

FÄRDIG BRÄNSLEMIX AV HALM, FLIS OCH ADDITIV FRÅN TERMINAL TILL KRAFTVÄRMEVERK

RAPPORT 2015:149



BRÄNSLEBASERAD EL- OCH
VÄRMEPRODUKTION



Färdig bränslemix av halm, flis och additiv från terminal till kraftvärmeverk

SUSANNE PAULRUD, ANDERS HJÖRNHEDE, MARCUS ÖHMAN

ISBN 978-91-7673-149-9 | © 2015 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

FÖRORD

Denna rapport är slutrapportering av projekt A 38728 Färdig bränslemix: bränsleblandningar av halm, flis och additiv från terminal till värme-, kraftvärmeverk (Energimyndighetens projektnummer P 38728) som faller under teknikområde anläggnings- och förbränningsteknik inom SEBRA, samverkansprogrammet för bränslebaserad el- och värmeproduktion.

Projektets huvudsyfte var att visa att halm kan användas som inblandning med andra bränslen och därmed ge förutsättning för ökad andel biobränslen i kraftvärmeverk. Projektet har också studerat om additiv kan minska driftproblem vid eldning av halm.

Projektet har följts av en referensgrupp bestående av Solvie Herstad Svärd (WSP), Rikard Norling, (Swerea KIMAB), Erik Lindhe (Tekniska verken Linköping) och Nader Padban (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 juni 2015

Helena Sellerholm

Områdesansvarig

Bränslebaserad el- och värmeproduktion, Energiforsk AB

Summary

Ready fuel mix of straw, wood chips and additive, from the terminal to the CHP-plant.

Introduction

Today, biomass fuels as different assortments of wood chips, waste and recycled fuels are used at thermal power plants. In order to secure fuel volumes and flows of biomass fuels in the future, more types of biomass fuels need to be tested and verified. Example of, in Sweden, a virtually unused fuel is straw. The amount of straw that can be used as fuel in Sweden is estimated to one million tons or about 4 TWh, but currently only a fraction of this quantity is used (Nilsson, 2009). The difficulty with straw is that it requires a more advanced logistics and fuel handling to feed the fuel into the boiler. For the majority of the existing heating plant that uses woodchips today, will become interested in bringing the straw in their production, it is required that the fuel is delivered as a readymade fuel product from a terminal. The use of biomass fuels can cause troublesome ash-related operational problems, including deposit formation, high temperature corrosion and bed agglomeration in CHP plant facilities. To blend straw with wood fuels, may increase the risk of these problems as straw usually contains higher concentrations of K and Cl. One way to reduce the ash related operational problems is to add additives.

So far, various materials and chemicals have been tested as additives in different biomass combustion reactors, facilities and plants, with large amounts of experimental data produced and reported (Ivarsson, 1998, Engvall, 2001, Herstad Svård, 2011, Piotrowska, 2015, Rebbling, 2014). Although there is a wealth of experience, there is still a clear need for continued development in several areas, including fouling and slag formation caused by alkali, silicon, chlorine and continued studies of various sulfur additives for reducing corrosion / fouling / slagging. Relatively new studies on gypsum, used as additive, shows in contrary to previous studies a great potential (Piotrowska, 2013 Piotrowska 2015 Rebbling 2014). Results from bench-scale experiments show the possibilities to reduce the ash-related problems that occur due to sticky partially molten potassium-rich silicates when adding a few percentage of gypsum (Piotrowska, 2015, Piotrowska 2013). Furthermore, results from full-scale combustion tests show the ability to potentially reduce fouling/ corrosion on the superheaters in grate fired waste boiler (Rebbling 2014).

The overall objective of the project is through full-scale combustion trial demonstrate to the power, and heat production market that straw is a useful fuel as a ready mix with other fuels. In addition, the objective is to demonstrate that there are new additives that can reduce the risk of operating problems. The objective includes to describe how alkali related operational problems is affected, using a mix of straw, wood chips and "new" additives in a 65 MW boiler. In addition the objectives is by thermochemical model calculations estimate the degree of mixing of two different additives (gypsum and elemental sulfur) in a mix of straw and wood chips, required to clearly achieve positive effects on the slag formation, fouling formation / high temperature corrosion. In addition, perform full-scale experiments with fuel mixes of wood chips and straw in a 65 MW boiler at Borås Energi och Miljö and through full-scale trials, study the effect of two additives (gypsum and sulfur), on the emissions, deposit formation, particles and ashes.

Methods

Thermochemical model calculations

Thermochemical model calculations were performed using the software program FactSage 6.4. This program uses the method of minimization of Gibbs (G) free energy of the system. The thermodynamic

data containing stoichiometric data as well as non-ideal solid and liquid solution models were taken from the FACT database included in the FactSage 6.4 program. A global approach including atmospheric pressure (1 bar) and an air-to-fuel ratio (λ) of 1.5, corresponding to a typical global oxidizing condition in a grate firing boiler was employed. The fuel compositions were used as input for the calculations. Furthermore, the calculations were made covering a temperature interval from 700 to 1300 °C. The calculations included three different liquid phases, i.e. two alkali salt melts and one oxide/silicate (slag) melt. All relevant binary solid solutions containing K, Na, Ca and Mg were also included. Based on the calculations the following results were produced;

- i) the amount of formed melt (oxide and molten salts) in weight-% of ingoing amount of fuel as a function of temperature, which was used as a measure of slagging tendency of the fuel mixes.
- ii) the percentage and the amount of potassium in the fuel that was released to the gas phase as a function of temperature, as well as the ratio between chloride and sulfate of the formed alkali-components found in gas phase. The latter results were used as a measure of the deposit forming tendency.

Full scale combustion trials

Within the project, a mix of fuels was produced, equivalent to 3,000 tons. The mix was delivered to Borås Energi och Miljö and consisted of 80% wood chips and 20% barley straw. The selection of barley straw was due to good availability of that type of straw in the neighborhood. At the trial, a crusher of type CBI 8400 was used. In order to get a good mix, a scoop fuel wood and a straw bale was loaded every other time. The additives were weighed and placed on top of the straw bale.

The fuel mix of straw and wood chips was delivered to Borås Energi och Miljö in October 2014 for full scale tests in their biomass boilers, two boilers with a grate of 65 MW each. The biomass boilers burns wood chips producing heat and steam. The steam data is approximately 500 °C and 50 bar pressure as it leaves the boiler. It is then used to drive two steam turbines. At full load, 150 m³ of biomass burned per hour in the two boilers. The ash from the combustion is returned to nature.

Four trials were conducted lasting approximately 24 hours, respectively, of which measurements were carried out during daytime (08:00 to 16:00). During the trials, the same operating data (steam data 31-32 tons / h, equivalent to 25-26 MW for each boiler) was held and the same fuel mix / composition were used. The flue gases were analyzed with respect to SO₂, HCl, NO_x, CO, CO₂ and O₂. To determine the particles (mass) size distribution and aerodynamic diameter as well as the chemical composition of each particle fraction size, a low pressure impactor (LPI) was used. The particles were divided into 14 size fractions. Total dust samples were taken out in connection with impactor measurements.

During all experiments, the deposit formation was measured on a simulated super heater tube for 4 h. The deposit growth was quantified by a so-called "cold finger", consisting of an air-cooled probe with removable sample rings. The cooled surface temperature of each sample ring was set at 430, 480 and 530 °C and was maintained throughout the test period. The flue gas temperature where the probe was located was around 550 °C.

Sampled particle from the impactor and the deposit probe rings were analyzed by chemical composition by X-Ray Fluorescence (XRF). A number of deposit samples were also analyzed by X-Ray Diffraction (XRD) analysis to identify the crystalline phases in the samples.

Fuel samples, fly ash samples and bottom ash samples were taken on dry ash during the latter part of the test period for each trial and a general sample was compiled after each trial. The samples were analyzed according to standard methods of SPs fuel accredited laboratory.

Results

Thermochemical model calculations

The results from the calculations showed significant effect on the reduction of the amount of oxide/silicate melt already when adding 0,5 wt-% gypsum to the fuel mixes, i.e. both the 10%- and 20% mix of barley straw to the energy wood assortment. When adding 0,1-0,4 wt-% elemental sulfur to the fuel mixes the amount of oxide melt was halved in the lower temperature range i.e. below 1000 °C but were not changed in the higher temperature range (> 1000 °C).

The amount and proportion of potassium that was found in the gas phase was greatly reduced in the lower temperature range (<1000 °C) when adding 0,5-2 wt-% gypsum to the fuel mixes. The reason for this is that potassium was found in stable solid sulfate compounds (K_2SO_4 , $K_2Ca_2(SO_4)_3$) in the lower temperature range and in molten salts dominated by K^+ , Ca^{2+} and SO_4^{2-} -ions in the temperature range of 950-1150 °C. As the salt melts are not particularly stable above 1000 °C the potassium retention was reduced drastically above 1000 °C. The share of potassium that was found as chlorides in the gas phase was significantly reduced in the fuel mixes when adding gypsum to the fuel mixes. The proportion and the amount of potassium found in the gas phase were also greatly reduced when adding elemental sulfur to the fuel mixes. Potassium was bound to solid sulfates (K_2SO_4 , $K_2Ca_2(SO_4)_3$) in the lower temperature range and in molten salts dominated by K^+ and SO_4^{2-} in the temperature range of 1000-1100 °C. Theoretically, only a few tenths of a percent of sulfur to the fuel was needed to obtain significant reduction in levels of potassium in the gas phase. The share of potassium that was found as chlorides in the gas phase was also significantly reduced in the fuel mixes when adding elemental sulfur to the fuel mixes.

The results from the thermochemical model calculations performed at a normal excess air and assuming complete mixing between the ash forming elements in the fuel mixes and gypsum particles and sulfur particles indicates the theoretical possibility of reducing both the slagging tendency and the deposit formation tendency. In theory, i.e. according to calculations, a required additive addition of just above 1% gypsum and a few tenth percent of sulfur to the fuel mix that contains 20% by weight barley straw is needed to achieve significant effects.

Full scale combustion trial

The results from full-scale combustion tests showed that the fuel mixes with 20 weight-% barley straw, generally worked well to manage in the plant's fuel feeding system. The straw tended to get stuck in some places and some adjustments were made to reduce the risk of blockages. The straw was relatively coarsely shredded and with a more finely chopped straw and a mixing ratio of 10-15% by weight, it is estimated that the fuel feeding should work without problems.

By adding the additives in connection with the shredding of the straw, the blending of the fuel and additives went very well. In the experiments, the gypsum was supplied in powder form and the sulfur was delivered in the form of small granules.

Figure 1 show that sulfur and chlorine content increases with the blending of straw, however, the chlorine content was lower than expected in the straw. This may be because the straw was laying in string in the field a couple of weeks before pressing, due to rainy weather. Of the main ash forming elements, mainly Si, K and Ca is increasing with the straw content. The adding of sulfur and gypsum additive resulted in a significant increase in sulfur content. The adding of the gypsum powder also increases the Ca content. Meanwhile, there is also a natural variation in e.g. Ca content of the straw when it comes from different fields.

As Table 1 show, the mean value of CO decreases and the mean value of O₂ is lowered with mixing of straw due to the supply of drier fuel and the CO value drops further when adding the additives. SO₂

increases markedly when adding gypsum powder and sulfur as additive. The increase in SO₂ levels show that significant amounts of the added sulfur and gypsum additive react with the ash-forming elements in the fuels during combustion. The sharp increase indicates that the addition of additives was somewhat oversized since the blending of additives in the fuel mix succeeded very well. In addition, the chlorine content in the straw was lower than expected.

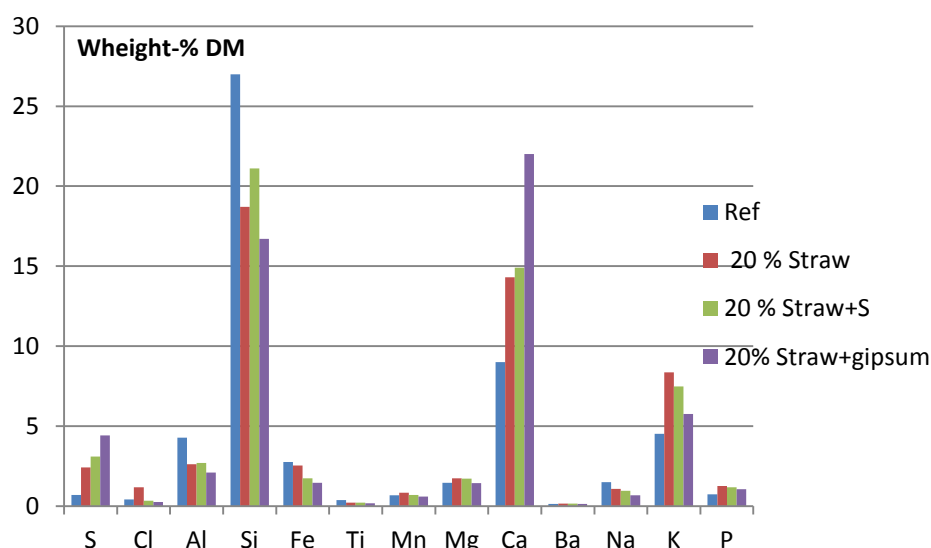


Figure 1. The chemical composition of the main elements of the fuel, with and without additives.

Tabell 1. Mean values for the measured gas concentrations in the polluted flue gas.

		Temp	NO _x	CO	CO ₂	O ₂ - real value	SO ₂
Date	Fuel	°C	mg/nm ³ 6% O ₂	mg/nm ³ 6% O ₂	%	%	mg/nm ³ 6% O ₂
2014-10-06	Ref 100 %wood chips	462	95	490	13	7	2,6
2014-10-07	20 % straw 80 % wood chips	507	88	121	15	5,5	37,3
2014-10-08	20 % straw 80 % wood chips + S	545	108	84	14	5,6	549,9
2014-10-09	20 % straw 80 % wood chips + gypsum	532	130	120	12	7,9	401,0

Figure 2 shows the analysed element distribution of the solid deposits on the probe rings and Figure 3 shows the analysed element distribution of the loosely attached deposits, knocked off before it was analyzed. As Figure 2 show, the chlorine content is higher in the reference fuel then the fuel mix with 20% barley straw. The sulfur content is also high for the straw mix without additives. The reason for this is that the chlorine content was low and sulfur content high in the used straw fuel. When adding the additives, the chlorine was reduced even more. The loose deposit show higher levels of mainly Ca, Si, and lower levels of K, Cl and S for all samples (Figure 3) (what could be related to that most loose deposit was released from the rings lee side). The results of XRD analysis of the deposits that was peeled off from the entire ring, shows that the phases identified can be NaCl, CaSO₄ (not present in

the fuel ref), KCl , K_2SO_4 , $(\text{Ca}, \text{Fe}) \text{SiO}_3$, SiO_2 and KAlSi_3O_8 . The identified phase KCl , was reduced with the blending of straw and additives while K_2SO_4 - "and CaSO_4 content increased.

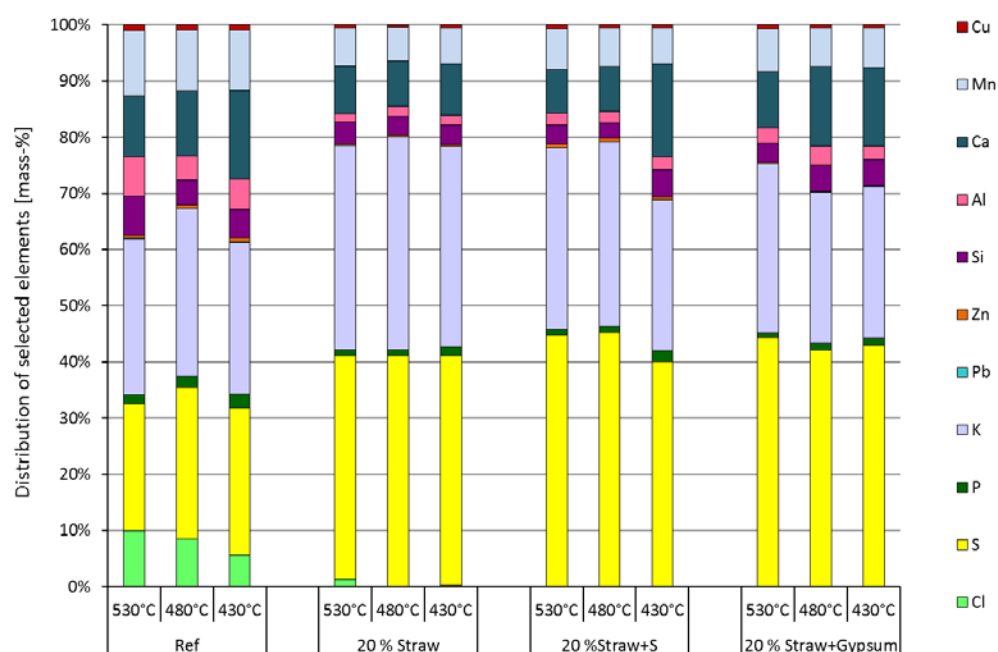


Figure 2. Measured elemental distribution of the solid deposit on the rings. The metals Fe, Cr and Ni have been removed from the figure as the main source is found in the ring material. Each bar in the graph consists of averages from four analyzes evenly spread across the ring circumference.

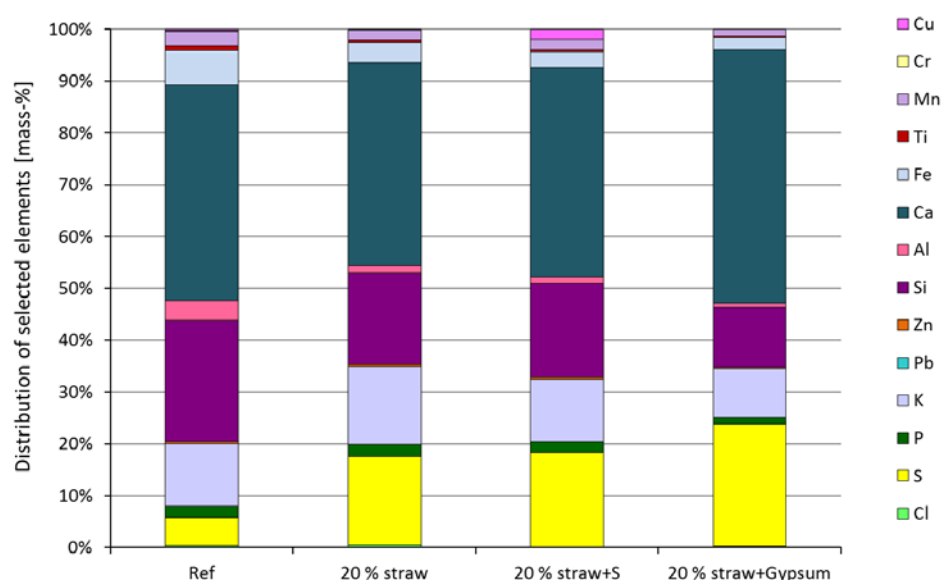


Figure 3. Measured elemental distribution of the loose deposit that was knocked away before the deposits were analyzed. This loose deposit is a mixture of the three probe rings exposed at every operating case. The reason they were mixed to obtain a sufficient amount of sample for the analysis.

Figure 4-5 shows the results of the impactor sampling. Concentrations of the analyzed elements below should not be taken as absolute levels instead used for comparison purposes. The assessment is that S-concentrations partly come from sulfur compounds such as K_2SO_4 but also from unreacted elemental sulfur in the cases concerned. Chlorine or chlorides can probably be assumed to be KCl, which can be confirmed by XRD analyzes.

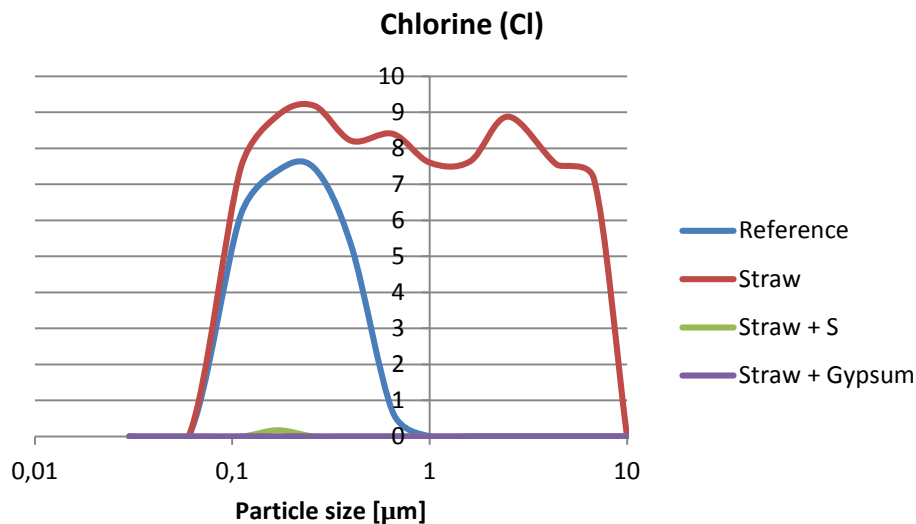


Figure 4. Chlorine content of fine particles from the impactor sampling.

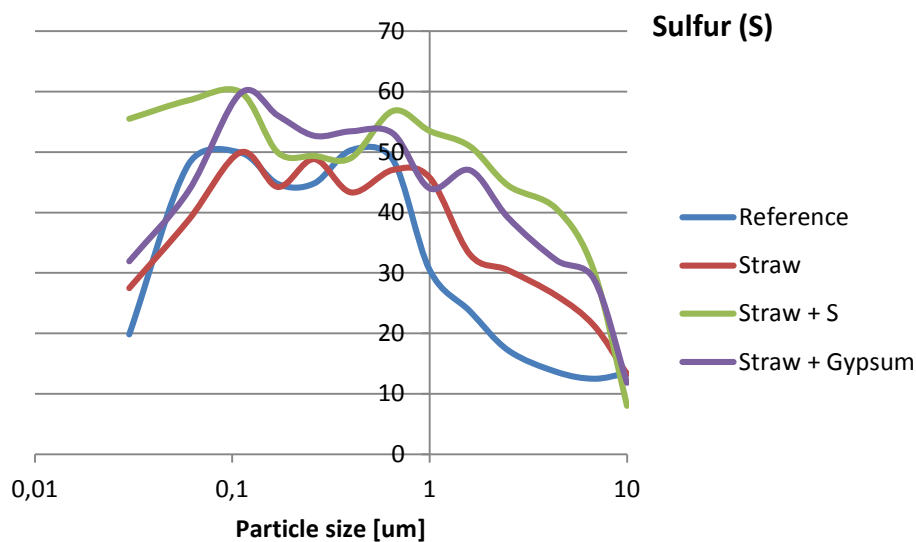


Figure 5. Sulphur content of fine particles from the impactor sampling.

