GJUTERISAND I FLUIDISERADE BÄDDPANNOR

RAPPORT 2015:198





GJUTERISAND I FLUIDISERADE BÄDDPANNOR

Vid förbränning av RT-flis

FREDRIK NIKLASSON LEYLA WICKSTRÖM PETER NAYSTRÖM RIKARD NORLING

ISBN 978-91-7673-198-7 | © 2015 ENERGIFORSK Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Denna rapport är slutrapportering av projekt M 39195 Gjuterisand som bäddmaterial i FB-pannor vid förbränning av RT-flis (Energimyndighetens projektnummer P 39195) som faller under teknikområde material- och kemiteknik inom SEBRA, samverkansprogrammet för bränslebaserad el- och värmeproduktion.

Projektet har följts av en referensgrupp bestående av Daniel Nordgren, Pöyry Sweden och Håkan Kassman, Vattenfall.

SEBRA, samverkansprogrammet för bränslebaserad el- och värmeproduktion, är efterföljaren till Värmeforsks Basprogram och startade som ett samarbetsprogram mellan Värmeforsk och Energimyndigheten 2013. All forskningsverksamhet som bedrevs inom Värmeforsk ingår sedan den 1 januari 2015 i Energiforsk. Därför ges denna rapport ut som en Energiforskrapport.

Programmets övergripande mål är att bidra till långsiktig utveckling av effektiva miljövänliga energisystemlösningar. Syftet är att medverka till framtagning av flexibla bränslebaserade anläggningar som kan anpassas till framtida behov och krav. Programmet är indelat i fyra teknikområden: anläggnings- och förbränningsteknik, processtyrning, material- och kemiteknik samt systemteknik.

Stockholm januari 2016

Helena Sellerholm Områdesansvarig Bränslebaserad el- och värmeproduktion, Energiforsk AB M 39195 Gjuterisand som bäddmaterial i FB-pannor vid förbränning av RT-flis



Sammanfattning

Inom gjuteriverksamhet används sand för att framställa formar och kärnor. Denna s.k. gjuterisand består av sandpartiklar (kvarts och fältspat) som täckts med bentonitlera och malt kol. Gjuterisanden återanvänds vanligtvis flera gånger i processen, men en delmängd går inte att återanvända och lämnar istället gjuteriet som ett avfall. Totalt rör det sig om en mängd av ca 200 kton per år. Att återanvända begagnad gjuterisand som bäddmaterial i FB-pannor skulle medföra en resursbesparing. Det är dock inte uppenbart hur driften av en FB-panna påverkas av att byta ut färsk natursand (som vanligtvis används) mot gjuterisand.

Syftet med detta projekt har varit att experimentellt utreda eventuella konsekvenser för panndriften av att använda gjuterisand i FB-pannor. Inom projektet har flisat returträ av engelskt ursprung eldats i olika sandbäddar i labbskala under det att beläggningsprover samlats in. Efter avslutade förbränningsförsök har beläggningsringar och bäddmaterial analyserats.

Resultaten som erhållits tyder på att gjuterisand kan reducera överhettarkorrosion i viss mån, medan bäddens sintringstemperatur tenderar att sjunka. Efter förbränningstesterna uppvisade alla bäddprover en antydan till agglomerering, men natursanden uppvisade en något lägre andel agglomererade korn än gjuterisanderna. Vid försöken i denna rapport var förhållandet mellan mängden bäddmaterial och bränsle högre än vad som kan förväntas i en storskalig anläggning, vilket betyder att skillnaderna mellan olika bäddmaterial borde bli mindre i storskaliga anläggningar.

Slutsatsen är att de flesta av de provade gjuterisanderna förefaller fungera bra som bäddmaterial, möjligtvis undantaget en furansand som uppvisade både relativt låg sintringstemperatur och ökad beläggningsbildning. Resultaten som erhållits bör dock inte utan eftertanke generaliseras till andra bränslen än det som använts under försöken.



Summary

Foundry sand is used for the production of casting forms and cores. The material consists of sand of quartz and feldspar covered by bentonite clay and ground charcoal. Most of the foundry sand is reused several times in the process, but a fraction of the material cannot be reused, instead it forms a waste stream of about 200 kilotons annually (in Sweden). It would save natural resources if the foundry sand could be utilized as bed material in fluidized bed boilers, where it would replace fresh sand. It is, however, not obvious how the boiler operation will be affected by changing the bed material to foundry sand.

The aim of this project has been to experimentally investigate possible consequences by using foundry sand as a bed material in fluidized bed boilers. In these experiments, a demolition waste wood of British origin has been burnt in fluidized beds of different kinds of foundry sands in a laboratory scale reactor while collecting deposit samples. After the test runs, deposit samples and bottom ashes have been analyzed.

The results indicate that the corrosion rate on superheaters may be marginally reduced by the foundry sand, but the sintering temperature of the fluidized bed is somewhat lowered. After the combustion tests, all bottom ashes exhibited some agglomeration tendencies, but the fresh sand to a lesser degree than the foundry sands. During the test runs in this work, the ratio between bed material and fuel has been higher than would be expected in a full-scale boiler, implying that the differences between bed materials may be smaller in practice than found in these lab-scale tests.

In summary, the results indicate that most of the foundry sands tested could be applicable as bed materials in fluidized bed boilers, with the exception of a furan sand that exhibited a relatively low sintering temperature and increased deposit formation. The results obtained should be considered to be specific for the fuel used in the tests.



Executive Summary

BACKGROUND

Foundry sand is used to make molds and cores in foundries and it consists of particles of quartz and feldspar covered with bentonite clay and ground charcoal (2-4%). The molds give the outer contour while the cores create the cavity of the casting. Clay minerals (usually 3-9% bentonite) act as bonding agent between the sand particles. Alternatively, about 2-3% of a chemical binder (thermosetting resin or water glass) can be used with no addition of ground char coal. In the preparation of the cores, only chemical binders are used. Under the molding process, the bulk of the chemical binders are combusted / pyrolysed.

Most of the foundry sand is re-used several times in the process. In total, Swedish foundries recirculate around 3 million tons of molding sand annually. However, between 5 and 10% of the foundry sand cannot be reused and becomes a waste flow of about 200 thousand tons per year.

The reason that all sand cannot be reused is due to the wear from thermal and mechanical stresses and also because virgin sand often has to be used for the cores. The chemical binders that are used in the cores are not compatible with residues of bentonite. When the casting has solidified and the mold is opened, core sand and mold sand will normally be mixed before it is reused in the production of new molds. In order to keep the volume of sand in the system at a constant level, excessive sand, corresponding to the amount of virgin sand added for cores, has to be removed. As mentioned above, this amounts to about 200 thousand tons per.

It would incur savings of costs and resources if the foundry sand could be used as bed material in fluidized bed boilers (FB-boilers) instead of being deposited. This would reduce the need for fresh sand to the boilers and also reduce the total waste stream correspondingly.

Currently, excess sand from foundries is used either as a filling material for establishments of e.g. industrial areas / shopping centers or used as construction material in landfills. About 70 thousand tons are landfilled annually.

The clay mineral bentonite, which is contained in some foundry sands, is expected to have positive effects in a boiler because its properties are similar to kaolin which has documented favorable characteristics for reducing deposit formation and corrosion on heat transfer surfaces [1-3]. But used foundry sand also contains some metallic residues, some of which may be alkali metals, which can degrade the performance of a boiler. The contents of bentonite and metal residues can vary considerably between different foundry sands. It is therefore not clear how the operation of a FB-boiler will be affected by the replacement of fresh sand to the foundry sand. However, it is clear that such a switch means a saving of resources.

In a previous Värmeforsk-project, sintering tests were performed in laboratory scale using foundry sand as bed material [4]. The results showed that the foundry sand, compare with quartz, reduces bed agglomeration tendencies when burning bark but increases the risk of agglomeration somewhat when burning olive kernels. That study was carried out, however, with only one kind of foundry sand and did not examine whether the foundry sand affected deposit formation and corrosion.

The use of foundry sand as a bed material is restricted to boilers that are rated for waste incineration or co-incineration because the foundry sand is classified as waste and its use in boilers falls within the scope of thermal treatment.



METHOD

The laboratory reactor used for the combustion experiments is illustrated in Figure S 1. The reactor consists of a vertical tube with an inner diameter of 0.10 meters. The bed temperature is controlled automatically with an electric air preheater through which the primary air passes. It is also possible to cool the bottom bed with a manually controlled flow of a mixture of water and air through a steel coil inserted into the bed. The reactor is currently not provided with flue gas recirculation, which otherwise could have been used to control the bed temperature. The fuel is fed in with a manually operated screw feeder at 0.25 meters above the bottom of the reactor.

The reactor's steel jacket is internally lined with ceramic insulation up to the inlet of tertiary air at 0.9 meters from the bottom of the reactor. The reactor is insulated on the outside of the steel jacket along its entire height. At a height of about 1.6 meters, an electric oven maintains a high flue gas temperature up to sampling ports higher up the reactor.



Tahle	S 1	Onerational	narameters	during	tests
rable	эт.	Operational	parameters	uuring	iesis.

Parameter	Värde
Sampling duration	8 h (probes) + start-up
Amount of bed material	800 g
O ₂ in flue gas	5 % (torr gas)
Primary air flow	50 l _n /min
Secondary air flow	22 l _n /min
Tertiary air flow	58 l _n /min
Bed temperature	800°C
Air factor	1.3

In – liters at normal conditions: 1013 kPa, 0°C

Figure S 1. Sketch of fluidized bed laboratory reactor.

The fuel used during the trials consisted of demolition wood supplied from Vattenfall combined heat and power plant in Nyköping. The demolition wood was of British origin. The material was ground and pressed to 6 mm pellets after removal of larger pieces of metal (such as spikes) and stones.

All measurements were carried out under as stationary conditions as possible at the point of operation defined by the parameters in Table S 1.

In the presentations and discussions of the results that follow below, the abbreviations listed in Table S 2 are used for the foundry sands and corresponding test cases.



Förkortning	Förklaring
GS1	Bentonite 1 (bentonite content 2,5%)
GS2	Resol/ester
GS3	Furan sand 1
GS4	Furan sand 2
GS5	Bentonite 2 (bentonite content 7,1 %)
GSRef	Baskarp 35 (Natural sand)

Table S 2 Test cases and bed materials.

DEPOSIT SAMPLING

The deposit probe used for the sampling was heated by the flue gas and was cooled from the inside with a regulator controlled air flow to reach a predetermined material temperature of 550 °C. The probe was exposed in a position of the reactor corresponding to the conditions at superheaters in a large scale boiler. The sample rings used have an outer diameter of 25 mm and the two rings analyzed were made of materials SS304 and 16Mo3.

After two hours of solid fuel feed, the exposure of deposit rings started. Prior to the exposure, the probe was warmed up within a protective sleeve inside the reactor without being exposed to the flow of particles. After 8 hours of exposure, the deposit probe was withdrawn and the fuel supply cut off. Examples of the deposits formed on the probe are shown by the photos in Figure S 2.



Figure S 2. Photos of deposit probe after exposures, for test cases GSref (left) and GS5 (right). Loose dust was mostly deposited on top of the probe (leeward side), but some coarse dust was also attached to the windward side. The photos show that the deposit was darker for the case GSRef compared to GS5.

During the stationary operating period when the deposit rings were exposed, the air supply was kept at a constant flow by two mass flow controllers. The fuel feed rate was adjusted manually with a speed-controlled fuel screw, aiming for an oxygen concentration of 5% in the flue gas. The ash in the fuel caused a gradual accumulation of bed material in the reactor, which was monitored by a differential pressure sensor that measured the pressure drop of the bottom bed. To prevent excessive accumulation of bed material, subsets of bed material were bled off a few times during each trial.



RESULTS

A comparison of the amounts of deposits on the sample rings, after the loose dusts were knocked off, is shown in Figure S 3. Please note that the deposits on the rings of 16Mo3 exhibited scaling, which complicates comparison. In particular, significant amounts fell off the sample rings of 16Mo3 from the test cases of GS3 and GS1. A more accurate comparison between the different test cases is probably given from the rings of SS304, showing that only GS3 had more deposit formation than the reference case. Overall, GS5 was the bed material that gave the least amount of deposits.



Figure S 3. Deposits on the sample rings after exposures. Please note that the rings of 16Mo3 exhibited scaling that affected the results, especially GS3 and GS1.

The elemental compositions of the deposits formed on the rings were determined by a handheld XRF, which provide semi-quantitative results. The method is deemed to be sensitive enough to detect any significant differences between deposits. The analyses of the deposits generally showed a large portion of elements that were too light to be quantified by the instrument. This lumped unspecified portion, denoted "Balance", consists mostly of oxygen bound in oxides and also includes carbon in carbonates and sodium in various compounds. The deposits were analyzed while still attached to the rings, which caused metals in the substrate (Fe, Cr and Ni) to be included in the analysis. It is not possible to quantify how large fractions of the detected concentrations that originated from the deposits or the substrates respectively. Generally, the thinner the deposit layer the higher concentrations of the metals in the substrate will be detected.

The results from the XRF-analyses are illustrated below by two alternative bar diagrams: 1) Concentrations of elements as measured, and 2) As distributions of quantified elements, excluding metals in the substrate. Analyses on the windward side of the deposits on the rings of SS304 are shown in Figure S 4. The results from test case GS3 showed somewhat different composition than the other cases by lower concentration of Fe but higher concentrations of typical ash forming elements such as Ca and Si. This is probably caused by a thicker ash deposit on this sample as compared to the others. In the comparison of Figure S 4, all foundry sands exhibited lower Cl concentrations than the reference case (Ref). GS5 showed the lowest Cl concentration of all test cases. In this work the concentration of chlorine (Cl) is used as the





first indicator of how aggressive the deposit is against the ring material, even though it is an obvious oversimplification of complex corrosion mechanisms.

