
eldstad under näsa [°C] <sup>b</sup>	852	17	844	16	888	16			
eldstadstopp [°C] <sup>b</sup>	840	12	828	14	838	10			
vändschakt [°C]	540	7,8	554	4,0	598	6,8			
före primeko [°C]	336	5,2	341	5,0	357	7,7			
efter primeko [°C]	153	1,8	154	1,9	116	27			
					(eg.150				
					-155)°				
O <sub>2</sub> före eko [%vg]	6,0	0,32	5,8	0,10	5,7	0,22			
difftryck bädd [kPa]	5,2	0,13	5,3	0,3	5,2	0,2			
difftryck konvektion [kPa]	1,4	0,14	1,5	0,06	1,5	0,2			
flöde totluft [Nm <sup>3</sup> /h]	33 000	830	36 000	470	34 000	1400			
flöde ammoniak [l/h]	130 000	830	190 000	15 000	180 000	58 000			

Tabell 4. Medelvärden av de viktigaste driftparametrarna med standardavvikelser.

Table 4. Average values and standard deviation values of the most important operating

<sup>a</sup> Beräknat flöde.

<sup>b</sup> Kalibrerade temperaturer tidigare visar att verklig temperatur för dessa positioner är ca 60-100 °C högre i verkligheten, p.g.a. att temperaturgivaren ser kalla ytor. Detta innebär att 850 °C/2 sekunder-kravet för förbränning av avfall uppfylls.

<sup> $\circ$ </sup> Felmätning instrument justerat till temperatur efter filter = 150-155 °C

Bränsleflödena ger upphov till inflöden av aska och grundämnen. I Bilaga B återges bränsleanalyserna, se Tabell 11 och inflöden av aska och de ämnen som analyserades i bränsleanalyserna, se Tabell 12.

Om de metaller som troligast är inblandade i beläggningsbildning kan sägas att i Ref är inflödet av svavel högre medan inflödet av koppar och zink är mindre än i F1 och F2. I F1 är inflödet av fosfor högre än i de övriga försöken. I övrigt är inflödena ganska lika.

Viktigare än de absoluta inflödena kan mängdförhållande mellan inflödena av vissa grundämnen vara. Inflödeskvoter (nyckeltal) redovisas i Tabell 5.

#### Tabell 5. Inflödeskvoter.

	Ref	F1	F2
Nyckeltal	mol/mol	mol/mol	mol/mol
S/Cl	1,5	0,68	0,52
Cl/(Na+K)	0,31	0,42	0,36
S/(Na+K)	0,47	0,28	0,19
P/(Na+K)	0,093	0,37	0,081
Ca/S	4,4	7,1	6,9
Ca/P	22	5,5	16
Ca/(S+P)	3,7	3,1	4,8
Cl/(K+Na+Pb/2)	0,31	0,41	0,36
Cl/(K+Na+Pb/2+Zn/2)	0,31	0,40	0,34

Även om det i Ref är överskott på svavel i förhållande till klor så är det för litet för att helt undantränga klor från alkali (Na+K) [8][9]. Detsamma gäller kvoten S/tillgängligt alkali som har angivits till minst 4-5 för att undvika bildning av alkaliklorid [9]. Vidare kan man konstatera att det i alla försök finns överskott på kalcium både i förhållande till svavel och fosfor, vilket kan innebära att dessa ämnen även binds av kalcium. Det skulle innebära att bildningen av alkaliklorider i än mindre grad hindras av svavel. Utifrån denna analys vore bildning av alkaliklorider väntat. Då har emellertid inte tagits hänsyn till slamaskans effekter, som visat sig kunna minska alkalikloridhalten avsevärt [2][10]. Bildning av zinkklorid eller blyklorid är också möjlig även om klor i första hand reagerar med alkali [1].

## 4.2 Kontrollbesiktning

En kontrollbesiktning utfördes av ÅF-Kontroll på rengasen i rökgaskanalen efter panna 5, se Bilaga C. Huvudskälet till att denna mätning gjordes var att kontrollera att dioxinemissionerna inte ökade vid förbränning av SLF samt visa att alla gränsvärdena kan innehållas då SLF förbränns.

Resultat av mätningarna gav att alla emissioner inklusive dioxin minskade i försök F1 och F2 jämfört med referensfallet bortsett från tungmetaller och kvicksilveremissionerna i de båda försöken, ammoniak i försök 1 och HCl i försök 2, se Tabell 6. Alla värden låg under gränsvärdena för tillståndet, de flesta med råge (förutom SO<sub>2</sub> i referensfallet och ammoniak i försök 1), se Tabell 7.

Tabell 6.	Procentuell ökning (+) respektive minskning (-) av emissioner i rökgasen efter rening
	för försöken jämfört med referensfallet.

Table 6.	Percentage increase (+) or decrease (-) of emissions after flue gas cleaning in the
	tests in comparative to the reference case.

Parameter	F1 jämfört med Ref	F2 jämfört med Ref
СО	- 64%	- 64%
SO2	- 84%	- 94%
NO <sub>x</sub>	- 29%	- 50%
Totalkolväte	0%	0%
Lustgas	- 53%	- 44%
Stoftutsläpp	- 9%	- 9%
Fukthalt	+ 6%	+ 1%
Metaller: As, Co, Cr, Cu,		
Mn, Ni, Pb, Sb, V	+ 130%	+ 83%
Metaller: Cd, Tl	+ 25%	+ 25%
Hg	+ 155%	+ 418%
HCl	- 38%	+ 14%
HF	0%	0%
Ammoniak-slip	+ 38%	- 15%
TCDD-ekvivalenter	- 75%	- 83%

Anm: Alla värden är normerade till 11% O<sub>2</sub>, torr gas och normaltillstånd innan jämförelse

Noteras bör att mätningen gjordes direkt efter den torra reningen vid försöken då den våta reningen är gemensam för flera pannor och mätning efter densamma inte skulle ge rättvisa svar. Flödet av aktivt kol och kalk styrdes av börvärdet på HCl i rökgasen efter den torra reningen. Flödet av ammoniak styrdes av ammoniakslipen i rökgasen.

Mätvariabel	Enhet <sup>b</sup>	Ref	Försök 1	Försök 2	Villkor
					tillstånd
Rökgasflöde	m <sup>3</sup> /h ntg	56 300	54 700	63 500	
Rökgastemperatur	°C	134	135	135	
efter filter					
O <sub>2</sub>	vol%	9,8	10,5	9,6	
CO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup> ntg	9,2	9,1	9,7	
CO	mg/m <sup>3</sup> ntg	14	<5	<5	100 e
SO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup> ntg	51	8	3	50 c
NO <sub>x</sub> <sup>a</sup>	mg/m <sup>3</sup> ntg	136	96	68	200 c
Totalkolväte	mg/m <sup>3</sup> ntg	<1	<1	<1	10 c
Lustgas	mg/m <sup>3</sup> ntg	12	5,6	6,7	20 c
Stoftutsläpp	mg/m <sup>3</sup> ntg	1,1	$\leq 1$	<1	10 c
Fukthalt	Vol%	10,3	10,9	10,4	
Metaller: As, Co,	$\mu g/m^3 ntg$	77	177	141	500 d
Cr, Cu, Mn, Ni, Pb,					
Sb, V					
Metaller: Cd, Tl	$\mu g/m^3 ntg$	<0,8	1	1	30 d
Hg	$\mu g/m^3 ntg$	1,1	2,8	5,7	30 d
HCl	mg/m <sup>3</sup> ntg	6,4	4,0	7,3	10 c
HF	mg/m <sup>3</sup> ntg	<0,1	<0,1	<0,1	1 c
Ammoniak	mg/m <sup>3</sup> ntg	7,2	9,9	6,4	10 c
TCDD-ekvivalenter	$ng/m^3 ntg$	0.012	0.003	0.002	0.1 f

#### Tabell 7. Emissioner i rökgas efter panna och torr rening uppmätta vid kontrollbesiktning i de olika fallen.

Table 7. Emissions in flue gas after boiler and dry cleaning device in the different tests.

räknat som NO<sub>2</sub>. <sup>b</sup> alla värden är normerade till 11% O<sub>2</sub> torr gas och normaltillstånd (n)

<sup>c</sup> dygnsmedelvärde

<sup>d</sup> 30 min - 8 tim

<sup>e</sup> timmedelvärde

<sup>f</sup> 6-8 timmar

## 4.3 Askanalyser

Figur 6 visar sammansättningen av aska med avseende på huvudelement från bottenaska, vändschakt, cyklon och filter (se Bilaga D för alla värden i tabellform samt Figur 3 och Tabell 1 för förklaring till provbeteckningarna). Proverna är e-prover; d.v.s. de är tagna i slutet av respektive försök. F2<sub>0</sub>B är med för att jämföras med Ref<sub>e</sub>B. Om inga minneseffekter av slammet finns i pannan så skall F2<sub>0</sub>B likna Ref<sub>e</sub>B, som är försök med enbart normalt avfall. Efter försök F1, där slam ingick, eldades normalt avfall i två veckor innan försök F2 gjordes. Av Figur 6 kan man utläsa att minneseffekterna är nära nog obefintliga vilket är en bra förutsättning för försöken.

Om man följer asksammansättningen genom pannan så är trenden att askandelen klor, svavel och kalcium ökar medan andelen kisel minskar ju längre från eldstaden man kommer. Särskilt mycket klor och kalcium är det i filteraskan, men det beror troligast på att tillsats av släckt kalk, som binder HCl, skedde strax uppströms filtret.



De olika försöken uppvisar någon större skillnad endast i järnhalten, som är minst i Ref.

Figur 6. Sammansättningen av aska m.a.p. huvudelement från olika försök (Ref, F1 och F2) och provtagningspunkter (B = bottenaska, V = vändschakt, C = cyklon, F = filter)

# Figure 6. Ash content of main elements from the different tests (Ref, F1 and F2) and positions of sampling (B=bottom ash, V=before conventional are, C = cyclone, F = filter)

Asksammansättningen av spårämnen visas i Figur 7. Koppar, zink och bly dominerar i alla prover. Skillnaden mellan försöken är betydligt större för dessa spårämnen än för huvudelementen. Trenden är att halterna är lägre i eldstaden än längre bak i rökgasstråket och högst i filteraskan. Halterna är i alla provtagningspunkter högst i försök F2 där de för flera ämnen är mer än dubbelt så höga som i Ref.