Conclusions

Some of the project conclusions are that the thermochemical model calculations performed at a normal excess air and assuming complete mixing between the ash forming elements in the fuel mixes and gypsum particles and sulfur particles indicates the theoretical possibility of reducing both the slagging tendency and the deposit formation tendency. In theory, i.e. according to calculations, a required

additive addition of just above 1% gypsum and a few tenth percent of sulfur to the fuel mix that contains 20% by weight barley straw is needed to achieve significant effects.

Full-scale trials show that the straw in a cost-effective way can be decomposed by conventional crushers in the terminal and mixed with wood chips. Optimization is required in terms of decomposition (fineness) and interference ratio for each specific facility to reduce the risk of problems in the fuel supply. By mixing in the additives in connection with the decomposition of the straw, i.e. where the additive is passing through the crusher with the fuel the blending succeeded very well. The combustion tests showed that the mixing of straw and additives gives a lower CO-emissions and higher temperature and that of SO₂ –emissions increases markedly in comparison with the reference fuel, 100% wood chips.

Sulfur to chlorine ratio in the deposit on the probe rings increased upon addition of gypsum and sulfur to the fuel mix, on which KCl content is reduced and K₂SO₄ and CaSO₄ content increased. The concentration of chlorine was reduced and the sulfur content increased in the finer particles (<1 micron) when adding gypsum and sulfur. The results from the project show that the same effect can be achieved with gypsum and sulfur, when used as additives. The results are in line with previous studies and show the ability to reduce deposit formation/corrosion on the super heaters and convection area when using gypsum as additive in grate fired boilers.

References

- Ivarsson; E. Nilsson, C., Smälttemperaturer hos halmaskor med respektive utan tillsatsmedel, Special Report 153, Swedish University of Agricultural Sciences, department of Farm buildings (1998) (in Swedish).
- Herstad Svärd S, Åmand L-E, Bowalli J, Öhlin J, Steenari B-M, Pettersson J, Svensson J-E, Karlsson S, Larsson E, Johansson L-G, Davidsson K, Bäfver L, Almark M. 2011. Ramprogram-Åtgärder för samtidig minimering av alkalirelaterade driftproblem Etapp 3. Värmeforsk rapport 1167, Värmeforsk (in Swedish).
- Nilsson, D, Bernesson, S. 2009. Halm som bränsle, Del 1 Tillgångar och skördetidpunkter. SLU rapport 011 (in Swedish).
- Piotrowska P, Dan Boström, Alejandro Grimm, Marcus Öhman. 2013. Krossade gipsplattor som bränsleadditiv vid fastbränsleeldning för minskad risk för askrelaterade driftsproblem - etapp 1 termokemiska modell-beräkningar och bänkskaleförsök. Delarbete utfört inom NWI projektets delprojekt 4 "Utveckling av förbränningsprocesser och bränslemixar" (in Swedish).
- Piotrowska, P, Rebbling, A, Lindberg, D, Backman, R, Öhman, M, Boström, D. Waste Gypsum Board against Ash Related Problems during Combustion of Biomass Part 1: Fluidized Bed. Energy Fuels 2015, 29, 877–893
- Rebbling A, Piotrowska, P, Boström, D, Näzelius, I-L, Öhman, M. 2013. Krossade gipsplattor som bränsleadditiv vid fastbränsleeldning för minskad risk av askrelaterade driftsproblem - etapp 2 fullskaleförsök i avfallseldad rosterpanna (25 MWt). Delarbete utfört inom NWI projektets delprojekt 4 "Utveckling av förbränningsprocesser och bränslemixar"(in Swedish).
- Steenari, B. M., Lindqvist, O. Biomass and Bioenergy, 1998, 14, 67-76.
- Zevenhoven-Onderwater, M., Backman, R., Skrifvars, B-J., Hupa, M. The ash chemistry in fluidised bed gasification of biomass fuels. Part I: predicting the chemistry of melting ashes and ash-bed material interaction. Fuel, 2001, 80, 1489-1502.

Innehåll

1	Sammanfattning	5
2	Inledning	6
2.1	Projektets mål	7
3	Genomförande	8
3.1	Termokemiska modellberäkningar	8
3.2	Framtagning av bränslemix på terminal	9
3.3	Förbränningsförsök	12
4	Resultat & Diskussion	14
4.1	Termokemiska modellberäkningar	14
4.1.1	Sammansättning hos bränslemixar - askbildande huvudelement	14
4.1.2	Beräknade/uppskattade slaggningsstendenser utifrån de termokemiska modellberäkningarna	16
4.1.3	Effekt av inblandning av kornhalm i energived	16
4.1.4	Effekt av inblandning av gips till bränslemixarna	18
4.1.5	Effekt av inblandning av elementärt svavel till bränslemixarna	20
4.1.6	Uppskattade/beräknade beläggningstendenser	22
4.1.7	Effekt av inblandning av kornhalm i energived	23
4.1.8	Effekt av inblandning av gips till bränslemixarna	24
4.1.9	Uppskattade/beräknade SO ₂ -halter i ej renad rökgas	29
4.1.10	Rekommendationer – additivinblandning	30
4.2	Fullskaleförsök med halmmixar och additiv	31
4.2.1	Effekt av halm och additiv på bränslets kemiska sammansättning	31
4.2.2	Effekt av halm och additiv på emissioner	33
4.2.3	Effekt av halm och additiv på beläggningstillväxten och dess sammansättning	34
4.2.4	Effekt av halminblandning och additiv på flygaska och bottenaska	36
4.2.5	Effekt av halminblandning och additiv på partiklar	38
4.3	Kostnads kalkyl för halmmix från terminal	40
4.4	Gips som additiv	41
5	Slutsatser	43
5.1	Rekommendationer fortsatt arbete	44
6	Referenser	45

1 Sammanfattning

Idag eldas huvudsakligen olika sortiment av skogsflis, avfall och returbränslen på värmeverken. För att kunna säkra bränslemängder och flöden av biobränslen även i framtiden behöver fler biobränslesortiment testas och verifieras. Exempel på ett outnyttjat bränsle är halm. Svårigheten med halm är att det krävs en mer avancerad logistik och bränslehantering för att få in bränslet i pannan. För att huvuddelen av de befintliga värmeverk som använder skogsflis idag ska bli intresserade av att ta in halm i sin produktion krävs att bränslet levereras som en färdig bränsleprodukt från en terminal. Användningen av biobränslen kan orsaka besvärande askrelaterade driftsproblem varav beläggingsbildning, högtemperaturkorrosion och bäddagglomerering i kraftvärmeverkens anläggningar uppmärksammats under en längre tid. Att blanda in halm kan öka risken för dessa problem då halm oftast innehåller högre halter av K och Cl. Ett sätt att minska askrelaterade driftproblem är att tillsätta lämpliga additiv.

I den här studien har fördjupande kunskaper tagits fram om gips som additiv kan minska eventuella driftproblem som kan uppstå vid inblandning av kornhalm i en träbränslemix. För att verifiera additivens effekt har fullskaleförsök genomförts med gips och svavel som additiv om 2- och 0,3 vikts-% (på våt bränslebasis) till en bränslemix med 20 vikts-% kornhalm och 80 vikts-% energived i Borås Energi & Miljös 2x65 MW rosteranläggning (50 bar, 500°C). Bränslemixen har tagits fram och levererats av Lundby Maskinstation som bedriver terminalverksamhet i Trädet utanför Ulricehamn.

Några av projektets slutsatser är att inledande modellberäkningar visar på en teoretisk möjlighet att vid inblandning av såväl gips som svavel både kunna reducera slaggningsstendensen och mängden kalium som går till gasfas och kunna reducera beläggingsbildnings-/korrosionsrisken på överhettare och andra konvektionsytor vid användning av en bränslemix som innehåller 20% kornhalm. Fullskaleförsöken visar att halmen på ett kostnadseffektivt sätt kan sönderdelas med konventionella krossar på terminal och mixas med energivedsflis. Optimering krävs vad gäller sönderdelning (finhet) och inblandningsgrad för varje specifik anläggning för att minska risken för problem i bränslematningen. Genom att mixa in additiven i samband med sönderdelningen av halmen, d.v.s. där additiven gick igenom riven tillsammans med bränslet lyckades inblandningen mycket bra. Förbränningsförsöken visade att vid inblandning av halm och additiv fås lägre CO och högre temperatur samt att SO₂ ökar markant i jämförelse med referensbränslet, 100 % energivedsflis. Svavel till klorförhållandet i beläggningarna på beläggingsringarna ökade vid inblandning av gips och svavel till bränslemixen varav KCl halten reduceras och K₂SO₄- och CaSO₄-halten ökade vid inblandning av gips och svavel. Koncentrationen av klor reducerades och halten svavel ökade hos de fina partiklarna (< 1 µm) vid inblandning av gips och svavel. Resultaten från projektet visar att samma effekt kan uppnås med gips som svavel, vid användning som additiv. Resultaten är i linje med tidigare tester och visar på möjligheten att kunna reducera beläggingsbildnings-/korrosionsrisken på överhettare och andra konvektionsytor vid gipsinblandning till rostereldade pannor.

2 Inledning

I Sverige finns stora outnyttjade tillgångar av halm som kan användas som bränsle för bl.a. uppvärmning och elproduktion. Den mängd halm som kan utnyttjas som bränsle uppskattas till en miljon ton eller ca 4 TWh, men för närvarande används endast en bråkdel av denna kvantitet (Nilsson, 2009). Svårigheten med halm är att de kräver en mer avancerad logistik och bränslehantering för att få in bränslet i pannan. För att befintliga värmeverk som normalt använder skogsflis ska vara intresserade av att ta in halm i sin produktion krävs att bränslet levereras som en färdig bränsleprodukt. Alternativet för halm är att användas i specialiserade halmanläggningar men nackdelen med dessa anläggningar är att leveranssäkerheten av bränsle är lägre p.g.a. de variationer i halmskörden som kan uppstå från år till år. Att använda halm i en bränslemix med skogsbränsle är därför mindre sårbart. För att leverera en färdig bränslemix krävs dock att bränslet först hanteras via en bränsleterminal. Genom att hantera bränslet via en terminal kan bränslemixarna lätt anpassas utifrån kundernas behov.

Användningen av bibränslen kan orsaka besvärande askrelaterade driftsproblem varav beläggingsbildning, högtemperaturkorrosion och bäddagglomerering i kraftvärmeverkens anläggningar uppmärksammas under en längre tid. Flertalet biobränsleeldade kraftvärmeverk i Sverige rapporterar mer eller mindre omfattande korrosionsproblem i överhettare som ger oacceptabelt kort livslängd (Henderson, 2006). Att blanda in halm kan öka risken för dessa problem då halm innehåller högre halter av K och Cl.

Ett sätt att minska askrelaterade driftproblem är att tillsätta lämpliga additiv. Under årens lopp har ett flertal studier genomförts kring additiv och dess effekter (Ivarsson, 1998, Engvall, 2001, Herstad Svärd, 2011, Piotrowska, 2015, Rebbling, 2014). Trots att det finns en bred erfarenhet så finns fortfarande ett tydligt behov av fortsatta utvecklingsinsatser inom flera områden, bl.a. beläggings- och slaggbildning orsakade av alkali, kisel, klor och studier av olika svaveladditiv för reduktion av korrosion/beläggning/slaggning. Svavel och olika lermineral, bl.a. kaolin har visat sig kunna användas för att omvandla alkaliklorider till mindre korrosiva alkalisulfater, respektive fånga in kalium och/eller höja smältpunkten hos den bildade askan vid biobränsleförbränning och därmed minska såväl beläggings- som korrosionsproblematiken. Ett relativt obeprövat additiv som har studerats på senare tid är gips (Piotrowska, 2013, Piotrowska 2015, Rebbling 2014). Resultat från bänkskaleförsök visar på potentialen att kunna reducera askrelaterade problem som uppstår p.g.a. klibbiga delvist smälta kaliumrika silikater, d.v.s. slagging i eldstad och på rost såväl som bäddagglomerering i fluidbäddar, vid inblandning av någon/några vikts-% gips till bl.a. kalium- och kiselrika strå- och gräsbränslen (Piotrowska, 2015, Piotrowska 2013). Vidare visar resultat från fullskaleförsök på möjligheten att potentiellt kunna reducera beläggingsbildnings-/korrosionsrisken på överhettare och andra konvektionsytor vid gipsinblandning till rostereldade avfallspannor (Rebbling 2014).

Vid tillverkningen av gipsskivor består gipsmassan ofta av en kombination av naturgips, industrigips (rest från kolkraftverk) och returkips. Huvuddelen av gipsen som används vid tillverkning i Sverige importeras idag. Använt gips från byggavfall betraktas som ett avfall och stora mängder gips läggs idag på deponi. 2012 skärpte Naturvårdsverket reglerna för hantering av gipsavfall och idag måste

gips antingen återvinns i godkända anläggningar eller deponeras i en mono-cell, d.v.s. gips får inte blandas med annat avfall. Detta har gjort att intresset för att återvinna gips till s.k. returgips har ökat. Detta medför att det finns tillgång på gips som återvunnen produkt på den svenska marknaden, vilket krävs för att kunna använda gips i biobränslepannor. Dock måste man kunna visa att gips inte kommer att leda till negativa följder för miljön eller människors hälsa vilket är tillsynsmyndighetens ansvar att bedöma.

2.1 Projektets mål

Det övergripande målet med projektet var att genom fullskaleförsök påvisa för marknaden inom kraft/värmeproduktionen att halm är ett användbart bränsle som färdig mix med andra bränslen. Därtill var målet att påvisa att det finns nya additiv som kan minska risken för eventuella driftproblem. I målsättningen ingick att beskriva hur alkalirelaterade driftsproblem påverkas när en mix av halm, energivedflis och "nya" additiv tillförs vid rosterförbränning i en 65 MW ångpanna, samt att beskriva de bakomliggande mekanismerna hur olika halm/trä/additiv- blandningar påverkar korrosion/beläggning/slaggning.

Projektets delmål var att:

- Genom termokemiska modellberäkningar uppskatta vilka inblandningsgrader av 2 olika additiv (gips och elementärt svavel) i olika mixar av halm och flis som krävs för att uppnå tydligt positiva effekter m.a.p. slagkning, beläggningsbildning/högtemperaturkorrosion.
- Genomföra fullskaleförsök med bränslemixar av flis och halm i en 65 MW ångpanna hos Borås Energi
- Genom fullskaleförsök studeraeffekten av inblandning av två additiv (gips och svavel), på emissioner, beläggningsbildning, partiklar och aska.

Det långsiktiga målet är att öka användningen av nya biobränslesortiment genom utnyttjande av lokala terminaler som kan anpassa och leverera färdiga bränslemixar vid behov.

3 Genomförande

Genom termokemiska modellberäkningar har kunskaper om bränslemixen samt additivens effekt på eventuella driftproblem tagits fram. För att verifiera additivens effekt har fullskaleförsök genomförts i en 65 MW biobränslepanna hos Borås Energi & Miljö. Bränslemixen har tagits fram och levererats av Lundby Maskinstation som bedriver terminalverksamhet i Trädet utanför Ulricehamn.

3.1 Termokemiska modellberäkningar

Termokemiska modellberäkningar utfördes för att bedöma effekten av inblandningsgraden av halm och två olika additiv, gips och elementärt svavel, till rundved/energived på slaggnings- och belägningsbildnings-tendensen/korrosionstendensen. Som ingångsdata, vad gäller ingående huvud- och askbildande element, användes bränsledata för de olika sortimenten (se tabell 1). Beräkningar utfördes med inblandning av 10 och 20 vikts-% (på våt basis) (motsvarar 20 och 30 vikts-% på torr basis) av kornhalm till rundved/energived. Additivinblandningsgrader om 0,5; 1 och 2 vikts% på våt basis till bränslemixarna användes vid beräkningar med gipsinblandning och additivinblandningsgrader om 0,1; 0,2 och 0,4 vikts-% på våt basis av elementärt svavel användes vid beräkningar med svavelinblandning i samma bränslemixar.

Tabell 1 Bränslekaraktäristik hos de två nyttjade bränsleproverna och de två nyttjade bränsleadditiven.

Vikts-% av TS	Energived*	Kornhalm	Gips	Svavel
C	50,4	47,2		
H	6,1	6		
O	42,54	42	51,3 (bal.)	
N	0,08	0,5	0,05	
Na	0,0001	0,024		
K	0,072	1,01	0,31	
Ca	0,114	0,34	25,5	
Mg	0,022	0,068	0,25	
Al	0,0012	0,046		
Fe	0,0004	0,02	0,12	
Si	0,006	0,65	1,13	
P	0,008	0,07		
Cl	0,01	0,08	0,04	
S	0,01	0,3	21,3	100
Aska	0,7	4,4		
Fukthalt (As received)	50	16	26	

*) Från Lindström, E., Larsson, S., Boström, D., Öhman, M. Slagging tendencies of woody biomass pellets made from a range of different Swedish forestry assortments. Energy&Fuels. 2010, 24, 3456–

3461. Energiveden (stam+bark) kommer från ett granbestånd som skördats och kvistats 10 km öster om Borås.

Modellberäkningar utfördes med programmet FACTSage-6.4. (Bale, 2002). Programmet bygger på en minimering av Gibb's fria energi för det system man undersöker. I beräkningarna har termodynamiska data för gaskomponenter såväl som stökiometrisk kondenserade faser, tre icke ideala lösningar (2 st salt och 1st oxid/slagg) och 5 icke ideala fasta lösningar använts (se tabell 2). Termodynamiska data hämtades från FACT-databasen som medföljer programmet.

Beräkningarna utfördes för att simulera förbränningsförloppet i en rosteranläggning d v s vid ett luftöverskott på 50% och vid varierande processtemperaturer (700-1300 °C). Utifrån beräkningarna och bränslesammansättningen bestäms: i) andelen bildad smälta (oxid respektive saltsmälta) i vikts-% av ingående mängd bränsle som funktion av temperaturen vilket nyttjas som ett mått på slaggnings-tendensen för bränslet/bränslemixen, samt ii) andelen och mängden kalium i bränslet som avgår till gasfasen, såväl som förhållandet mellan klorid och sulfat hos bildade alkalikomponenter som återfinns i gasfas som funktion av temperaturen. Dessa användes som ett mått på beläggingsbildningstendensen. Ovanstående modellberäkningar och approach har i flertalet tidigare arbeten (bl a Öhman 2010) gett god kvalitativ överensstämmelse med uppmätta slaggnings-/beläggings-/ och partikelemissionstendenser som bestämts genom förbränningsförsök i såväl full- som bänkskala.

Tabell 2 Använda element och valda lösningsmodeller vid de termokemiska modellberäkningarna. Modellerna erhöles från FACT-databasen som tillhandahålles i FactSage 6.4.

Element	C, H, O, N, Na, K, Ca, Mg, Al, Fe, Mn, Si, P, S, Cl
Lösningssmodeller	<i>FT oxid Slag C:</i> (CaO, MgO, K₂O, FeO, Na₂O, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, Na₃PO₄, Ca₃PO₄, Mg₃PO₄, Fe₃PO₄, K₃PO₄, FePO₄, liq) <i>FT-Pulp: Melt A</i> (NaCl, KCl, NaOH, KOH, Na₂SO₄, K₂SO₄, Na₂CO₃, K₂CO₃, Na₂S, K₂S, liq) <i>FT-Pulp: ACL</i> (NaCl, KCl, NaOH, KOH, ss) <i>FT-Salt: LCSO (liq-K,Ca//CO₃,SO₄)</i> <i>FT-Salt: CSOB ((Li), Na, K// SO₄, CO₃, ss)</i> <i>FT-Salt: CSMO (MgSO₄-CaSO₄, ss)</i> <i>FT-Salt: SCSO (K,Ca//CO₃,SO₄, ss)</i> <i>FT-Sal: SSUL (Na, (Mg,Ca) /SO₄, ss)</i>

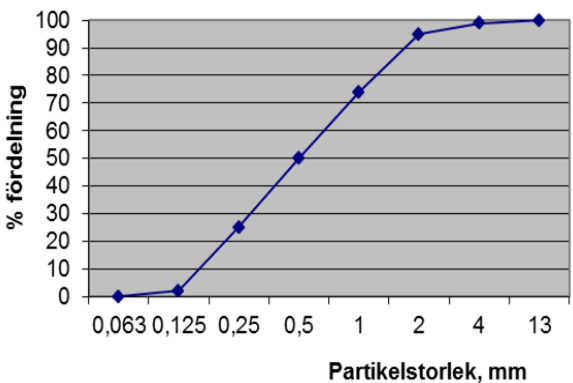
3.2 Framtagning av bränslemix på terminal

Utifrån resultaten från modellberäkningarna togs en bränslemix fram av Lundby maskinstation i Trädet. På Lundby Maskinstation finns tre terminaler för lagring av flis, kalk mm. Lundby Maskinstation arbetar för att utveckla sin terminalverksamhet med mer mixer av råvaror såsom halm. Då Lundby Maskinstation bedriver en åkeriverksamhet kan egna lastbilar användas för att transportera halm från åker till terminal och flis/halm från terminal till värmeverk. Inom projektet togs en bränslemix fram, motsvarande 3000 ton. Mixen som levererades till Borås Energi bestod av 80 vikt-% energivedsflis och 20 vikt-%

kornhalm. Valet av kornhalm gjordes pga. god tillgänglighet av den typen av halm i närområdet. Även additiven blandades in vid sönderdelningen på terminalen.