Figure S 4. XRF-analyses on the windward side of the deposit rings of SS304 (double tests on Ref). Left) Measured concentrations, Right) Distribution of elements listed.

The sintering temperatures of the bottom ashes after the combustion experiments were determined by tests in a vertical cylindrical metal reactor that is enclosed in an oven. A constant gas flow fluidized a sample of bottom ash in the reactor while the oven temperature was increased by a rate of $3.5 \,^{\circ}$ C / minute. The temperature and the pressure were measured by a probe inserted into the bed. The bed pressure falls when the bed agglomerates and the temperature at which the pressure starts to decline is here denoted as the sintering temperature. The accuracy of the method is estimated to be approximately +/- 15 °C.

The results from the sintering tests of the bottom ashes are shown in Table S 3. The highest sintering temperature was found for the reference case. The bottom ash with the lowest sintering temperature was the furan sand GS3, which sintered at approximately 60 °C lower temperature than the reference case.

Test	Temperature [°C]
Ref	923
GS1	912
GS2	901
GS3	863
GS4	884
GS5	890

Table S 3. Temperatures at which onset of sintering are detected for samples of bottom ashes.

DISCUSSION

During the experiments in the present study, approximately 13 kg of fuel was burnt in a bed of 800 g bed material containing a maximum of 7% bentonite. This corresponds to an addition of 0.4% bentonite of the fuel supplied. Based on a typical renewal rate of bed material in a full-scale boiler and assuming foundry sand containing bentonite is used, the estimated addition



of bentonite will be about 0.1% of the fuel. This figure can be compared to published studies of kaolin as additives, which have demonstrated good results both in terms of raising the sintering temperature and reducing corrosion problems in the boiler [1-3]. These studies found that the required addition of kaolin is at least 1% of the fuel, when burning difficult fuels. That is in order of one magnitude higher than the expected addition of bentonite by using foundry sand as bed material. The conclusion of this discussion is that even if bentonite has beneficial properties, the relatively low addition implies that the positive effects can be expected to be limited. This does not mean that they need to be insignificant.

The main driver to replace natural sand to foundry sand in FB-boilers is the cost saving arising from the price difference between natural sand and foundry sand. Initially, some investments at the plants may be required in a supply system for the foundry sand. The need for supplementary equipment is site specific, but in most cases probably not insignificant. This implies that to become an attractive alternative, the cost of the foundry sand has to be significantly lower than the cost of the natural sand. That is conceivable, because foundry sand is classified as a waste and a reception fee has to be paid for its disposal at landfills.

CONCLUSIONS

Most foundry sands work well as bed materials, under the experimental conditions in this study, possibly with the exception of sand GS3, which showed both a relatively low sintering temperature and increased deposit formation. The foundry sand that showed the most promising results was Bentonite 2 (GS5).

Analysis by SEM of deposits on 16Mo3 rings showed no significant differences between samples with respect to the oxide thickness and corrosion at the surface. Significant scaling of the samples hampered the analysis. On the other hand, SEM images of stainless steel SS304 samples showed that the grain boundary attacks were significantly reduced for test case GS5 compared to GSRef.

SEM analyses of the foundry sand samples (before the combustion tests) showed some agglomeration in the samples that contained bentonite, but not in the other samples. In the study of the bottom ashes (after the combustion tests), all samples of bed material showed some degree of agglomeration. No significant difference in agglomeration between samples was observed, even if GSRef showed a slightly lower proportion of agglomerated grains. An accumulation of Na and K was observed in the interfaces of agglomerated grains. The alkali metals may have originated from the fuel or from the sands. Although the foundry sands containing bentonite did not show stronger agglomeration than the other samples after exposure, the agglomeration tendencies detected before exposure should be taken under consideration and proposedly be further studied, because it is not impossible that this tendency could be reinforced by prolonged exposure.

Finely divided sand particles could be discerned in the bed samples after testing. Cracks in the sand grains were observed in all sand samples, both before and increasingly after testing. It was not possible to conclude any differences between the foundry sands and the reference sand regarding these behaviors.

The use of foundry sand may reduce the superheater corrosion to some extent, but the sintering temperature of the bed tends to drop slightly. In the tests in this report, the ratio between bed material and fuel was higher than would be expected in a large-scale plant, implying that the differences between the bed materials should be less in large-scale facilities. The results obtained in this work are found from test with one fuel only (demolition wood of English origin).



In summary, the results indicate that the impact of using foundry sand as a bed material in FB-boilers is limited. In these tests, the entire fluidized bed consisted of foundry sand, but it is also quite possible to use a mixture of natural sand and foundry sand. Naturally, it is a prerequisite that the sand used as bed material, of whatever origin, have to be of a size distribution appropriate for the boiler in which it is used.

REFERENCES

- 1. Berg, M., A. Andersson, C. Andersson, et al. Förbränning av returträflis Etapp 2 av ramprojekt returträflis; Rapport 820; VÄRMEFORSK Service AB: Stockholm, 2003.
- Davidsson, K., D. Eskilsson, M. Gyllenhammar, et al. Åtgärder för samtidig minimering av alkalirelaterade driftproblem; Rapport 997; VÄRMEFORSK Service AB: Stockholm, 2006.
- Engvall, K. Asksintringsproblem i konvektionspaketet tester med additiv i stor skala; Rapport 742; VÄRMEFORSK Service AB: Stockholm, 2001.
- De Geyter, S., M. Eriksson, M. Öhman, et al. Skillnader i bäddagglomereringstendens mellan alternativa bäddmaterial och olika mineraler i natursand; Rapport No. 920; VÄRMEFORSK Service AB: Stockholm, 2005.



Innehåll

Bilaga.2.		Tabellvärden från XRF-analyser 5				51
Bilaga.	.1.	Foton	av beläggningssonde	r		50
6	Refere	enser				49
	5.1	Förslag	till fortsatt arbete			47
5	Slutsat	tser				47
	4.6	Resulta	atdiskussion			45
		4.5.2	SEM/EDS			42
		4.5.1	Ljusoptisk mikroskop	i (LOM)		40
	4.5	Mikros	kopi av beläggningsri	ngar		40
		4.4.2	Beläggningar på 16M	103-ringar		39
	4.4	4.4.1	Beläggningar nå SSS()4-ringar		37
	4.4	XRF-Ar	alvs av beläggningar			33
	43	+.2.3 Påslage	smängder			30
		4.2.2 4.2.2	SEM/EDS-analyser av	v hottensskor		29
		4.2.1 1 2 2	ARF-analyser av bott	enaskor		27
	4.2	Botten	aska	opackor		26
	4.1	Driftda	ta, medelvärden			26
4	Result	at				26
	3.7	IVIIKTOS	kopianalys (SEIVI och	LOINI)		25
	3.6 2.7	Analys	av material med nand			23
	3.5 2.6	Belagg	ningsprovtagning			22
	3.4	Testge	nomförande			22
	3.3	Gjuteri	sander			20
	3.2	Bränsle	2			20
	3.1	Labora	torieuppställning			19
3	Metoc	ler				19
	2.2	Tidigar	e erfarenheter			18
	2.1	Gjuteri	processen			16
2	Bakgrı	und				16
1	Introd	uktion				15
_	Refere	ences				12
	Conclu	ISIONS				11
	Discus	sion				10
	Result	s9				
	Depos	it Sampl	ling			8
	Metho	d				7
	Backgr	ound				6



Bilaga.	3.	Hantering av provringar	54
Bilaga.	4.	Resultat från EDS-analys	55
4.1.	Provrii	ngar	55
4.2.	Sander - Före provning		62
4.3.	Botten	askor - Efter provning	72
Bilaga.	5.	SEM bilder av SS304-ringar	84



1 Introduktion

Överskottssand från gjuterier, i fortsättningen benämnd "gjuterisand", är en restprodukt som hittills hanterats som avfall med begränsade avsättningsmöjligheter. Om denna sand används som bäddmaterial i fluidiserade bäddpannor ("FB-pannor") istället för att deponeras skulle det medföra en resursbesparing i och med att behovet av jungfrulig sand minskar och den totala avfallsströmmen minskar i motsvarande grad.

Den jungfruliga sanden som används i gjuteriindustrin och den som används i FBpannor har samma ursprung. Det är dock inte uppenbart på vilket sätt driften av en FB-panna påverkas av att byta ut jungfrulig natursand mot gjuterisand.

Syftet med detta projekt har varit att experimentellt utreda eventuella konsekvenser för panndriften av att använda gjuterisand i FB-pannor. En förhoppning var att bytet av bäddmaterial skulle minska korrosion och påslag i pannan. Inom projektet förbrändes flisat returträ i olika gjuterisandbäddar i labbskala under det att beläggningsprover samlades in. Efter avslutade förbränningsförsök provades bäddmaterialens sintringstemperaturer, beläggningar analyserades och eventuella spår av korrosion på låglegerade beläggningsringar undersöktes.



2 Bakgrund

2.1 GJUTERIPROCESSEN

Årligen produceras ca 300 kton gjutgods i Sverige. Den största volymen består av järnbaserat gjutgods men även så kallade "icke järnmetaller", som exempelvis aluminium, mässing och andra kopparlegeringar gjuts i betydande omfattning. Gjutgodset framställs antingen i permanenta formar som används flera gånger eller i engångsformar. De senare görs i huvudsak av sand där kvarts/fältspatsand, av samma typ som exempelvis används i FB-pannor, dominerar.

I gjutprocessen används sand både för tillverkning av formar, som bildar gjutgodsets ytterkontur, och till kärnor som ger innerkonturen. Som bindemedel till kärnorna används någon form av härdplast eller vattenglas. Bindemedelstillsatsen är i storleksordningen 2 vikt-%. Dessa bindemedel kan även användas till formar men för serietillverkning av framför allt järngjutgods används istället 3-8 vikt-% bentonitlera + vatten. Bentoniten kompletteras vanligtvis med en tillsats av 2-4 vikt-% stenkolspulver.

I samband med gjutprocessen kommer huvuddelen av plastbindemedlen att förbrännas eller pyrolyseras.

När gjutgodset stelnat och formen delas kommer kärnsanden och formsanden i regel att blandas före det att den recirkuleras och återanvänds till nya formar.

Det mesta av gjuterisanden återanvänds flera gånger i processen. Totalt återcirkulerar Sveriges gjuterier omkring 3 miljoner ton formsand. Mellan 5 och 10 % av gjuterisanden går dock inte att återanvända utan måste avlägsnas ur systemet. Detta motsvarar en mängd av ca 200 kton per år. I Figur 1 visas ett exempel på en gjutform och i Figur 2 visas ett typiskt flödesschema över gjutprocessen.





Form (Underdel) Kärna

Form (Överdel)

Figur 1. Gjutform före ihopläggning. Figure 1. Mould before assembly.



Figur 2. Gjuteriprocessen - flödesschema. Figure 2. Foundry Process - Flowchart.



Anledningen till att sanden inte går att återanvända till 100 % är dels att man får en förslitning av sandkornen på grund av den termiska- och mekaniska påverkan och dels att huvuddelen av den jungfruliga sand som tillförs processen används för framställning av kärnor. De kemiska bindemedlen som används i kärnorna är inte kompatibla med rester av bentonit. När gjutgodset stelnat och formen delas kommer kärnsanden och formsanden i regel att blandas före det att den recirkuleras och återanvänds till nya formar. För att sandsystemet volymsmässigt skall hållas på en konstant nivå måste överskottssand motsvarande den tillförda mängden jungfrulig sand avlägsnas vilket, som ovan nämnts, motsvarar ca 200 kton/år i Sverige.

För närvarande används en stor del av överskottssanden från gjuterierna antingen som utfyllnadsmaterial vid etablering av exempelvis industriområden/köpcentra eller används som konstruktionsmaterial på deponier. Omkring 70 kton deponeras årligen.

Gjuterierna har kostnader inte bara för inköp av sand och bentonit utan även för hanteringen av sanden som restprodukt/avfall. Om gjuterisanden kan användas som bäddmaterial i FB-pannor, helt eller delvis, istället för att deponeras skulle det medföra en kostnads- och resursbesparing i och med att behovet av jungfrulig sand för pannorna minskar.

2.2 TIDIGARE ERFARENHETER

Lermineralet bentonit som finns i en del gjuterisander förväntas ge positiva effekter i en förbränningsanläggning då dess egenskaper liknar kaolin som har dokumenterat goda egenskaper för att minska beläggningsbildning och korrosion på värmeöverförande ytor [1-3]. Men använd gjuterisand innehåller också en del metallrester, varav en del kan vara alkalimetaller, vilket kan försämra dess egenskaper i en förbränningsanläggning. Både bentonitegenskaper och förekomsten av metallrester i använd gjuterisand kan variera mellan olika gjuterisander. Det är därför inte uppenbart på vilket sätt driften av en FB-panna påverkas av att byta ut jungfrulig sand mot gjuterisand. Däremot står det klart att det innebär en resursbesparing om gjuterisand kan användas.

I ett tidigare Värmeforskprojekt har sintringstester i laboratorieskala genomförts med gjuterisand som bäddmaterial [4]. Resultaten visade att gjuterisand, jämför med kvarts, minskar agglomereringstendensen vid förbränning av bark men ökar risken något för olivkärnor. Den studien genomfördes dock bara med en sorts gjuterisand och undersökte inte ifall gjuterisanden påverkar beläggningsbildning och korrosion.