Figur 7. Sammansättningen av aska m.a.p. spårämnen från olika försök (Ref, F1 och F2) och provtagningspunkter (B = bottenaska, V = vändschakt, C = cyklon, F = filter)

Figure 7. Ash content of trace elements from the different tests (Ref, F1 and F2) and positions of sampling (B=bottom ash, V=before conventional are, C = cyclone, F = filter).

#### 4.3.1 Konsekvensen av ökat och förändrat askflöde

Askmängden i bränslet ökade med 38% i försök 1 och 19% i försök 2 jämfört med referensfallet. Det ger ett ökat inflöde av aska på ca 380 kg/h i försök 1 och 190 kg/h i försök 2.

I Figur 8 visas antalet sändningar av aska i vändschaktet, cyklonen och filtret. Om vi antar att alla sändningar sänder lika mycket aska varje gång med samma densitet så får vi att det blir 47 % mer aska i vändschaktet, 30% mer cyklonaska men 4 % mindre filteraska i försök F1 jämfört med i Ref, se Tabell 8. I försök F2 jämfört med Ref så ökar vändschaktsaskan med 35% medan cyklonaskan och filteraskan minskar med 11 respektive 14%. Detta innebär att slambränsleaskan i huvudsak hamnar i vändschaktet och i cyklonen. Bränsleaskan från SLF hamnar till större delen tidigt i pannan jämfört med normalt avfall. Tyvärr finns ingen mätning på mängden bottenaska i de olika fallen men det kan förväntas att stor del av askan från SLF stannar i bottenbädden och/eller siktas senare ut som grov bottenaska, då bränslet innehåller en del metallbitar.

Mängden flygaska beror till stor del på hur mycket släckt kalk och aktivt kol som tillsätts före filtret så flygaskmängderna beror inte enbart på vilken bränsleaska som går in. Eftersom kalkflödet var svårmätt, varmed vi inte har tydliga skillnader i förbrukning, så går det inte att jämföra flygaskmängderna mellan fallen.



- Figur 8. Antal sändningar av aska från vändschaktet (V-aska), cyklonen (C-aska) och filtret (F-aska) per dygn under försöken.
- Figure 8. Number of sendings of ash from the empty pass (V-aska), the cyclone (C-aska) and the filter (F-aska) per day during the tests.

Tabell 8. Förändring av askmängderna av de olika askorna vid försöken.

Aska	F1 jämfört med Ref	F2 jämfört med Ref
	% förändring i antal sändningar	
Vändschakt	+ 47%	+ 35%
Cyklon	+ 30%	- 11%
Filter	- 4%	- 14%

Table 8. The change of ash amount in the different ashes at the tests.

Innehållet i askorna förändras marginellt förutom för koppar och zink som ökar i alla askor vid förbränning med SLF. Järn ökar också jämfört med Ref förutom i bottenaskan för F1. Se Bilaga D. De förändrade askinnehållen i F1 och F2 ändrar inte klassningen av askorna [12], vilket innebär att samma avsättning som askor från förbränning av normalt avfall kan användas. Idag blandas bottenaska med vändschaktsaska och används som konstruktionsmaterial på deponi. Cyklonaska blandas med filteraska samt askstabiliserande additiv och deponeras på icke farligt avfallsdeponi.

#### 4.4 Beläggningsanalyser

Massökningen av beläggningar i eldstad, vändschakt och uppströms ekonomisern (=nedströms konvektion) visas i Figur 9. Inga resultat från eldstaden i Ref erhölls (se kapitel 3.6.3). Några bilder på beläggningsringar efter exponering ges i bilaga F. För alla försök är beläggningstillväxten klart störst i eldstaden medan den i vändschaktet endast är något större än nedströms konvektionsstråket. Massökningen av beläggningarna i eldstaden är större i F1 än i F2, men eftersom beläggningarna var svåra att få ut hela (se kapitel 3.6.3) så går det inte att säga om det är en signifikant skillnad. Massökningen i vändschakt och nedströms konvektionsdelen är betydligt mindre än i eldstaden. Ref och F1 är nästan lika i dessa två positioner, medan sonderna i F2 har ungefär dubbelt så mycket beläggningar som Ref och F1.



Figur 9. Massökningen av beläggningar.

#### Figure 9. Mass increase of deposits.

Beläggningarnas ökning av substansmängd grundämnen visas i Figur 10. I enlighet med den större beläggningstillväxten så innehåller eldstadsbeläggningarna i F1 mer av de flesta grundämnen än i F2. Undantaget är klor som finns i större mängd i F2. Här skall dock påpekas att eldstadsmätningarna är behäftade med osäkerhet p.g.a. att de erhållits i en svårartad miljö och därmed är väldigt heterogena (se Bilaga F). Intrycket är att man kunde få en annan beläggningsmängd och kanske sammansättning om de placerats annorlunda i eldstaden. I vändschakt och nedströms konvektionsdelen är beläggningens sammansättning likartad i F1 och F2 fast dubbelt så stor mängd har deponerats i F2. I referensfallet finns det mindre mängd tungmetaller men något mer klor i dessa positioner än i F1.



Figur 10. Beläggningstillväxt. Övre och nedre diagram skiljer sig i skalan på y-axeln och i att resultat från eldstaden inte finns med i det nedre diagrammet.

Figure 10. Growth of deposits. The scale of the y-axis differs between the diagrams. The results from the furnace are not shown in the lower diagram.

Beläggningarnas sammansättning visas i Figur 11. En jämförelse av de olika positionerna visar att bly har betydligt högre halt i vändschaktet än i eldstaden och nedströms konvektionsdelen. För järn och klor är halterna högre nedströms konvektionsdelen, även om det för järn i F2 är likartade halter i alla positioner. Uppmätt järnhalt kan komma ifrån korrosionsprodukten och skall därför inte enbart ses som en beläggning, d.v.s. det kan även vara järn från tubmaterialet som ger den ökade järnhalten förutom järn från bränsle eller additiv. Aluminium är mest förekommande i eldstaden. Alkali och svavel uppvisar inga tydliga trender.

Det förekommer mindre halter koppar i Ref än i de andra försöken. Klorhalten är lägst i F1 och högst i F2.



Figur 11. Sammansättningen av beläggningarna.

#### Figure 11. Composition of the deposits.

Figur 12 visar beläggningstillväxten i vändschaktet vid olika yttemperaturer. Temperaturen har liten betydelse i Ref och F1 även om mönstret med lägst beläggningstillväxt vid 350 °C och högst vid 420 °C är detsamma i alla försöken. I F2 är beläggningshastigheten betydligt större vid 420 °C än vid de övriga temperaturerna. Mest markant ökar innehållet av järn i F2 jämfört med de andra försöken, men detta är troligtvis en korrosionsprodukt och inte en beläggning. Koppar, natrium och kalium samt klor och svavel är högre i F2 jämfört med Ref och F1.


Figur 12. Beläggningstillväxt vid olika yttemperaturer i vändschaktet.

Figure 12. Deposit growth at different surface temperatures upstream of the convection area.

#### 4.5 Gasmätningar

Figur 13 visar koncentrationerna av HCl och SO<sub>2</sub> i rökgasen (rågas) i mätposition D (se Figur 1) normerade till 11% O<sub>2</sub>. Staplarna visar koncentrationen som medelvärdet av två mätningar mellan vilka det var ganska stor spridning (varje mätning är markerad med x i Figur 13). Det betyder att variationen under försökets gång har varit betydligt större än vad de angivna värdena avslöjar. För F1 och F2 är det därför svårt att säga att skillnaden i halt mellan försöken är signifikant. För Ref är skillnaden jämfört med de andra försöken så stor att man kan säga att det i genomsnitt är lägre koncentration HCl och högre koncentration av SO<sub>2</sub> i rökgasen.

Spridningen kan bero på att både HCl och SO<sub>2</sub> kan ha fastnat på partiklar i gasen och som då inte kommer med i analysen av rökgasen eftersom partiklar inte detekteras i använd metod [13]. Vid mätningen hölls dock temperaturen på mätinstrumentet över gastemperaturen så avvikelserna tros i huvudsak bero på bränslevariationen.



Figur 13. Koncentrationer (mg/Nm<sup>3</sup> torr gas vid 11% O<sub>2</sub>, medelvärden av två mätningar) av HCl och SO<sub>2</sub> i rågas nedströms ekonomisern.

Figure 13. The concentration  $(mg/Nm^3)$  dry gas at 11% O<sub>2</sub>, average value of two measurements) of HCl and SO<sub>2</sub> after the economizer.

#### 4.6 Korrosionstester

Den initiala korrosionen och tillväxten av beläggningar på proverna utvärderades för två olika bränsleblandningar samt i referensexponeringar med normalt bränslemix. För varje försök exponerades tre material (16Mo3, 304L och 310) vid tre temperaturer (280°C, 350°C och 420°C) med hjälp av korrosionssonden. Exponeringstiden var 24 timmar. Analysarbetet fokuserade på bränsleblandningarnas effekter.

#### 4.6.1 **Optisk inspektion**

I Figur 14 och Figur 15 visas fotografier av 16Mo3 och 304L proverna efter exponering. I figuren betyder vindsidan (0°) den sida som rökgasen träffar tuben medan läsidan (180°) är den sida som är bakom tuben i rökgasriktningen. Vindsidan uppvisade generellt mindre beläggning, vilket även var fallet på 310-proverna (beläggningsringarna på korrosionssonden). Detta var speciellt påtagligt vid de högre temperaturerna och vid försöket med enbart SLF och avfall (F2). För flera av proverna flagade en del av beläggningen av efter exponeringen, d.v.s. på väg ut från pannan eller under nedkylningen av provet. Detta gäller alla material och temperaturer men var speciellt tydligt för 304L i försöket med SLF (F2) och den högsta temperaturen, Figur 15.



- Figur 14. Fotografier av 16Mo3 proverna efter 24 timmars exponering i positionerna vindsida (0°) och läsida (180°) för de olika försöken och de olika provringarna vid 280, 350 och 420 °C yttemperatur. Mindre beläggning fanns generellt på vindsidan (0°).
- Figure 14. Photographs of the 16Mo3 samples after 24 hours exposure at the positions of wind side (0°) and lee-side (180°) in the different tests at 280, 350 and 420 °C surface temperature. Less deposit was typically found on the wind side (0°) of the samples.