Additiven blandades in i mixar om 2 vikts-% gips resp. 0,3 vikts-% svavel (på våt basis) till bränslemixen. Gipspulvret (tabell 3) levererades av Gips Recycling AB och svavlet av Enviloop.

Tabell 3. Analys av returkips pulver.

På torrt prov		
Klorid, Cl-, vikt-%	0,04	
Svavel, S, vikt-%	21,3	
Kväve, N, vikt-%	0,05	
Aluminium, Al, vikt-%	0,30	
Kisel, Si, vikt-%	1,13	
Järn, Fe, vikt-%	0,12	
Titan, Ti, vikt-%	<0,1	
Mangan, Mn, vikt-%	<0,1	
Magnesium, Mg, vikt-%	0,25	
Kalcium, Ca, vikt-%	25,5	
Barium, Ba, vikt-%	<0,1	
Natrium, Na, vikt-%	<0,1	
Kalium, K, vikt-%	0,31	
Fosfor, P, vikt-%	<0,1	

Vid försöket användes en kross av typen CBI 8400. För att få en bra blandning lastades en skopa energived och en halmbal varannan gång, se figur 1. För att få en bra inblandning av additiven vägdes dessa och placerades ovanpå halmbalen.



Figur 1. Sönderdelning av energived och halm på Lundby terminal.

Under försöket konstaterades relativt snabbt att denna kross ej snittade halmen tillräckligt utan bara rev isär balen, vilket resulterade i en för grov fraktion av halm. En grov fraktion resulterar i att bränslemixen blir voluminös och lätt hänger sig i bränslematningen till pannan. Denna typ av kross fungerar dock om halmen skulle ha snittats i samband med pressningen. I det fortsatta försöket användes sedan en vanlig halmsnittare och bränslet fick blandas med en skopa, se figur 2. Additiven placerades ovanpå halmbalen även vid användning av denna riv. Bränslemixen transporterades sedan med lastbil till Borås Energi.



Figur 2. Sönderdelning av halm i en halmsnittare.

3.3 Förbränningsförsök

Bränslemixen av halm och energived levererades till Borås Energi & Miljö under oktober månad 2014 för test i deras biobränslepannor, två pannor med planrost på 65 MW vardera. Biobränslet anländer med lastbilar och lastas av i högar. Bränslet fraktas sedan med hjullastare till tippfickor. På väg till biobränslelagret passerar bränslet en beredningsstation och här avskiljs metallskrot samt överstor flis med en magnetavskiljare respektive skivsäll. Den överstora flisen krossas sedan och återförs till bränslet där det mals till rätt storlek. Från lagret matas bränslet med ett underjordiskt transportband till en bränsletork. Torken drivs av ånga. Det torkade bränslet mats ut ur botten av torken och förs vidare med transportband till två bränslesilos och därifrån till de två ångpannorna för förbränning. Uppehållstiden i torken varierar mellan sex sekunder och sex minuter. Det testade bränslet kördes dock förbi torken och direkt till bränslesilon då halmen ej kan köras genom torken.

I biobränsleångpannorna förbränns skogsflis för att värma vatten till ånga. Ångan håller cirka 500°C och har 50 bars tryck när den lämnar pannan. Den används sedan till att driva två ångturbiner. Vid full last förbränns cirka 150 m³ biobränsle i timmen i de båda pannorna. Askan från förbränningen återförs till naturen.

Försöksplan

Fyra stycken försök genomfördes om ca 24 h vardera varav mätningar utfördes under dagtid (08.00-16.00). Under försöken hölls liknande driftsdata (ångdata 31-32 ton/h, motsvarande 25-26 MW för en panna) och samma bränslemix/sammansättning (se Tabell 4).

Tabell 4. Antal försök och bränslemixar.

Datum	Bränsle	Additiv	Ångdata ton/h
2014-10-06	Ref. 100 % energivedsflis		32
2014-10-07	Mix 80 vikt-% energivedsflis/20-vikt % kornhalm		31
2014-10-08	Mix 80-vikt % energivedsflis/20-vikt % kornhalm	0,3 vikts-% svavel	33
2014-10-09	Mix 80-vikt % energivedsflis/20-vikt % kornhalm	2 vikts-% gips	28*

* Sista försöket var effekten något lägre pga grövre rivet halm.

Provtagning emissioner, partiklar och beläggningar

Rökgaserna analyserades med avseende på SO₂, HCl, NO_x, CO, CO₂ och O₂. För att bestämma partiklarnas (mass)storleksfördelning m.a.p. aerodynamisk diameter såväl som kemisk sammansättning hos respektive partikelstorlek användes en lågtrycksimpaktor (LPI). En lågtrycksimpaktor ger masstorleksfördelningen under en viss tidsperiod, genom att man före mätning preparerar impaktorplattan med vägda polykarbonatfolier och efter insamling av partiklar väger ut folierna med insamlade partiklar. Varje polykarbonatfolie är infettad för att undvika att partiklar förloras på grund av "bounce off"-effekten, avstudsning. Partiklarna delas upp i 14 storleksfraktioner, impaktorsteg. Efter utvägning analyseras polykarbonatfolien med infångat innehåll kemiskt analys för att identifiera vilka

olika kemiska ämnen som återfinns i respektive impaktorsteg (d.v.s. partikelstorlek). Ett totalstoftprov togs ut i samband med impaktormätningen.

Under samtliga försök bestämdes beläggningstillväxten på en simulerad överhettartub under 4 h. Beläggningstillväxten kvantifierades med hjälp av ett s.k. "kallt finger", bestående av en luftkyld sond med löstagbara provringar. Den kylda yttemperaturen på respektive provring ställdes in på 430, 480 och 530 °C och bibehålldes under hela provtiden. Rökgastemperaturen där sonden var beläggen var runt 550 °C.

Kemisk analys genom röntgenfluorescens (XRF)

Samplade partikelprov från impaktorn och beläggningssondringarna analyserades m.a.p. dess kemiska sammansättning genom röntgenfluorescens (XRF). Ett antal beläggningar analyserades också m.h.a. XRD-analys för att identifiera kristallina faser i proverna.

Bränsle, botten-och flygaskprover

Bränsleprov, flygaskprov och bottenaskprov togs ut för torr aska under senare delen av provperioden för varje försök och ett generalprov sammanställdes efter varje försök. Proverna analyserades enligt standardmetoder på SP:s ackrediterade bränslelaboratorium (tabell 5).

Tabell 5. Metoder för bränsle och askanalyserna.

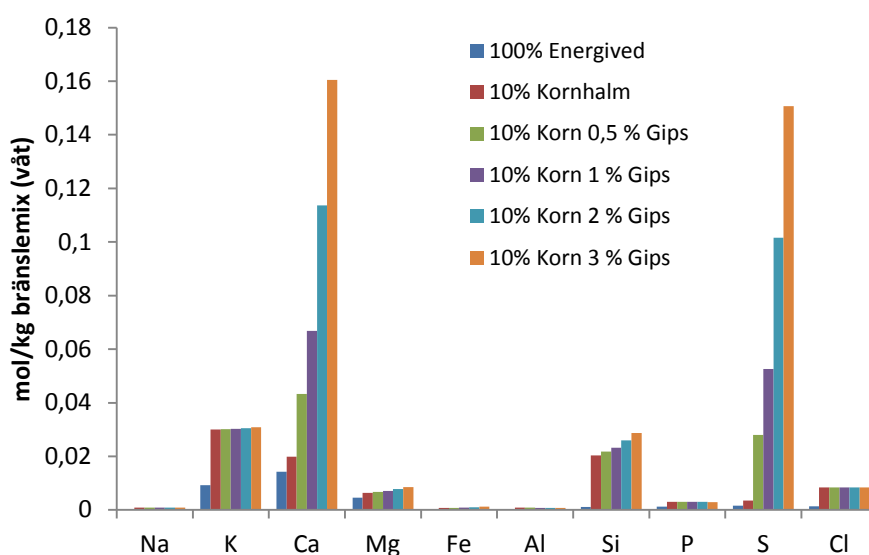
Bränsleanalys	Metod
Total fukt:	CEN/TS 14774-2
Aska:	CEN/TS 14775
Svavel:	CEN/TS 15289 (svavelanalysator)
Klor:	CEN/TS 15289 A (jonkromatografi)
Kol, väte, kväve:	CEN/TS 15104
Syre:	Beräknat som differens
Värmevärde:	CEN/TS 14918 (likvärdig med ISO 1928)
Huvudelement: - Al, Si, Fe, Mn, Ti, Ca, Mg, Ba, Na, - K, P	mod. ASTM D 3682 (ICP-OES)
Spårelement: - As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn, Mo	mod. ASTM D 3683
Askanalys	Metod
Svavel:	SS 187186
Lakbar klorid:	Lakning- kvantifiering med jonkromatograf mod. ASTM D 3682 (ICP-OES)
Huvudelement: - Al, Si, Fe, Mn, Ti, Mg, Ca, Ba, Na, K, P	mod. ASTM D 3683 (ICP-OES)
Spårelement: - As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn, Mo	

4 Resultat & Diskussion

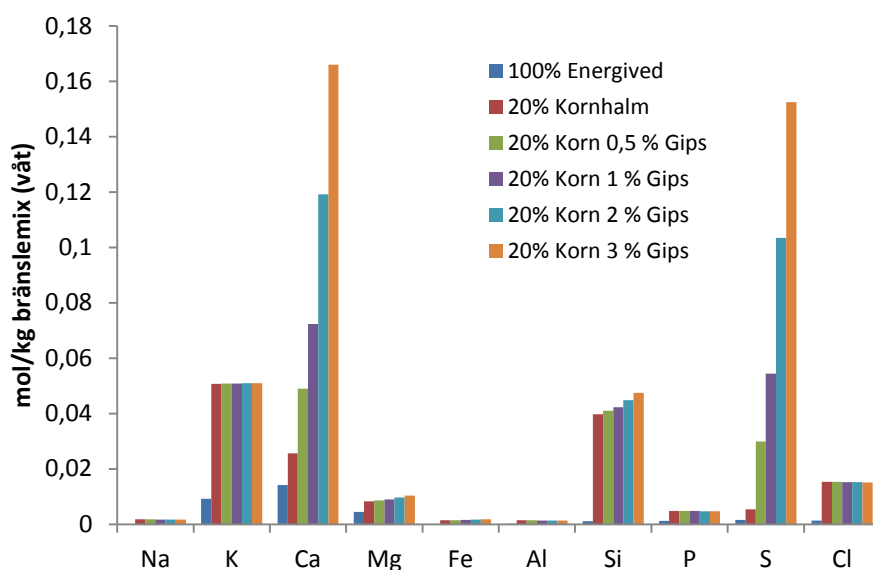
4.1 Termokemiska modellberäkningar

4.1.1 Sammansättning hos bränslemixar - askbildande huvudelement

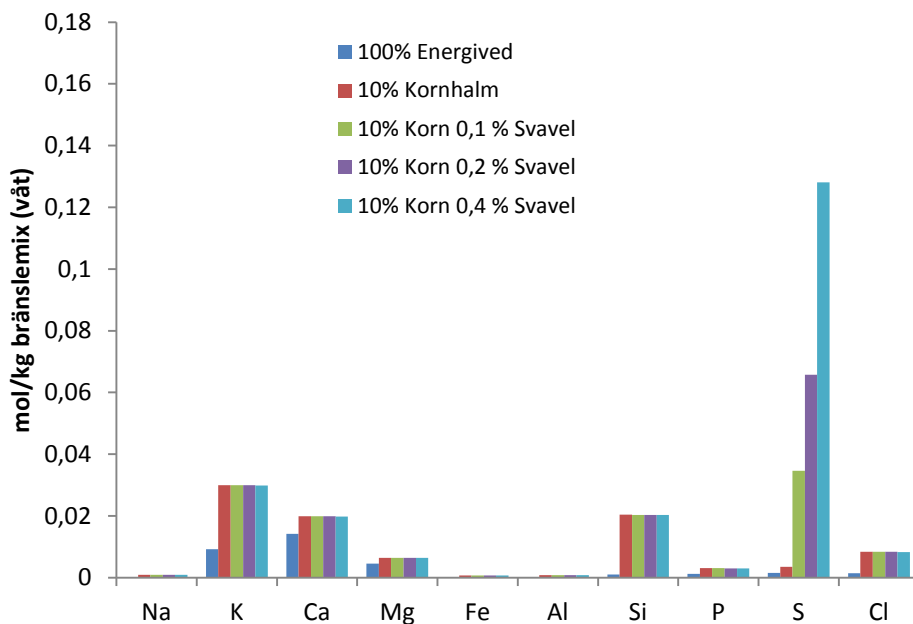
Som utgångspunkt för val av inblandningsgrader av respektive additiv i respektive bränslemix sammanställdes olika potentiella sammansättningar hos olika bränslemixar på molbasis inför de termokemiska beräkningarna (se figur 3-6 nedan).



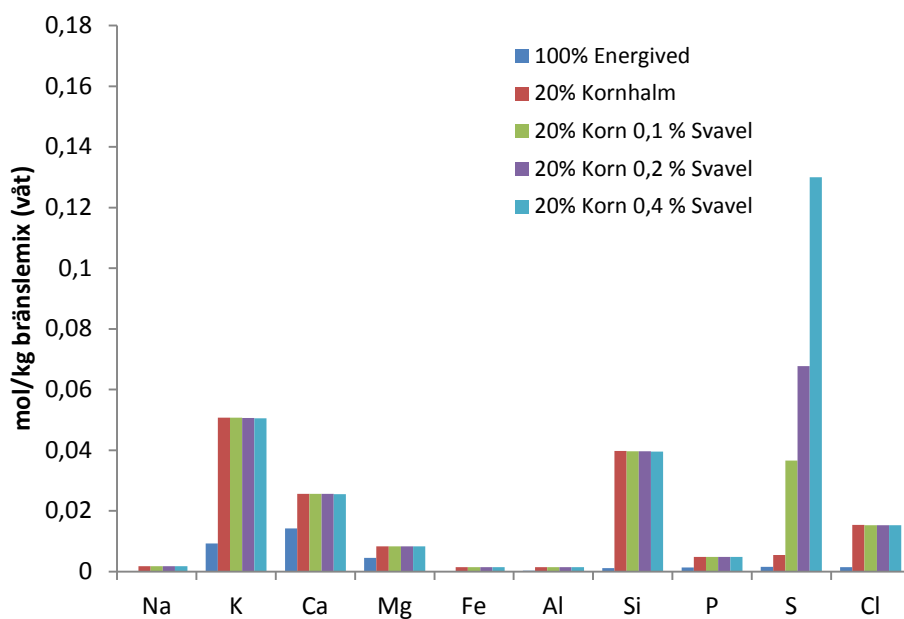
Figur 3. Skillnader i sammansättning m a p askbildande huvudelement hos energived och bränslemixar med inblandning av 10 vikts-% kornhalm och olika inblandningsgrader av gips (på våt basis).



Figur 4 Skillnader i sammansättning m a p askbildande huvudelement hos energived och bränslemixar med inblandning av 20 vikts-% kornhalm och olika inblandningsgrader av gips (på våt viktsbasis).



Figur 5 Skillnader i sammansättning m a p askbildande huvudelement hos energived och bränslemixar med inblandning av 10 vikts-% kornhalm och olika inblandningsgrader av elementärt svavel (på våt viktsbasis).



Figur 6 Skillnader i sammansättning m a p askbildande huvudelement hos energived och bränslemixar med inblandning av 20 vikts-% kornhalm och olika inblandningsgrader av elementärt svavel (på våt viktsbasis).

Av figurerna 3 och 4 framgår att halten kisel, kalium och klor i bränslemixen ökar kraftigt vid inblandning av 10- och 20 vikts-% kornhalm till energived. Vid 10% inblandning av kornhalm till energivedsprovet krävs en gipsinblandningsgrad om 0,5 vikts-% för att nå liknande svavel- och kalciumhalter som kaliumhalten i bränslemixen. För att nå liknande svavel- och kalciumhalter som kaliumhalter vid 20% inblandning av kornhalm krävs en gipsinblandningsgrad om 1 vikts-%. Av figurerna 5 och 6 framgår att inblandningsgrader om 0,1 respektive 0,15 vikts-% av

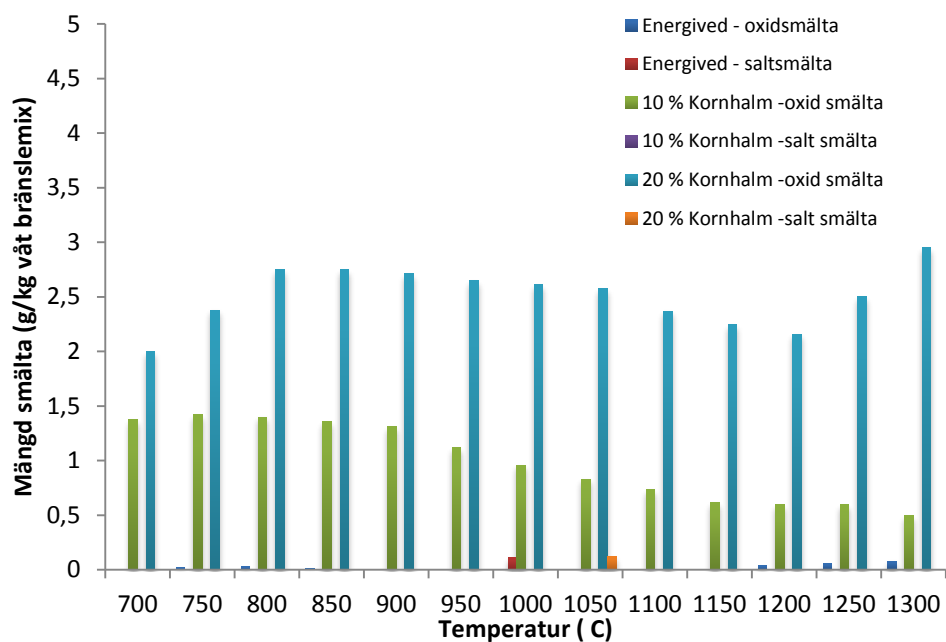
elementärt svavel behövs för att uppnå likande svavelhalter som kaliumhalter i bränslemixar innehållande 10 respektive 20 vikts-% kornhalm i energived.

4.1.2 Beräknade/uppskattade slaggningstendenser utifrån de termokemiska modellberäkningarna

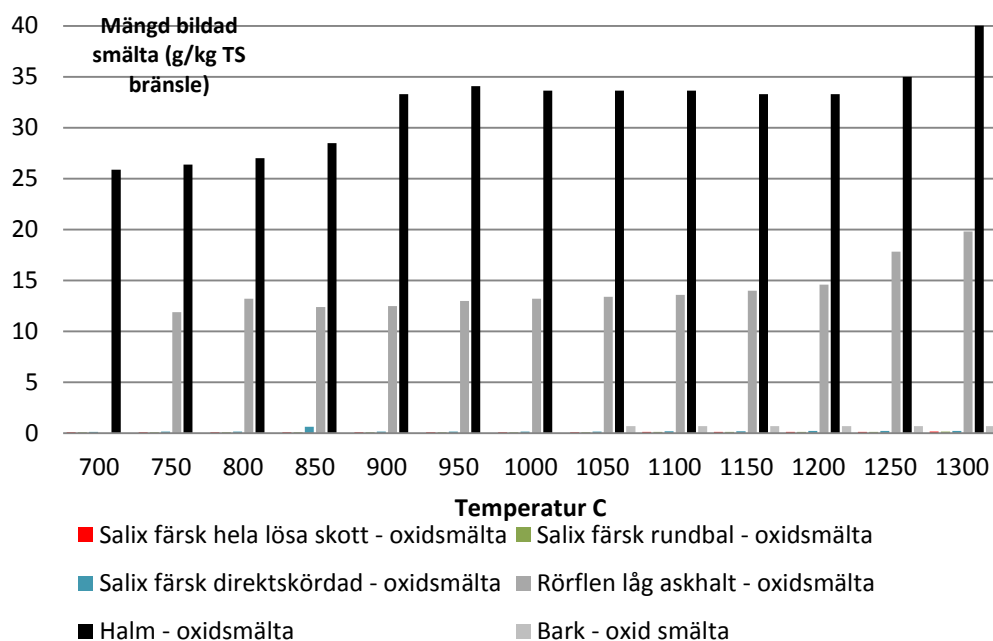
I tidigare arbeten har diskussioner förts om de mekanismer som ligger bakom slaggningssprocesserna vid förbränning av biobränslen med relativt lågt såväl som relativt högt innehåll av fosfor. (Boström, 2002, Gilbe, 2008 a,b, Lindström, 2007, Öhman, 2004). Resultaten från dessa arbeten pekar mot att det under själva utbränningsförloppet i och på de enskilda bränslepartiklarna bildas kaliumsilikat respektive kaliumfosfatrika smältor i vilka omkringliggande kalcium- och magnesiumföreningar kan lösas in. Tillgången till kisel, antingen i form av mer reaktivt (i växters organiska matris) och/eller sandpartiklars ytor, alternativt fosfor, är en förutsättning för att dessa silikat- respektive fosfatmältor initialt skall bildas. Dessa silikat och fosfatrika smältor föreslås vara en förutsättning för bildandet av slagg hos biobränslen. Tillgången till kalcium och magnesium minskar dock problematiken vad gäller slaggbildning då dessa ämnen markant höjer smälttemperaturen hos den bildade smältan. Att genom termokemiska modellberäkningar uppskatta mängden smält aska (särskilt s.k. oxidsmältor som innehåller silikater alternativt fosfater) under förbränningsförloppet är därför intressant för att bedöma ett bränsle/bränslemix slaggningstendens. Den smälta askan kan vid förbränning av biobränslen antingen bestå av en saltsmälta (t. ex en blandning av smält K_2SO_4 , KCl , K_2CO_3) och/eller en oxidmälta där olika oxider, fosfater och silikater bildar en smälta. Saltsmältorna är lågviskösa och är därför inte så klubbiga emedan oxidsmältorna är högviskösa och är därför mer klubbiga och därmed mer slaggningssbenägna. I förbränningssammanhang är det framförallt oxidsmältorna som gett upphov till slaggbildningen (Gilbe, 2008a, Boström, 2002). I tidigare arbeten har därför mängden bildad oxidsmälta bestämts och detta modelleringsförfarande har gett god kvalitativ överensstämmelse med slaggningstendenser som bestämts i förbränningsförsök (Gilbe, 2008b, Näzelius, 2013). I beräkningarna har både förekomsten av en salt- och oxidmälta predikterats.