Eftersom gjuterisand är klassad som avfall och dess nyttjande som bäddmaterial faller inom ramen för termisk behandling är användningen i dagsläget begränsad till pannor som är klassade för avfallsförbränning eller samförbränning.



3 Metoder

3.1 LABORATORIEUPPSTÄLLNING

Laboratoriereaktorn som använts under förbränningsförsöken är illustrerad i Figur 3. Den vertikala reaktorn har en innerdiameter av 0,10 meter och i botten vilar en fluidiserad bädd på en luftfördelarplatta. Bäddtemperaturen regleras automatiskt med en elektrisk luftförvärmare genom vilken primärluften passerar. Det finns även möjlighet att kyla bottenbädden med ett manuellt kontrollerat flöde av vatten och luft genom en rörslinga i bädden. För närvarande är reaktorn inte försedd med rökgasåterföring, vilket annars kunde använts för att reglera bäddtemperaturen. Bränslet matas in med en manuellt reglerad skruvmatare vid 0,25 meter över reaktorns botten.

Reaktorns stålmantel är invändigt beklädd med keramiskt isolermaterial från botten upp till tertiärluftens inlopp vid 0,9 meter. Reaktorn är dessutom isolerad på utsidan längs hela dess höjd. Vid en höjd av ca 1,6 meter finns en elektrisk ugn som upprätthåller en hög rökgastemperatur upp till provtagningsuttagen högre upp i reaktorn.

Alla mätningar och provtagningar har utförts under så stationära förhållanden som möjligt enligt driftpunkten definierad av parametrarna i Tabell 1.



Tabell 1. Driftinställningar under försöken.

Table 1. Operational parameters during tests.

Parameter	Värde
Drifttid	8 h (för sonder) + uppstart
Mängd bäddmaterial	800 g
O2 i rökgas	5 % (torr gas)
Primärluftflöde	50 l _n /min
Sekundärluftflöde	22 l _n /min
Tertiärluftflöde	58 l _n /min
Bäddtemperatur	800°C
Luftfaktor	1,3

ln-liter vid normaltillstånd: 1013 kPa, 0°C



3.2 BRÄNSLE

Bränslet under försöken utgjordes av returträ som erhållits från Vattenfalls kraftvärmeanläggning i Nyköping. Returträet var av engelskt ursprung. För att möjliggöra kontinuerlig bränsleinmatning till laboratoriereaktorn var det nödvändigt att bereda bränslet, vilket skedde genom att materialet maldes och pressades till pellets med 6 mm diameter. Större metallbitar (såsom spikar och beslag) samt stenar avlägsnades för hand innan bränslet maldes. Beredningen av bränslet medförde att fukthalten i det pelleterade bränslet blev lägre än i originalbränslet. Den sänkta fukthalten antas inte påverka utfallet av de jämförande tester som utförts i denna studie. En kemisk analys av det pelleterade bränslet ges i Tabell 2.

 Tabell 2. Bränsleanalys av den pelleterade Brittiska RT-flis som använts under försöken.

 Table 2. Fuel analysis of the pelletized British waste wood burnt during the tests.

Elementaranalys		Huvudelement		Spårämnen	
Fukt %, v.b.	7,4	Al %, t.b.	0,28	Cu mg/kg t.b.	44
Aska %, t.b.	8,6	Si %, t.b.	2,31	V mg/kg t.b.	6
Cl %, t.b.	0,26	Fe %, t.b.	0,40	Cr mg/kg t.b.	39
S %, t.b.	0,1	Ti %, t.b.	0,16	Co mg/kg t.b.	4
C %, t.b.	45,9	Mn %, t.b.	0,01	Ni mg/kg t.b.	9
H %, t.b.	5,6	Mg %, t.b.	0,10	Zn mg/kg t.b.	620
N %, t.b.	1,8	Ca %, t.b.	0,72	Pb mg/kg t.b.	370
O %, t.b.	38	Ba %, t.b.	0,03	Cd mg/kg t.b.	1
VV MJ/kg, t.b.	18,5	Na %, t.b.	0,22	Mo mg/kg t.b.	0,8
		K %, t.b.	0,17	As mg/kg t.b.	13
		P %, t.b.	0,02		

v.b.) Vått bränsle, t.b.) Torrt bränsle, VV) Värmevärde

3.3 GJUTERISANDER

I resultatredovisningen som följer har de förkortningar som anges i Tabell 3 använts för gjuterisanderna och dess testfall. Som försöksreferens ingår ett testfall, GSRef, i vilket sanden utgörs av en natursand som ofta används i storskaliga FB-pannor.

Tabell 3. Testfall, bäddmaterial.

Table 3.	Test ca	ises, be	d materi	als
----------	---------	----------	----------	-----

Förkortning	Förklaring
GS1	Bentonitbunden 1 (bentonithalt 2,5%)
GS2	Resol/ester
GS3	Furan sand 1
GS4	Furan sand 2
GS5	Bentonitbunden 2 (bentonithalt 7,1 %)
GSRef	Natursand, Baskarp 35



<u>GS1, Bentonitbunden 1:</u> Den absolut största mängden överskottssand som genereras vid ett enskilt gjuteri, ca 50 000 ton per år. Innhåller en del bentonit. Som kärnbindemedel används epoxiharts som härdats genom katalys med SO₂.

GS2, **Resol/ester:** Hartset som används till bindemedel är vattenlösligt och innehåller KOH och/eller NaOH. Bedömningen är att alkalimängden i sanden torde vara liten i förhållande till vad som kommer från RT-flisen. Bland gjuterisanderna är det denna som man har svårast att hitta avsättning för idag. Det beror på att härdaren innehåller en ester som vid laktester, enligt Naturvårdsverkets mottagningskriterier för avfall till deponier, ger utslag i DOC (disolved organic carbon). Även om estern i sig inte är miljöfarlig kan regelverket sätta stopp för viss användning. Att använda sanden som bäddmaterial skulle lösa detta problem på ett elegant sätt. Innehåller ingen bentonit.

<u>GS3, Furan 1:</u> Furanhartsen (fenol/furfuryl-alkohol) har härdats med en blandning av fosforsyra och paratoluensulfonsyra. Sanden innehåller rester av S och P från härdaren i bindemedlet. Tillsatsen av härdaren är 0,5 % av sandvikten per recirkuleringsvarv i gjutprocessen. Härdaren ger sanden en sur karaktär. Innehåller ingen bentonit.

<u>GS4, Furan 2:</u> Samma som för "Furan 1" med den skillnaden att syran inte innehåller fosfor (endast paratoluensulfonsyra). Innehåller ingen bentonit.

<u>GS5, Bentonitbunden 2:</u> Vanligt förekommande sand vid flera gjuterier spridda över södra tredjedelen av Sverige. Innhåller ca 7 % bentonit och 2-4 % kol. Som bindemedel används polyuretan som härdats genom katalys med amin-gas.

Storleksfördelningar för de sandprover som använts under försöken ges i Figur 4. GS1 och GS4 har lite högre finandel än de övriga, medan GS3 och GSRef har högre grovandel. Om detta påverkar resultaten är oklart.



Figur 4. Storleksfördelningar för de testade bäddmaterialen. Figure 4. Particle size distributions of the bed materials tested.

Grundämnesanalyser för de ovan listade sanderna ges i Tabell 4. Innehållet av Cl är överlag måttligt, dock lite högre för bentonitmaterialen GS1 och GS5 än de övriga. Svavelinnehållet är generellt högre än klorinnehållet och allra högst för Furansanderna GS4 och GS3. Furansanden GS3 innehåller även en hög koncentration av P från härdprocessen med fosforsyra. Det skulle förstås vara fördelaktigt om det gick att



utvinna denna fosfor direkt från gjuterisanden, men det kanske krävs ytterligare lite högre koncentration för att det ska bli ekonomiskt lönsamt.

	GSRef	GS1	GS2	GS3	GS4	GS5
Cl	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,04
S	0,05	0,26	0,06	0,38	0,73	0,20
Р	0,05	0,09	0,10	1,86	0 <i>,</i> 05	0,03
к	1,05	1,26	1,55	0,75	0,92	0,66
Si	28,4	21,6	25,3	22,9	26,7	17,4
AI	0,76	1,48	0,75	0,43	0,54	1,62
Ca	0,21	0,88	0,34	0,27	0,22	0,84
Fe	0,23	1,17	0,45	0,30	0,30	0,83
Ti	0,03	0,15	0,07	0,02	0,04	0,08

Tabell 4. Grundämneskoncentrationer i sanderna (analyserat med XRF), angivet i mass-%. Table 4. Concentrations of elements in the sands measured by the handheld XRF (mass-%).

3.4 TESTGENOMFÖRANDE

Inför varje förbränningsförsök rengjordes reaktorn invändigt med hjälp av tryckluft och dammsugare. Sedan hälldes 800 g bäddmaterial in i reaktorn. Uppvärmning av reaktorn påbörjades genom att tillföra primärluft via luftförvärmaren, samtidigt som ugnen högre upp i reaktorn också värmdes. Efter en stund tändes en gasolflamma som riktades ned mot bädden. Under uppvärmningsfasen vägdes bränslet in till bränslefickan och gasanalysinstrumenten kalibrerades. När bäddtemperaturen nådde 800 °C stängdes gasolbrännaren och fastbränsleinmatningen startades.

Efter två timmars fastbränsleinmatning påbörjades exponering av beläggningsringar. Dessförinnan hade beläggningssonden värmts upp inuti en skyddande hylsa i reaktorn utan att exponeras för partikelflödet. Efter 8 timmars exponering togs beläggningssonden ut och bränsletillförseln stängdes av.

Under den stationära driftperioden, då beläggningsringarna exponerades, hölls lufttillförseln vid konstant flöde med hjälp av två massflödesregulatorer. Bränsletillförseln justerades manuellt med en varvtalsreglerad bränsleskruv för att uppnå en syrekoncentration på ca 5 % i rökgasen. Askan i bränslet medförde att mängden bäddmaterial i reaktorn ökade efter hand, vilket detekterades med en differenstryckgivare över bottenbädden. För att undvika alltför stora nivåändringar tappades delmängder av från bädden några gånger under försökens gång.

Efter varje test, när reaktorn kylts ned, insamlades bottenaskan i plastbehållare. Bränslet som fanns kvar i bränslefickan matades ut och vägdes för att kunna beräkna mängden bränsle som förbränts under försöket.

3.5 BELÄGGNINGSPROVTAGNING

Beläggningssonden som använts under provtagningarna värmdes utvändigt av rökgasflödet samtidigt som den kyldes invändigt med ett regulatorstyrt luftflöde för att nå en förbestämd materialtemperatur på 550 °C. Sonden exponerades i en position i reaktorn där rökgasens temperatur motsvarar den vid överhettare i en storskalig



panna, se Figur 3. Materialtemperaturen mäts av termoelement i en anliggande ring med samma diameter som provringarna. Tidigare tester med termoelement fastlödda på varje individuell provring har visat att temperaturskillnaden mellan provringarna är mindre än 10°C.

Provringarna har en ytterdiameter av 25 mm och de två ringar som analyserats var gjorda av materialen SS304 och 16Mo3. Skissen av sondspetsen i Figur 5 visar att det går att applicera tre ringar parallellt, men endast de två inre ringpositionerna användes i denna testserie.

Hanteringsproceduren för beläggningsringarna finns beskrivet i "Hantering av provringar".



Figur 5. Genomskärning av beläggningssonden. De ljusa partierna är provringarna (i detta projekt användes endast två av tre möjliga). Figure 5. Cross-section of the deposit probe. The light parts are the sample rings (only two of the rings were used in this work).

3.6 ANALYS AV MATERIAL MED HANDHÅLLEN XRF

Handhållna XRF-instrument har funnits på marknaden i nästan 20 år och under den tiden har den tekniska utvecklingen medfört förbättrad mätnoggrannhet särskilt för lättare grundämnen. För närvarande kan grundämnen ned till Mg analyseras med handhållna XRF-instrument. Dock är detektionsgränsen högre och noggrannheten lägre för lätta grundämnen jämfört med tunga. En handhållen XRF fastsatt i ett bordsstativ möjliggör snabba analyser av ett stort antal prover till ett lågt pris jämfört med konventionella analysmetoder. En Thermo Scientific Niton XL3t x-ray fluorescence (XRF) analysator har använts för de XRF-mätningar som presenteras i denna rapport.

För många materialprover, som t.ex. gruvprover, är det nödvändigt att mäta både lätta och tunga grundämnen. I sådana inhomogena prover är det möjligt att ett eller flera grundämnen absorberar fluorescens från andra ämnen. Denna effekt är vanligt förekommande i prover som innehåller många olika grundämnen, men moderna XRF-



instrument kompenserar automatiskt utan att användaren behöver göra några provtypiska kalibreringar.