Figur 15. Fotografier av 304L proverna efter 24 timmars exponering exponering i positionerna vindsida (0°) och läsida (180°) för de olika försöken och de olika provringarna vid 280, 350 och 420 °C yttemperatur. Mindre beläggning fanns generellt på vindsidan (0°).

Figure 15. Photographs of the 304L samples after 24 hours exposure at the positions of wind side (0°) and lee-side (180°) in the different tests at 280, 350 and 420 °C surface temperature. Less deposit was typically found on the wind side (0°) of the samples

#### 4.6.2 Gravimetri

Alla provringar vägdes före och efter exponering. Massökningen orsakas både av att det bildas en beläggning och av att det bildas korrosionsprodukter men domineras typiskt av bildningen av beläggning. Som alltid vid sondförsök går en del av beläggningen förlorad när sonden tas ut ur pannan, bland annat på grund av att sonden skrapar emot väggen och på grund av att delar av beläggningen spricker sönder och flagar av när den kyls ned. Det är viktigt att ha detta i åtanke vid tolkningen av massökningsresultaten i Figur 9.

Figur 16 är massökningen för alla material och försök samlade för de tre olika exponeringstemperaturerna (280°C, 350°C och 420°C). Vid 420°C flagade en stor del av beläggningen av på 304L provet (se fotografi i Figur 15). En streckad stapel indikerar därför istället en trolig massökning i figuren. Samma massökningstrend kan observeras för alla temperaturer och material. Referensfallet och F1 har jämförbara massökningar medan F2 har betydligt högre massökning vid alla temperaturer och för alla material. Massökningen för det låglegerade 16Mo3 är högre än för de två höglegerade stålen, 304L och 310. Skillnaden i massökning mellan 304L och 310 är liten. Den massökning dessa stål uppnått härrör i huvudsak från bildandet av beläggning, speciellt vid de lägre temperaturerna. Detta indikerar att försöket med enbart inblandning av SLF som bränsle genererar större beläggningstillväxt vid alla temperaturer. (F2) Eftersom beläggningstillväxten kan antas vara materialoberoende förklaras sannolikt den högre massökningen för 16Mo3 av en högre korrosionshastighet.



- Figur 16. Massökningen för alla material och försök samlade för de tre olika temperaturerna (280°C, 350°C och 420°C). Vid 420°C (F2) flagade en stor del av beläggningen av på 304L provet (se fotografi i Figur 15). En streckad stapel indikerar därför istället en trolig massökning i figuren.
- Figure 16. Mass gain for all materials and exposure conditions for all three temperatures (280°C, 350°C och 420°C). A large part of the deposit spalled of on the 304L sample at 420°C (F2), see photograph in Figur 15. A predicted mass gain is therefore instead indicated by the dashed line.

I Figur 17 finns resultaten för 16Mo3 proven samlade i en graf. Här framgår tydligt att F2 ger en högre massökning vid alla temperaturer medan referensfallet och F1 har jämförbara massökningar vid alla temperaturer. Effekten av exponeringstemperatur skiljer mellan de försöken. I referensfallet och F1 kan man se mindre påverkan av olika exponeringstemperaturen på massökningen. För båda försöken gäller att ökad exponeringstemperatur ger ökad massökning. Störst effekt av exponeringstemperaturen på massökningen finns för försöket F2. Resultaten visar att den högsta massökningen för alla tre material erhålls med SLF (F2) medan massökningen i försöket med slam och SLF (F1) är ungefär lika stor som vid referensfallet. Detta gäller alla temperaturer.



Figur 17. Massökningen för 16Mo3 vid alla försök samlade för de tre olika temperaturerna (280°C, 350°C och 420°C).

Figure 17. Mass gain for 16Mo3 after exposure in the three different exposure conditions for all three temperatures (280°C, 350°C and 420°C).

#### 4.6.3 Beläggningsanalys av provmaterial 310

På korrosionssonden satt under försöken nio provringar av materialet 310 på vilka gjordes beläggningsanalys av SP. Resultaten från dessa analyser presenteras mer detaljerat i avsnitt 4.4 och Figur 12. Där framgår att försöket med bara SLF och avfall (F2) genererar mer beläggning men även en något annorlunda sammansättning. Typiskt är att den beläggningen (försök F2) har större andel klor samt koppar och lägre andel svavel jämfört med beläggningarna bildade i försöken med SLF och slam (F1) och referensen. Dessa trender gäller vid alla temperaturer. Mängden beläggning från beläggningsanalysen stämmer väl med massökningarna rapporterade i Figur 16.

#### 4.6.4 Röntgendiffraktometri (XRD) på provmaterial 304L

Beläggning och korrosionsprodukter på samtliga 304L-prov analyserades med hjälp av XRD. Generellt var resultaten svårtolkade, vilket tyder på att många och/eller komplexa faser bildats. På samtliga prov detekterades de kristallina faserna (Fe,Cr)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (Fe,Cr)<sub>3</sub>O<sub>4</sub> samt Ca(SO<sub>4</sub>). Topparna var skiftade från ren hematit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) och magnetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) vilket är väntat då 304L bildar en blandoxid innehållande även krom. Detta motsvarar Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> och Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> på 16Mo3-proverna (SEM/EDX på tvärsnitt) då 16Mo3 materialet saknar krom.

Tydligast resultat fanns vid den högsta exponeringstemperaturen 420°C. Där detekterades utöver de tidigare nämnda faserna: NaCl, KCl, (Na,K)Cl, CuO, K<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> samt hydrerad FeCl<sub>2</sub>. Dessa faser detekterades i alla försök vid 420°C. Tydliga skillnader mellan försöken var att CuO-intensiteten var svagare i referensförsöket än vid F1 och F2. Vidare var K<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>-intensiteten högre vid försöket med dosering av slam (F1). Att hydrerad FeCl<sub>2</sub> detekteras tyder på närvaro av järnklorid som är mycket hygroskopisk vilket innebär att den snabbt reagerar och bildar hydrerad FeCl<sub>2</sub> (fast form) i närvaro av fuktig luft, t.ex. vid provpreparering inför XRD analys. Tolkningen är att vi haft FeCl<sub>2</sub> på provet men att det vid provprepareringen bildat hydrerad FeCl<sub>2</sub> (fast form) som detekterats med XRD. Vid de lägre exponeringstemperaturerna (280 och 350°C) var XRD spektrumen mer svårtolkade. Det var därmed svårt att titta på relativa intensiteter. Här är istället troliga faser markerade som närvarande (med x). Resultaten från XRD-analysen är sammanfattade i Tabell 9.

# Tabell 9. Kristallina faser detekterade på 304L exponerad 24h vid 280, 350 och 420°C i de olika försöken (Ref, F1 and F2).

Table 9.	The different crystal phases detected on 304L exposed for 24h at 280, 350 and
	420°C in the three different exposure conditions (Ref, F1 and F2).

	(Fe,Cr) <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(Fe,Cr) <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Ca(SO <sub>4</sub> )	NaCl	KC1	(NaK)Cl	CuO	$K_2Ca_2(SO_4)_3$	FeCl <sub>2</sub>
420°C									
Ref	S	S	S	S	S	S	W	W	W
F1	S	S	S	S	S	S	S	S	W
F2	S	S	S	S	S	S	S	W	W
350°C									
Ref	S	S	S	Х	Х	Х	Х	Х	Х
F1	S	S	S	Х	Х	Х	Х	Х	Х
F2	S	S	S	Х	Х	Х	Х	Х	Х
280°C									
Ref	S	S	S	Х	Х	Х	Х	Х	Х
F1	S	S	S	X	Х	Х	Х	X	Х
F2	S	S	S	X	Х	X	Х	Х	Х
	S = strong, W = weak, X = possible								

#### 4.6.5 Elektronmikroskopi (SEM/EDX) på provmaterial 16Mo3

Elektronmikroskopi användes för att studera sammansättningen i beläggningar och korrosionsprodukter på provmaterialet 16Mo3. Resultaten är sammanfattade i en temperaturupplöst serie (280°C, 350°C och 420°C) i närvaro av bränsleadditivet SLF (F2) samt en serie med alla tre försök (ref, F1 och F2) vid en temperatur (420°C). Generellt finns stora lokala variationer på alla analyserade prov. Detta beror både på skillnader mellan vind och läsida men även flagning och provpreparering påverkar. Därför har ett typiskt område valts på varje prov. Ändå kan tjocklek, antalet skikt, sprickbildning samt mängden beläggning variera något mot det som kan tolkas som typiskt för varje prov. Detta har tagits hänsyn till i sammanfattningen av resultaten. Elementen kisel (Si) samt fosfor (P) har i elementkartorna utelämnats. Fosfor hittades bara i mycket små mängder (<1 at%) även när slam doserades. Kisel väntas komma från sanden och förväntas inte påverka korrosionsförloppet. Kisel kan även komma från slip-pappret använt vid provprepareringen.

# 4.6.5.1 Effekt av temperatur på beläggningssammansättning och korrosionsangrepp i närvaro av SLF (F2) – 16Mo3 exponerad vid 280°C, 350°C och 420°C

För att studera effekten av SLF samt inverkan av exponeringstemperaturen undersöktes slipade tvärsnitt av 16Mo3-prover exponerade vid 280°C, 350°C och 420°C i försöket med enbart SLF och avfall (F2). Massökningen (se Figur 17) visade en tydlig temperatureffekt. Högre temperatur gav högre massökning vilket gällde alla försök men var tydligast i försöket med enbart SLF (F2) som additiv.

I Figur 18 visas SEM/BSE bilder av slipade tvärsnitt genom provringar exponerade vid de olika temperaturerna i närvaro av SLF (F2). Beläggningens och korrosionprodukternas tjocklek varierade mellan lä- och vindsidan på alla analyserade prover. Tjockleken var på vindsidan typiskt mindre än halva tjockleken på läsidan. Beläggningens och korrosionprodukternas tjocklek hade även större lokala variationer på vindsidan varför all analys gjordes på läsidan. Tjockleksfördelningen mellan de olika temperaturerna stämmer väl med den rapporterade massökningen (Figur 17). Beläggningen och korrosionprodukternas totala tjocklek vid 280°C var c:a 200 µm och kan delas upp i flera olika skikt. Det yttersta mörka beläggningsskiktet var inte kontinuerligt över ytan vilket kan bero på att det inte bildats överallt eller att vissa delar fallit av under provprepareringen. Noterbart är att ett område med något tjockare beläggning flagat vid ingjutningen och därför inte analyserades. Områdets struktur stämmer väl med den analyserades men typiska tjocklekar underskattas förmodligen något vid 280°C.