4.1.3 Effekt av inblandning av kornhalm i energived

Av figur 7 framgår att mängden bildad oxid- såväl som saltsmälta för energivedsprovet är mycket låg inom hela det studerade temperaturintervallet, d.v.s. provet har mycket låg uppskattad slaggningstendens. Vid inblandning av 10- respektive 20 vikts-% av kornhalmsprovet ökar mängden uppskattad bildad mängd oxidsmälta till 1- respektive drygt 2,5 gram/kg för våt bränslemix vid en temperatur av 1000 °C. I figur 8 redovisas resultat från beräkningar för tidigare studerade prov d.v.s. för typisk vetehalm, salix, bark och rörflen. Omräknat till 50% fukthalt så ger tidigare studerade rörflensprov och vetehalmsprov betydligt högre mängder oxidsmälta per kg bränsle, d.v.s. 6 resp. 16 g oxidsmälta/kg våt bränsle (50% fukt). Inblandning av 10 och 20 vikts-% kornhalm till energived ger dock mer mängd oxidsmälta/kg våt bränslemix än för tidigare studerade bark och salixprover. Utifrån dessa smältauppskattningar så torde slaggningstendensen hos bränslemixar innehållande kornhalmsinblandningar därför vara högre än för typiska bark och salixfraktioner.



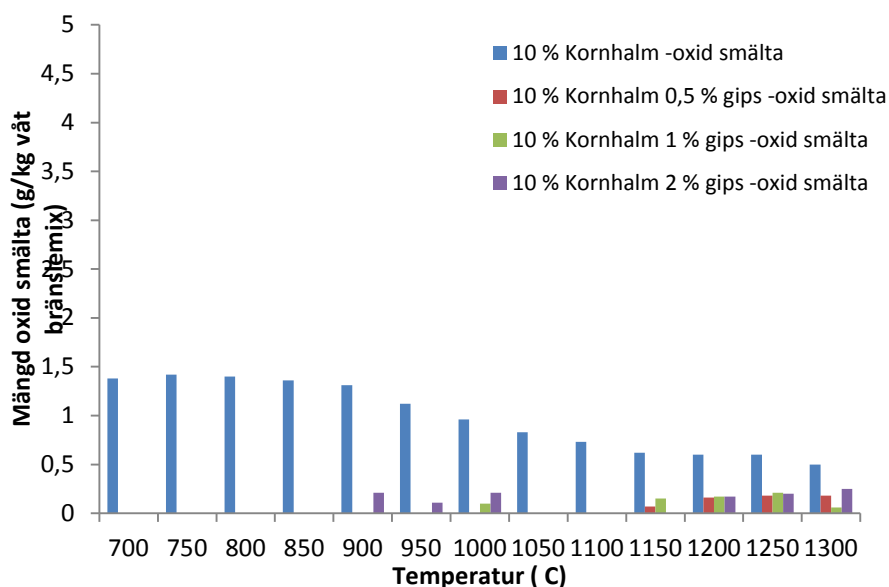
Figur 7. Beräknad mängd bildad oxid- och saltsmälta för ren energived och vid inblandning av 10- respektive 20 vikts-% kornhalm på våt basis.



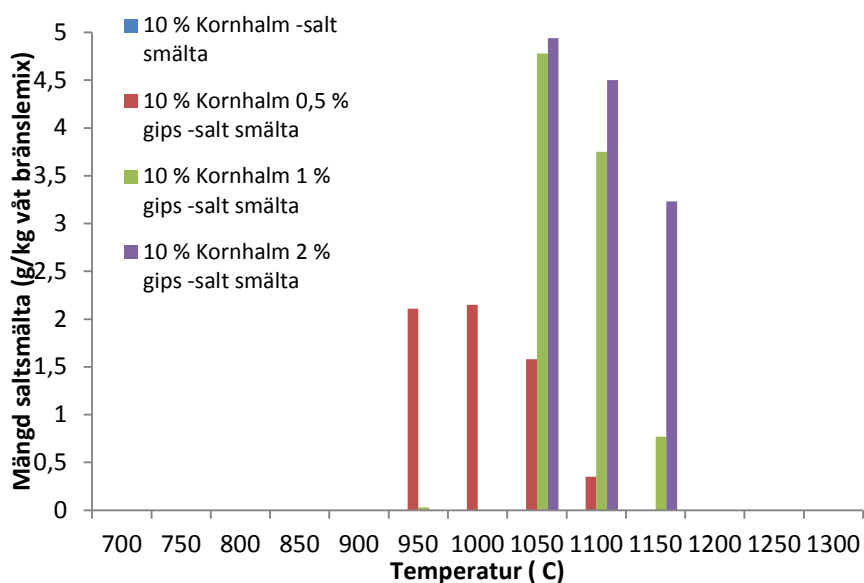
Figur 8. Beräknad mängd bildad oxidsmälta (g/kg TS) för olika tidigare studerade bränsleprov (100% salix 2 prover (Paulrud, Öhman, 2014) 100% rörflen, 100% vetehalm och 100% bark) (Piotrowska, 2013).

4.1.4 Effekt av inblandning av gips till bränslemixarna

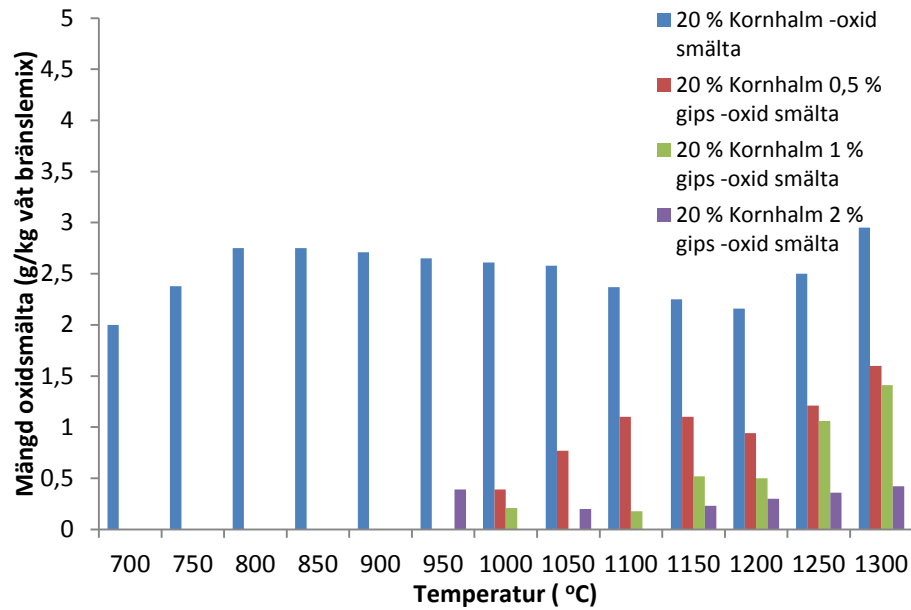
Av figur 9 framgår att mängden bildad oxidsmälta reduceras vid inblandning av gips. Anledningen till detta är att kalium återfinns i fasta sulfater (K_2SO_4 , $K_2Ca_2(SO_4)_3$) i det lägre temperaturintervallet och i saltsmältor som domineras av K^+ , Ca^{2+} och SO_4^{2-} i intervallet 950-1150 °C (se figur 10) samt att stabila fasta kalciumsilikater dominerar vid temperaturer över 1200 °C (p.g.a. Ca tillförseln via gipset). Anledningen till att saltsmältorna uppkommer vid högre temperaturer vid de högre gipsinblandningarna är troligen att den fasta fasen $K_2Ca_2(SO_4)_3$ är mer stabil vid dessa inblandningsgrader.



Figur 9. Beräknad mängd bildad oxidsmälta vid inblandning av gips (% på våt bränslemix basis) till bränsleblandningen innehållande 10 vikts-% kornhalm (våt basis).

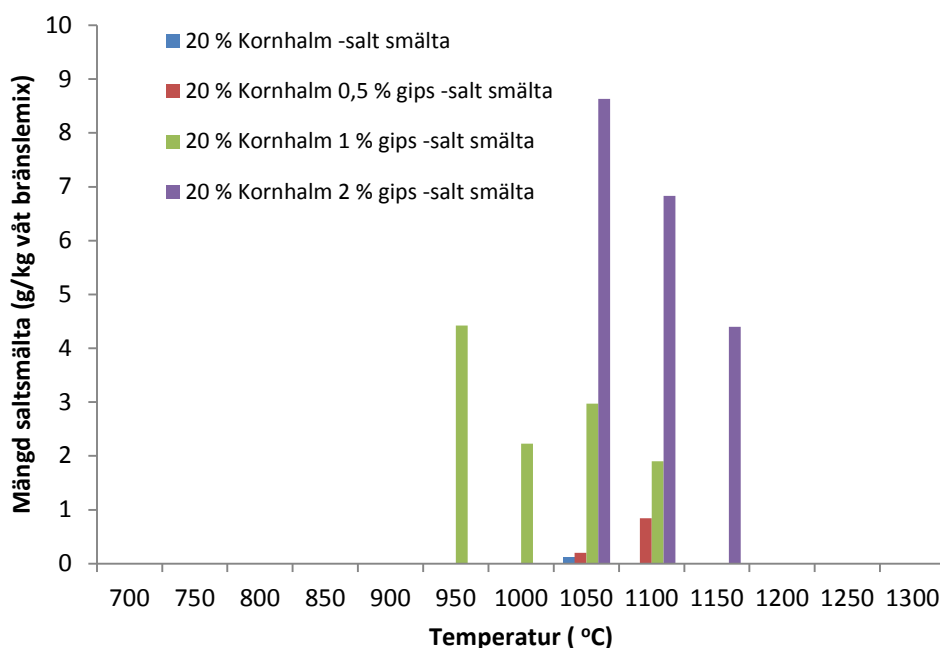


Figur 10. Beräknad mängd bildad saltsmälta vid inblandning av gips (% på våt bränslemix basis) till bränsleblandningen innehållande 10 vikts-% kornhalm (våt basis).



Figur 11. Beräknad mängd bildad oxidsmälta vid inblandning av gips (% på våt bränslemix basis) till bränsleblandningen innehållande 20 vikts-% kornhalm (våt basis).

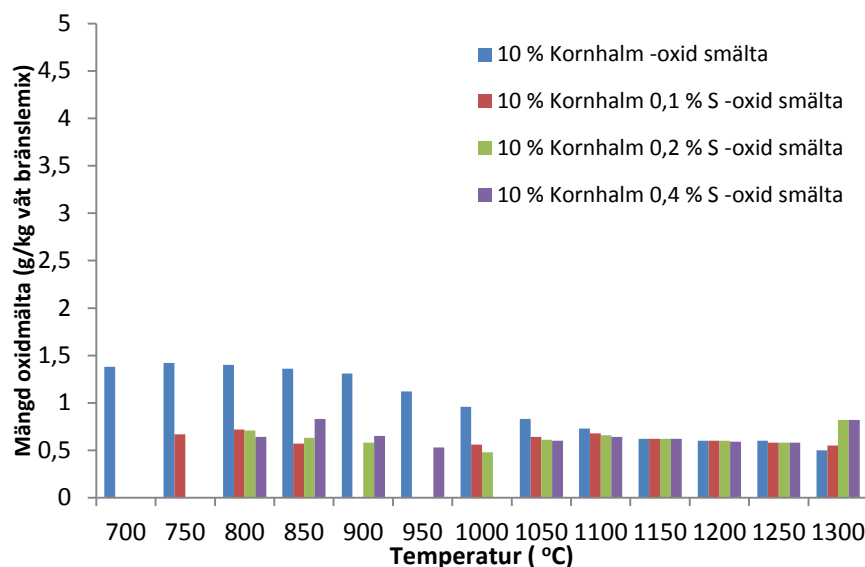
Av figur 11 framgår också att mängden bildad oxidsmälta reduceras vid inblandning av 0,5% gips till bränslemixen innehållande 20 vikts-% kornhalm. Anledningen till detta är att kalium återfinns i fasta sulfater (K_2SO_4) i det lägre temperaturintervallet samt att mängden stabila fasta kalciumsilikater ökar vid det högre temperaturintervallet. Mängden bildad oxidsmälta reduceras ännu kraftigare vid de högre inblandningsgraderna av gips. Anledningen till detta är att kalium återfinns i fasta sulfater (K_2SO_4 , $K_2Ca_2(SO_4)_3$) i det lägre temperaturintervallet och i saltsmältor som domineras av K^+ , Ca^{2+} och SO_4^{2-} i intervallet 950-1150 °C (se figur 12) samt att stabila fasta kalciumsilikater dominerar vid temperaturer över 1200 °C (p.g.a. Ca tillförseln via gipset). Anledningen till att saltsmältorna uppkommer vid högra temperaturer vid den högre gipsinblandningen (2 %) är troligen att den fasta fasen $K_2Ca_2(SO_4)_3$ är mer stabil vid denna inblandningsgrad.



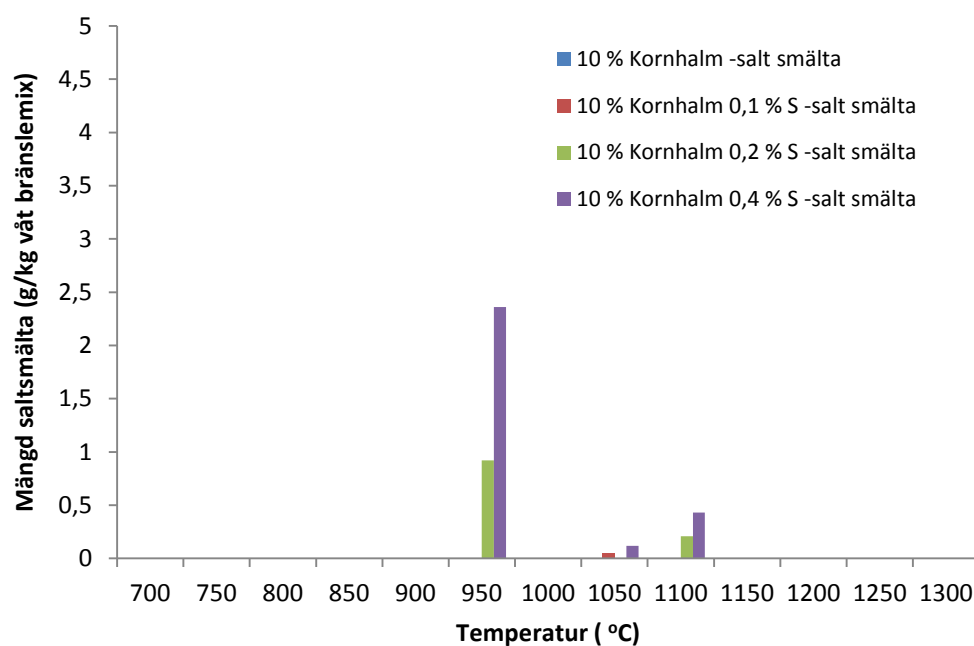
Figur 12. Beräknad mängd bildad saltsmälta vid inblandning av gips (% på våt bränslemix basis) till bränsleblandningen innehållande 20 vikts-% kornhalm (våt basis).

4.1.5 Effekt av inblandning av elementärt svavel till bränslemixarna

Mängden oxidsmälta elimineras vid det lägre temperaturintervallet (< 800 °C) och halveras i temperaturintervallet mellan 800-1000 °C vid inblandning av svavel till bränsleblandningen innehållande 10 vikts-% kornhalm (figur 13). Anledningen till detta är att kalium återfinns i fasta sulfater (K_2SO_4 , $K_2Ca_2(SO_4)_3$) i det lägre temperaturintervallet och i saltsmältor som domineras av K^+ och SO_4^{2-} i intervallet runt 950 °C (se figur 14)

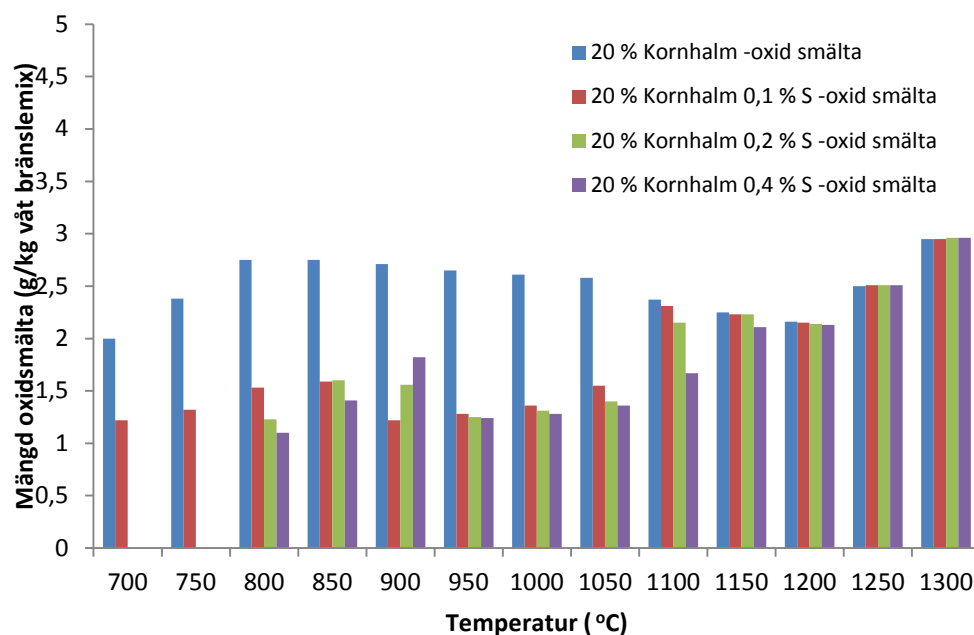


Figur 13. Beräknad mängd bildad oxidsmälda vid inblandning av elementärt svavel (% på våt bränslemix basis) till bränsleblandningen innehållande 10 vikts-% kornhalm (våt basis).

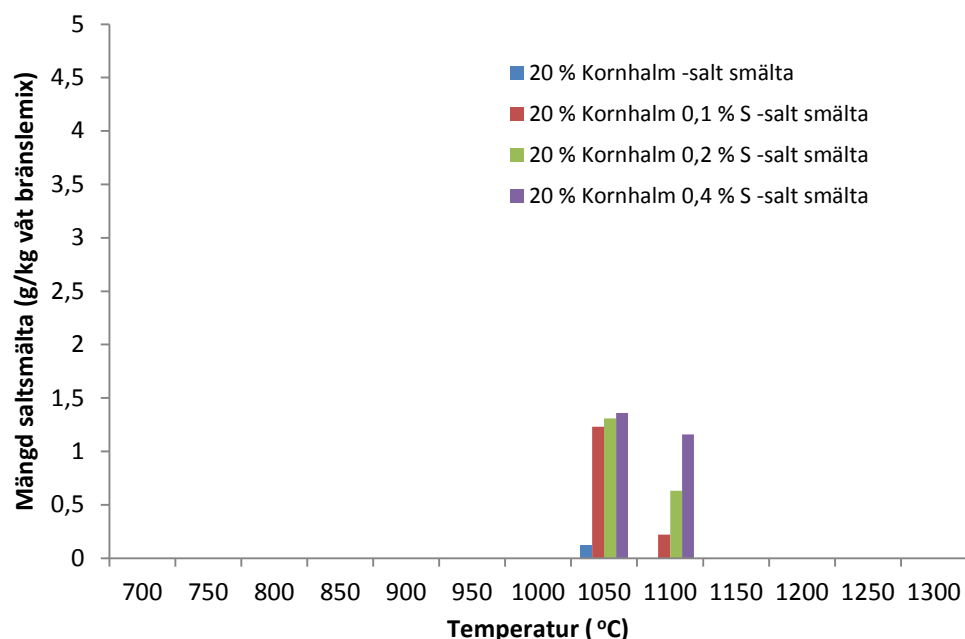


Figur 14. Beräknad mängd bildad saltsmälda vid inblandning av elementärt svavel (% på våt bränslemix basis) till bränsleblandningen innehållande 10 vikts% kornhalm (våt basis).

Mängden oxidsmälda halveras vid det lägre temperaturintervallet (< 1100 °C) vid inblandning av svavel till bränsleblandningen innehållande 20 vikts-% kornhalm (se figur 15). Anledningen till detta är att kalium återfinns i fasta sulfater (K_2SO_4 , $K_2Ca_2(SO_4)_3$) i det lägre temperaturintervallet och i saltsmältor som domineras av K^+ och SO_4^{2-} i intervallet runt 1050-1100 °C (se figur 16).



Figur 15. Beräknad mängd bildad oxidsmälda vid inblandning av elementärt svavel (% på våt bränslemix basis) till bränsleblandningen innehållande 20 vikts-% kornhalm (våt basis).



Figur 16. Beräknad mängd bildad saltsmälda vid inblandning av elementärt svavel (% på våt bränslemix basis) till bränsleblandningen innehållande 20 vikts-% kornhalm (våt basis).