Det finns dock fortfarande en del mer ovanliga provtyper som kräver specifika kalibreringsmätningar för att instrumentet ska ge korrekta värden. Askor och askbeläggningar faller i den kategorin där resultaten skulle kunna förbättras med kalibrering mot typprover. En studie där en mängd askor analyserades både med en handhållen XRF och med en mer vedertagen metod av uppslutning i syror följt av ICPanalys (Inductive Coupled Plasma) [5] har visat att de flesta ämnen kan bestämmas relativt väl med en handhållen XRF. Ett undantag är svavel som i avfallsaskor överskattas med ca 100 %. Mätsituationen försvåras när XRF:en används för att analysera en tunn beläggning som sitter ovanpå ett metallsubstrat som är fallet för beläggningsringar. Förhållandet försvåras ytterligare något av att den kemiska sammansättningen i beläggningen kan variera längs djupet från ytan ned mot substratet. Mätresultaten blir en sorts medelvärden som viktas mot mätmetodens penetrationsdjup som varierar mellan olika grundämnen. En noggrann kalibrering för denna typ av prover är svår att åstadkomma då den påverkas av en mängd parametrar. I denna studie har ingen sådan kalibrering heller varit nödvändig eftersom uppmätta koncentrationer enbart använts för att studera relativa förändringar mellan olika testfall. Även om analysvärdena från den handhållna XRF:en avviker något från verkliga värden så är de fortfarande huvudsakligen proportionella mot verkliga koncentrationer [6].

Det bör noteras att den handhållna XRF:en inte mäter "lätta" grundämnen som C, N, O och Na. För att kunna mäta så lätta grundämnen med XRF bör provet placeras i vakuum eller i en heliumatmosfär för att undvika störande fluorescens eller absorption från gasmolekyler längs strålgången mellan instrument och mätobjekt.

Askproverna i föreliggande testserie analyserades i en plastkopp försedd med 6 µm plastfolie folie i botten. Provkoppen ställdes sedan på ett bordsstativ, se Figur 6. Beläggningsringarna analyserades hängande på en sprint i en provhållare ovanpå bordsstativet, vilket illustreras till höger i Figur 6.





Figur 6. Vänster) Den handhållna XRF:en är fastsatt under ett blyskärmat bordsstativ och styrs med hjälp av en dator.

Höger) Sketch över mätuppställning vid XRF-analyser av beläggningsringar.

Figure 6. Left) The handheld XRF is attached below a test stand and is controlled by a PC. Right) Sketch of set-up used to analyze rings with attached deposit samples.

3.7 MIKROSKOPIANALYS (SEM OCH LOM)

Svepelektronmikroskop (SEM) avbildar ytor med hjälp av en elektronstråle som sveps över provet och kan ge upp till ca 100 000 gånger förstoring. Den interaktion som sker mellan elektronerna och provytan utnyttjas för SEM-avbildning. Vid bestrålningen med elektroner emitterar provet även högenergetisk röntgenstrålning med unika energinivåer för varje grundämne. Strålningen detekteras med energidispersiv röntgenspektroskopi (EDS) vilket ger möjligheten att bestämma provets elementarsammansättning.

Provanalyserna utfördes i ett svepelektronmikroskop av märket Jeol JSM 7000F Field Emission Gun (FEG) med en accelerationsspänning på 20 kV. En "backscatter"elektrondetektor (BSE) användes vid analyserna för att kunna urskilja atomkontrast utifrån bakåtspridda elektroner. Kemisk analys gjordes med hjälp av en EDS-detektor (X-max) tillverkad av Oxford Instruments. Proverna undersöktes även med optisk mikroskopi (LOM) i ett Leica DM-IRM mikroskop.

Innan analyserna utfördes så göts sandproverna in (kallingjutning), torrslipades till en hög ytjämnhet (P4000SiC-papper) samt guldbelades (~15 nm tjockt lager). Provringarna av kolstål (16Mo3) varmingöts (i tvärsnitt) i ledande epoxi och torrslipades (P2500-P4000). Provringarna av rostfritt stål (SS304) varmingöts (i tvärsnitt) i ledande epoxi och våtpolerades (3µm diamantsuspension) för att möjliggöra undersökning av eventuellt förekommande korngränskorrosion med LOM och SEM.

Kolstålsproverna hade flagnat betydligt. På prov GS1 fanns det knappt någon korrosionsprodukt kvar, så ytterligare analys genomfördes av avflagnat material från samma prov för att få en uppfattning om beläggningens tjocklek. Provförberedning samt undersökning av det avflagnade materialet genomfördes på samma sätt som för övriga stålprov.



4 Resultat

4.1 DRIFTDATA, MEDELVÄRDEN

Under alla försöken användes samma bränsle (Tabell 2) och samma förbränningsförhållanden eftersträvades utgående från driftinställningarna i Tabell 1. Medelvärden av de gaskoncentrationer som under försöken uppmättes i rökgasen ut från reaktorn listas i Tabell 5. Det kan noteras att för testfallet GS5 uppmättes något högre halt av HCl än för övriga driftfall. De uppmätta SO₂-koncentrationerna var genomgående låga. Dock var driftfallet GS1 det första som kördes efter en renovering av reaktorn, vilket av någon anledning medförde att SO₂-koncentrationerna var högre initialt (ca 20 ppm). Koncentrationen sjönk under försökets gång och planade de sista timmarna ut vid ca 5 ppm.

Temperaturer uppmätta i reaktorn anges för de olika driftfallen i Tabell 6. De måttliga skillnader som uppmätts beror antagligen till största delen på hur mycket beläggningar som samlats på givarna.

Test	O₂ %	CO₂ %	H2O %	CO ppm	HCI ppm	NO _x ppm	SO₂ ppm
GS1	5,1	15,4	12,4	6	136	311	5*
GS2	5,0	15,3	12,6	4	140	310	5
GS3	5,1	15,3	12,5	6	142	319	5
GS4	5,1	15,3	12,3	6	149	298	5
GS5	5,1	15,4	12,6	4	171	306	3
GSref	5,0	15,4	12,4	5	157	298	4

Tabell 5. Gaskoncentrationer, medelvärden, utlopp från reaktor. Table 5. Gas concentrations, averages measured at exit from reactor.

*) För GS1 var SO₂-halten högre initialt, men planade de sista timmarna ut vid ca 5 ppm.

Tabell 6. Medelvärden av gastemperaturer uppmätta på olika höjder i reaktorn, angivet i °C.
Table 6. Gas temperatures measured in different zones in the reactor (C).

Test	Bädd	Primär- zon	Sek zon	Tert zon	Vid ÖH
GS1	800	760	960	989	732
GS2	800	764	942	976	724
GS3	800	753	937	983	725
GS4	800	758	943	976	724
GS5	800	763	945	974	728
GSref	800	753	947	982	728

4.2 BOTTENASKA

Efter varje försök insamlades den aska blandat med ursprungligt bäddmaterial som fanns kvar i reaktorn. I följande text benämns denna blandning för bottenaska. Vid testerna var den ursprungliga mängden bäddmaterial 800 gram och under tio timmars förbränning utvecklades ca 61 kWh vilket motsvarar en kvot på 13 kg bäddmaterial per



MWh. Denna kvot är uppemot 5 gånger högre än vad som vanligtvis är fallet i storskaliga FB-anläggningar när natursand används som bäddmaterial. Eftersom sanden innebär en betydande kostnad i både inköp och kvittblivning så strävar man efter att minimera omsättningen av bäddmaterial i kommersiella pannor. Dock är konsekvensen av att omsätta alltför lite sand också kostsam då det kan leda till bäddsintring och eventuellt driftstopp, så antagligen omsätts sanden med en liten säkerhetsmarginal, dvs. lite mer än absolut nödvändigt. I föreliggande försöksserie sattes kvoten inte utifrån sådana aspekter utan begränsades av experimentella förutsättningar (bäddvolym och förbränningstid). Konsekvensen är att bottenaskan från dessa experiment innehåller större andel ursprungligt bäddmaterial och mindre andel aska än vad som antagligen blir fallet i storskaliga anläggningar.

4.2.1 XRF-analyser av bottenaskor

Resultaten från XRF-analyser utförda på bottenaskorna som insamlades efter förbränningsförsöken illustreras av det vänstra diagrammet i Figur 7. Som jämförelse visas motsvarande diagram för gjuterisanderna före förbränningsförsöken (samt bränslet) till höger. Diagrammen visar relativa massfördelningar av de uppmätta grundämnena. Analysresultaten finns även som tabeller i "Tabellvärden från XRFanalyser."

Elementarsammansättningarna skiljer sig betydligt mellan gjuterisanden (till höger i Figur 7) och bäddmaterialet efter förbränningen (till vänster i Figur 7). Skillnaden beror naturligtvis på att bäddmaterialet under förbränningen blandats med beståndsdelar från bränslets aska. Ämnen såsom Ca, Fe, Ti, Cr och S ansamlas i bäddmaterialet. Även en måttlig andel Cl binds in i bädden, men som illustreras av den högra stapeln i det högra diagrammet så innehåller bränslet mer Cl än S. Trots det innehåller bäddmaterialet mer S än Cl, vilket innebär att det mesta av tillförd Cl lämnar bädden medan S binds in i något större omfattning. Överhuvudtaget är det större innehållsmässiga variationer mellan gjutersanderna än mellan bottenaskorna. Det beror antagligen på att bäddmaterialets uppmätta sammansättning domineras av askans egenskaper. Möjligtvis påverkas resultatet något av att analysmetoden (XRF) kan ge en överrepresentation av ytligt liggande ämnen (som i beläggningar på sandkornen).

Vid en jämförelse mellan bottenaskorna kan noteras att endast askan från GS1 innehåller mer Cl än referensfallet. Det är inte entydigt om det är en fördel eller nackdel om bottenbädden innehåller mer Cl. Å ena sidan kan kloret som är kvar i bädden inte angripa överhettarna men å andra sidan kan klorider i bädden bidra till att sänka dess agglomereringstemperatur. Gjuterisanden GS3 innehåller en relativt hög andel P och efter förbränning innehöll bäddmaterialet från GS3 fortfarande en något högre andel P än övriga fall, men skillnaden mot övriga testfall hade minskat betydligt och koncentrationen hade sjunkit. Det betyder att eventuell fosforutvinning från gjuterisanden bör ske innan den används som bäddmaterial.





Figur 7. XRF analys av bottenaskan efter försöken (vänster), jämfört med analys av sanderna (höger). Figure 7. XRF-analyses of bottom ashes after the tests (left), compared to analyses of the foundry sands (right).

Utvalda molkvoter (nyckeltal) mellan olika grundämnen jämförs i Tabell 7, där kvoter för sanderna visas till vänster och bottenaskorna till höger. Mittemellan listas motsvarande molkvoter för bränslet. Vid beräkning av dessa nyckeltal hade det varit önskvärt att även inkludera Na (i samband med K), men eftersom Na inte kunde analyseras har det utelämnats från kvoterna som redovisas. Den första molkvoten i Tabell 7, K/Ca, uppvisar genomgående högre värden för sanderna än för både bränsle och bottenaskorna. Att kvoten är lägre i bottenaskan än i ingående materialflöden betyder att en mindre andel av tillförd K stannar i bädden jämfört med Ca.

Saltkvoten (Cl+2S)/K visar om det finns tillräckligt med S och Cl för att kunna binda all K till salter. I alla sander utom GS3 och GS4 är kvoten under 1, medan kvoten är mellan 2,5 och 3,9 för bottenaskor och bränslet. Det betyder att S och Cl i bottenaskorna huvudsakligen är bundna till andra ämnen än K. Sulfateringskvoten 2S/Cl anger om det finns överskott av S för eventuell sulfatering av alkaliklorider. Denna kvot är hög för gjuterisanderna, låg för bränslet och fortfarande relativt hög i bottenaskan, vilket betyder att S har större benägenhet att stanna i bädden än Cl. Eventuellt binds S till Ca som det finns höga koncentrationer av i bottenbädden.

Det sista nyckeltalet i Tabell 7, (2Ca+3Fe+K)/(2Si+Al+3P+2Ti), är en s.k. alkalinitetskvot. Generellt ökar risken för sintringar och beläggningsbildningar med kvotens värde, men riskbedömningar bör inte baseras enbart på detta nyckeltal eftersom askkemin påverkas av många faktorer [7]. Det kan vara värt att notera att kvoten är betydligt högre i bottenbädden än i både ingående sander och bränsle, dvs. alkaliniteten ökar i bädden. Vid jämförelse med uppmätta koncentrationer (i Figur 7) verkar ökningen av alkalinitet främst bero på att Ca och Fe anrikas i bädden.



	Sand	ler					Brän	Bott	enasko	or			
	GS 1	GS 2	GS 3	GS4	GS 5	Re f	sle	GS 1	GS 2	GS 3	GS 4	GS 5	Re f
K/Ca	1,4	4,6	2,9	4,2	0,8	5,2	0,24	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	6	6	0	7	0	6		1	6	2	5	5	5
(Cl+2S)/K	0,5	0,1	1,2	1,9	0,8	0,1	3,12	2,5	3,1	3,9	3,5	3,4	3,8
	3	0	6	4	0	3		9	7	0	5	6	5
2S/Cl	18,	9,6	73,	123	12,	13,	0,8	4,9	8,5	8,7	8,7	10,	7,2
	3		8	,3	5	8						8	
(2Ca+3Fe+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,34	0,8	0,6	0,8	0,6	0,7	0,7
K)/	9	4	3	3	8	2		4	5	4	7	4	4
(2Si+Al+3P													
+2Ti)													

Tabell 7. Nyckeltal beräknade från analyser av sander, bränsle och bottenaskor.
Table 7. Key numbers calculated from analyses of sands, fuel and bottom ashes.