Vid 350°C och 420°C är beläggningens och korrosionprodukternas totala tjocklek c:a 400 respektive c:a 500 µm. Tjockleksvariationerna över provet exponerat vid 350°C var större än vid 420°C vilket innebär att den typiska tjockleken överskattas något. Noterbart är att alla beläggningar/korrosionsprodukter har samma struktur som vid 280°C, alltså oberoende av temperatur. Beläggning/korrosionsprodukter består även vid 350°C och 420°C av en inre mörkare del (30-40%) närmast metallen samt en ljusare yttre del. Dessutom finns stråk av ännu ljusare partier i den yttre delen av beläggningen vid alla temperaturer. Dessa stråk är inte kontinuerliga utan finns på olika områden men på alla prov. Utanför det ljusare skiktet och närmast rökgasen finns ett inte kontinuerligt skikt på alla prov, visas tydligast

vid 280°C. SEM/BSE bilderna ger information om sammansättningen och kan tolkas som att den inre delen består av generellt sett lättare/porösare material samt att de yttre ljusa stråken består av tyngre element.



Figur 18. SEM/BSE bilder av slipade tvärsnitt genom 16Mo3 ringar exponerade vid de olika exponeringstemperaturerna (280°C, 350°C och 420°C) i närvaro av SLF (F2).

Figure 18. SEM/BSE images showing polished cross-sections through deposits and corrosions products formed on 16Mo3 in the presence of SLF (F2) at 280°C, 350°C and 420°C.

#### 4.6.5.1.1 Försök med enbart SLF och avfall (F2) vid 280°C

I Figur 19 visas en SEM/BSE-bild med högre förstoring från det slipade tvärsnittet genom beläggning och korrosionsprodukter bildade vid 280°C i F2. SEM/EDX-elementkartor visas även från det markerade området i SEM/BSE-bilden. SEM/EDX-kvantifieringar från de olika områdena verifierar BSE-bilden och elementkartorna. Det c:a 40 µm tjocka mörka området närmast metallen, d.v.s.. korrosionsfronten, består av järnklorid. Detta område följs av en c:a 30-40 µm tjock tät järnoxid medan den yttre järnoxidrika delen av beläggningen (c:a 50 µm) har en mer heterogen sammansättning. I skiktet bestående av tät järnoxid har en c:a 30 µm bred spricka bildats. Inget tyder på att den bildats under exponeringen utan att den har bildats efter exponeringen eller under provprepareringen. Det yttersta mörkare skiktet, vilket är c:a 60 µm tjockt, består i huvud sak av Na, S, Ca, K

och Cl. Även Cu återfinns här. Inget eller mycket låga halter bly (Pb), koppar (Cu) eller zink (Zn) detekterades i närheten av korrosionsfronten. XRD-resultaten var svårtolkade vid 280°C men faserna Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, FeCl<sub>2</sub>, KCl, CaSO<sub>4</sub>, NaCl, CuO samt Na<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>) som detekterats vid 420°C stämmer väl med korrelationen av element i elementkarorna. Även kvantitativa SEM/EDX-resultat var svårtolkade förutom i Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, FeCl<sub>2</sub> -skikten vilket tyder på att analysvolymen var större än enskilda faser eller att mer komplexa faser bildats i den yttre delen av beläggningen. Noterbart är att även SEM/EDX-analysen av järnkloridskiktet visade en sammansättning som matchar XRD-resultaten, d.v.s.. hydrerad FeCl<sub>2</sub>. Även i detta fall är detta en effekt av provprepareringen och tolkningen är att skiktet består av FeCl<sub>2</sub>. Detta gäller alla SEM/EDX-analyser av järnklorid.



- Figur 19. SEM/BSE-bild med högre förstoring från det slipade tvärsnittet genom beläggning och korrosionsprodukter bildade vid 280°C i närvaro av SLF (försök F2) på 16Mo3. SEM/EDX-elementkartor visas även från det markerade området i SEM/BSE-bilden.
- Figure 19. SEM/BSE image showing polished cross-section of the deposit and corrosion products formed at 280°C in the presence of SLF (F2) formed on 16Mo3. SEM/EDX elemental maps from the marked region in the SEM/BSE image are also shown.

#### 4.6.5.1.2 Försök med enbart SLF och avfall (F2) vid 350°C

I Figur 20 visas en SEM/BSE bild med högre förstoring från det slipade tvärsnittet genom beläggning och korrosionsprodukter bildade vid 350°C i närvaro av SLF (försök F2). SEM/EDX elementkartor visas även från det markerade området i SEM/BSE bilden och dessa visar att beläggning och korrosionsprodukter har samma struktur som vid 280°C. Området bestående av järnklorid närmast metallen är vid 350°C ca 150 µm tjockt. Detta område följs igen av en tät järnoxid medan den yttre järnoxidrika delen av beläggningen har en mer heterogen sammansättning. Dessa skikt är nu ca 50 respektive 220 µm tjocka. Även vid denna temperatur kan sprickbildning observeras i det täta järnoxidskiktet. Det yttre mörkare skiktet är här tunt men var tjockare på andra delar av provet. Även vid 350°C återfinns Cu i den yttersta delen av beläggningen medan inget eller mycket låga halter Pb, Cu eller Zn detekterades i närheten av korrosionsfronten. XRD-resultaten var igen svårtolkade men faserna Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, FeCl<sub>2</sub>, KCl, CaSO<sub>4</sub>, NaCl samt CuO som detekterats vid 420°C stämmer väl med korrelationen av element i kartorna. Även kvantitativa SEM/EDX-resultat var svårtolkade förutom i Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, FeCl<sub>2</sub> skikten.



- Figur 20. SEM/BSE-bild med högre förstoring från det slipade tvärsnittet genom beläggning och korrosionsprodukter bildade vid 350°C i närvaro av SLF (försök F2) på 16Mo3. SEM/EDX-elementkartor visas även från det markerade området i SEM/BSE-bilden.
- Figure 20. SEM/BSE image showing polished cross-section of the deposit and corrosion products formed at 350°C in the presence of SLF (F2) formed on 16Mo3. SEM/ED elemental maps from the marked region in the SEM/BSE image are also shown.

4.6.5.1.3 Försök med enbart SLF och avfall (F2) vid 420°C

I Figur 21 visas en SEM/BSE bild med högre förstoring med SEM/EDX-elementkartor från det slipade tvärsnittet genom beläggning och korrosionsprodukter bildade vid 420°C i närvaro av SLF (försök F2). Dessa visar att beläggning och korrosionsprodukter har samma struktur som vid 280°C och 350°C. Området bestående av järnklorid närmast metallen är vid 420°C c:a 150-170 µm tjockt. Elementkartan och kvantifieringen visade lägre halter Cl än vid 280°C och 350°C p.g.a. annan provprepareringsteknik, se 3.6.4.2. Järnkloridskiktet följs igen av en tät järnoxid medan den yttre järnoxidrika delen av beläggningen har en mer heterogen sammansättning. Dessa skikt är vid 420°C ca 50-100 µm respektive 250 µm tjocka. Även vid denna temperatur kan viss sprickbildning observeras i det täta järnoxidskiktet (visas ej). Ett yttre mörkare skiktet kunde även vid 420°C ses på vissa delar av provet. Även här återfinns Cu i den yttersta delen av beläggningen medan inget eller mycket låga halter Pb, Cu eller Zn detekterades i närheten av korrosionsfronten. SEM/EDX resultaten stämmer väl med XRD resultaten där Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, FeCl<sub>2</sub>, KCl, CaSO<sub>4</sub>, NaCl, KNaCl och CuO detekterades.



- Figur 21. SEM/BSE-bild med högre förstoring från det slipade tvärsnittet genom beläggning och korrosionsprodukter bildade vid 420°C i närvaro av SLF (försök F2) på 16Mo3. SEM/EDX-elementkartor visas även från det markerade området i SEM/BSE-bilden.
- Figure 21. SEM/BSE image showing polished cross-section of the deposit and corrosion products formed at 420°C in the presence of SLF (F2) formed on 16Mo3. SEM/EDX elemental maps from the marked region in the SEM/BSE image are also shown.

# 4.6.5.2 Effekt av de olika bränsleadditiven på beläggningssammansättning och korrosionsangrepp – 16Mo3 exponerad vid 420°C i 24 timmar (Ref, F1 och F2)

För att studera effekten av de olika bränsleblandningarna valdes den högsta exponeringstemperaturen (420°C) vilken enligt massökningen Figur 17 gav störst skillnad mellan de olika försöken. Detta gjordes för att kunna särskilja effekter av de olika bränslena på beläggning och korrosionsprodukter från lokala variationer som i alla fall var stora. Effekten av temperatur som studerades på försöket med enbart SLF och avfall (F2) samt XRD-resultaten visar att beläggningarna och korrosionsprodukter typiskt har samma struktur vid alla temperaturer vilket indikerar att resultaten bör vara generella för alla temperaturer.

I Figur 22 visas SEM/BSE-bilder av slipade tvärsnitt genom provringar exponerade i de olika försöken vid 420°C. Som tidigare varierade beläggningens tjocklek och lokala variation mellan lä- och vindsidan på alla analyserade prover varför all analys gjordes på läsidan. Tjockleksfördelningen mellan de olika försöken stämmer väl med den rapporterade massökningen (se Figur 17). Beläggningen och korrosionsprodukter bildade vid försöket dubbelt tiocka F2 är ca så som i de andra försöken men alla beläggningar/korrosionsprodukter har samma struktur. Beläggning/korrosionsprodukten består i alla fall av en inre mörkare del (30-40%) närmast metallen samt en ljusare yttre del närmast rökgasen. Dessutom finns stråk av ännu ljusare partier i den yttre delen av beläggningen i alla försök. Dessa stråk är inte kontinuerliga utan finns på olika områden men på alla prov.



- Figur 22. SEM/BSE-bilder av slipade tvärsnitt genom 16Mo3-ringar exponerade i de olika försöken (Ref, F1 och F2) vid exponeringstemperaturen 420°C.
- Figure 22. SEM/BSE images showing polished cross-sections through deposits and corrosion products formed on 16Mo3 in the different tests (Ref, F1 and F2) at 420°C.