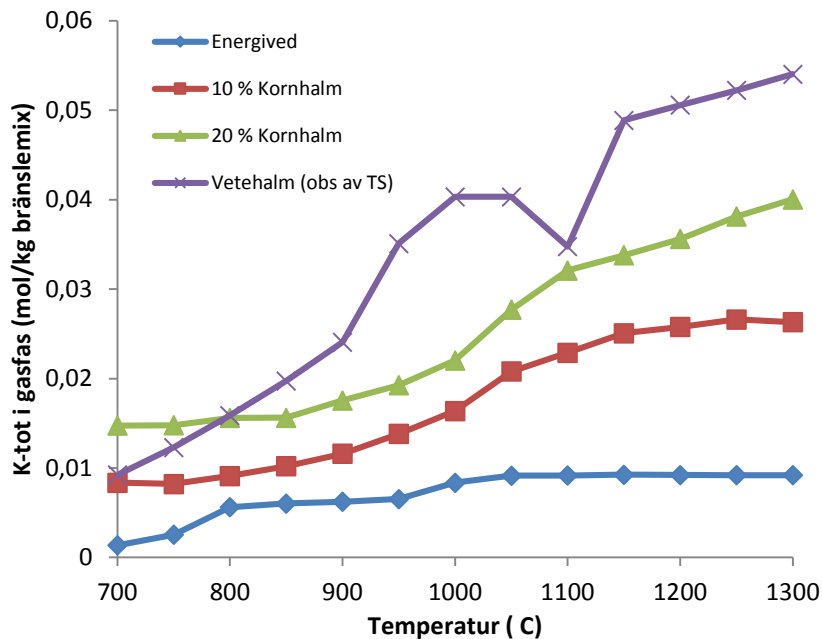
4.1.6 Uppskattade/beräknade beläggningstendenser

Flertalet tidigare utförda arbeten har visat både på betydelsen av mängden smält material hos den finpartikulära fraktionen för beläggningstillväxten (Zevenhoven-Onderwater, 2001) i anläggningars konvektionsdel och på betydelsen av smälta klorinnehållande alkaliföreningar för klorinducerad korrosion (Nielsen, 2000) vid nyttjande av biobränslen. Den finpartikulära fraktionen domineras av kaliumföreningar och om mängden kaliumföreningar som avgår till gasfas i eldstaden/på rostern kan reduceras bör detta generellt leda till minskad

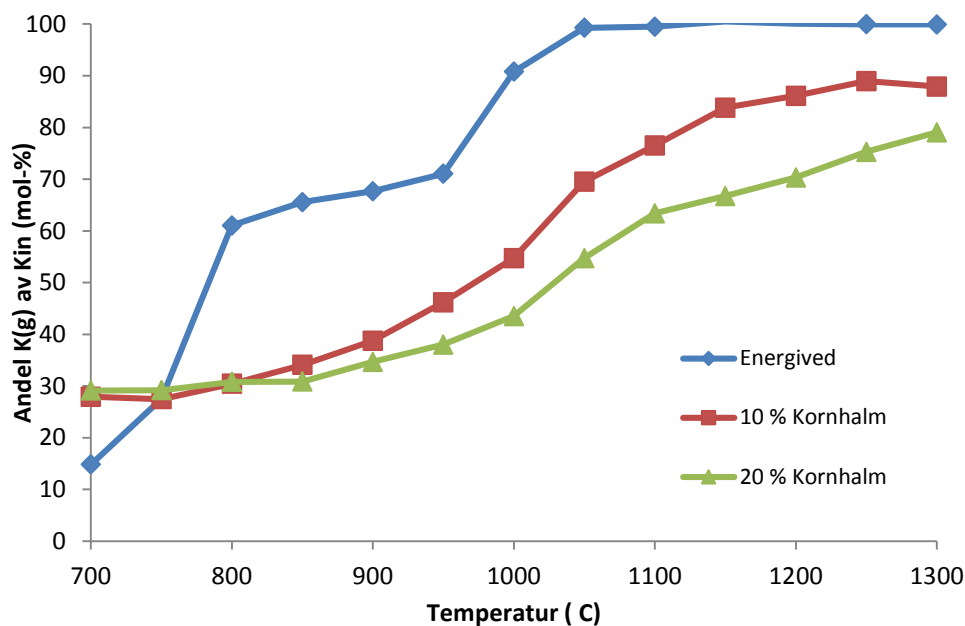
belägningsproblematik. Mängden/andelen av $K_{tot}(g)$ som föreligger som $KCl(g)$ är också intressant att beräkna då en hög andel KCl anses öka risken för såväl belägningsbildningen som högtemperaturkorrosion. Kvoten $K_2SO_4(g)/KCl(g)$ anses också vara av betydelse då en sulfatisering av bildad KCl ofta anses vara av godo för att reducera uppkomsten av högtemperaturkorrosion på t ex överhettare (Henderson, 2004). För att uppskatta effekten av additivinblandning till de olika bränslemixarna på belägningsbildningen bestämdes såväl mängden som andelen kalium som avgick till gasfasen (dessa kan sedan kondensera till fina partiklar alternativt på tubylor) vid varierande processtemperatur. Andelen K_{tot} i gasfas som föreligger som $KCl(g)$ och kvoten $K_2SO_4(g)/KCl(g)$ i bränslet har också beräknats och anges i resultaten. Då mängden Na som återfinns i bränslena/bränslemixen är ca 100 ggr lägre än mängden K så redovisas ej fördelningen av Na -komponenter i gasfas.

4.1.7 Effekt av inblandning av kornhalm i energived

Av figur 17 framgår att den beräknade/uppskattade mängden av kalium som övergår till gasfasen nära tredubblas vid inblandning av 20 vikts-% kornhalm till energived vid 1000 °C i jämförelse vid ren energivedseldning. De uppskattade mängderna är i paritet med ren vetehalmseldning enligt tidigare beräkningar. Observera att mängderna vid vetehalmseldning anges på torr råvara.



Figur 17 Beräknad mängd kalium som återfanns i gasfas vid varierande temperatur för energived och vid inblandning av 10- respektive 20 vikts-% kornhalm på våt basis samt jämförelse med tidigare studerad rent vetehalmsprov (Piotrowska, 2013) (obs beräknad på torr basis).



Figur 18 Beräknade andelen av tillfört kalium i bränslet som återfinns i gasfas vid varierande temperatur för energived och vid inblandning av 10 resp 20 vikts-% kornhalm på våt basis.

Av figur 18 framgår att andelen kalium i bränslet som enligt beräkningarna övergår till gasfasen är högre för ren energived än för bränslemixarna med kornhalm. Det senare beror på att kalium binds till fasta faser (silikater) och smältor (oxidsmälta) i högre utsträckning hos bränslemixarna innehållande kiselrik kornhalm.

Andel tillfört kalium som föreligger som KCl (g)

Beräkningarna visar också att andelen av tillfört kalium i bränslet som föreligger som KCl i gasfas (över hela det studerade temperaturintervallet) är 13-15% för energived, 24-27% för bränslemix med 10% kornhalminblandning och 28-30% för bränslemix med 20% kornhalminblandning. Vid de högre temperaturintervallen (> 1100 °C) innebär detta att KOH(g) är den dominerande gasen innehållande kalium.

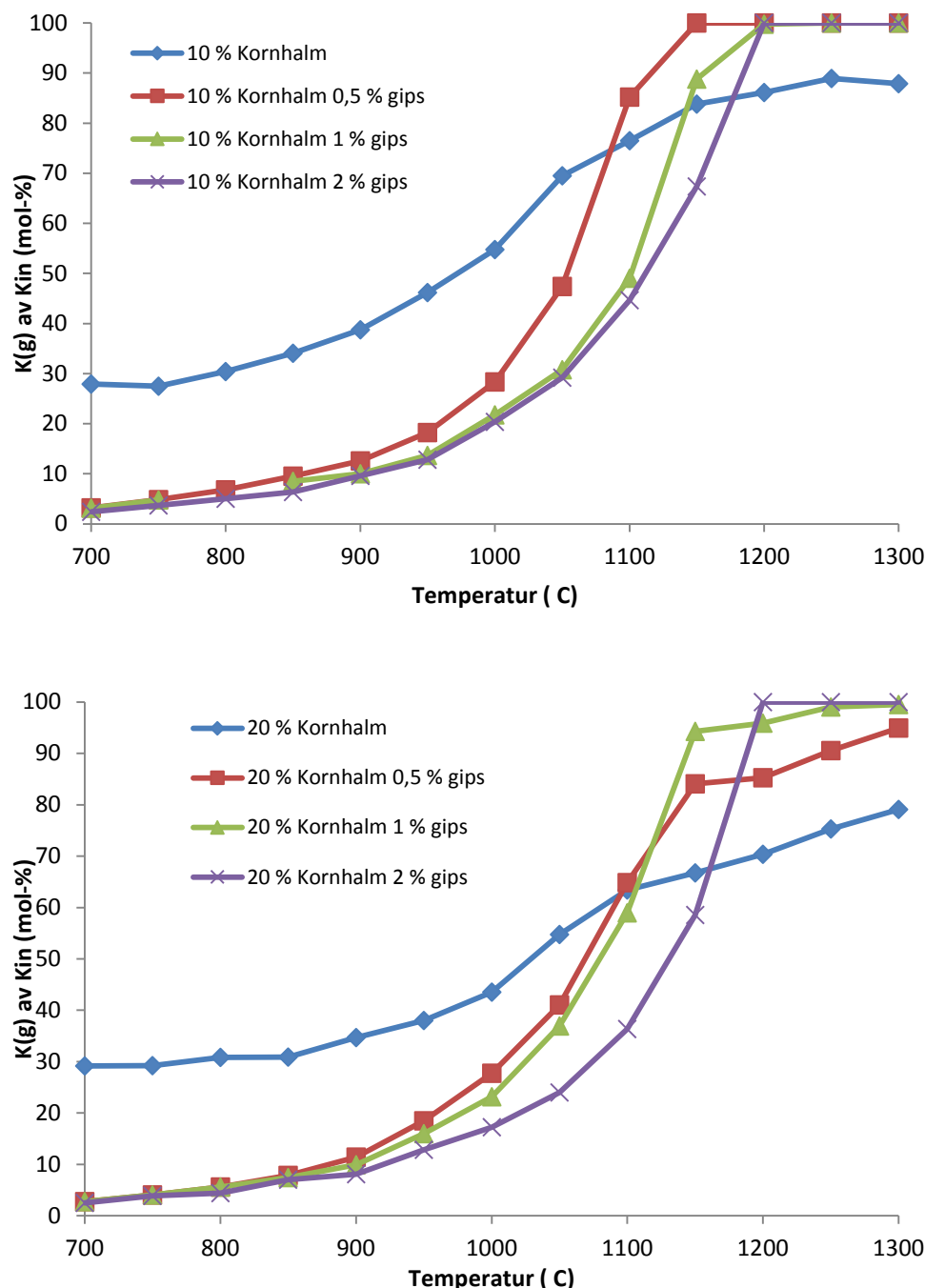
Kvoten $KCl(g)/K_2SO_4(g)$

Resultaten visar också att kvoten $KCl(g)/K_2SO_4(g)$ är som lägst 2-2,5 vid 1000-1050 °C för energived, 4 vid 1050 °C för 10 vikts-% kornhalminblandning och 7 vid 1050 °C för 20 vikts-% kornhalminblandning.

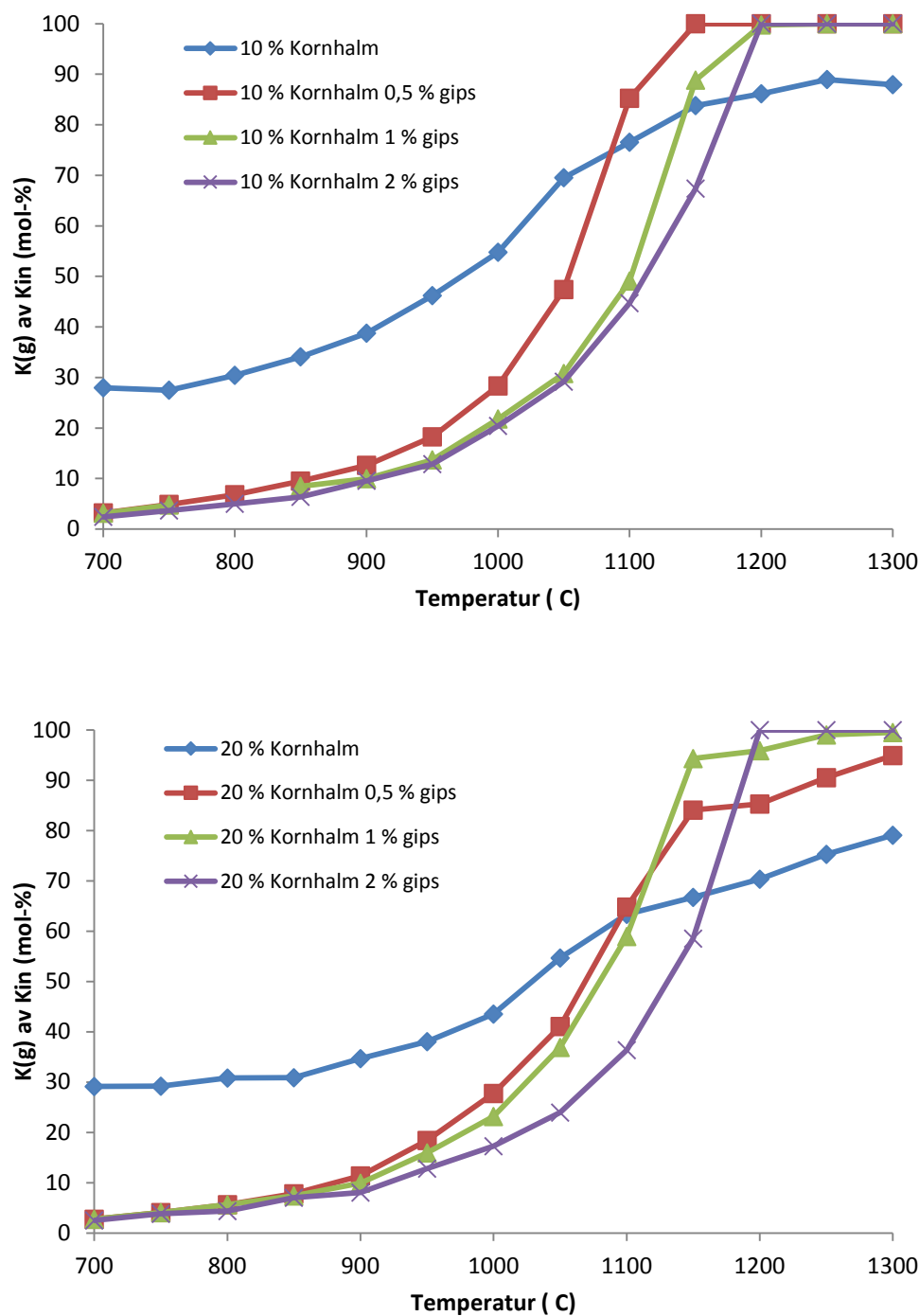
4.1.8 Effekt av inblandning av gips till bränslemixarna

Mängden och andelen kalium som återfinns i gasfas reduceras kraftigt i det lägre temperaturintervallet (< 1000 °C) vid inblandning av gips till bränslemixarna (se figur 19-20). Anledningen till detta är att kalium återfinns i fasta sulfater (K_2SO_4 , $K_2Ca_2(SO_4)_3$) i det lägre temperaturintervallet och i saltsmältor som dominerar av K^+ , Ca^{2+} och SO_4^{2-} i intervallet 950-1150 °C. Då saltsmältorna inte är särskilt stabila över 1000 °C så minskar uppbindningsgraden drastiskt över ca 1000 °C. Vid bränslemixer om 20 vikts-% kornhalm behövs en inblandningsgrad om 2% för att bibehålla höga uppbindningsgrader av kalium även vid temperaturer mellan 1000-1100 °C. Anledningen att kaliumhalten är högre vid gipsinblandning än utan vid

temperaturer över 1100 °C beror sannolikt på att det kalcium som tillsätts via gipset konkurrerar ut kalium från den bildade silikatsmälta och detta kalium avgår då till gasfasen. Anledningen att beräkningarna visar något mindre K-avgång vid högre inblandningsgrader är att saltsmältorna innehållande K är lite mer stabila vid de högra inblandningsgraderna. Den ökade K avgången vid det högre temperaturintervallet behöver inte nödvändigtvis leda till en ökning av korrosionsrisken då K (g) enligt beräkningarna föreligger som KOH.



Figur 19. Beräknad mängd kalium som återfinns i gasfas vid varierande temperatur utan och med inblandning av gips till bränslemixen bestående av 10 vikts-% kornhalm i energived (övre) och 20 vikts-% kornhalm i energived (nedre).



Figur 20. Beräknade andelen av tillfört kalium i bränslet som återfinns i gasfas (% på våt bränslemix basis) vid varierande temperatur utan och med inblandning av gips till bränslemixen bestående av 10 vikts-% kornhalm i energived (övre) och 20 vikts-% kornhalm i energived (nedre).

Andelen av tillfört kalium som föreligger som KCl (g)

Resultat från beräkningar med 10% kornhalm sinblandning visar att andelen av tillfört kalium i bränslet som föreligger som KCl i gasfas är 24-27% för bränslemix med 10% kornhalm inblandning, 3-25% vid 0,5 och 1% gips inblandning och 2-24% för bränslemixar med 2% gips inblandning. Vid de högre temperaturintervallen (>

1100 °C) innebär detta att KOH(g) är den dominerande gasspecien innehållande kalium. Vid temperaturer under 1100 °C så dominerar KCl (g).

Resultat från beräkningar med 20% kornhalmsinblandning visar att andelen av tillfört kalium i bränslet som föreligger som KCl i gasfas är 28-30% för bränslemix med 20% kornhalminblandning, 3-27% vid samtliga gipsinblandningsgrader. Vid de högre temperaturintervallen (> 1100 °C) innebär detta att KOH(g) är den dominerande gasspecien innehållande kalium. Vid temperaturer under 1100 °C så dominerar KCl (g).

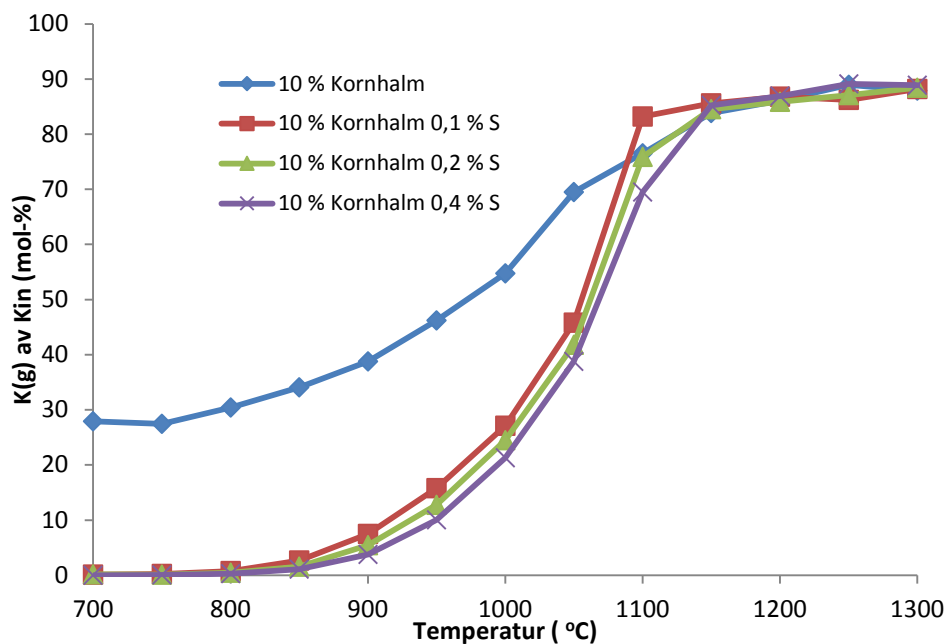
Kvoten $KCl(g)/K_2SO_4(g)$

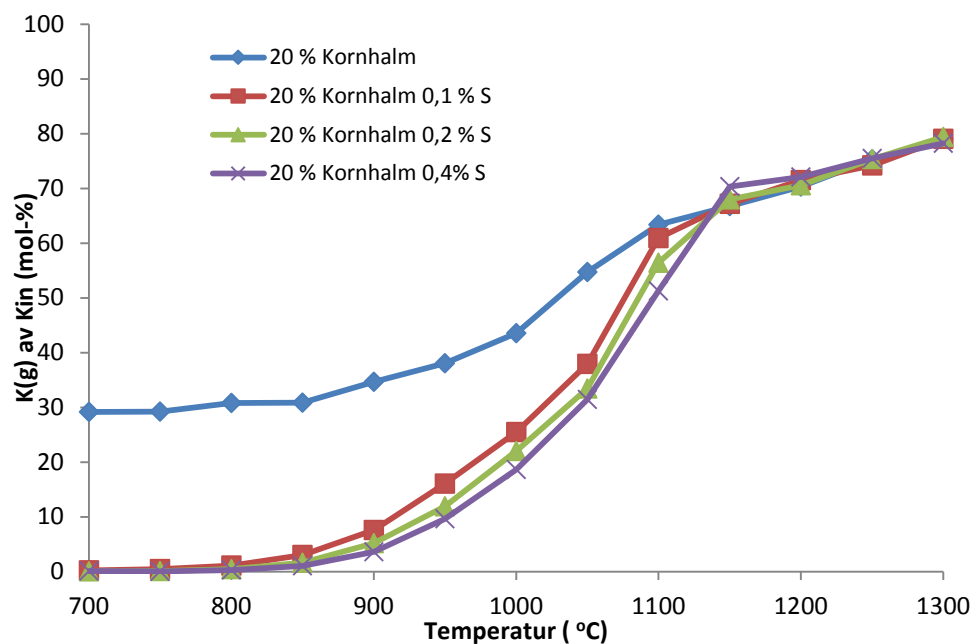
Kvoten $KCl(g)/K_2SO_4(g)$ är som lägst 4 vid 1050 °C för 10% kornhalminblandning, 2 vid 1100 °C vid inblandning av 0,5% gips till bränslemixen, 3 vid 1150 °C vid inblandning av 1% gips till bränslemixen och 4 vid 1150 °C vid inblandning av 2% gips till bränslemixen.

Kvoten $KCl(g)/K_2SO_4(g)$ är som lägst 7 vid 1050 °C för 20% kornhalminblandning, 3 vid 1100 °C vid inblandning av 0,5% gips till bränslemixen, 2 vid 1150 °C vid inblandning av 1% gips till bränslemixen och 2 vid 1200 °C vid inblandning av 2% gips till bränslemixen.