4.2.2 Sintringstester

Efter förbränningsförsöken genomfördes en försöksserie för att fastställa sintringstemperaturerna för de olika bottenaskorna som blev kvar. Dessa sintringstester utfördes i en vertikal cylindrisk metallreaktor som var innesluten i en ugn. Ett gasflöde bestående av en blandning av kvävgas och 15 % CO₂ fluidiserade ett bäddprov av bottenaska taget från förbränningsförsöken. Temperatur och tryck i bädden uppmättes med en nedstucken sond under tiden som ugnstemperaturen ökades med en hastighet av 3,5 °C/min från ca 750°C. När bädden sintrar sjunker bäddtrycket och den temperatur då bäddtrycket börjar minska kontinuerligt anges vid dessa försök som sintringstemperarur. I exemplet som visas i Figur 8 anger den blå linjen hur bäddens temperatur (avläses på vänster vertikalaxel) ökar med tiden på den horisontella axeln. Den gröna linjen visar differentialtrycket falla, i detta fall, och då är bäddtemperaturen 912 °C, vilket här anges som sintringstemperatur. Metodens noggrannhet bedöms till ca +/- 15 °C.

Resultaten från sintringstester med denna metod påverkas av vald gasflödeshastighet [8]. Till viss del beror det på att ett högre gasflöde rör om mer i bädden men även på att ett högre flöde kan blåsa ut finfraktionen från bädden och de fina askpartiklarna kan ha annan smältpunkt än de grövre. För att undvika förlust av finfraktion under sintringstesterna valdes ett lågt gasflöde som ändå var tillräckligt för att fluidisera bädden (ca 0,15 m/s vid 800 °C) under de försök som redovisas här. De uppmätta sintringstemperaturerna anges i Tabell 8. Gjuterisanderna förefaller ha något lägre sintringstemperaturer än referensfallets Baskarpssand. Den sand som uppvisade lägst sintringstemperatur var GS3, kanske beroende på fosforinnehållet.

Initiala försök gjordes med högre gasflöde genom reaktorn för att mer efterlikna verkliga förhållanden, men det resulterade i att betydande andelar av bottenaskan drogs iväg ut ur reaktorn av gasflödet. I en storskalig panna är det mycket möjligt att finandelen av den aska som vid föreliggande försök fanns i bottenaskan skulle burits iväg som flygaska (till cyklon eller efterföljande filter). Detta skulle i så fall troligtvis höja sintringstemperaturen för återstående bäddmaterial. Slutsatsen är att de sintringstemperaturer som redovisas här troligtvis är lägre än vad som skulle bli fallet i en storskalig FB-panna. Temperaturangivelserna bör således enbart användas som



indikator för inbördes rangordning och som en grov uppskattning på hur mycket det kan skilja mellan de olika bäddmaterialen.



 Tabell 8. Temperaturer då tydligt sintringsförlopp börjar för bottenaskor från de olika testfallen.

 Table 8. Temperatures at which onset of sintering are detected for samples of bottom ashes.

Figur 8. Exempel på resultat från sintringstest (GS1). Figure 8. Example of results from sintering testing (GS1).

4.2.3 SEM/EDS-analyser av bottenaskor

Baserat på resultaten från sintringstesterna ovan valdes bäddmaterialen GS1, GS2, GS5, samt GSRef ut för vidare analys med hjälp av SEM/EDS analyser. Vid urvalet togs även hänsyn till att dessa gjuterisander är vanligt förekommande och att GS2 har begränsade avsättningsmöjligheter.

SEM-bilder på de utvalda gjuterisandsproven före och efter exponering visas nedan i Figur 9 till Figur 16. Kornagglomerering var mer eller mindre obefintlig före provning för sandprover GSRef och GS2 (Figur 9 och Figur 13). Sandprover innehållande bentonit (GS1 och GS5) uppvisade dock högre andel agglomererade korn (Figur 11och Figur 15). Det fanns även en tydlig beläggning på/runt de flesta korn i dessa prover.

Efter provning uppvisade alla sandprover en viss mån av agglomerering (Figur 10, Figur 12, Figur 14 och Figur 16). GSRef uppvisade en något lägre andel agglomererade korn, men i övrigt observerades ingen större skillnad i agglomereringstendens mellan proverna. I Figur 12 har analysresultat från EDS inkluderats vilket visar K- och Nafördelningen i ett område med agglomererade korn i provet från GS1 efter exponering.

Övriga analysresultat från EDS är bifogade i Bilaga 4. Analysresultaten visade att kornen i alla sandprov huvudsakligen innehöll Na, K, Al, Si och O före provning (Figur 41 - Figur 50). Kornbeläggningen i prov GS1 och GS5 före provning bestod av Al, Si och O (Figur 43 - Figur 49), vilka utöver Ca och Na är de huvudsakliga beståndsdelarna i bentonit [9]. Utöver dessa ämnen så bestod beläggningen runt agglomererade korn i GS5 också av Ca och Na (Figur 50), men dessa ämnen var inte associerade med agglomererade korn i GS1 (Figur 45). Ingen kemisk skillnad i kornsammansättning



märktes efter provning, men de flesta korn uppvisade en beläggning huvudsakligen bestående av Ca men också av Na, K och Al (Figur 51 - Figur 62). Beträffande agglomererade korn, så fanns det en ansamling av Na och K i agglomereringspunkterna (Figur 12, Figur 59 - Figur 62).

Förekomsten av Na, K och Ca kan härröra från bränslet i försöken, då alla dessa ämnen finns i askan, men de kan också ha kommit ifrån själva provsanden då både Na och K påvisades i gjuterisanden före provning. Det har dock inte varit möjligt att fastställa en mer markant agglomerering för något av proverna, vilket antyder att inget av sandproverna verkar ha högre affinitet att binda till Na, K eller Ca.

Även om det i det här fallet inte har gått att fastsälla en starkare agglomereringstendens för något av sandproverna efter provning så bör kornagglomereringen i bentonitproverna före provning noteras, då längre tids exponering skulle kunna förstärka denna tendens. Bentonit innehåller Ca och Na [9] vilka verkar öka agglomereringstendensen. Dessa ämnen återfanns även i agglomereringspunkter i bentonitsandproverna före provning. (Kalcium-bentonit verkar generellt ha en hög agglomereringstendens [9].) Agglomerering före provning observerades även i sandprov GS1, men var i detta fall enbart associerat med Al.

En ökande andel finfördelade sandpartiklar kunde skönjas i sandproverna efter exponering i bädden. Det gick inte att fastställa någon skillnad i detta beteende mellan gjuterisanderna och referenssanden. Det kan spekuleras att denna finfördelning bidrar till en sänkning av sintringstemperaturen. Även sprickbildning i sandkornen observerades i sandproverna, i viss mån före exponering och i ökad grad efter. Även avseende detta beteende gick det inte att fastställa någon skillnad mellan gjuterisanderna och referenssanden (Baskarp 35). Enstaka korn såg ut att var hårdare åtgångna än andra, men p.g.a. begränsade resurser gjordes inga ytterligare jämförelser mellan proven med avseende på denna observation.



Figur 9. SEM-bilder på referenssand före provning vid låg (vänster) och vid hög (höger) förstoring (GSRef). Figure 9. SEM images of reference sand prior to testing at low (left) and high (right) magnification (GSRef).





Figur 10. SEM-bilder på bäddmaterial (GSRef) efter test vid låg (vänster) och vid hög (höger) förstoring. Pil visar agglomererade korn.

Figure 10. SEM images of GSRef after testing at low (left) and high (right) magnification. Agglomerated grains are indicated by arrow.



Figur 11. SEM-bilder på gjuterisand med 2,5% bentonit (GS1) före provning. Inringat område (till vänster) visas även i högre förstoring (till höger). Pilar visar agglomererade korn.

Figure 11. SEM image of sand GS1 prior to testing. Circled region (left) is also shown at higher magnification (right). Agglomerated grains are indicated by arrows.





Figur 12. SEM-bilder (övre) på gjuterisand GS1 efter provning vid låg (vänster) och vid hög (höger) förstoring. Pilar visar agglomererade korn. Resultat från EDS analys (nedan) visar K- och Na-fördelningen i övre bilden till höger.

Figure 12. SEM images (top) of sand GS1 after test at low (left) and high (right) magnification. Agglomerated grains are indicated by arrows. EDS analysis showing the K and Na distribution in the top right image are shown below.



Figur 13. SEM-bilder på gjuterisand GS2 före provning vid låg (vänster) och vid hög (höger) förstoring. Figure 13. SEM images of foundry sand GS2 prior to testing at low (left) and high (right) magnification.





Figur 14. SEM-bilder på gjuterisand med resol/ester (GS2) efter provning vid låg (vänster) och vid hög (höger) förstoring. Pilar visar agglomererade korn.

Figure 14. SEM images of foundry sand GS2 after testing at low (left) and high (right) magnification. Agglomerated grains are indicated by arrows.




Figur 15. SEM-bilder på gjuterisand med ny bentonit (7,1%) (GS5) före provning vid låg (vänster) och vid hög (höger) förstoring. Pilar visar agglomererade korn.

Figure 15. SEM images of foundry sand GS5 prior to testing at low (left) and high (right) magnification. Agglomerated grains are indicated by arrows.



Figur 16. SEM-bilder på gjuterisand med ny bentonit (7,1%) (GS5) efter provning vid låg (vänster) och vid hög (höger) förstoring. Pilar visar agglomererade korn.

Figure 16. SEM images of foundry sand GS5 after testing at low (left) and high (right) magnification. Agglomerated grains are indicated by arrows.

4.3 PÅSLAGSMÄNGDER

Efter exponering av beläggningsproverna togs foton av sonden, vilket exemplifieras i Figur 17 för testfallen GSref och GS5. Foton från övriga testfall återfinns i Bilaga 1. Som framgår av Figur 17 ansamlades betydande mängder av förhållandevis stora partiklar på ringarnas läsida (uppåt i figuren) samt en del på ringarnas vindsida (nedåt i figuren). Detta relativt löst sittande stoft skulle i en storskalig panna avlägsnas med



hjälp av sotblåsning och utgör i praktiken inget påtagligt driftproblem. Vid demontering av provringarna faller det löst sittande stoftet av i varierande (slumpmässig) omfattning vilket leder till mätosäkerheter vad gäller uppmätt beläggningstillväxt. För att minska denna osäkerhet knackades ringarna med en systematisk metod beskriven i Bilaga 3. Trots den systematiska knackningen varierade mängden kvarsittande grovkornigt stoft något, vilket påverkar mätresultat för både beläggningstillväxt och grundämneskoncentrationer. För ringarna av 16Mo3 uppkom ytterligare en mätosäkerhet i och med att beläggningarna tenderade att flaga. Flagorna lossade från ringmaterialet i korrosionsfronten. Särskilt noterades att betydande mängder flagat på 16Mo3 ringarna från driftfallen GS3 samt GS1. Antagligen erhålls en mer rättvisande jämförelse mellan de olika driftfallen från ringarna av SS304 (som inte flagade i samma omfattning). En jämförelse mellan de påslagsmängder som återfanns på ringarna, efter det att löst stoft knackats bort, visas i Figur 18. Från ringarna i SS304 kan utläsas att endast GS3 gav kraftigare beläggningsbildning än referensfallet. Sammantaget förefaller GS5 vara det bäddmaterial som ger minst beläggningar. Fotona av beläggningsproverna i Figur 17 visar även att beläggningen på 16Mo3 ringen från testfall GS5 hade något ljusare färg än referensfallet.



Figur 17. Foton av beläggningssonden efter exponering, testfall GSRef (vänster) och GS5 (höger). Löst stoft ansamlades företrädelsevis ovanpå sonden (läsida), men en del fäste även på vindsidan. Bilderna visar att beläggningen på 16Mo3-ringen hade mörkare färg i GSref jämfört med GS5.

Figure 17. Photos of deposit probe after exposures, for test cases GSref (left) and GS5 (right). Loose dust was mostly deposited on top of the probe (leeward side), but some coarse dust was also attached to the windward side. The photos show that the deposit was darker for the case GSRef compared to GS5.





Figur 18. Uppmätta påslagsmängder. Observera att 16Mo3 tenderade att flaga, vilket påverkar en del resultat, särskilt GS3 samt GS1.

4.4 XRF-ANALYS AV BELÄGGNINGAR

Ringarnas beläggningar analyserades med den metod som beskrivs i avsnitt 3.6. Resultaten är enbart halvkvantitativa, vilket innebär att man inte kan lita förutsättningslöst på uppmätta koncentrationer. Däremot bedöms metoden som tillräckligt känslig för att detektera om betydande skillnader uppkommit mellan olika beläggningar. Vid resultatjämförelsen bör även beaktas att grovkorning flygaska kan finnas kvar i varierande omfattning samt att beläggningen i vissa fall kan ha flagat eller bitvis fallit av.

XRF-analyserna av beläggningsringarna visar genomgående en relativt hög andel "Balance" som utgörs av grundämnen som inte kan specificeras av instrumentet. Denna ospecificerade andel består troligtvis till största delen av O bundet i oxider och även av C i karbonater och Na i olika föreningar. Dessutom ger analyserna betydande koncentrationer av metaller från ringmaterialen såsom Fe, Cr och Ni på grund av "genomlysning" av beläggningen". Dessa metaller kan även återfinnas i själva beläggningen, men det är utifrån analysresultaten omöjligt att avgöra hur mycket som härstammar från respektive källa.

Resultaten från XRF-analyserna illustreras i den följande resultatredovisningen (se t.ex. Figur 19) med två alternativa stapeldiagram: 1) Grundämneskoncentrationer som de mättes upp, och 2) Som fördelning av uppmätta grundämnen exkluderat "Balance", Fe, Cr och Ni. De två alternativen har sina för- och nackdelar. Fördelen med att visa uppmätta koncentrationer är att sådana diagram ger en fingervisning om beläggningarnas relativa tjocklek genom att uppmätta koncentrationer av legeringsämnen från ringmaterialet ökar om beläggningens tjocklek minskar. Analysresultaten finns även redovisade som tabeller i "Tabellvärden från XRFanalyser".