#### 4.6.5.2.1 Referensförsök (Ref) vid 420°C

I Figur 23 visas en SEM/BSE-bild med högre förstoring från det slipade tvärsnittet genom beläggning och korrosionsprodukter bildade vid 420°C med normalt avfall (försök Ref). SEM/EDX-elementkartor visas även från det markerade området i SEM/BSE-bilden. SEM/EDX-kvantifieringar från de olika områdena verifierar BSE-bilden och elementkartorna. Även i referensfallet bildas ett ca 60 µm tjockt området närmast metallen bestående av järnklorid. Elementkartan och kvantifieringen visade lägre halter Cl än vid 280°C och 350°C med SLF (F2) p.g.a. annan provprepareringsteknik, se avsnitt 3.6.4.2. Järnkloridområdet följs som tidigare av en ca 30 µm tjock tät järnoxid medan den yttre järnoxidrika delen av beläggningen har en mer heterogen sammansättning. Inget eller mycket låga halter Pb, Cu eller Zn detekterades i närheten av korrosionsfronten. SEM/EDX-resultaten stämmer väl med XRD-resultaten där bland annat detekterades Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, FeCl<sub>2</sub>, KCl, CaSO<sub>4</sub>, NaCl, KNaCl och CuO.



- Figur 23. SEM/BSE bild med högre förstoring från det slipade tvärsnittet genom beläggning och korrosionsprodukter bildade vid 420°C referensförsöket (Ref) på 16Mo3. SEM/EDelementkartor visas även från det markerade området i SEM/BSE- bilden.
- Figure 23. SEM/BSE image showing a polished cross-section of the deposit and corrosion products formed at 420°C (Ref) formed on 16Mo3. SEM/EDX elemental maps from the marked region in the SEM/BSE image are also shown.

#### 4.6.5.2.2 Försök F1 vid 420°C

I Figur 24 visas en SEM/BSE-bild med högre förstoring från det slipade tvärsnittet genom beläggning och korrosionsprodukter bildade vid 420°C i närvaro av SLF och slam (försök F1). SEM/EDX-elementkartor visas även från det markerade området i SEM/BSE-bilden och dessa visar att beläggning och korrosionsprodukter har samma struktur som de tidigare visade tvärsnitten. Det ca 40 µm mörka området närmast metallen består av järnklorid. Elementkartan och kvantifieringen visade igen lägre halter Cl än vid 280°C och 350°C p.g.a. annan provprepareringsteknik, se avsnitt 3.6.4.2. Järnkloridområdet följs som tidigare av en tät järnoxid emedan den yttre järnoxidrika delen av beläggningen har en mer heterogen sammansättning. Dessa skikt är nu 40 µm respektive 30 µm tjocka. Även i detta försök kan viss sprickbildning observeras i det täta järnoxidskiktet (visas ej). Det ca 50 µm yttre

mörkare skiktet innehåller även här en del ljusare stråk. Dessa ljusa stråk innehåller Pb, Zn och Cu, men inte mer än (<5 at.%) detekterades. Inget eller mycket låga halter Pb, Cu eller Zn detekterades i närheten av korrosionsfronten. SEM/EDX-resultaten stämmer väl med XRD-resultaten där bland annat detekterades Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, FeCl<sub>2</sub>, KCl, CaSO<sub>4</sub>, NaCl, (NaK)Cl och CuO. Eftersom kvantifieringen av Pb och Zn gav låga halter och ingen tydlig fas med dessa element kunde identifieras med XRD är det svårt att tolka hur dessa element är bundna i beläggningen men tydligt är att de finns i den yttre delen av beläggningen.



- Figur 24. SEM/BSE-bild med högre förstoring från det slipade tvärsnittet genom beläggning och korrosionsprodukter bildade vid 420°C i närvaro av slam och SLF (försök F1) på 16Mo3. SEM/EDX-elementkartor visas även från det markerade området i SEM/BSEbilden.
- Figure 24. SEM/BSE image showing a polished cross-section of the deposit and corrosion products formed at 420°C in the presence of sludge and SLF (F1) formed on 16Mo3. SEM/EDX elemental maps from the marked region in the SEM/BSE image are also shown.

4.6.5.2.3 Försök F2 vid 420°C

SEM/EDX analysen finns redovisad i detalj i avsnitt 4.6.5.1.3.

### 5 Resultatanalys

Resultaten visar tydligt att slam kan initialt minska beläggnings- och korrosionsproblematiken vid förbränning av SLF. Det blir mindre mängd och mindre korrosiva beläggningar med inblandning av 4% slam (energibas) i en bränslemix med 21% SLF (energibas) och resten normalt avfall. Med stöd av de olika parametrar som utreddes i projektet ges nedan en förklaring till resultaten.

#### 5.1 Driften

Vid de tre försöken, Ref, F1 och F2, så var driften av anläggningen jämn. Driftvärdena (flöden och temperaturer mm.) var likartade i alla försök. Detta innebär att de uppkomna resultaten inte är en effekt av olika driftsförhållanden utan kommer av de olika bränslen samt additiv som använts under försöken. Dock skall det noteras att flödet av ammoniak, kalk och aktivt kol har varierat eftersom flödena styrdes av börvärdet på emissionsvärdena. Bäddtemperaturen sjönk successivt under försök F1 och kan ha hjälpt till att minska beläggningsbildningen, dock är minskningen marginell jämfört med vad man i [15] har visat ge effekt.

#### 5.2 Bränsle- och rökgasanalyser

Vid jämförelse av de olika bränslena så var inflödet av svavel högre och klor lägre i Ref jämfört med F1 och F2. Halterna av HCl i rökgasen svarar mot halten klor i bränslet. S/Cl-förhållandet i bränslena var för lågt för att svavel skulle kunna undantränga klor från alkali i alla försök [2].

Skillnaden i halt SO<sub>2</sub> i rökgasen mellan försöken är större än den i bränslet. Det tyder på att större andel av bränslets svavel återfinns i aska eller beläggningar i F1 och F2 än i Ref. Det kan ha bildats alkalisulfater istället för alkaliklorider samt eventuellt koppar-, bly- och zinksulfater istället för klorider men det kanske är mer troligt att det är kalciumsulfater som bildats då överskottet av kalcium är högt. Kalcium har troligtvis även fångat fosfor. Ca/(S+P) - förhållandet är högre i F2, vilket skulle kunna förklara att mer alkaliklorider återfinns i beläggningarna i F2 jämfört med Ref och F1 (som har samma Ca/(S+P)-förhållande).

#### 5.3 Askanalyser

Askorna i de olika försöken uppvisar inte någon större skillnad förutom i järnhalten, som är minst i Ref, se Figur 6. Skillnaden i järnhalt i askan beror troligen på det större inflödet av järn i F1 och F2 jämfört med i Ref, se Bilaga B. Skillnaden i inflöde av järn mellan F1 och F2 verkar dock inte ha någon större betydelse för andelen järn i askan. Halterna koppar och zink svarar mot inflödena av dessa ämnen.

Den enda aska som visar någon skillnad mellan de olika testfallen är vändschaktsaskan där anrikningen av klor är mycket mindre i F2 jämfört med Ref och F1. Anrikningskvoter återges i Bilaga E. Mindre andel klor verkar ha bildat fasta föreningar som hamnat i vändschaktsaskan i F2. Mer andel av klor befinner sig i gasfas (som gas eller partiklar) och i beläggningarna i F2, vilket stämmer med beläggningsanalysen. Innehållet i askorna påverkas inte så mycket av de förändrade bränslemixarna i de båda testfallen att det påverkar avsättningen för askorna. Vid normal drift av pannorna blandas bottenaska och vändschaktsaska och används som konstruktionsmaterial på deponi, och cyklon och filteraska blandas med stabiliseringsadditiv och deponeras på icke farligt avfallsdeponi. I detta projekt är dock inga laktester gjorda så för att säkerställa att de inte påverkas av askinnehållet i de eldade bränslena bör eventuellt laktester göras. Det ökade inflödet av aska i F1 (+38% jämfört med Ref) och F2 (+19% jämfört med Ref) visar sig i huvudsak som ökade bottenask- och vändschaktaskmängder.

#### 5.4 Beläggningar

Slutsatser angående beläggningar bör dras utan beaktande av de beläggningar som erhölls i eldstaden. Även järn bör bortses ifrån eftersom det helt eller delvis kan ha lösts ut ur själva ringens material eller ur en korrosionsprodukt vid den kemiska analysen.

Beläggningsanalyserna visar att mängden beläggningar ökar vid förbränning av SLF (F2) men när dessutom slam tillförs (F1) så är det ingen större skillnad på beläggningstillväxten jämfört med Ref. Att tillsats av slam minskar beläggningarna har tidigare observerats bl.a. i ett tidigare projekt med samförbränning av slam och s.k. bilfluff [3], ett projekt med samförbränning av flis, halm och slam [2] samt i ett nyss avslutat KME1-projekt [11]. Halten klor och alkalimetaller är högre i beläggningarna i F2 (se Figur 10) och den troliga förklaringen till detta är att det högre inflödet av klor i F2 p.g.a. SLF (se Bilaga B) leder till ökad bildning av alkaliklorider. Dessa är flyktiga och befinner sig i gasfas vid eldstadstemperaturer, men kondenserar ut som partiklar när temperaturen sjunker under ca 800 °C, och hamnar därför på relativt kalla ytor såsom beläggningssonder. Eftersom tillförsel av klor i F1 är lika hög som i F2 så betyder det att slammet har hindrat kloridbildningen. Klor har ersatts med svavel i beläggningarna och mindre mängd beläggningar har uppkommit genom tillförsel av slam. Troligt är att alkali har bundit till svavel istället för klor och en del av partiklarna har fastnat på tuberna medan en del har följt med rökgasen ut i filtret. En del alkali kan också ha bundit till slammets aluminosilikater, t.ex. i form av zeoliter från tvättmedel, som är komplexa molekyler som binder alkali och bildar högsmältande askpartiklar. Dessa partiklar kan stanna i bottenaskan eller föras med rökgasen genom pannan. Beläggningarna i F1 har något högre aluminiumhalter än Ref. Något högre halt av fosfor återfinns i vändschaktsaskan och i beläggningarna nedströms konvektion i F1. Fosforns roll är oklar men kan inte uteslutas. Flygaska från slammet kan också ha haft en viss blästrande effekt på tuberna.

Noterbart är att det är mer klor och mindre alkali i beläggningarna nedströms konvektion jämfört med beläggningarna i vändschaktet i alla försök. Dessutom minskar beläggningstillväxten ju längre bak i konvektionsstråket man kommer på samma sätt i alla försök.