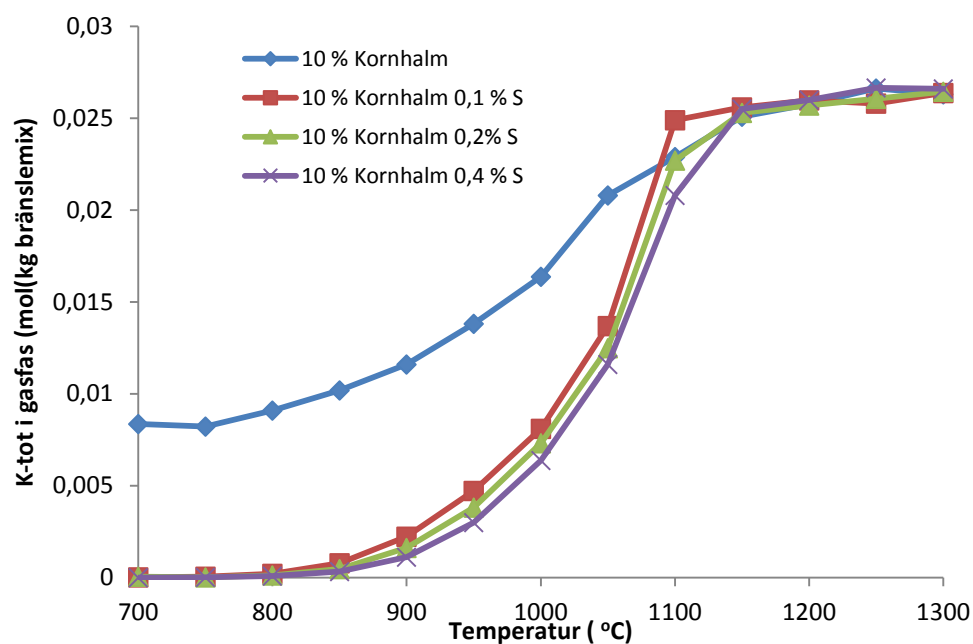
3.4.3 Effekt av inblandning av elementärt svavel till bränslemixarna

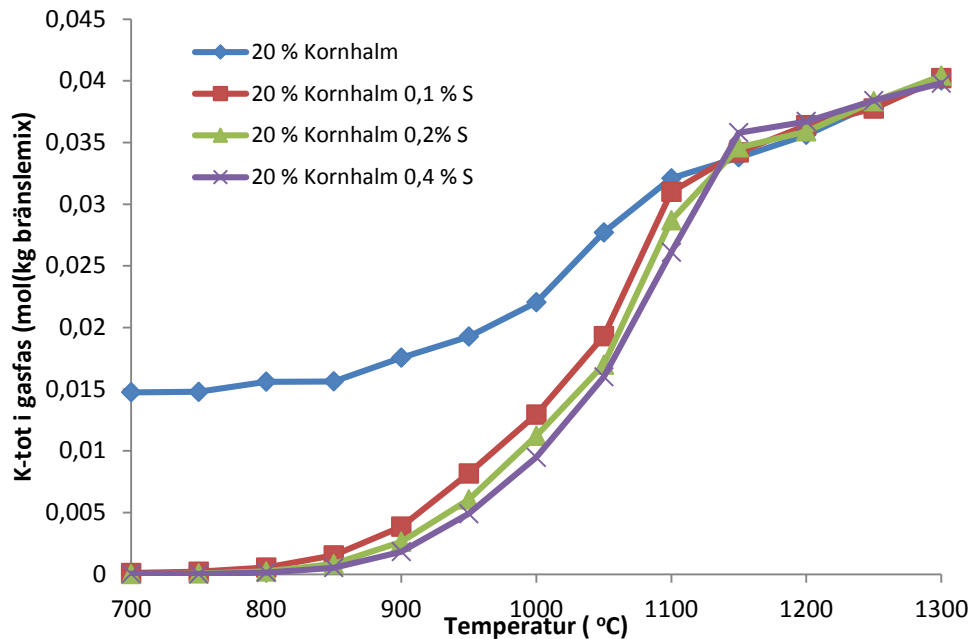
Andelen och mängden kalium som återfinns i gasfasen reduceras också vid inblandning av elementärt svavel (se figur 21-22). Kalium binds till fasta sulfater (K_2SO_4 , $K_2Ca_2(SO_4)_3$) i det lägre temperaturintervallet och i saltsmältor som domineras av K^+ och SO_4^{2-} i intervallet runt 1000-1100 °C. Teoretiskt behövs endast en inblandningsgrad om ett fåtal tiondels procent av svavel till bränslet för att er hålla signifikanta reduktionsgrader av kalium i gasfas för de studerade bränslemixarna.





Figur 21. Beräknad mängd kalium som återfinns i gasfas vid varierande temperatur utan och med inblandning av elementärt svavel till bränslemixen bestående av 10 vikts-% kornhalm i energived (övre) och 20 vikts-% kornhalm i energived (undre).





Figur 22. Beräknade andelen av tillfört kalium i bränslet som återfinns i gasfas (% på våt bränslemix basis) vid varierande temperatur utan och med inblandning av elementärt svavel till bränslemixen bestående av 10 vikts-% kornhalm i energived (övre) och 20 vikts-% kornhalm i energived (undre).

Andel tillfört kalium som föreligger som KCl (g)

Resultat från beräkningar med 10 vikts-% kornhalmsinblandning visar att andelen av tillfört kalium i bränslet som föreligger som KCl i gasfas är 24-27% och, 0-26% vid samtliga iblandningsgrader av svavel. Vid de högre temperaturintervallen (> 1100 °C) innebär detta att KOH(g) är den dominerande gasspecien innehållande kalium. Vid temperaturer under 1100 °C så dominerar KCl (g).

Resultat från beräkningar med 20 vikts-% kornhalmsinblandning visar att andelen av tillfört kalium i bränslet som föreligger som KCl i gasfas är 28-30% och 0-28% vid samtliga svavelinblandningsgrader. Vid de högre temperaturintervallen (> 1100 °C) innebär detta att KOH(g) är den dominerande gasspecien innehållande kalium. Vid temperaturer under 1100 °C så dominerar KCl (g).

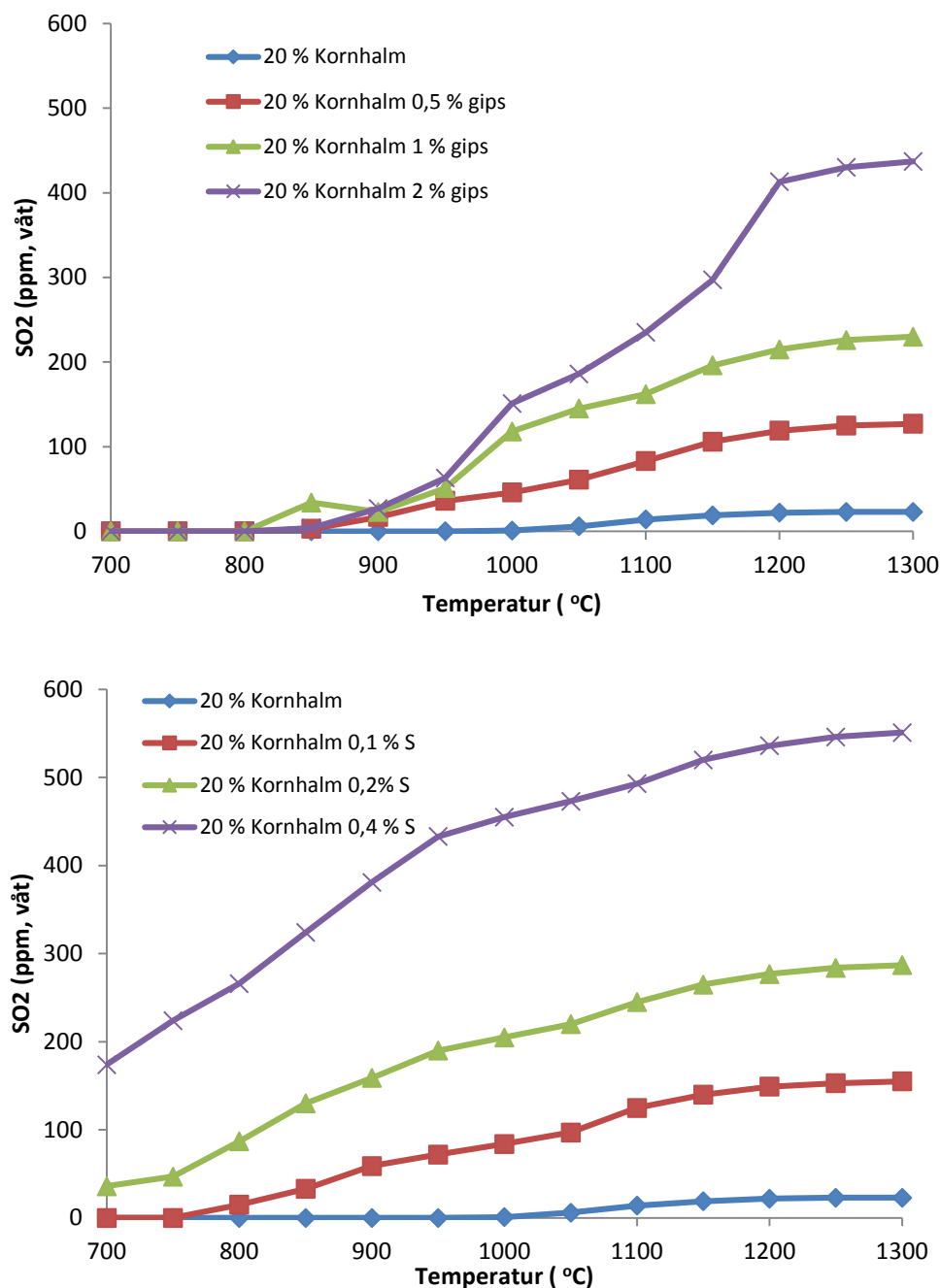
Kvoten $KCl(g)/K_2SO_4(g)$

Kvoten $KCl(g)/K_2SO_4(g)$ är som lägst 4 vid 1050 °C för 10 vikts-% kornhalminblandning, 2 vid 1100 °C vid samtliga studerade inblandningsgrader av svavel till bränslemixen.

Kvoten $KCl(g)/K_2SO_4(g)$ är som lägst 7 vid 1050 °C för 20% kornhalminblandning, 3 vid 1100 °C vid samtliga studerade inblandningsgrader av svavel till bränslemixen.

4.1.9 Uppskattade/beräknade SO_2 -halter i ej renad rökgas

Resultaten från beräkningarna visar på risken att höga SO_2 -halter eventuellt kan erhållas i de ej renade rökgaserna vid de högre inblandningsgraderna, särskilt vid inblandning av elementärt svavel.



Figur 23. Jämviktshalter av SO₂ i utgående ej renade rökgaser vid gips- (övre) respektive svaveltillsats (undre) till bränslemixen innehållande 20 vikts-% kornhalm i energived.

4.1.10 Rekommendationer – additivinblandning

Resultaten från de termokemiska modellberäkningarna utförda vid ett normalt luftöverskott och fullständig omblandning mellan de aktuella bränslemixarnas askbildande huvudelement och gipspartiklar respektive svavelpartiklar visar på den teoretiska möjligheten att vid inblandning av såväl gips som svavel borde kunna reducera slaggnings-tendensen och mängden kalium som går till gasfas. Detta genom att binda upp kalium till kondenserade kaliumsulfatbaserade

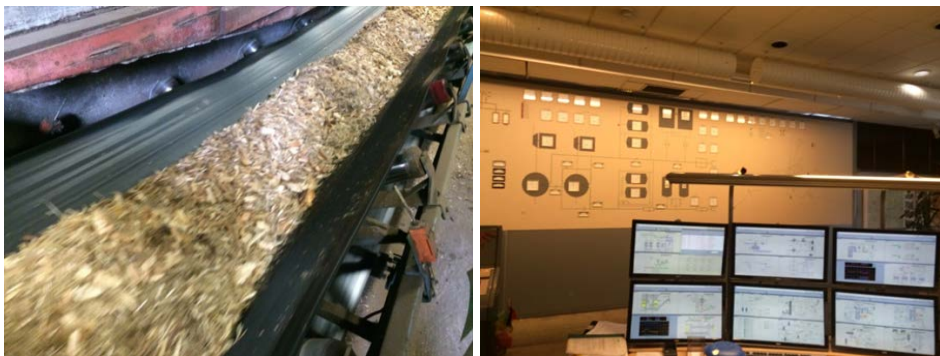
partiklar/smältor d v s potentiellt kunna reducera beläggingsbildnings-/korrosionsrisken på överhettare och andra konvektionsytor.

Teoretiskt (enligt de utförda beräkningarna) behövs inblandningsgrader om drygt 1 % gips och ett fåtal tiondelsprocent av svavel till den bränslemix som innehåller 20 vikts-% kornhalm för att uppnå kraftiga effekter. Praktiskt kan det behövas högre inblandningsgrader p.g.a. att dessa beräkningar bygger på fullständig omblandning av bränsle och additiv d.v.s. allt gips och svavel som tillsätts förväntas delta i reaktioner vilket knappast är normalfallet i praktiken, särskilt inte för gipsfallet. Hänsyn har inte heller i beräkningarna tagits till att reducerade förhållanden delvis föreligger i rosterzonen. Det senare kan påverka uppsprickningen av gipset positivt vilket eventuellt skulle ge ökade positiva effekter d v s en ökad effektivitet av gipsinblandning redan vid lägre inblandningsgrader. Hänsyn kan också behöva tas till vilka SO₂-halter som kan tolereras i de ej rena rökgaserna vid val av slutgiltig inblandningsgrad.

4.2 Fullskaleförsök med halmmixar och additiv

Resultatet från fullskaleförsöken visade att bränslemixarna med 20 vikts-% halm överlag fungerade bra att hantera i anläggningens inmatningssystem. Halmen tenderade att fastna på vissa ställen och vissa omställningar fick göras för att minska risken för stopp. Halmen var relativt grovt riven och med en mer finhackad halm och en inblandningsgrad på 10-15 vikts-% är bedömningen att inmatningen bör fungera helt utan problem.

Genom att mixa in additiven i samband med sönderdelningen av halmen, d.v.s. där additiven tillsattes till riven tillsammans med bränslet lyckades inblandningen mycket bra. Vid försöken användes returkips som levererades i pulverform och svavlet levererades i form av små granuler.



Figur 24. Bränslematningen och kontrollrumet Borås energi, försök med halmmix.

4.2.1 Effekt av halm och additiv på bränslets kemiska sammansättning

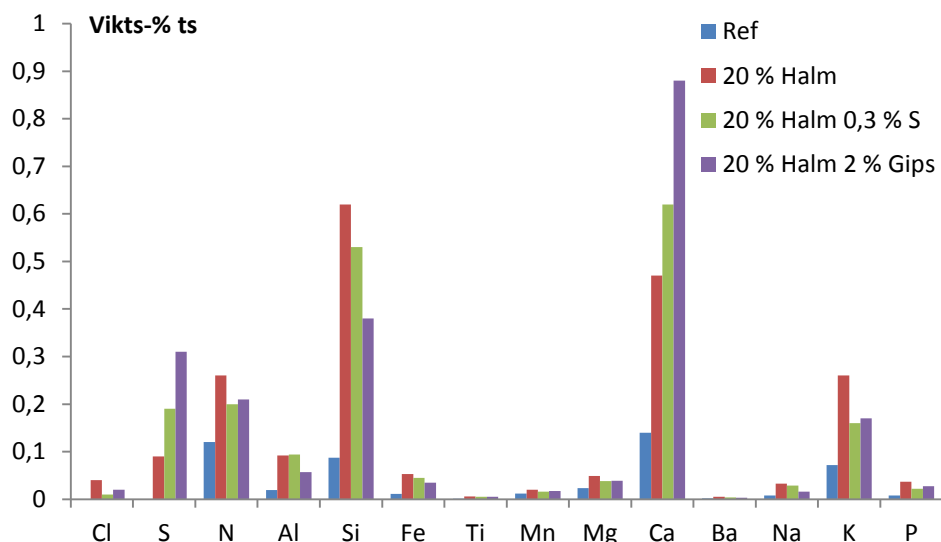
Bränsleanalyser från fullskaleförsöken redovisas i tabell 6 (askhalt och fukthalt) och i figur 25 visas den kemiska sammansättningen i referensbränslet och halmmixarna med och utan gips- och svaveladditiv. Som framgår av tabell 5 så ökar askhalten från 0,7 till 3,5 % vid inblandning av halm. Fukthalten varierar mellan 37-45 %.

Av figur 25 framgår att svavel och klorhalten ökar vid inblandning av halm, klorhalten var dock lägre än förväntat i halmen. Detta kan bero på att halmen låg i

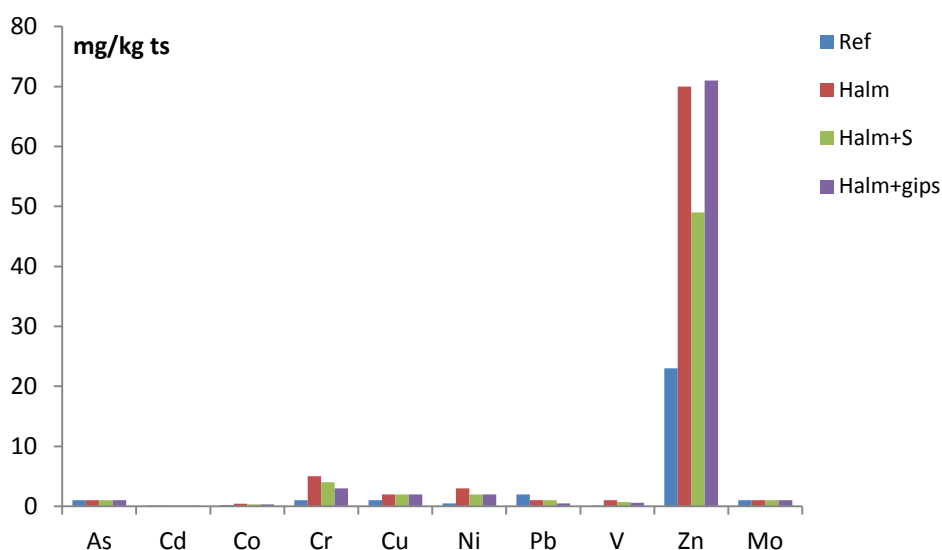
sträng ute på fältet ett par veckor innan pressning p.g.a. regnigt väder. Av askbildande huvudelement ökar framförallt Si, K och Ca. Vid inblandning av svavel och gips fås en signifikant ökning av svavel. Vid inblandning av gips ökar även Ca-halten. Samtidigt finns det en naturlig variation i tex Ca-halten i halmen då den kommer från olika fält. För spårämnen ökar framförallt Zn-halten vid inblandning av halm.

Tabell 6. Fukthalt och askhalt på bränslet.

	Ref	20 % Halm	20 % Halm + S	20 % Halm + gips
Total fukt, vikt-%	36,9	40,1	37,9	45,0
Aska, vikt-% ts	0,7	3,5	3,5	3,9



Figur 25. Den kemiska sammansättningen av huvudelement i bränslet, med och utan additiv.



Figur 26. Den kemiska sammansättningen av spårelement i bränslet, med och utan additiv.

4.2.2 Effekt av halm och additiv på emissioner

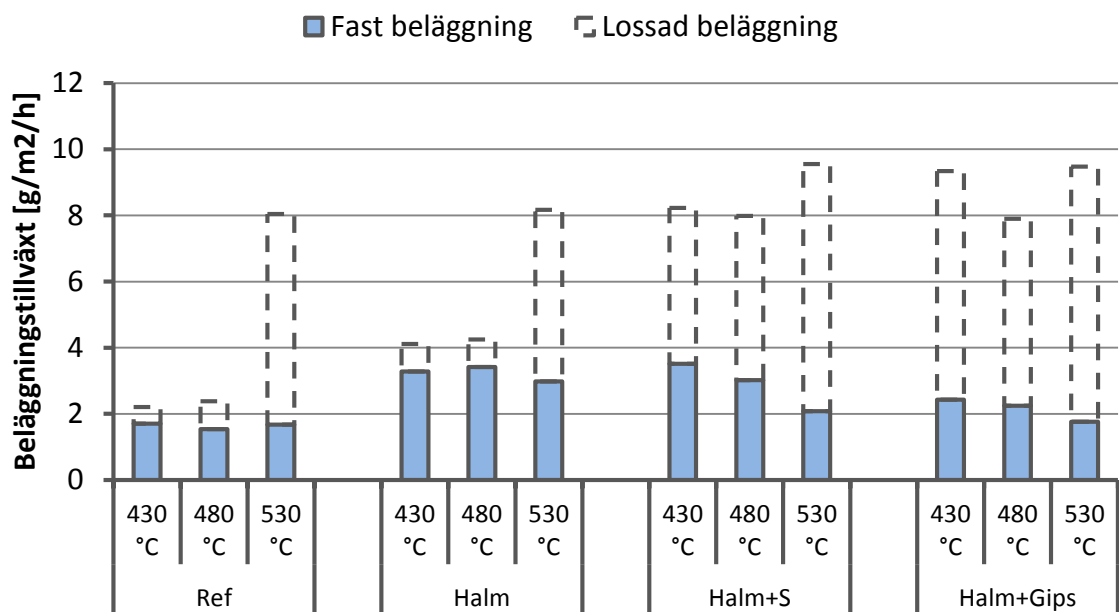
I tabell 7 visas effekten av att blanda in halm och additiv på emissionerna. Som framgår av tabellen så minskar medelvärdet på CO och medelvärdet på O₂ sjunker vid inblandning av halm pga av inblandning av torrare bränsle och CO-värdet sjunker ytterligare vid inblandning av S-additiv. SO₂ ökar markant för både gips och svaveladditiv. De ökade SO₂ halterna visar att signifikanta mängder av det tillförda svavlet och gipset spricker sönder/reagerar med de nyttjade bränslenas askbildande huvudelement under förbränningen. Den kraftiga ökningen beror på att tillsatsen av additiv blev något överdimensionerat då inblandningen av additiv i bränslemixen lyckades väldigt väl. Därtill var klorhalten i halmen lägre än beräknat. Även NO_x steg något då temperaturen var något högre för mixarna med additiv. För bränslemixen med gips var dessutom luftöverskottet något högre pga av att detta bränsleparti hade något grövre halm och fick en fluffigare struktur vilket resulterar i en ojämn inmatning. Resultatet från HCl analyserna visade sig tyvärr vara felaktiga p.g.a. att tekniskt fel uppstått på utrustningen i samband med provtagning och kan ej användas.