Figure 18. Mass gained on deposit rings. Please note that the rings of 16Mo3 exhibited scaling that affected the results, especially GS3 and GS1.

4.4.1 Beläggningar på SS304-ringar

Analyser av beläggningarna på SS304-ringarnas vindsidor visas i Figur 19. Till vänster visas uppmätta koncentrationer och till höger är resultaten omräknade till massfördelningar av listade grundämnen. De delar av staplarna som i vänstra diagrammet är markerade i vitt är ospecificerade (lätta) grundämnen som syre, kol och natrium. Analysresultatet för GS3 skiljer sig något från de övriga genom lägre koncentration av Fe men högre koncentrationer av askbildare som Ca och Si. Orsaken är troligtvis att beläggningen på vindsidan av ringen var tjockare för GS3 än för de övriga fallen.

Noterbart från Figur 19 är att GS5 uppvisade lägst Cl-koncentration. I detta arbete används klorkoncentrationen (Cl) som en enkel indikator på hur aggressiv beläggningen är mot ringmaterialet, men det är givetvis en förenkling av komplicerade korrosionsmekanismer. I Figur 19 uppvisade alla gjuterisander lägre Clkoncentrationer än referensfallet med ren Baskarpssand (Ref).





Analyser av beläggningarna på SS304-ringarnas läsidor visas i Figur 20 (av samma ringar som i Figur 19). På läsidorna visade analyserna mindre skillnader mellan driftfallen än de gjorde på vindsidorna. Största skillnaden mellan fällen förefaller vara i mängd detekterad Fe (i vänstra diagrammet), vilket påverkas mest av beläggningens tjocklek. Noterbart är att avsevärt högre koncentration av Fe genomgående detekteras på läsidorna jämfört med vindsidorna i Figur 19, vilket tyder på betydligt tunnare beläggningar på läsidona. Fallet GS5 hade tunnast beläggning på läsidan av alla testfallen, medan Ref och GS1 hade tjockast. Samtidigt var andelen Cl högst för just GS5, men generellt var klorkoncentrationerna lägre än på vindsidan och utan några signifikanta skillnader mellan driftfallen.





Figur 20. XRF-analyser av beläggningarna på SS304-ringarnas läsidor. Vänster) Uppmätta koncentrationer, Höger) Fördelning av listade ämnen.

Figure 20. XRF-analyses of the leeward side of the deposit rings of SS304. Left) Measured concentrations, Right) Distribution of elements listed.

4.4.2 Beläggningar på 16Mo3-ringar

Beläggningarna på 16Mo3-ringarna var efter exponeringarna mer eller mindre flagade. Det medför att viss försiktighet bör iakttas vid jämförelse mellan fallen eftersom delar av beläggningen kan fallit av från analyserade ytor på några av ringarna. Analysresultaten för beläggningarna på 16Mo3-ringarnas vindsidor visas i Figur 21. För fallet GS4 är analysen utförd på yttersidan av en stor flaga som lossnat från vindsidan medan de övriga analyserna utfördes på beläggningar som de satt på ringarna. Den i särklass högsta Cl-koncentrationen återfanns i beläggningen från referensfallet. Av gjuterisanderna hade furansanderna GS3 och GS4 något högre Clkoncentration än de övriga.





Figure 21. XRF analyses on the windward side of 16Mo3 rings. Left) Measured concentrations, Right) Distribution of elements listed.



Analyserna av beläggningarna på 16Mo3-ringarnas läsidor visas i Figur 22. Här var beläggningarna avsevärt tunnare än på vindsidorna (vilket kan utläsas från att detekterad Fe-koncentrationer var högre). Cl-koncentrationerna var på läsidorna låga för GS2 och GS4 medan en hög koncentration uppmättes för GS1.



Figur 22. XRF-analyser av beläggningarna på 16Mo3-ringarnas läsidor. Vänster) Uppmätta koncentrationer, Höger) Fördelning av listade ämnen.

Figure 22. XRF analyses on the leeward side of deposit rings of 16Mo3. Left) Measured concentrations, Right) Distribution of elements listed.

4.5 MIKROSKOPI AV BELÄGGNINGSRINGAR

4.5.1 Ljusoptisk mikroskopi (LOM)

Ljusoptiska bilder av stålproven (16Mo3) kan ses i Figur 23-Figur 26. Vid analysen var proven placerade så att läsidan pekade uppåt, så som de var placerade i provriggen. En ytbeläggning med varierande tjocklek fanns på alla prov förutom på GS1, från vilket en betydande mängd material hade flagnat av. Flagning hade dock skett på alla stålprov, vilket även kunde förklara den delvisa avsaknaden av ytskikt på övriga prover. Ett korroderat område som uppvisade gropbildning samt inre angrepp fanns under det sammanhängande ytskiktet på proven. Detta område var ungefär lika djupt på alla prover (70-100 μ m¹). Denna typ av angrepp observerades sporadiskt även där det inte fanns något ytskikt.



¹ Uppskattad från tvärsnittsanalys



Figur 23. Ljusoptisk bild på stålprov (16Mo3) efter exponering med referenssand (Baskarp 35) (GSRef). Bilderna visar områden 90° från vindsidan (till vänster) och läsida (till höger). Skalorna i nedre högra hörnen visar 500 μm.

Figure 23. Micropraphs of 16Mo3 steel after exposure using reference sand (GSRef). Image positions of the specimen are perpendicular to gas flow (left) and leeward side (right). Scale bars in lower right corners are 500 μ m.



Figur 24. Ljusoptisk bild på stålprov (16Mo3) efter exponering med gjuterisand med 2,5 % bentonit (GS1). Bilderna visar områden på läsidan (till vänster) och vindsidan (till höger). Det finns ingen synbar ytbeläggning på proven. Skalorna i nedre högra hörnen visar 500 μm.

Figure 24. Micropraphs of 16Mo3 steel after exposure case GS1. Image positions are at leeward side (left) and windward side (right). No visible deposit on the specimen surface. Scale bars in lower right corners are 500 μ m.



Figur 25. Ljusoptisk bild på stålprov (16Mo3) efter exponering med gjuterisand med resol/ester (GS2). Bilderna visar områden 90° från vindsidan (till vänster) och läsida (till höger). Skalorna i nedre högra hörnen visar 500 μm.

Figure 25. Micropraphs of 16Mo3 steel after exposure testing case GS2. Image positions are perpendicular to gas flow (left) and leeward side (right). Scale bars in lower right corners are 500 µm.





Figur 26. Ljusoptisk bild på stålprov (16Mo3) efter exponering med gjuterisand med ny bentonit (7,1%) (GS5). Bilderna visar områden 90° från vindsidan (till vänster) och vindsida (till höger). Skalorna i nedre högra hörnen visar 500 μm

Figure 26. Micropraphs of 16Mo3 steel after exposure testing case GS5. Image positions are perpendicular to gas flow (left) and windward side (right). Scale bars in lower right corners are 500 μm.

4.5.2 SEM/EDS

SEM-bilder på 16Mo3-proven visas i Figur 27-Figur 30 och en bild på avflagnat material från GS1 visas i Figur 31. Djupast oxid/ytskikt, ca 500 μ m, uppmättes för prov GSref medan motsvarande värden för övriga prover var ca 350 μ m (GS2) och 200 μ m (GS5). I Figur 28 har även analysresultat från EDS inkluderats som visar Cl- och Fefördelningen i ett område på prov GS1. Det framgår där tydligt hur Cl förekommer under Fe-oxiden som fyller en korrosionsgrop. SEM-analysen påvisade kvarvarande ytbeläggning på GS1 (Figur 28) och det avflagnade materialet från GS1 hade en maximal uppmätt tjocklek på 650 μ m (Figur 31).

Övriga analysresultat från EDS är bifogade i Bilaga 4. Dessa visar att ytskiktet huvudsakligen bestod av järnoxid samt även Mo och/eller S (Figur 34 - Figur 40). (På grund av överlappande toppar i EDS-spektrat är det svårt att särskilja ämnena Mo och S.) Ca påvisades i mitten av ytoxiden på GSRef-provet (Figur 34) och Cl hittades i proverna GS1, GS2 och GS5 (Figur 35 - Figur 40). Ett saltlager bestående av Cl, Na, K, Ca och Mo/S kunde urskiljas ovanför ytoxiden på prov GSRef (Figur 34). En liknande beläggning, men bestående av färre ämnen, fanns även på prov GS2 (Figur 37).





Figur 27. SEM-bilder på stålprov (16Mo3) efter exponering med referenssand (Baskarp 35) (GSRef) som visar områden med (till vänster) och utan (till höger) tjock oxid/ytbeläggning. Bilderna visar områden -120° från vindsidan (till vänster) och läsida (till höger).

Figure 27. SEM images of 16Mo3 steel after exposure testing in case GSRef, showing regions with (left) and without (right) thick surface oxide. Image positions are at -120° from windward side (left) and leeward side (right).



Figur 28 SEM-bilder (övre) på stålprov (16Mo3) efter exponering med gjuterisand med 2,5% bentonit (GS1). Bilderna visar läsida (till vänster) och ett område -90° från vindsidan (till höger). Resultat från EDS analys (nedan) visar Cl- och Fe-fördelningen i det markerade området i övre vänstra bilden.

Figure 28. SEM images (top) of 16Mo3 steel after exposure testing case GS1. Image positions are at leeward side (left) and perpendicular to gas flow (right). Maps from EDS analysis showing the Cl and Fe distribution in squared area in top left image are shown below.





Figur 29. SEM-bilder på stålprov (16Mo3) efter exponering med gjuterisand med resol/ester (GS2), som visar områden med (till vänster) och utan (till höger) tjock oxid/ytbeläggning. Bilderna visar områden -90° (till vänster) och 90° (till höger) från vindsidan.

Figure 29. SEM images of 16Mo3 steel after exposure testing in case GS2, showing regions with (left) and without (right) thick surface oxide. Image positions are at -90° (left) and at 90° (right) with respect to the windward side of the specimen.



Figur 30. SEM-bilder på stålprov (16Mo3) efter exponering med gjuterisand med ny bentonit (7,5%) (GS5), som visar områden med (till vänster) och utan (till höger) tjock oxid/ytbeläggning. Bilderna visar områden -120° från vindsidan (till vänster) och vindsida (till höger).

Figure 30. SEM images of 16Mo3 steel after exposure testing case GS5, showing regions with (left) and without (right) thick surface oxide. Image positions are at -120° from windward side (left) and leeward side (right).



Figur 31. SEM-bild på avflagnat material från stålprov av 16Mo3 efter exponering med gjuterisand med bentonit (2,5%) (GS1). Lägre förstoring (35x) användes för denna bild.



Figure 31. SEM image of flaked material from 16Mo3 steel after exposure at case GS1. Note that this image was captured at a lower magnification (35x).

Provringarna av rostfritt stål (SS304) uppvisade visuellt inga tydliga korrosionsangrepp. Detta utesluter inte att de drabbats av korngränskorrosion och en särskild undersökning med avseende på detta gjordes därför först med LOM och sedan SEM. För att få tydliga resultat med avseende på detta krävdes att proverna polerades med diamantsuspension och undersöktes med SEM. Illustrerande exempel på bilder ifrån SEM-analyserna ges i Bilaga 5. Baserat på en översiktlig undersökning med LOM och ett antal detaljförstoringar runt om provringarna med SEM, kunde det påvisas att samtliga undersökta provringar drabbats av korngränskorrosion men i mycket olika omfattning. Utgående ifrån både skillnad i omfattning och inträngningsdjup kunde angreppen rangordnas så att kraftigast angrepp erhölls för GSRef och sedan i avtagande ordning GS2, GS1 och GS5. För den sistnämnda var det mycket svårt att observera något angrepp med LOM och med SEM krävdes en högre förstoring än för övriga, för att tydligt kunna identifiera ett angrepp.

4.6 RESULTATDISKUSSION

Under de experiment som utförts i föreliggande studie förbrändes ungefär 13 kg bränsle i 800 g bäddmaterial som maximalt bestod av ca 7 % bentonit. Det motsvarar en bentonittillsats på 0,4 % av tillfört bränsle. I en verklig panna ger omsättningen av bäddmaterial en lägre kvot mellan tillförda mängder av sand och bränsle än vad som var fallet under dessa försök. Under normal omsättning av bäddmaterial i en storskalig panna blir uppskattningsvis bentonittillsatsen ca 0,1 % av tillfört bränsle om en bentonitbaserad gjuterisand används. Detta kan jämföras med studier där kaolin använts som additiv, vilket visat ge goda resultat både vad gäller att höja sintringstemperatur och minska eventuell korrosionsproblematik i panna. Kaolintillsatsen som krävs för att uppnå markant förbättring med besvärliga bränslen är minst någon enstaka procent av bränslet [1, 2, 10]. Det är i storleksordning en tiopotens högre än den bentonittillsats som förväntas från bentonitbaserad gjuteterisand som bäddmaterial. Teoretiskt skulle det vara möjligt att höja bäddomsättningen av gjuterisand för att öka bentonittillsatsen, men antagligen skulle förtjänsten inte uppväga kostnaderna för ökat materialflöde. Slutsatsen från detta resonemang är att även om bentonit, likt kaolin, har positiva egenskaper så medför den relativt låga tillsatsen att de positiva effekterna kan förväntas bli begränsade. Därmed inte sagt att de behöver vara obetydliga.