Projektet undersökte inte hur lätt- eller svårsotade beläggningarna som fastnade på tuberna var. Under tiden för beläggnings- och korrosionssondernas exponering i försöken var pannans sotblåsning minimerad.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Konsortiet för Materialteknik för termiska Energiprocesser

#### 5.5 Korrosionsanalyser

Den initiala korrosionen utvärderades för varje försök där tre material (16Mo3, 304L och 310) exponerades vid tre temperaturer (280°C, 350°C och 420°C) under 24 timmar. En jämförelse av legeringarna indikerar att de rostfria stålen (304L och 310) korroderar mindre än det låglegerade stålet 16Mo3, se Figur 16. Detta är sannolikt en effekt av att de rostfria stålen bildar en kromrik mer skyddande oxid än 16Mo3 som bildar en järnrik oxid.

Då enbart SLF samförbrändes med den vanliga bränslemixen (försök F2) erhölls högre massökning för alla material och temperaturer än de två andra försöken (Ref och F1). Resultaten indikerar att detta är en kombination av mer beläggning samt tjockare korrosionsproduktskikt. Noterbart är att när SLF samförbrändes med avfall och slam (F1) massökningarna beläggningar/korrosionsprodukter samt jämförbara med är referensförsöket. Slam adderas för att bl.a. omvandla alkaliklorider till mindre korrosiva föreningar som alkalisulfater, därigenom skapas en mindre korrosiv miljö, t.ex. genom reaktion (1), vilket stämmer väl med XRD-resultaten som indikerar mer alkalisulfat i närvaro av slam (F1). Vidare har tidigare undersökningar också visat att tillsats av slam även ger mindre mängd beläggning. Resultaten stämmer därmed väl med tidigare försök med slam [2][3].

$$2KCl + SO_3(g) + H_2O(g) \rightarrow K_2SO_4(s) + 2HCl(g)$$
(1)

Den mikrostrukturella undersökningen av tvärsnitten genom beläggningar/korrosionsprodukter bildade på 16Mo3 visade att korrosionsprodukterna hade samma struktur vid alla temperaturer och i alla miljöer, se Figur 18 och Figur 22. Detta tyder på att samma avgörande korrosionsmekanism är verksam i alla försök och vid alla temperaturer. Undersökningen visade ett område bestående av järnklorid i korrosionsfronten vid alla försök. Inga tungmetaller (Cu, Pb, Zn), eller mycket låga halter, återfanns i närheten av korrosionsfronten, se t.ex. Figur 19. Inte heller kunde några tecken på smältor återfinnas i närheten av korrosionsfronten. Resultaten indikerar därmed klorinducerad korrosion i alla försök vid alla temperaturer. Järnkloriden bildar ett ickeskyddande skikt närmast metallen som minskar vidhäftningen av oxiden samt ökar risken för stilleståndskorrosion.

Beläggningsanalysen visar att beläggningen då enbart SLF samförbränns med den vanliga bränslemixen (F2) har en större andel alkaliklorid, se Figur 12. Tillsatsen av slam undertrycker påslaget av alkaliklorid i beläggningen. Detta förklarar varför försöket med SLF och slam (F1) har ett mindre korrosionsangrepp jämfört med försöket med SLF utan slam (F2). Bränsleanalysen med SLF visar högre halter Cu, Pb, och Zn men avsaknaden av dessa element i korrosionsfronten tyder på att de inte spelar någon större roll med avseende på den initiala högtemperaturkorrosionen, vilket man befarade i steg 1 av detta projekt [1].

Resultaten från projekt KME 411 [11] indikerar att slamtillsatser ger bättre effekt på korrosionshastighet vid högre materialtemperatur. I projektet tittade man på materialtemperaturerna (450 - 550 °C), d.v.s. högre temperaturer än vad som använts i detta projekt. Då den korta exponeringstiden och de relativt låga exponeringstemperaturerna under exponeringar i detta projekt har genererat relativt små massökningar är det svårt att dra slutsatser om en eventuell temperatureffekt av slamadditivet.

#### 5.6 Emissioner

De olika försöken gav inte upphov till några utgående rökgasemissioner som överskred villkoren i anläggningens tillstånd. Trots att SLF innehåller mer klor och väsentligt högre halter koppar (som agerar som katalysator vid dioxinbildning) än normalt avfall så uppmättes mycket låga halter av dioxiner i rökgasen ut från anläggningen. Rökgasreningsutrustningen hanterade variationen av SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl och dioxiner för de tre försöken. Förbrukningen av kalk och aktivt kol var inom normal variation.

#### 5.7 Sammanfattning

Resultaten visar att samförbränning av slam ger mindre mängd och mindre korrosiva beläggningar. Det finns flera tänkbara orsaker till detta men enligt ovanstående resonemang så kan man sammanfattningsvis säga att det är svårt att hitta en enskilt förklarande orsak till slammets goda effekter. Förutom slammets innehåll av svavel, fosfor och alumniumsilikater som fångar in alkali, så skulle också det ökade askflöde kunna vara orsaken till skillnaden mellan F2 och F1. Askan har en blästrande effekt samt för med sig en del kladdiga partiklar som annars skulle fastna på tuberna. Det bör tilläggas att alla slamtyper inte har samma effekt. Innehållet av bl.a. svavel, kalcium, fosfor, aluminium och zeoliter samt askhalt påverkar hur effektivt slammet är som additiv till samförbränning av klor-, alkali- och metallhaltiga bränslen. I Värmeforskprojektet "Ramprogram - Åtgärder för samtidig minimering av alkalirelaterade driftproblem, Etapp 3", som är en fortsättning av [2] och skall slutredovisas i december 2010, kommer olika typer av slam att utredas. Förbränningsförsök görs i Chalmers CFB-panna där bark, RDF-pellets och 4 olika slam undersöks.

#### 6 Slutsatser

Följande slutsatser har dragits av projektet:

- Samförbränning med 23% SLF (energibas) ger totalt större mängd beläggningar på tuberna samt större andel alkali och klor i beläggningarna än vid förbränning av normal avfallsmix..
- Samförbränning med drygt 20% SLF (energibas) ger initialt ökad korrosionshastighet vilken kan förhindras genom tillförsel av 4% slam (energibas).
- Tillsatsen av slam minskar halten alkali och klor i beläggningarna. Det minskar också den totala mängden beläggningar samt mängden bildade korrosionsprodukter med upp till 60%.
- Bildande av smältor i beläggningarna med alkaliklorider är inte trolig med tanke på den observerande mikrostrukturen.
- Resultaten indikerar klorinducerad korrosion i alla försök vid alla temperaturer på det låglegerade 16Mo3.
- Den initiala korrosionen ökar med ökande metalltemperatur i närvaro av SLF (F2). Massökningarna indikerar samma fenomen i alla försök, men då ganska modest i Ref och F1.
- Minskad mängd beläggning erhålls ju längre bak i konvektionsstråket (=lägre gastemperatur) man kommer. Mer klor och mindre alkali erhålls nedströms konvektion jämfört med före konvektionsdelen.
- Klorider och sulfater av Ca, Na och K dominerar sammansättningen av påslagen.
- Avsaknaden eller den mycket låga halten av Cu, Pb och Zn i korrosionsfronten tyder på att de inte spelar någon större roll avseende högtemperaturkorrosionen.
- En jämförelse av legeringarna indikerar att de rostfria stålen (310 och 304L) initialt korroderar mindre än det låglegerade stålet 16Mo3.
- Askmängden in med bränslet ökade 38% vid tillsats av både slam och SLF (F1) och med 19% vid samförbränning av SLF (F2) jämfört med enbart förbränning av normalt avfall. Detta ger en ökad kostnad för hantering av bottenaska och vändschaktsaska. De analyser som gjorts i detta projekt visar inte på att askorna behöver annat avnämarställe än vad som används idag.
- Den torra rökgasreningsutrustningen hanterade variationerna i emissioner så att alla villkor i tillståndet kunde uppfyllas.

# 7 Rekommendationer och användning

#### 7.1 Rekommendationer

Projektet har tydligt visat att sameldning med rötslam initialt kan minska beläggnings och korrosionsproblemen med klorinnehållande bränslen. Genom att samelda med rötslam kan större andel av "besvärliga" bränslen eldas och ändå inte få mer problem än vid normal förbränning av avfall. Detta innebär för pannägaren att en större variation av bränslen kan användas i pannan och fler avfallsbränslen som idag har svårt att få avsättning kan energiåtervinnas.

För att undvika beläggnings- och korrosionsproblem så bör mindre mängd SLF sameldas med vanligt avfall (kanske 5-10% (energi) inblandning vilket flertalet anläggningar redan har) eller om så hög inblandning som 20% (energi) av SLF används så bör rötslam tillföras som additiv. Utifrån försöket med rötslam och ca 20% SLF i detta projekt kunde inte någon initialt utökad korrosions- eller beläggningsrisk för konvektionsdelen och nedströms denna iakttas annan än vid förbränning av vanligt avfall. Inte heller för överhettare med normal placering kan en högre risk iakttas. Däremot om ca 20% SLF mixas med avfall utan slam så verkar såväl korrosion som beläggningarna initialt öka väsentligt.

#### 7.2 Förslag till fortsatt forskningsarbete

Flera intressanta forskningsarbeten finns att göra inom området för förbränning av "besvärliga" bränslen. Förändringen på marknaden att mer hushållsavfall komposteras och mer industriavfall går till förbränning (deponiförbud för organiskt avfall) gör att bränslemixen till avfallsförbränningsverken kommer att bestå av mer "besvärliga" bränslen. Detta projekt visade på att genom att samförbränna SLF och avloppsslam så kan beläggningsproblematiken förenklas. Testperioden var dock för kort för att ge mer än initiala tendenser. För att säkerställa resultaten bör långtidstest utföras. Projektet har heller inte optimerat andelen av de olika bränslena eller gått in mer på vilken typ av slam som ger effekt. Försöken är endast gjorda i en fluidbädd och resultaten kan till viss del överföras till en rosterpanna men det skulle behövas ett förbränningstest även på en roster för att kunna säkerställa att effekterna gäller även för denna typ av förbränningsutrustning.