Tabell 7. Medelvärden för uppmätta gaskoncentrationer i orenad rökgas.

		Temp	NO _x	CO	CO ₂	O ₂ - verkligt värde	SO ₂
Datum	Bränsle	°C	mg/nm ³ 6% O ₂	mg/nm ³ 6% O ₂	%	%	mg/nm ³ 6% O ₂
2014-10-06	Ref (energivedsflis)	462	95	490	13	7	2,6
2014-10-07	20 % halm 80 % energived	507	88	121	15	5,5	37,3
2014-10-08	20 % halm 80 % energived + S	545	108	84	14	5,6	549,9
2014-10-09	20 % halm 80 % energived + gips	532	130	120	12	7,9	401,0

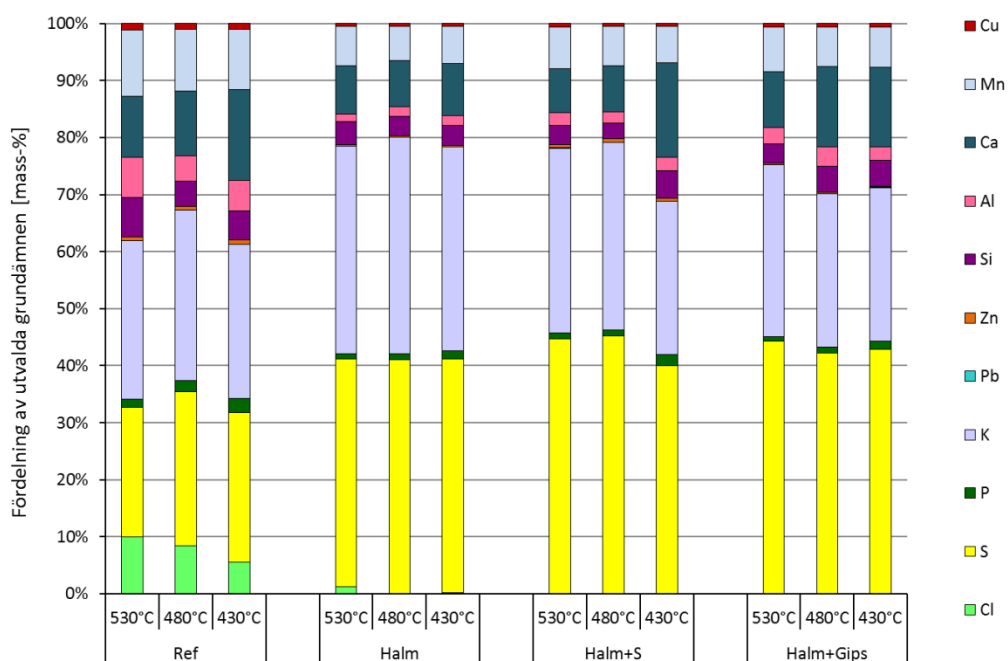
4.2.3 Effekt av halm och additiv på beläggningstillväxten och dess sammansättning

Figur 27 visar uppmätt beläggningstillväxt på provringarna för de olika bränsleblandningarna. Som framgår av figuren så ökar beläggningstillväxten vid inblandning av halm. Vid inblandning av additiv ökar de lösa beläggningarna och de fasta beläggningarna minskar med ökad temperatur. Den stora variationen av lossad beläggning beror antagligen till största delen på att varierande mängder föll av under hanteringen av ringarna (stoftet satt mycket löst).

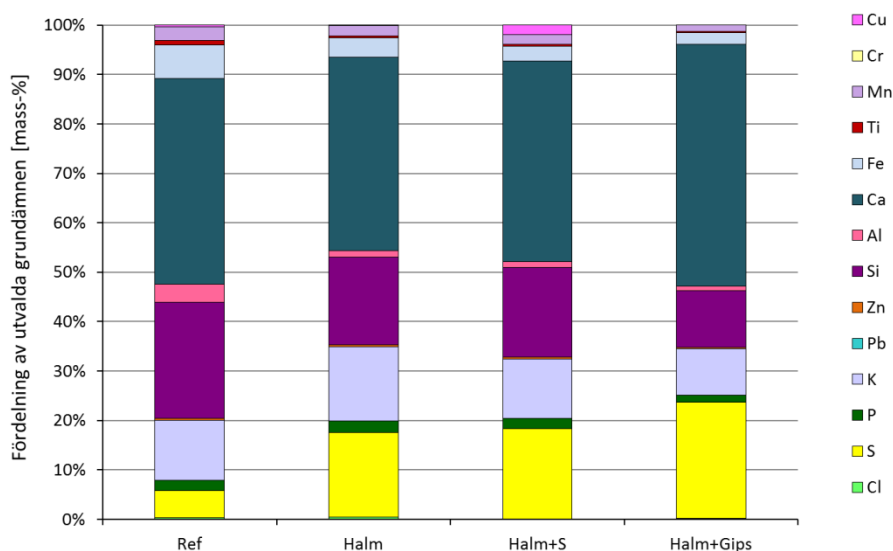


Figur 27. Diagram av uppmätt beläggningstillväxt på provringarna. Den vita delen av staplarna representerar stoft som avlägsnades med en knackning på ringarna, medan den blå delen visar hur mycket som satt kvar på ringen efter knackning.

Figur 28 visar uppmätt grundämnesfördelning av den fasta beläggningen på ringarna och figur 29 visar uppmätt grundämnesfördelning hos det lösa stoft som knackades bort innan beläggningarna analyserades. Som framgår av figur 28 är klorhalten högre i referensbränslet än vid inblandning av 20 % kornhalm. Svavelhalten är även högre för halmmixen utan additiv. Anledningarna till detta är att klorhalten var låg och svavelhalten hög i det använda halmbränslet. Vid inblandning av additiv minskar klore ytterligare. Det lösa stoftet visar högre halter av framförallt Ca och Si och lägre halter av K, Cl och S för samtliga prover (figur 30), vilket kan hänga samman med att det mesta lösa stoftet lossat från ringarnas läsidor. Resultatet från XRD-analysen på avskrapad beläggning från hela ringen, visar att identifierade faser från beläggningsringarna kan utgöras av NaCl, CaSO₄ (förekommer ej i ref bränslet), KCl, K₂SO₄, (Ca, Fe) SiO₃, SiO₂ och KAlSi₃O₈. Den identifierade fasen KCl minskade vid inblandning av halm och additiv medan K₂SO₄- och CaSO₄-halten ökade.



Figur 28. Uppmätt grundämneshöjning av den fasta beläggningen på ringarna. Metallerna Fe, Cr och Ni har tagits bort från figuren då den största källan återfinns i ringmaterialet. Varje stapel i diagrammet utgörs av medelvärden från fyra analyser jämnt utspridda över ringens omkrets.

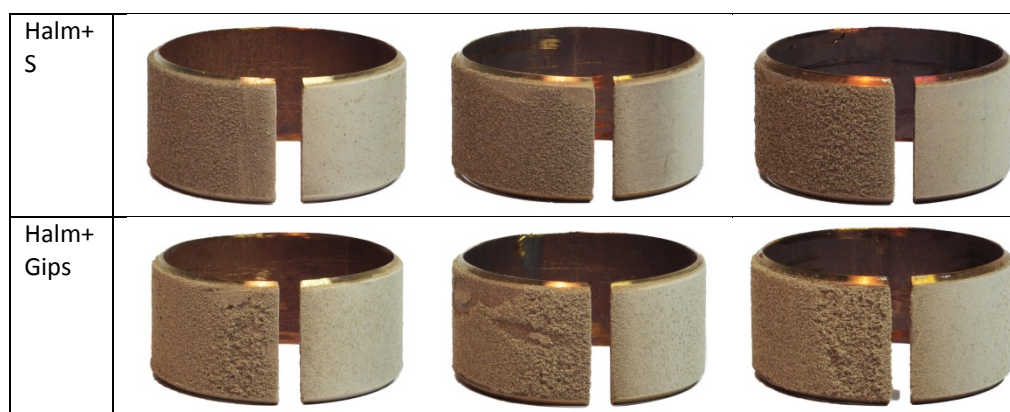


Figur 29. Uppmätt grundämneshöjning hos det lösa stoft som knackades bort innan beläggningarna analyserades. Detta lösa stoft utgör en blandning från de tre beläggningsringar som exponerades vid varje driftfall. Anledningen till att de blandades var att få tillräcklig provmängd för analys.

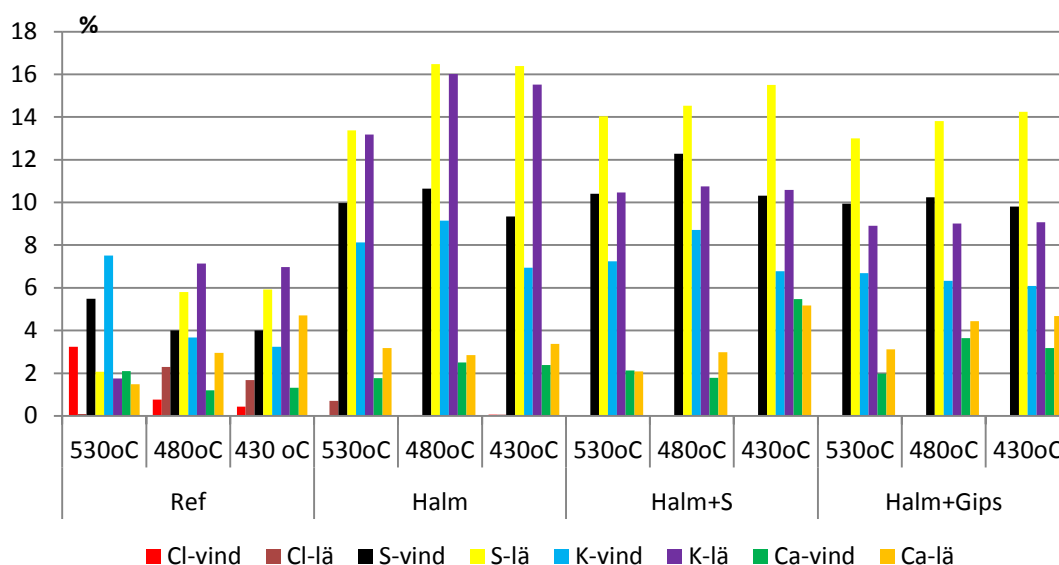
Vid dessa försök uppkom en tydlig färgskillnad på ringarnas vind- respektive läsida vilket framgår av Figur 30. På ringarnas läsidor återfanns också en del mer eller mindre löst sittande stoft som format "strukturer" medan beläggningen var

ljusare och jämnare fördelad på vindsidan. Den lösa beläggning som knackades bort (analys i Figur 29) kom till största delen från ringarnas läsidor.

Resultatet visar att beläggningarna på provsondens läsida har något högre koncentrationer av flertalet ämnen. Figur 31 visar Cl, S, K och Ca koncentration på lä och vindsida.



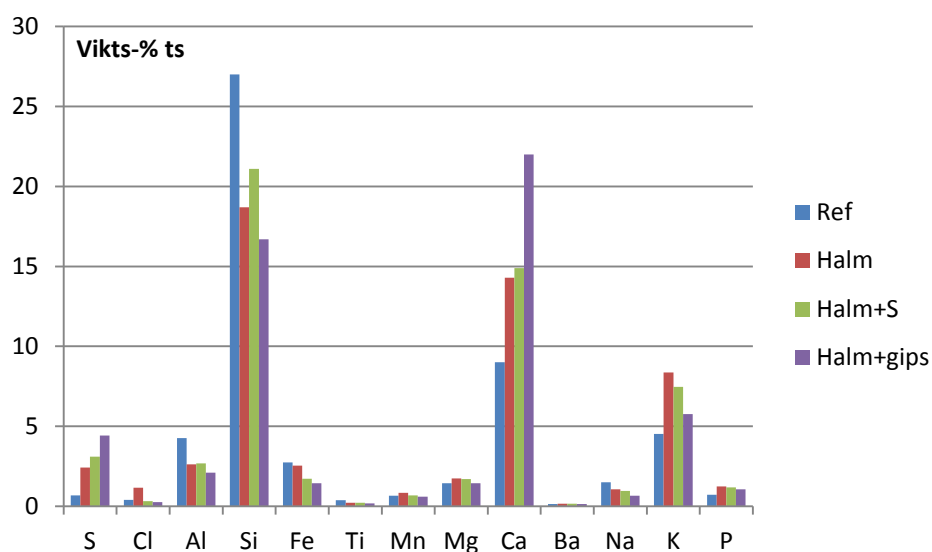
Figur 30. Foton av beläggningsringar efter exponering, tagna från den sida som var riktad uppåt under exponeringen. Gasflödet kom från höger sida i figurerna. Det lösa stoft som ansamlades på ringens läsida (vänster i figuren) har fallit av i varierande omfattning. En tydlig färgskillnad kan observeras mellan vind- och läsida vid halminblandning.



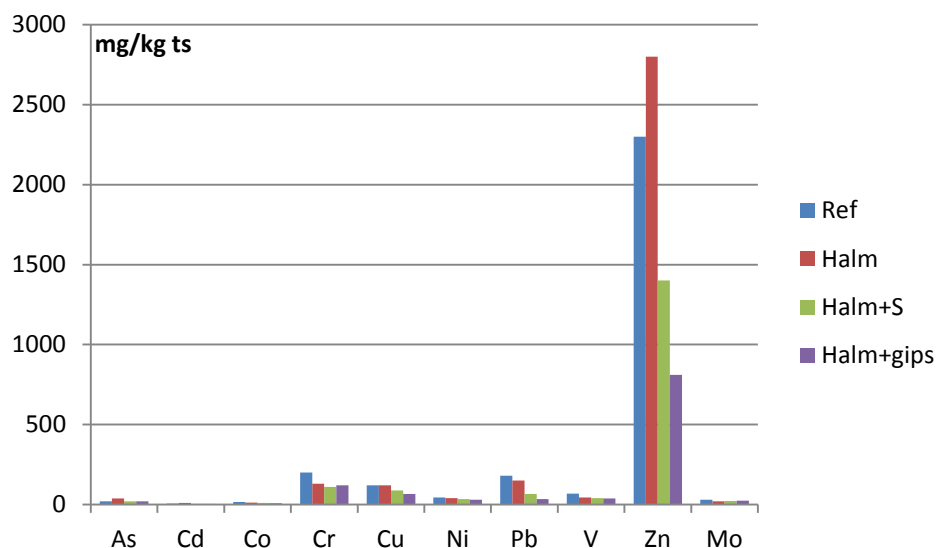
Figur 31. Uppmätt grundämnesfördelning och koncentrationer av den fasta beläggningen på ringarnas vind och läsida.

4.2.4 Effekt av halminblandning och additiv på flygaska och bottenaska

Figur 32 och 33 visar den kemiska sammansättningen på flygaskan. Som framgår av figuren ökar svavelhalten vid tillsats av halm, svavel och gips. Klorhalten är högre vid bara tillsats av halm för att sedan minska vid tillsats av svavel och gips.

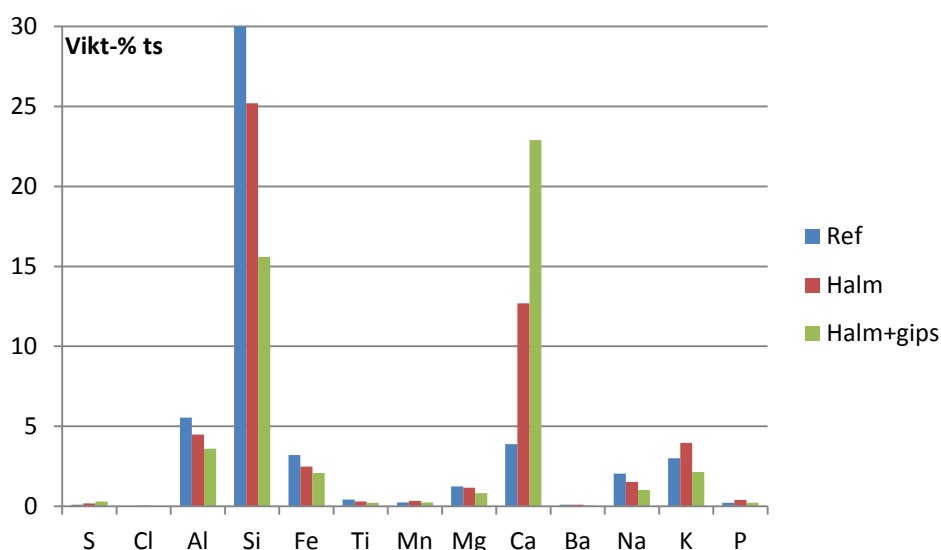


Figur 32. Sammansättningen av huvudelement i flygaskan.

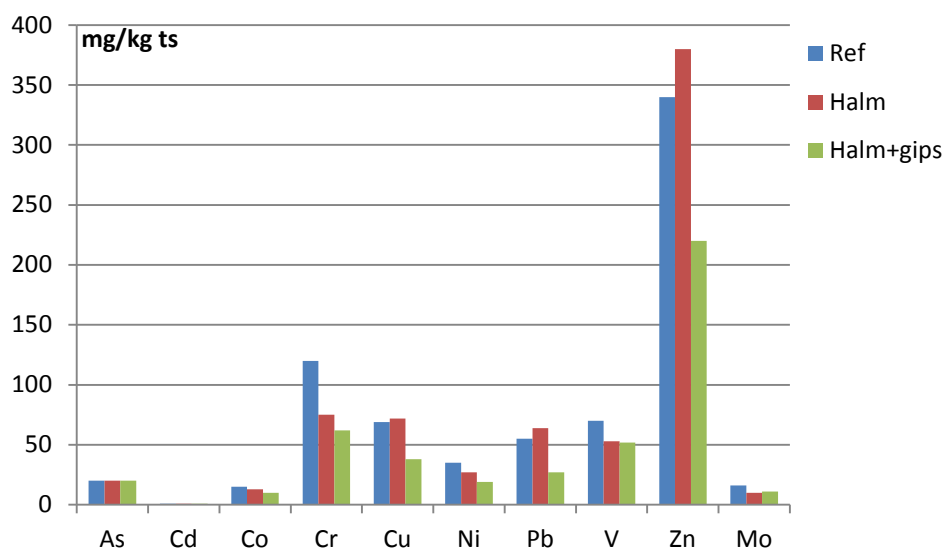


Figur 33. Sammansättningen av spårelement i flygaskan.

Figur 34 och 35 visar de kemiska sammansättningarna för bottenaskarna. Tyvärr saknas analysresultat från bottenaska för fallet med Halm + S, vilket beror på en miss vid själva provtagningen. Svavelhalten är högre i blandningen med gips vilket kan tyda på att allt svavel inte har reagerat, alternativt att det har blivit bundet i föreningar som gärna stannar kvar i bottenaskan. I övrigt är Ca-halten högre vid inblandning av gips.



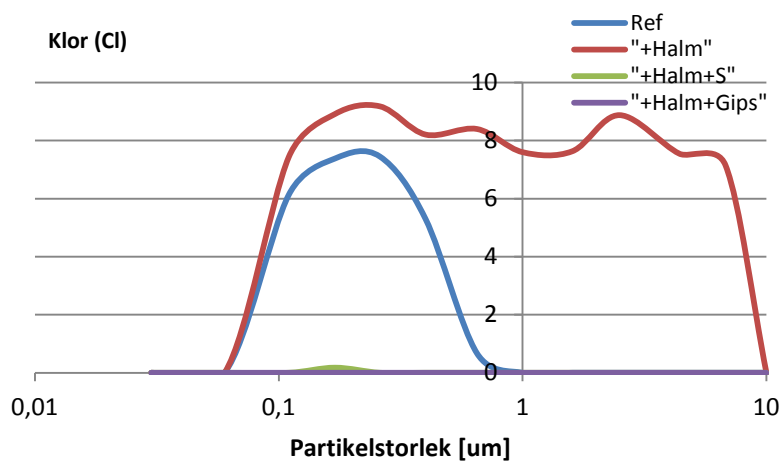
Figur 34. Den kemiska sammansättningen av huvudelement i bottenaskan. Data på halm+svavel saknas.



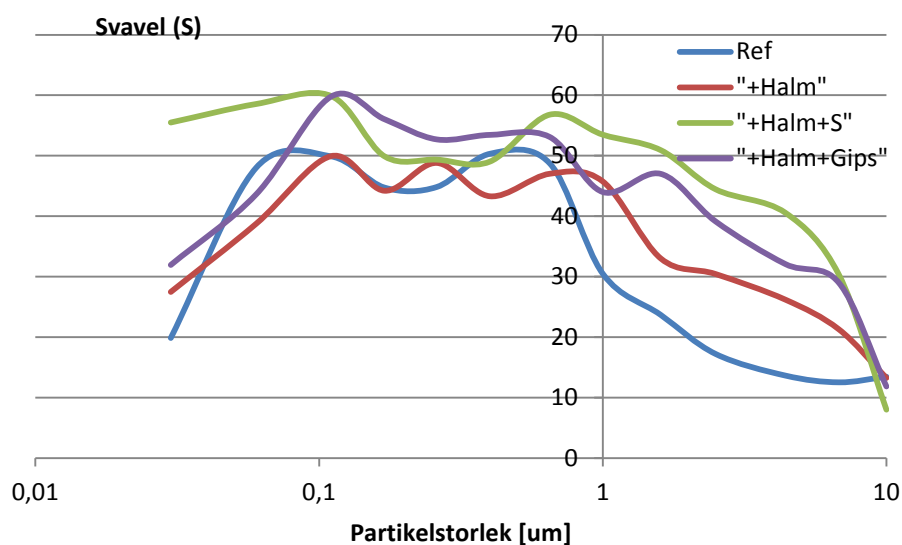
Figur 35. Den kemiska sammansättningen av spårelement i bottenaskan. Data på halm + svavel saknas.