Den huvudsakliga drivkraften för att byta ut natursand mot gjuterisand i FB-pannor är den kostnadsbesparing som uppkommer från prisskillnaden mellan natursand och gjuterisand. Vid förbränningsanläggningen kan det dock initialt krävas vissa investeringar i ett inmatningssystem av gjuterisand som komplement till natursand. Vid vissa anläggningar kanske det finns någon outnyttjad kalksilo eller dylikt som kan användas för detta ändamål. Behovet av kompletterande matningsutrustning är anläggningsspecifikt men i de flesta fall antagligen inte obetydligt. Detta betyder att det krävs en ansenlig prisskillnad mellan gjuterisand och natursand för att gjuterisand ska komma till användning i FB-pannor. Det är alltså nödvändigt att finna en affärsuppgörelse mellan gjuterier och pannägare som kan gagna båda parter. Förutsättningar finns eftersom begagnad gjuterisand är klassad som avfall och därmed belagd med en mottagningsavgift vid kvittblivning, om inte andra alternativa användningsmöjligheter kan hittas.



GJUTERISAND I FLUIDISERADE BÄDDPANNOR



5 Slutsatser

De flesta gjuterisanderna förefaller fungera bra som bäddmaterial, möjligtvis undantaget en furansand (GS3) som uppvisade både relativt låg sintringstemperatur och ökad beläggningsbildning. Den gjuterisand som visade bäst resultat med avseende på beläggningsbildning och beläggningsegenskaper var Bentonitbunden 2 (GS5).

Analys av beläggningsringar (16Mo3) både ljusoptiskt samt med SEM påvisade ingen större skillnad mellan proverna med avseende på oxidtjocklek samt korrosionsangrepp vid ytan. Betydande flagning av proverna försvårade analysen, då man inte med säkerhet kunde fastsälla oxidationsdjupet (via ytoxidens tjocklek).

SEM-analys av sandprover före provning påvisade viss kornagglomerering i proverna med bentonit, men inte i övriga prover. Efter provning uppvisade alla sandprover en viss mån av agglomerering. Det observerades ingen större skillnad i agglomereringstendens mellan proverna, även om GSRef innehöll en något lägre andel agglomererade korn. I agglomereringspunkterna påträffades ansamlingar av Na och K, vilka antingen kan ha härrört från bränslet i försöken eller ifrån själva provsanden. Även om bentonitsandproverna inte uppvisade starkare agglomereringstendens än övriga prover efter exponering, så bör kornagglomereringen innan exponering beaktas och gärna studeras ytterligare, då det inte kan uteslutas att denna tendens skulle kunna förstärkas av längre tids exponering.

Finfördelade sandpartiklar kunde skönjas i bottenskorna efter provning. Även sprickbildning i sandkornen observerades i alla sandprover, både innan och i ökad grad efter provning. Det gick inte att fastställa några skillnader mellan gjuterisanderna och referenssanden (Baskarp 35) avseende dessa beteenden. Dock gjordes inga detaljerade jämförelser mellan proven med avseende på denna observation.

Resultaten från de utförda testerna tyder på att gjuterisand kan reducera överhettarkorrosion för kolstål i viss mån och vid innehåll av 7,5% bentonit avsevärt minska angrepp av korngränskorngränskorrosion på rostfritt stål. Bäddens sintringstemperatur tenderar dock att sjunka något. Vid testerna i denna rapport var förhållandet mellan bäddmaterial och bränsle högre än vad som kan förväntas i en storskalig anläggning, vilket betyder att skillnaderna mellan bäddmaterialen borde bli mindre i storskaliga anläggningar. Resultaten som redovisas har erhållits för ett karaktäristiskt bränsle (returträ av engelskt ursprung).

Sammanfattningsvis tyder resultaten på att konsekvenserna för en FB-panna är måttliga vid inblandning av gjuterisand som bäddmaterial. Vid dessa försök har hela fluidbädden utgjorts av gjuterisand, men det är även fullt möjligt att i praktiken använda en blandning av natursand och gjuterisand. Givetvis är det en förutsättning att bäddmaterialet, oavsett ursprung, behöver hålla en storleksfördelning som är lämplig för den anläggning där den används.

Att gjuterisanden är klassad som avfall begränsar användningen till pannor som är klassade för avfallsförbränning eller samförbränning.

5.1 FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE

Nästa steg kan vara att pannägare tar beslut om att byta ut sitt väl beprövade bäddmaterial till gjuterisand. Som underlag inför sådana beslut föreslås ett



demonstrationsprojekt där drift med gjuterisand demonstreras i en storsskalig anläggning under det att driften dokumenteras och utvärderas. En sådan demonstration skulle kunna påvisa eventuella konsekvenser som inte visar sig i korttidstester i labbskala. Exempelvis kan fullskaliga försök belysa långtidseffekter och visa ifall gjutersanden ställer speciella krav på exempelvis matningsutrustning. Av intresse vore även att studera hur korngränskorrosion kan minimeras på överhettare av rostfritt stål vid användande av bentonitinnehållande gjuterisand.



6 Referenser

- 1. Berg, M., A. Andersson, C. Andersson, et al. *Förbränning av returträflis Etapp 2 av ramprojekt returträflis*; Rapport 820; VÄRMEFORSK Service AB: Stockholm, 2003.
- Davidsson, K., D. Eskilsson, M. Gyllenhammar, et al. Åtgärder för samtidig minimering av alkalirelaterade driftproblem; Rapport 997; VÄRMEFORSK Service AB: Stockholm, 2006.
- 3. Engvall, K. *Asksintringsproblem i konvektionspaketet tester med additiv i stor skala;* Rapport 742; VÄRMEFORSK Service AB: Stockholm, 2001.
- De Geyter, S., M. Eriksson, M. Öhman, et al. Skillnader i bäddagglomereringstendens mellan alternativa bäddmaterial och olika mineraler i natursand; Rapport No. 920; VÄRMEFORSK Service AB: Stockholm, 2005.
- König, L. X-Ray Fluorescence The use of handheld XRF analyzers for a quick measurement of elements in waste incineration ashes and waste fuel. Examensarbete, Högskolan i Borås, 2013.
- 6. Norling, R., A. Stålenheim, F. Niklasson and A. Hjörnhede *Korrosionskontroll genom analys av flygaska och avlagringar*; Projekt M12-219; Energiforsk AB: Stockholm, 2015.
- 7. Strömberg, B. and S. Herstad Svärd *Bränslehandboken*; Rapport No. 1234;
- VÄRMEFORSK Serviceaktiebolag: Stockholm, 2012.
- Eriksson, M., K. Wikman, M. Berg and M. Öhman Effekten av fluidiseringshastighet och kornstorlek på agglomereringsrisk vid biobränsleeldning i FB-pannor Rapport Nr. 890; VÄRMEFORSK Service AB: Stockholm, 2007.
- 9. Hauser, E.A. and U. Colombo, *Colloid Science Of Montmorillonites And Bentonites*. Clays and Clay Minerals, 1953. **2**(1): p. 439-461.
- Zintl, F. and B. Ljungdahl Sintring i FB och CFB Utveckling av prediktiv metod samt test av additiv och sameldning; Rapport No. 712; VÄRMEFORSK Service AB: Stockholm, 2000.



Bilaga.1. Foton av beläggningssonder

Foton av beläggningsringar efter exponering i rökgasen visas i Figur 32 nedan. Sondspets åt vänster, rökgasflödet underifrån. Stoftet ovanpå sonden sitter löst och avlägsnades innan beläggningen analyserades. Den ring som tillverkats i materialet 16Mo3 har på sidorna en mörkare beläggning än övriga vilket beror på korrosionsangrepp.



GS2





GS4







Figur 32. Foton av beläggningssond efter exponeringar. Figure 32. Photos of the deposit probe after exposures.



Bilaga.2. Tabellvärden från XRF-analyser

		•				•
Case	Ref	GS1	GS2	GS3	GS4	GS5
Cl	1,33	0,91	1,01	0,59	1,07	0,26
S	4,79	5,75	6,74	5,21	6,23	7,51
Р	0,12	0,18	0,14	0,18	0,17	0,22
К	3,15	3,79	4,22	2,71	4,37	4,04
Pb	0,13	0,17	0,15	0,17	0,13	0,13
Zn	0,23	0,22	0,24	0,24	0,23	0,23
Si	6,84	7,31	6,63	9,99	6,63	7,39
AI	1,07	1,26	1,25	1,35	1,52	1,41
Ca	8,46	7,72	8,45	11,13	8,33	9,49
Fe	20,4	17,6	18,4	9,2	25,0	22,5
Ті	1,79	1,93	2,04	2,49	2,02	2,22
Mn	0,73	0,60	0,67	0,34	0,96	0,86
Cr	1,24	1,93	1,37	0,29	1,83	1,82
Cu	0,18	0,14	0,16	0,11	0,22	0,19
Ni	0,59	0,91	0,74	0,13	0,94	1,16
Bal	48,5	49,1	47,3	55,4	39,8	39,9

Tabell 9. XRF-analyser av vindsidor på ringar av SS304.Table 9. XRF-analyses on windward sides of SS304 rings.

Tabell 10. XRF-analys av läsidor på ringar av SS304.

10000110	And analys at lastast paringal at sessen	
Table 10.	XRF-analyses on leeward sides of SS304 rings.	

Case	Ref	GS1	GS2	GS3	GS4	GS5
Cl	0,48	0,42	0,36	0,53	0,36	0,51
S	4,24	4,68	4,00	3,74	3,91	2,88
Р	0,21	0,19	0,18	0,19	0,15	0,20
к	1,32	1,69	1,11	1,11	1,11	0,70
Pb	0,14	0,17	0,11	0,13	0,10	0,06
Zn	0,23	0,18	0,15	0,20	0,14	0,13
Si	6,82	6,68	6,10	6,03	6,00	5,32
AI	2,16	2,16	2,22	2,12	2,52	2,11
Са	10,54	9,14	8,03	8,56	7,28	5,71
Fe	40,15	40,54	45,08	45,17	47,14	50,50
Ті	1,98	1,74	1,50	1,49	1,36	0,97
Mn	1,35	1,28	1,34	1,37	1,37	1,29
Cr	6,34	6,49	7,86	7,46	8,17	9,91
Cu	0,29	0,28	0,26	0,29	0,29	0,27
Ni	2,83	2,97	3,46	3,39	3,53	3,89
Bal	20,11	20,64	17,48	17,50	15,88	13,25



Case	Ref	GS1	GS2	GS3	GS4	GS5
Cl	2,88	1,11	1,07	1,29	1,37	1,09
S	4,12	3,99	4,10	2,87	2,57	4,29
Р	0,13	0,16	0,16	0,18	0,14	0,19
к	3,16	2,92	2,81	2,37	2,51	2,94
Pb	0,11	0,13	0,15	0,11	0,10	0,11
Zn	0,22	0,20	0,18	0,22	0,12	0,18
Si	4,34	5,44	5,54	5,09	6,31	4,48
AI	0,92	1,06	1,08	1,16	1,57	1,10
Са	5,45	5,85	6,23	5,77	5,09	5,55
Fe	31,6	33,5	28,9	43,4	42,07	41,0
Ti	1,25	1,33	1,46	1,27	1,18	1,26
Mn	0,61	0,53	0,68	0,56	0,81	0,48
Cr	0,11	0,08	0,07	0,08	0,07	0,08
Cu	0,13	0,12	0,20	0,13	0,17	0,11
Bal	44,52	43,12	47,02	35,06	35,70	36,66

Tabell 11. XRF-analyser av vindsidor på ringar av 16Mo3.Table 11. XRF-analyses on windward sides of 16Mo3 rings.

Tabell 12. XRF-analyser av läsidor på ringar av 16Mo3.Table 12. XRF-analyses on leeward sides of 16Mo3 rings.

		•			-	
Case	Ref	GS1	GS2	GS3	GS4	GS5
Cl	0,38	1,63	0,12	0,48	0,12	0,53
S	2,40	2,98	4,36	2,44	4,26	3,40
Р	0,12	0,13	0,14	0,16	0,15	0,12
к	0,63	1,94	1,32	0,71	1,28	1,17
Pb	0,07	0,15	0,13	0,12	0,14	0,20
Zn	0,10	0,13	0,09	0,14	0,09	0,17
Si	3,86	4,77	4,89	4,61	5,16	6,26
AI	1,53	1,61	1,68	1,73	1,80	1,35
Са	4,55	5,88	5,54	5,38	5,55	7,45
Fe	71,0	59 <i>,</i> 3	72,5	65 <i>,</i> 0	72,8	44,6
Ті	0,72	1,08	0,96	0,90	0,99	1,40
Mn	0,59	0,65	0,61	0,55	0,56	0,45
Cr	0,13	0,11	0,11	0,12	0,12	0,09
Cu	0,10	0,16	0,13	0,10	0,18	0,13
Ni	0,02	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Bal	13,43	19,00	6,99	17,18	6,37	32,30
~ T O D	.	6 1 .				