Följande punkter skulle vara intressanta att fortsätta undersöka i nya projekt:

- Olika andel slam i bränslemixen
- Olika slamtyper
- Andra temperaturer och material
- Göra längre förbränningsprov för att kvantifiera korrosionshastigheter
- Öka mängden SLF
- Optimera inblandningsmängderna av SLF och rötslam beroende på ång/vattentemperaturer
- Förbränningsförsök både i fluidbädd och på roster
- Laktester på askorna för att säkerställa rätt avsättning
- Studera hur dioxininnehållet i askorna påverkas av SLF respektive SLF/rötslam och olika parametrar
- Kombinera WR's "Sänkt bädd temperatur"-projekt med rötslaminblandning med SLF, alternativt byta ut SLF mot annat svårt bränsle

#### 8 Litteraturreferenser

- Gyllenhammar M., Victorén A, Niemi J., Johansson A.; "Energiåtervinning av brännbar fraktion från fragmentering av metallhaltigt avfall", Waste Refinery ISSN nr 164-4706 WR 08, Borås December 2008
- [2] Gyllenhammar M., Herstad Svärd S., Davidsson K., Åmand L-E, Steenari B-M., Folkeson N., Pettersson J., Svensson J-E, Boss A., Johansson L., Kassman H.; "Ramprogram - Åtgärder för samtidig minimering av alkalirelaterade driftproblem, Etapp 2", Värmeforsk Service AB, Rapport 1037, Stockholm December 2007
- [3] Eskilsson D., Johansson A., Johansson L., Wikström-Blomqvist E.; "Samförbränning av bilfluff, rötslam och avfall i en 20 MW fluidbäddpanna", SP-AR 2007:11, Statens Energimyndighet projektnr 22432-1, Stockholm December 2007
- [4] Åmand, L.-E., Leckner, B., Eskilsson, D., Tullin, C., (2006), "Deposits on heat transfer tubes during co-combustion of sewage sludge", Fuel 85, pp. 1313-1322
- [5] Mark F.E., Fisher M.M., Smith K.A.; "Energy recovery from automotive shredder residue through co-combustion with municipal solid waste", Association of plastics manufacturers in Europe, Brussels September 1998
- [6] Börjesson L., Marklund S., Johansson S.; "Bilen blir bränsle En återvinningsstudie om restprodukter från fragmentering", Stiftelsen REFORSK FoU148 Oktober 1998
- [7] Wikström-Blomqvist E., Franke J., Johansson I.; "Karakterisering av fasta inhomogena avfallsbränslen – inverkan av metoder för provtagning och provberedning", Värmeforsk Service AB, Rapport 1036, Stockholm December 2007
- [8] Davidsson K.O., Åmand L.-E., Steenari B.-M., Elled A.-L., Eskilsson D., Leckner B.; "Countermeasures against alkali-related problems during combustion of biomass in a circulating fluidized bed boiler", Chemical Engineering Science 63 (2008) 5314 – 5329
- [9] Robinson A., Junker H., Baxter L.; "Pilot-Scale Investigation of the Influence of Coal-Biomass Cofiring on Ash Deposition", Energy & Fuels 2002, 16, 343-355
- [10] Davidsson K., Eskilsson D., Gyllenhammar M., Herstad Svärd S., Kassman H., Steenari B-M, Åmand L-E.; "Ramprogram - Åtgärder för samtidig minimering av alkalirelaterade driftproblem", Värmeforsk Service AB, Rapport 997, Stockholm December 2006
- [11] Pettersson J., Svensson J-E., Skog E., Johansson L-G., Folkeson N., Froitzheim J., Karlsson S., Larsson E., Israelsson N., Enestam S., Tuiremo J., Jonasson A., Heikne B., Andersson B-Å., Arnesson B.; "Utvärdering av olika additivs möjligheter att bemästra korrosion och påslag på ångöverhettare i en avfallseldad CFB-panna", KME 411. Skall godkännas 3 februari 2010.
- [12] Adler P., Haglund J-E., Sjöblom R.; "Vägledning för klassificering av förbränningsrester enligt Avfallsförordningen", Värmeforsk Service AB, Rapport 866, Stockholm Maj 2004
- [13] Wikström-Blomqvist E., Samuelsson J., Ohlsson A.; "Optimerad rening av HCl och SO<sub>2</sub> med minskade kalktillsatser vid torr rökgasrening", Värmeforsk Service AB, Rapport 996, Stockholm December 2006
- [14] Gustavsson L., Nyquist G.; "Värmeforsks mäthandbok; utgåva 3", Värmeforsk Service AB, Rapport 937, Stockholm September 2005

[15] Niklasson F., Pettersson A., Claesson F.; "Sänkt bäddtemperatur I FB-pannor för avfallsförbränning –etapp 2", Waste Refinery projekt nr 19, publiceras i mars 2010

### A Beräkning av flödet av normalt avfall+SLF i försök F1

Flödet av normalt avfall+SLF i F1 är obekant. Det kan beräknas om slamflödet är känt, vilket är fallet. Skillnaden mellan pannans bruttoeffekt (totalt ingående bränsleeffekt) och ingående effekten från det tillförda slammet ger ingående effekten från normalt avfall+SLF. Bränsleflödet kan sedan räknas ut med bränslets värmevärde.

$$b_{n+SLF} = \frac{P_{brutto} - P_{slam}}{H_{n+SLF}},$$

där

$$P_{brutto} = P_{tormtsk}/\eta$$

 $\operatorname{och}$ 

 $P_{slam} = b_{slam} H_{slam}$ .

Tabell 10. Beteckningar

Table 10. Designations.

parameter	Beteckning
bränsleflöde	b
värmevärde bränsle	Н
effekt	Р
pannans verkningsgrad	η
index	
normalt avfall+SLF	n+SLF
brutto	brutto
slam	slam

# B Bränsleanalyser och inflödet av grundämnen

#### Tabell 11. Bränsleanalyser

#### Table 11. Fuel analysis

	försök:	Ref	-	-	F1 <sup>a</sup>	F2
	bränsletyp:	avfall	avfall+SLF	slam	mix	avfall+SLF
	datum:	0429-30	0507-08	0507-08	0507-08	0528-29
fukt	%	27,4	26,2	9,5	24,45	29
aska	%ts	21	25,4	43,2	27,63	24,8
brännbart	%ts	51,6	48,4	47,3	48,26	46,2
Värmevärde, H <sub>cal</sub>	MJ/kg ts	18,78	19,09	12,64	18,28	18,4
Värmevärde, H <sub>eff</sub>	MJ/kg ts	17,52	17,85	11,76	17,09	17,2
S, svavel	% ts	0,57	0,28	0,99	0,37	0,26
Cl, klor	% ts	0,42	0,64	0,05	0,57	0,55
F, fluor	% ts	0,01	0,02	0,03	0,02	0,03
C, kol	% ts	44	44,7	30,4	42,91	42,6
H, väte	% ts	5,8	5,8	4,1	5,59	5,6
N, kväve	% ts	0,95	0,9	3	1,16	1,2
O, syre	% ts	27,2	22,4	18,2	21,87	25
på inaskat prov vid 500 °C						
Al, aluminium	% av aska	5,39	4,91	6,52	5,11	4,87
Si, kisel	% av aska	20	21,6	6,03	19,65	21,9
Fe, järn	% av aska	2,76	6,26	21,9	8,22	7,18
Ti, titan	% av aska	1,04	0,87	0,37	0,81	0,63
Mn, mangan	% av aska	0,1	0,14	0,04	0,13	0,12
Mg, magnesium	% av aska	1,49	1,32	0,67	1,24	1,19
Ca, kalcium	% av aska	15	11,4	12,8	11,58	9,03
Ba, barium	% av aska	0,19	0,17	0,08	0,16	0,34
Na, natrium	% av aska	3,07	2,93	0,33	2,60	3,11
K, kalium	% av aska	1,85	1,56	0,53	1,43	1,58
P, fosfor	% av aska	0,52	0,52	7,1	1,35	0,44
As, arsenik	mg/kg aska	47	<20	<20	<20	28
Cd, kadmium	mg/kg aska	19	17	1	15	15
Pb, bly	mg/kg aska	1100	1000	29	878	1400
Cu, koppar	mg/kg aska	2000	21900	1900	19390	16000
Cr, krom	mg/kg aska	270	280	48	251	390
Ni, nickel	mg/kg aska	67	160	19	142	170
Zn, zink	mg/kg aska	3000	7600	1100	6784	10500
Mo, molybden	mg/kg aska	<10	28	<10	<10	32
V, vanadin	mg/kg aska	54	50	70	53	68
Co, kobolt	mg/kg aska	35	41	10	37	36
Sb, antimon	mg/kg aska	1800	150	<20	<20	140
Tl, tallium	mg/kg aska	<20	<20	<20	<20	<20
Sn, tenn	mg/kg aska	45	80	<20	<20	130
Se, selen	mg/kg aska	-	-	-	0	<20

<sup>a</sup> Framräknat från analysen av de ingående bränslena och deras flöden.

#### Tabell 12. Inflödet av grundämnen

#### Table 12. Inflow of elementals

	Ref	-	-	F1	F2
	avfall	avfall+SLF	slam	summa	avfall+SLF
Paramete	kg/h	kg/h	kg/h	kg/h	kg/h
r					
aska	1000	1140	230	1370	1190
S	27	13	5	18	12
CI	20	29	0	29	26
F	0	1	0	1	1
С	2100	2010	160	2170	2040
Н	280	260	20	280	270
Ν	45	40	16	57	57
0	1300	1010	100	1110	1200
AI	53	56	15	71	58
As	0,05	-	-	-	0,03
Ва	1,9	1,9	0,18	2,1	4,0
Ca	150	130	30	160	110
Cd	0,02	0,02	0,00	0,02	0,02
Со	0,04	0,05	0,00	0,05	0,04
Cr	0,27	0,32	0,01	0,33	0,46
Cu	2,0	25	0,44	25,4	19
Fe	28	72	51	120	85
К	19	18	1,2	19	19
Mg	15	15	1,5	16,5	14
Mn	1,00	1,60	0,09	1,7	1,4
Мо	-	0,03	-	-	0,04
Na	31	34	0,76	35	37
Ni	0,07	0,18	0,00	0,19	0,20
Р	5,2	5,9	16	22	5,2
Pb	1,1	1,1	0,01	1,1	1,7
Sb	1,8	0,17	-	0.17	0,17
Si	200	250	14	264	260
Sn	0,05	0,09	-	0,09	0,15
Ti	10	9,9	0,85	11	7,5
TI	-	-	-	-	-
V	0,05	0,06	0,02	0,07	0,08
Zn	3,0	8,7	0,25	8,9	12,5

## C Emissionsmätning vid proveldning i Panna 5

På uppdrag av Lidköpings Värmeverk AB har ÅF-Kontroll AB utfört emissionsmätningar efter panna 5 vid bolagets anläggning i Lidköping.