4.2.5 Effekt av halminblandning och additiv på partiklar

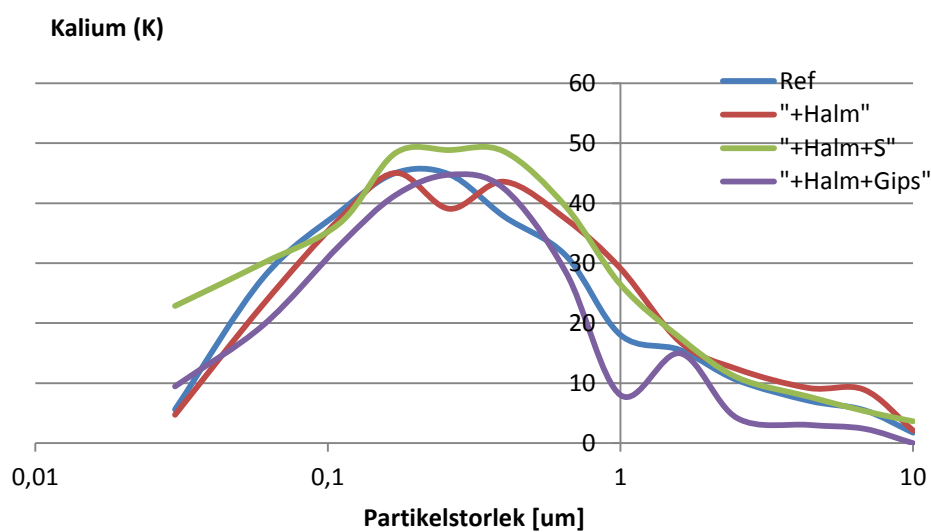
Figur 36-39 visar resultaten från impaktörprovtagningen. Halter av de analyserade grundämnena nedan ska inte uppfattas som absoluta halter utan användas i jämförande syfte. Bedömningen är att S-koncentrationerna dels kommer från svavelföreningar som t.ex. K_2SO_4 men också från ej reagerat elementärt svavel i de berörda fallen. Klor eller förmodligen klorider kan antas vara KCl, vilket kan styrkas av XRD-analyserna. Halten av K och Ca visar inga större skillnader mellan de olika bränslena.



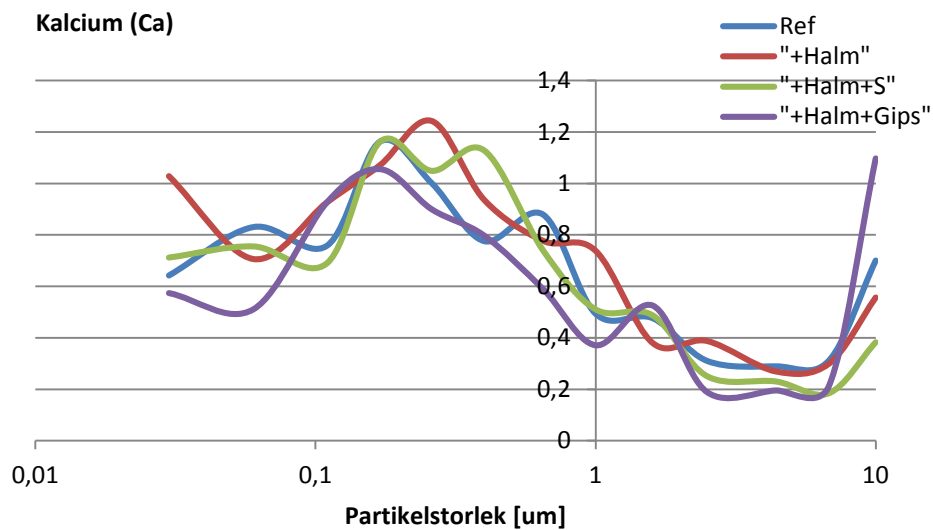
Figur 36. Klorhalt i fina partiklar från impaktorprovtagning.



Figur 37. Svavelhalt i fina partiklar från impaktorprovtagning.



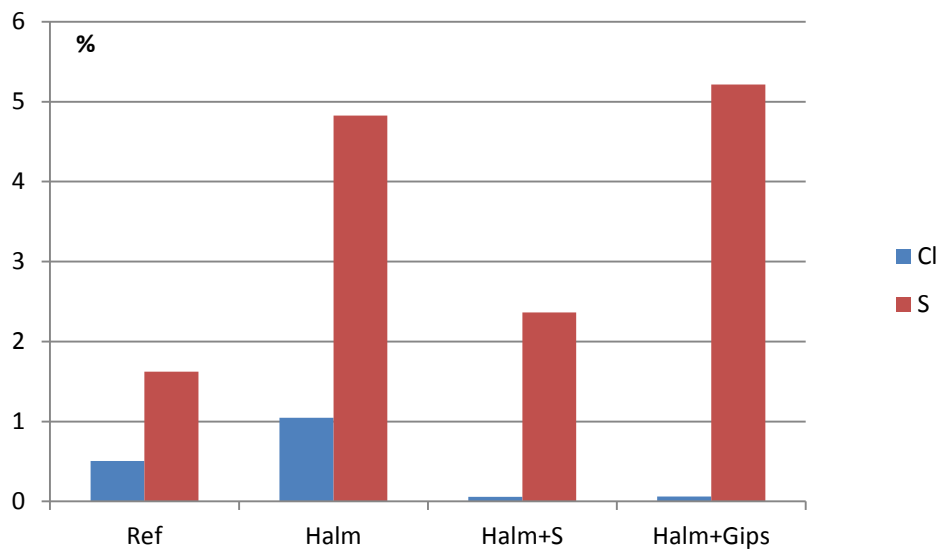
Figur 38. Kaliumhalt i fina partiklar från impaktorprovtagning.



Figur 39. Kalciumhalt i fina partiklar från impaktorprovtagning.

Totalstoff

I figur 40 visas koncentration av klor och svavel i totalstoffprover som togs ut i samband med impaktormätningarna. Liksom för de fina partiklarna minskar klorhalten vid tillsättande av additiv medan svavelhalten uppvisar ett mer ojämnt resultat.



Figur 40. Svavel och klorhalt i totalstoff.

4.3 Kostnads kalkyl för halmmix från terminal

Inom ett nyligen avslutat projekt "Lokala terminaler för ökad användning av nya biobränslesortiment i värmeverken" (Paulrud mfl, 2015) så har kostnads kalkyler genomförts för halm i mix med träbränsle från terminal. Underlaget till dessa kalkyler beskrivs i Paulrud m.fl., 2015.) Kostnads kalkylen visar att det är effektivast att använda halm som snittas vid pressning samt att balstorleken är 90

*120 * 250 cm vid krossning. Vid den balstorleken kan energiveden placeras ovanpå balen vid sönderdelning i stora krossar.

Det är något mer kostnadseffektivt att ta fram bränslemixen på terminal och sönderdela med krossar med hög kapacitet än att värmeverket investerar i en stationär halmriv. Inblandningsgrad och styrning blir dock mer flexibel om värmeverket sönderdelar själv. Kostanden för halm i sträng och avstånd till terminal och värmeverk har stor betydelse för den totala kostnaden. Kostnaden för sönderdelad halm i mix med trädbänsle och där halmkostnad är 350 kr/ton i sträng blir fritt levererat Borås Energi från Lundby Maskin station 210 kr/MWh (avser 2014).

Om transporten mellan fältet och terminalen kan minskas från 35 km till 15 km och transporten mellan terminalen och värmeverk från 55 till 30 km blir totala kostnaden för halmen levererat till värmeverket 197 kr/MWh (tabell 7). Om priset på halm i sträng minskar till 150 kr/ton (ett vanligt pris i Skåne) och blir priset för halm i mix med träflis 150 kr/MWh. Ett pris som konkurrerar väl med dagens träbränslepriser.

Kostnaden för additiv är inte inkluderat i tabell 7. Vid användning av gips styrs kostnaden av om gipset först måste hanteras av Gipsrecycling till ett retur gips. Därtill styrs inblandningskostnaden av vilken metod som tillämpas och var i kedjan additivet blandas in. Bedömningen är att gips som additiv är mest kostnadseffektivt i avfallspannor där gipset kan användas utan att först omvandlas till en returprodukt.

Tabell 7. Kostnad (2014) för halmmix från terminal till värmeverk. Press med snittare, sönderdelning med hög kapacitet på terminalen, kort transportavstånd till terminal och till värmeverk, 1,5 mil till terminal och 3 mil till värmeverk.

	Kr/ton	Kr/MWh	Kr/ton	Kr/MWh	Kr/ton	Kr/MWh
Halmkostnad på fält	350	83	150	36	250	60
Pressning	197	47	197	47	197	47
Lastn, hemtransp, avlast, 1,5 mil	80	19	80	19	80	19
Lastare vid sönderdelning	29	7	29	7	29	7
Borttagning snöre	40	10	40	10	40	10
Sönderdelning	80	19	80	19	80	19
Lastare för flis	10	2	10	2	10	2
Vägtransport till värmeverk, 3 mil	42	10	42	10	42	10
Summa	828	197	628	150	728	173

Värmevärde 4,2 MWh/ton (15 % fukthalt)

Skörd 3 ton/ha

4.4 Gips som additiv

Vid tillverkningen av gipsskivor består gipsmassan ofta av en kombination av naturgips, industrigips (rest från kolkraftverk) och returgips. Huvuddelen av gipsen som används vid tillverkning i Sverige importeras idag. Använt gips från byggavfall betraktas som ett avfall och stora mängder gips läggs idag på deponi.

2012 skärpte Naturvårdsverket reglerna för hantering av gipsavfall och idag måste gips antingen återvinnas i godkända anläggningar eller deponeras i en mono-cell, d.v.s. gips får inte blandas med annat avfall. Detta har gjort att intresset för att återvinna gips till s.k. returgips har ökat. Detta medför att det finns tillgång på gips som återvunnen produkt på den svenska marknaden. Störst på att återvinna gips i Sverige är Gips Recycling Sweden. De har idag två mottagningsanläggningar i Sverige, en i Bålsta och en i Halmstad.

Enligt en studie från Luleå Tekniska universitet är det tillämpningsområdet för det återvunna gipset som är styrande för vilka krav och villkor som måste uppfyllas innan sorterade gipsskivor upphör att vara avfall (Löf, 2014). Vid nytillverkning av gipsskivor så har det ännu inte ifrågasatts eller prövats av någon myndighet om det återvunna gipsmaterial ska klassas som ett avfall eller inte. Branschen och myndigheterna uppfattning är dock att återvunnet gipsmaterial ska betraktas som ett icke-avfall när det används som råvara vid tillverkning av nya gipsskivor. Om gipsavfall ska återvinnas i syfte att användas inom jordbruket eller nya användningsområden som t.ex. additiv så finns det ännu inga riktlinjer framtagna som säkerställer att gipsavfallet kan upphöra att vara avfall.

För kunna ta reda på om det är tillåtet att använda återvunnet gips som bränsleadditiv i biobränslepannor måste enligt studien fallet prövas i en prövningsinstans när det väl bli aktuellt att använda det. Avgörande faktorer i den bedömningen kommer huvudsakligen vara vilka positiva och negativa miljöeffekter som kan uppstå vid användandet samt om förfarandet ska betraktas som ett resursutnyttjande eller ett kvittblivningsförfarande. Det bör även beaktas om tillsats av återvunnen gips som additiv har negativ inverkan för möjligheten att återföra askor till naturen genom att exempelvis leda till en alltför hög halt av tungmetaller i dem.

5 Slutsatser

Fördelen med att hantera bränsle via terminaler är flera. Dels kan bränslet levereras vid behov samt kan bränslesortimentet anpassas till kundens behov genom att olika bränslen kan mixas och additiv tillföras. Inblandning av halm kan dock orsaka besvärande askrelaterade driftsproblem såsom beläggingsbildning, högtemperaturkorrosion och bäddagglomerering om halmen innehåller höga halter av kalium och klor. I den här studien har därför fördjupande kunskaper tagits fram om bränslemixen samt om additiv kan minska eventuella driftproblem som kan uppstå. För att verifiera additivens effekt har fullskaleförsök genomförts med gips och svavel som additiv om 2- och 0,3 vikts% (på våt bränslebasis) till en bränslemix med 20 vikt-% kornhalm och 80-vikts-% energived i en 2x65 MW rosteranläggning (50 bar, 500 °C). Slutsatser från projektet är:

- Modellberäkningar visade på en teoretisk möjlighet att vid inblandning av såväl gips som svavel både kunna reducera slaggningsgraden och mängden kalium som går till gasfas och kunna reducera beläggingsbildnings-/korrosionsrisken på överhettare och andra konvektionsytor vid användning av en bränslemix som innehåller 20% kornhalm.
- Teoretiskt (enligt de utförda modellberäkningarna) behövs inblandningsgrader om drygt 1 % gips och ett fåtal tiondelsprocent av svavel till den bränslemix som innehåller 20% kornhalm för att uppnå kraftiga effekter.
- Fullskaleförsöken som genomfördes visar att kornhalm som bränsle i mix med energivedsflis fungerar i ett befintligt bränslehanteringssystem vid förbränningen i en 65 MW rosterpanna. Viss optimering krävs dock vad gäller sönderdelning (finhet) och inblandningsgrad för att minska risken för problem i bränslematningen.
- Halmen kan på ett kostnadseffektivt sätt sönderdelas med konventionella krossar på terminal och mixas med energivedsflis.
- Genom att mixa in additiven i samband med sönderdelningen av halmen, d.v.s. där additiven gick igenom riven tillsammans med bränslet lyckades inblandningen mycket bra.
- Förbränningsförsöken visade att vid inblandning av halm och additiv fås lägre CO och högre temperatur samt ökar SO₂ markant i jämförelse med referensbränslet, 100 % energivedsflis.
- Svavel till klorförhållandet i beläggningarna på beläggningsringarna ökade vid inblandning av gips och svavel till bränslemixen varav KCl halten reduceras och K₂SO₄- och CaSO₄-halten ökade vid inblandning av gips och svavel.
- Koncentrationen av klor reducerades och halten svavel ökade hos de fina partiklarna (< 1 µm) vid inblandning av gips och svavel.
- Resultaten från projektet visar att samma effekt kan uppnås med gips som svavel, vid användning som additiv. Resultaten är i linje med tidigare

tester och visar på möjligheten att kunna reducera beläggingsbildnings-/korrosionsrisken på överhettare och andra konvektionsytor vid gipsinblandning till rostereldade pannor.

- Återvunnet gipsmaterial betraktas som ett icke-avfall när det används som råvara vid tillverkning av nya gipsskivor. Det finns dock ännu inga riktlinjer framtagna som säkerställer att returgips kan upphöra att vara avfall vid användning som additiv i biobränslepannor.

5.1 Rekommendationer fortsatt arbete

Vid användning av halm i bränslemixen bör inblandningsgrad och sönderdelningsgrad på halmen optimeras och testas för varje specifik anläggning.

Vid användning av additiv är inblandningen i bränslet en viktig faktor. Olika metoder att blanda in additiv som gips i eldstaden bör undersökas, från inblandning i bränslet på terminal till direkt dosering i eldstaden.

Långtidsförsök med gips som additiv föreslås utföras för att definitivt påvisa effekter på reduktion av högtemperaturkorrosion.

Beräkningar på miljövinster och ekonomiska kostnadskalkyler för användning av återvunnet gips som bränsleadditiv bör genomföras.

6 Referenser

- Bale, C.; Chartrabd, P.; Degterov, S. A.; Eriksson, G.; Hack, K.; Ben Mahfoud, R.; Melancon, J.; Pelton, A. D.; Petersen, S. Calphad- Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry; 2002; pp 189–228.
- Boström, D., Skoglund, N., Grimm, A., Boman, C., Öhman, M., Broström, M., Backman, R. Ash transformation chemistry during thermochemical conversion of biomass.. *Energy Fuels* 2012, 26, 85–93.
- Engvall, Klas. 2001. Asksintringsproblem i konvektionspaketet-tester med additiv i stor skala. Värmeforsk rapport 742, Värmeforsk.
- Gilbe, C., Öhman, M., Lindström, E., Boström, D., Backman, R., Samuelsson, R., Burvall, J. Slagging characteristics during residential combustion of biomass pellets. *Energy&Fuels*, 2008, 22, 3536-3543.
- Gilbe, C., Lindström, E., Backman, R., Samuelsson, R., Burvall, J., Öhman M. Predicting slagging tendencies for biomass pellets fired in residential appliances: a comparison of different prediction methods. *Energy&Fuels*, 2008, 22, 3680-3686.
- Henderson P, Ifwer K, Stålenheim A, Montmegomery M, Högberg J & Hjörnhede 2006. Kunskapsläget beträffande högtemperaturkorrosion i ångpannor för biobränsle. och avfall, Värmeforsk rapport 992, Värmeforsk.
- Henderson, P., Andersson, C., Kassman, H., The use of fuel additives in wood and waste wood-fired boilers to reduce corrosion and fouling problems, *VGB PowerTech*, 2004, 6, 58-62.
- Hedman H, Daniel Nordgren, Dan Boström, Marcus Öhman, Padban Nader. 2011. Ökad elproduktion med halm genom sameldning med trädbränslen. Värmeforsk rapport 1162. Värmeforsk.
- Herstad Svärd S, Åmand L-E, Bowalli J, Öhlin J, Steenari B-M, Pettersson J, Svensson J-E, Karlsson S, Larsson E, Johansson L-G, Davidsson K, Bäfver L , Almark M. 2011. Ramprogram-Åtgärder för samtidig minimering av alkalirelaterade driftproblem Etapp 3. Värmeforsk rapport 1167, Värmeforsk.
- Hinge, J. 2009. Utarbetande av ett program för ökad förbränning av halm i Sverige, baserat på danska erfarenheter. Värmeforskrapport 1117, Värmeforsk.
- Ivarsson; E. Nilsson, C., Smälttemperaturer hos halmaskor med respektive utan tillsatsmedel, Special Report 153, Swedish University of Agricultural Sciences, department of Farm buildings (1998).
- Lindström, E., Sandström, M., Boström, D., Öhman, M., Slagging characteristics during combustion of cereal grains rich in phosphorous. *Energy & Fuels*, 2007, 21, 710-717
- Löf, A. 2014. Gips som avfall, produkt eller biprodukt? Hur tillämpas lagstiftningen vid återanvändning av gipsmaterial? Umeå Universitet. Examensarbete i miljö- och hälsoskydd.

Nielsen, H. P., Frandsen, F. J., Dam-johansen, K., Baxter, L. L. The implications of chlorine-associated corrosion on the operation of biomass-fired boilers. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2000, 26, 283-298.

Näzelius, I.N, Boström, D., Boman, C., Hedman, H., Samuelsson, R., Öhman, M. Influence of Peat Addition to Woody Biomass Pellets on Slagging Characteristics during Combustion. *Energy Fuels*, 2013, 27 (7), 3997–4006

Nilsson, D, Bernesson, S. 2009. Halm som bränsle, Del 1 Tillgångar och skördetidpunkter. SLU rapport 011.

Paulrud, S, Johansson, F Rosenqvist, H. 2015. Lokala terminaler för ökad användning av nya biobränslesortiment i värmeverken. SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, SP Rapport:2015:07

Paulrud, S, Öhman, M. Lagring/torkning av salix-effekt på slaggnings och beläggningstendens vid förbränning, SP Rapport 2014:46, ISBN 978-91-87461-89-7, Borås 2014.

Piotrowska P, Dan Boström, Alejandro Grimm, Marcus Öhman. 2013. Krossade gipsplattor som bränsleadditiv vid fastbränsleeldning för minskad risk för askrelaterade driftsproblem - etapp 1 termokemiska modell-beräkningar och bänkskaleförsök. Delarbete utfört inom NWI projektets delprojekt 4 "Utveckling av förbränningsprocesser och bränslemixar".

Piotrowska, P, Rebbling, A, Lindberg, D, Backman, R, Öhman, M, Boström, D. Waste Gypsum Board against Ash Related Problems during Combustion of Biomass Part 1: Fluidized Bed. *Energy Fuels* 2015, 29, 877–893

Rebbling A, Piotrowska, P, Boström, D, Näzelius, I-L, Öhman, M. 2013. Krossade gipsplattor som bränsleadditiv vid fastbränsleeldning för minskad risk av askrelaterade driftsproblem - etapp 2 fullskaleförsök i avfallseldad rosterpanna (25 MWt). Delarbete utfört inom NWI projektets delprojekt 4 "Utveckling av förbränningsprocesser och bränslemixar"

Steenari, B. M., Lindqvist, O. *Biomass and Bioenergy*, 1998, 14, 67-76.

Zevenhoven-Onderwater, M., Backman, R., Skrifvars, B-J., Hupa, M. The ash chemistry in fluidised bed gasification of biomass fuels. Part I: predicting the chemistry of melting ashes and ash-bed material interaction. *Fuel*, 2001, 80, 1489-1502.

Öhman, M mfl. 2010. Minskade askrelaterade driftsproblem genom inblandning av torv i åkerbränslen. Värmeforskrapport 1142. Värmeforsk, Stockholm.

Färdig bränslemix av halm, flis och additiv från terminal till kraftvärmeverk

Idag eldas huvudsakligen olika sortiment av skogsflis, avfall och returbränslen på värmeverken. För att kunna säkra bränslemängder och flöden av biobränslen även i framtiden behöver fler biobränslesortiment testas och verifieras. Exempel på ett outnyttjat bränsle är halm. I den här studien har fördjupande kunskaper tagits fram om gips som additiv kan minska eventuella driftproblem som kan uppstå vid inblandning av kornhalm i en träbränslemix. Resultaten från projektet visar att samma effekt kan uppnås med gips som svavel, vid användning som additiv. Resultaten är i linje med tidigare tester och visar på möjligheten att kunna reducera beläggningsbildnings-/korrosionsrisken på överhettare och andra konvektionsytor vid gipsinblandning till rostereldade pannor.

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



Energiforsk