	-				•		
Case	Ref	GS1	GS2	GS3	GS4	GS5	
Cl	0,43	0,55	0,34	0,35	0,32	0,28	
S	1,4	1,2	1,3	1,4	1,3	1,4	
Р	0,26	0,27	0,27	0,42	0,27	0,26	
К	1,0	1,4	1,1	0,95	1,0	1,1	
Pb	0,06	0,08	0,06	0,07	0,05	0,07	
Zn	0,11	0,14	0,13	0,13	0,14	0,14	
Si	10,7	9,5	11,0	9,8	11,4	10,4	
Al	0,95	0,95	0,91	0,86	0,90	1,15	
Ca	7,2	6,8	7,0	7,8	6,6	7,1	
Fe	4,9	5,3	3,9	5,3	4,9	4,8	
Ti	1,3	1,1	1,2	1,4	1,2	1,3	
Mn	0,19	0,20	0,16	0,22	0,18	0,19	
Cr	0,56	0,31	0,35	0,52	0,61	0,43	
Cu	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	
Ni	0,12	0,05	0,05	0,07	0,09	0,07	
Bal	70,5	71,7	72,0	70,4	70,8	71,1	

Tabell 13. XRF analyser av bottenaska efter försöken.Table 13. XRF analyses of bottom ashes after experiments.

Tabell 14. XRF-analys av löst stoft från beläggningssonden.

Table 14. XRF analyses of loose dust from the deposit probe.

	Ref	GS1	GS2	GS3	GS4	GS5	GS5
Cl	0,82	0,83	0,61	1,35	0,60	0,68	0,96
S	4,1	7,6	6,4	5,0	6,5	6,6	4,5
Р	0,21	0,28	0,29	0,30	0,32	0,33	0,31
к	1,9	3,7	2,5	2,4	2,5	2,7	2,3
Pb	0,22	0,31	0,32	0,32	0,31	0,32	0,30
Zn	0,27	0,31	0,32	0,34	0,33	0,33	0,28
Si	8,1	12,4	12,0	11,6	13,5	14,1	13,5
Al	1,7	2,5	2,5	2,1	3,1	3,0	2,4
Ca	11,8	19,5	20,3	18,8	22,3	22,9	17,4
Fe	30,3	14,9	13,1	11,6	19,1	15,4	10,8
Ti	2,5	4,7	4,7	4,2	5,7	6,0	4,3
Mn	0,41	0,46	0,49	0,43	0,55	0,55	0,42
Cr	0,31	0,29	0,34	0,21	0,29	0,25	0,13
Cu	0,15	0,17	0,16	0,15	0,23	0,22	0,16
Ni	0,07	0,05	0,04	0,05	0,04	0,03	0,02
Bal	36,8	31,6	35,1	40,8	23,5	26,1	41,8



Bilaga.3. Hantering av provringar

Proceduren för hanteringen av beläggningsringarna beskriv nedan i steg:

- 1) Ringarna tvättas i ultraljudsbad med isopropanol.
- 2) Efter att ha torkats vägs ringarna och placeras sedan på sonden.
- 3) Ringarna exponeras i förbränningsreaktorn. Under första uppvärmningsfasen är sonden skyddad av en hylsa. Vid starten av exponeringen dras hylsan bort.
- Efter exponeringen kyls sonden i en burk innehållande kiselgel. Därefter demonteras ringarna från sonden. Löst stoft som ramlar av under hanteringen samlas in i möjligaste mån.
- 5) Ringarna placeras i individuella märkta plastbehållare som förvaras i exsickator.
- 6) Ringarna vägs ut.
- 7) För att avlägsna löst stoft på ringarna på ett systematiskt sätt fick de falla ned 10 cm längs ett stålrör med en utvidgning i änden, se Figur 30. Stöten får löst stoft att lossa och det samlas in i en kopp placerad under fallröret.
- 8) Ringarna vägs återigen ut för att ta reda på mängden hård beläggning på ringarna.
- 9) Därefter förvaras beläggningsringarna i exsickator tills beläggningarna ska analyseras.



Figur 33. Uppställning för att kontrollerat avlägsna löst stoft från beläggningsringarna. Figure 33. Set-up to remove loose deposits from exposed deposit rings by a consistent method.



Bilaga.4. Resultat från EDS-analys

4.1. Provringar



Figure 34. EDS maps of 16Mo3 steel sample after exposure testing in the presence of reference foundry sand (GSRef).





Mo La1

Si Ka1

Figur 35. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen vid ytan på stålprov 16Mo3 (i tvärsnitt) efter exponering med gjuterisand med 2,5% bentonit (GS1). Figure 35. EDS maps of 16Mo3 steel sample after exposure testing in the presence of foundry sand containing 2,5% bentonite (GS1).





Figur 36. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen vid ytan på stålprov 16Mo3 (i tvärsnitt) efter exponering med gjuterisand med 2,5% bentonit (GS1). Figure 36. EDS maps of 16Mo3 steel sample after exposure testing in the presence of foundry sand containing 2,5% bentonite (GS1).





Mo La1

Si Ka1

Figur 37. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen vid ytan på stålprov 16Mo3 (i tvärsnitt) efter exponering med gjuterisand med resol/ester (GS2). Figure 37. EDS maps of 16Mo3 after exposure testing in the presence of foundry sand containing resol esther (GS2).





Mo La1

Al Ka1

Si Ka1

Figur 38. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen vid ytan på stålprov 16Mo3 (i tvärsnitt) efter exponering med gjuterisand med resol/ester (GS2). Figure 38. EDS maps of 16Mo3 after exposure testing in the presence of foundry sand containing resol esther (GS2).





Mo La1

Si Ka1

Figur 39. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen vid ytan på stålprov 16Mo3 (i tvärsnitt) efter exponering med gjuterisand med ny bentonit (7,5%) (GS5). Figure 39. EDS maps of 16Mo3 steel after exposure testing in the presence of foundry sand containing new bentonite (7.5%) (GS5).





Figur 40. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen på avflagnat material från stålprov 16Mo3 efter exponering med gjuterisand med 2,5% bentonit (GS1) Figure 40. EDS maps of flaked material from 16Mo3 steel sample after exposure testing in the presence of foundry sand containing 2,5% bentonite (GS1).



4.2. Sander - Före provning



Figur 41. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen för referenssand (GSRef) före provning. Figure 41. EDS maps of reference sand (Baskarp 35) (GSRef) before test exposure.





Al Ka1

Figur 42. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen för referenssand (GSRef) före provning. Figure 42. EDS maps of reference sand (Baskarp 35) (GSRef) before test exposure.

Si Ka1







O Ka1



Na Ka1_2





CI Ka1



K Ka1



Fe Ka1



Al Ka1



Figur 43. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen för gjuterisand med 2,5% bentonit (GS1) före provning. Figure 43. EDS maps of foundry sand containing Bentonite (2.5%) (GS1) before test exposure.







O Ka1





S Ka1



CI Ka1





Fe Ka1





Al Ka1

Figur 44. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen för gjuterisand med 2,5% bentonit (GS1) före provning. Figure 44. EDS maps of foundry sand containing Bentonite (2.5%) (GS1) before test exposure.











Figur 45. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen för gjuterisand med 2,5% bentonit (GS1) före provning. Figure 45. EDS maps of foundry sand containing Bentonite (2.5%) (GS1) before test exposure.











 \mathcal{A}_{i}





CI Ka1







Fe Ka1



Al Ka1

Si Ka1 Figur 46. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen för gjuterisand med resol/ester (GS2) före provning. Figure 46. EDS maps of foundry sand containing resol/esther (GS2) before test exposure.







Al Ka1

Figur 47. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen för gjuterisand med resol/ester (GS2) före provning. Figure 47. EDS maps of foundry sand containing resol/esther (GS2) before test exposure.













CI Ka1

K Ka1





Fe Ka1





Figur 48. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen för gjuterisand med ny bentonit (7,1%) (GS5) före provning. Figure 48. EDS maps of foundry sand containing new Bentonite (7.1%) (GS5) before test exposure.







Si Ka1

Al Ka1




Figur 50. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen för agglomererad gjuterisand med ny bentonit (7,1%) (GS5) före provning. Figure 50. EDS maps of agglomerated foundry sand containing new Bentonite (7.1%) (GS5) before test exposure.



4.3. Bottenaskor - Efter provning







Figur 51. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen för referenssand (GSRef) efter provning. Figure 51. EDS maps of reference sand (GSRef) after test exposure.







O Ka1



Na Ka1_2



S Ka1







Fe Ka1

CI Ka1





Figur 52. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen för gjuterisand med 2,5% bentonit (GS1) efter provning. Figure 52. EDS maps of foundry sand containing Bentonite (2.5%) (GS1) after test exposure.





Figur 53. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen för gjuterisand med resol/ester (GS2) efter provning. Utöver övriga ämnen påvisades även Ti (nedre högra hörnet). Figure 53. EDS maps of foundry sand containing resol/esther (GS2) after test exposure. Note additional element map in lower right corner indicating Ti content.





Figur 54. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen för gjuterisand med ny bentonit (7,1%) (GS5) efter provning. Figure 54. EDS maps of foundry sand containing new Bentonite (7.1%) (GS5) after test exposure.

Si Ka1

Al Ka1





Figur 55. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen för referenssand (GSRef) efter provning. Figure 55. EDS maps of reference sand GSRef after test exposure.





Figur 56. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen för gjuterisand med 2,5% bentonit (GS1) efter provning. Figure 56. EDS maps of foundry sand containing Bentonite (2.5%) (GS1) after test exposure.





Figur 57. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen för gjuterisand med resol/ester (GS2) efter provning. Figure 57. EDS maps of foundry sand containing resol/esther (GS2) after test exposure.













CI Ka1











Al Ka1

Figur 58. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen för gjuterisand med ny bentonit (7,1%) (GS5) efter provning. Figure 58. EDS maps of foundry sand containing new Bentonite (7.1%) (GS5) after test exposure.





Figur 59. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen för agglomererad referenssand (GSRef) efter provning. Figure 59. EDS maps of agglomerated reference sand (Baskarp 35) (GSRef) after test exposure.





Figur 60. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen för agglomererad gjuterisand med 2,5% bentonit (GS1) efter provning. Figure 60. EDS maps of agglomerated foundry sand containing Bentonite (2.5%) (GS1) after test exposure.





Si Ka1 Figur 61. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen för agglomererad gjuterisand med resol/ester (GS2) efter provning.

Al Ka1

.

Figure 61. EDS maps of foundry sand containing resol/esther (GS2) after test exposure.





Figur 62. Resultat från EDS-analys som visar elementfördelningen för agglomererad gjuterisand med ny bentonit (7,1%) (GS5) efter provning. Notera att även Mg påvisades (nedre högra hörnet).

Figure 62. EDS maps of foundry sand containing Bentonite (7.1%) (GS5) after test exposure. Note additional element map in lower right corner indicating Mg content.





Bilaga.5. SEM bilder av SS304-ringar

Figur 63. SEM-bilder på rostfritt stålprov (SS304) efter exponering med referenssand (GSRef) som visar områden med korngränsangrepp. Bilderna visar områden på vindsidan.

Figure 63. SEM images of stainless steel SS304 after exposure, test case GSRef, showing regions with grain boundary attack. Both images show areas at the windward side.





Figur 64. SEM-bilder på rostfritt stålprov (SS304) efter exponering med gjuterisand innehållande 2,5 % bentonit (GS1) som visar områden med korngränsangrepp. Bilderna visar områden på vindsidan (ovan) och läsidan (nedan).

Figure 64. SEM images of stainless steel SS304 after exposure, test case GS1, showing regions with grain boundary attack. The images show areas at the windward side (above) and leeward side (below).





Figur 65. SEM-bilder på rostfritt stålprov (SS304) efter exponering med gjuterisand innehållande resol/ester (GS2) som visar områden med korngränsangrepp. Bilderna visar ett område på vindsidan (ovan) och ett område 45° från den (nedan).

Figure 65. SEM images of stainless steel SS304 after exposure, test case GS2, showing regions with grain boundary attack. The images show an area at the windward side (above) and an area 45° from it (below).





Figur 66. SEM-bilder på rostfritt stålprov (SS304) efter exponering med gjuterisand innehållande 7,5 % bentonit (GS5) som visar områden med korngränsangrepp. Bilderna visar ett område på vindsidan (ovan) och en del av samma område i högre förstoring (nedan).

Figure 66. SEM images of stainless steel SS304 after exposure, test case GS5, showing regions with grain boundary attack. The images show an area at the windward side (above) and part of it enlarged (below).



GJUTERISAND I FLUIDISERADE BÄDDPANNOR

Gjuterisand används inom gjuteriverksamhet för att göra gjutformar och kärnor, och materialet består av sandpartiklar av kvarts och fältspat som täckts med bentonitlera och malt kol. Det mesta av gjuterisanden återanvänds flera gånger i processen, men en delmängd kan inte återanvändas och blir ett avfall i en mängd av ca 200 kton per år.

Om gjuterisand återanvänds som bäddmaterial i fluidiserade bäddpannor istället för att deponeras skulle det medföra en resursbesparing. Det är dock inte uppenbart på vilket sätt driften i FB-pannor påverkas av att byta ut färsk natursand mot gjuterisand.

Syftet med detta projekt har varit att experimentellt utreda eventuella konsekvenser för panndriften av att använda gjuterisand i FB-pannor. Inom projektet har flisat returträ av engelskt ursprung eldats i olika gjuterisandbäddar i labbskala under det att beläggningsprover samlats in. Efter avslutade förbränningsförsök har beläggningsringar och bäddmaterial analyserats.

Resultaten som erhållits indikerar att gjuterisand kan reducera överhettarkorrosion i viss mån, medan bäddens sintringstemperatur tenderar att sjunka något. Labbförsöken visar att de flesta gjuterisanderna fungerar bra som bäddmaterial, möjligtvis undantaget en furansand som både sänkte sintringstemperaturen och ökade beläggningsbildningen.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se