Mätningarna genomfördes enligt vad som står i kontrollprogrammet men för panna 5 istället för den gemensamma kanalen. Mätningarna utfördes 2009-04-29, 2009-05-07 och 2009-05-28 och resultaten sammanfattas i tabellen nedan som medelhalter under kontrollen.

Panna 5	Enhet	Resultat		
Datum		Test 1, 2009-04-29	Test 2, 2009-05-07	Test 3, 2009-05-28
Tid		11:45-17:45	11:00-17:00	11:00-17:00
Rökgasflöde	m3/h ntg	56 300	54 700	63 500
Rökgastemperatur	°C	134	135	135
02	Vol-%	9,8	10,5	9,6
CO2	Vol-%	9,2	9,1	9,7
CO	$mg/m_3 tg/1$	14	<5	<5
SO2	$mg/m_3 tg/1$	51	8	3
NOx	mg/m3 tg/1,2	136	96	68
Totalkolväte	$mg/m_3 tg/1$	< 1	<1	<1/3
Lustgas	$mg/m_3 tg/1$	12	5,6	6,7
Stoftutsläpp	$mg/m_3 tg/1$	1,1	$\leq 1$	<1
Fukthalt	Vol-%	10,3	10,9	10,4
Metaller: As, Co, Cr,	$\mu g/m_3 tg/1$	77	177	141
Cu, Mn, Ni, Pb, Sb,				
V				
Metaller: Cd, Tl	$\mu g/m_3 ntg/1$	< 0,8	1	1
Hg	$\mu g/m_3 tg/1$	1,1	2,8	5,7
HCl	$mg/m_3 tg/1$	6,4	4,0	7,3
HF	$mg/m_3 tg/1$	< 0,1	<0,1	<0,1
Ammoniak	$mg/m_3 tg/1$	7,2	9,9	6,1
TCDD-ekvivalenter	ng/m3 tg/1	0,012	0,003	0,002

/1 normerad till 11 % O2.

/2 räknat som NO2.

/3 uppmätt kl.17.45-18.30.

# D Asksammansättning

Nedan visas halter på torrsubstans i de olika askproverna.

	Botten-	Vändschakt-	Cyklon-	Filter-	Botten-	Vändschakt-	Cyklon-	Filter-
	Ref e B	Ref e V	Ref e C	Ref e F	F1 e B	F1 e V	F1 e C	F1 e F
vikt-%								
S	0.32	0.83	1.71	3.19	0.39	0.38	0.78	1.87
Cl	0.06	0.84	1.34	11.5	0.08	0.15	0.98	12.8
C tot	0.04	-	-	1.46	0.05	-	-	1.58
Karbonat	< 0.01	-	-	0.73	< 0.01	-	-	0.7
TOC	0.04	-	-	0.74	0.05	-	-	0.88
Al	5.95	7.4	8.19	3.45	5.8	7.48	10.4	4.27
Si	29.4	27.9	19.2	5.26	28.1	23.2	14.7	5.44
Fe	3.32	3.3	3.69	1.08	3.15	8.62	9.97	4.66
Ti	0.5	0.55	0.95	0.77	0.56	0.44	0.91	0.97
Mn	0.07	0.09	0.13	0.06	0.06	0.1	0.16	0.1
Mg	0.95	0.91	1.57	0.99	0.87	0.7	1.4	1.2
Са	7.06	7.68	14.6	28.5	7.64	6.12	11.8	24
Ва	0.16	0.16	0.21	0.12	0.14	0.14	0.31	0.24
Na	3.79	2.6	1.82	1.18	3.68	2.34	1.78	1.21
К	2.4	1.91	1.3	0.45	2.04	1.72	1.19	0.57
Р	0.16	0.27	0.46	0.33	0.25	1.4	1.69	1.14
mg/kg								
As	60	30	<20	60	90	<20	<20	30
Cd	2	5	7	50	2	12	12	63
Со	8	<5	13	40	<5	<5	16	14
Cr	380	340	340	470	430	480	340	300
Cu	3200	5300	3800	5600	12000	16000	11000	16000
Mo	25	30	26	23	26	30	35	35
Ni	60	90	180	70	80	270	220	150
Pb	1200	980	960	3800	1100	930	1200	4100
V	40	50	60	35	40	45	60	35
Zn	2700	3500	5500	5600	3500	4200	9200	13000
Tl	<20	<20	<20	<20	<20	<20 50	<20	<20
Sn	<20	<20	<20	<20	<200	<20	<20	<20
Se	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20
На	<0.02	\$20	~20	5.0	<0.02	\$20	~20	10
ing	N0.02	-	-	5.9	N0.02	-	-	10

	Botten-	Botten-	Vändschakt-	Cyklon- aska	Filter-
	F2 0 B	F2 e B	F2 e V	F2 e C	F2 e F
vikt-%					
S	0.25	0.25	0.34	0.83	1.31
Cl	0.06	0.04	0.29	1.49	14.8
C tot	0.06	0.05	-	-	1.49
Karbonat C	< 0.01	< 0.01	-	-	0.64
TOC	0.06	0.05	-	-	0.85
Al	5.8	6.23	8.75	10.4	5.08
Si	28.2	27.4	23.9	16.4	7.06
Fe	2.43	4.22	9.23	7.41	3.5
Ti	0.52	0.57	0.68	1.04	0.89
Mn	0.06	0.08	0.14	0.26	0.1
Mg	0.94	0.8	1.01	1.56	1.12
Са	7.17	6.6	6.65	11.8	19.9
Ba	0.19	0.18	0.26	0.52	0.31
Na	3.83	3.46	2.22	2.08	1.8
К	1.93	1.79	1.52	1.17	0.72
Р	0.19	0.21	0.46	0.52	0.51
mg/kg					
As	90	60	<20	<20	40
Cd	2	3	7	19	84
Со	35	10	23	29	25
Cr	600	520	500	440	380
Cu	4000	12000	20000	14500	25000
Мо	28	29	44	43	37
Ni	170	150	380	300	170
Pb	1400	1100	700	1100	3900
V	44	43	50	58	33
Zn	2500	5500	7700	11500	14000
TI	<20	<20	<20	<20	<20
Sb	200	250	50	100	300
Sn	<20	<20	<20	<20	<20
Se	<20	<20	<20	<20	<20
Hg	< 0.02	< 0.02	-	-	12

# E Anrikningskvoter

För alla grundämnen utom klor och svavel har anrikningskvoten definierats (massandel av det aktuella ämnet i aktuell aska eller beläggning)/(massandel av inaskat bränsle). För klor och svavel har anrikningskvoten definierats (massandel av det aktuella ämnet i aktuell aska eller beläggning)/((massandel av torrt bränsle)/askhalt i bränslet).

	anrikning	anrikning	anrikning
	Ref	F1	F2
bottenbäddsaska			
alkali	1,26	1,41	1,12
Ca	0,47	0,66	0,73
Fe	1,20	0,39	0,59
Al	1,10	1,14	1,28
р	0,31	0,19	0,48
S	0,12	0,29	0,24
Cl	0,03	0,04	0,02
Cu	1,60	0,62	0,75
beläggn.eldst.			
alkali	-	2,22	1,71
Ca	-	0,78	0,89
Fe	-	0,37	0,70
Al	-	1,96	1,85
Р	-	0,46	1,14
S	-	8,19	6,68
Cl	-	0,97	2,71
Cu	-	1,54	4,38
vändschaktsaska			
alkali	0,92	1,00	0,80
Ca	0,51	0,53	0,74
Fe	1,20	1,06	1,29
Al	1,37	1,47	1,80
Р	0,52	1,06	1,05
S	0,31	0,58	0,32
Cl	0,42	0,47	0,13
Cu	2,65	0,82	1,25
beläggn. vändschakt			
alkali	3,46	3,21	3,20
Ca	0,40	0,43	0,33
Fe	0,72	0,37	0,97
Al	0,37	0,39	0,21
Р	0,00	0,76	0,00
S	5,16	8,19	26,71

Cl	1,50	1,45	3,61
Cu	5,00	4,10	7,50
beläggn. konv.			
alkali	2,44	2,22	2,77
Ca	0,47	0,86	0,66
Fe	3,99	1,10	1,11
Al	0,37	0,78	0,41
Р	0,00	0,76	0,00
S	2,21	14,15	5,72
Cl	5,50	3,87	8,12
Cu	15,00	2,05	3,75
cyklonaska			
alkali	0,63	0,73	0,69
Ca	0,97	1,02	1,31
Fe	1,34	1,22	1,03
Al	1,52	2,04	2,14
Р	0,88	1,28	1,18
S	0,63	0,58	0,79
Cl	0,67	0,47	0,67
Cu	1,90	0,56	0,91
filteraska			
alkali	0,33	0,44	0,54
Ca	1,90	2,07	2,20
Fe	0,39	0,57	0,49
Al	0,64	0,84	1,04
Р	0,63	0,87	1,16
S	1,18	1,39	1,25
Cl	5,75	6,19	6,67
Cu	2.80	0.82	1.56

# F Bilder av ringar från beläggningssonderna

Nedan visas bilder av beläggningssonder från olika försök och positioner. Bilderna har tagits vid en vinkel om 90° där 0° är vindsidan och 180° är läsidan av ringen.



Figur 25. Beläggningsring i Ref exponerad nedströms konvektion.

Figure 25. Deposit ring exposed downstream of convection pass in Ref



Figur 26. Beläggningsring i F1 exponerad i eldstaden. Figure 26. Deposit ring exposed in the furnace in the test F1


Figur 27. Beläggningsring i F1 exponerad nedströms konvektion.

Figure 27. Deposit ring exposed downstream of convection pass in the test F1



Figur 28. Beläggningsring i F2 exponerad i eldstaden..

Figure 28. Deposit ring exposed in the furnace in the test F2



Figur 29. Beläggningsring i F2 exponerad nedströms konvektion.





Figur 30. Beläggningsring med kiselkarbidlager i F1 exponerad i eldstaden.

Figure 30. Deposit ring with silicon carbide layer exposed in the furnace in the test F1



## WASTE REFINERY

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