

Litteraturstudie om slameldning i rostpanna

Kent Davidsson

Litteraturstudie om slameldning i rostpanna

Literature survey about firing of sludge in grate boilers

Kent Davidsson

Projektnummer WR-37

År: 2011

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

Förord

I projektgruppen till WR-37 har förutom rapportförfattaren ingått Marianne Gyllenhammar (Stena Metall AB), Lia Detterfelt (Renova), Veronica Mitros (Halmstads Energi och Miljö AB), Torbjörn Jonsson och Jesper Pettersson (båda High Temperature Corrosion Centre på Chalmers tekniska Högskola). Ett tack riktas till Sven Hermansson (SP, Energiteknik) vars initierade beskrivningar av rostpannors funktion och karaktäristik till stor del används i föreliggande rapport. Ett tack riktas också till Solvie Herstad Svärd (S.E.P. Scandinavian Energy Project AB) för läsning och synpunkter på rapporten.

Sammanfattning

Eldning av bränslen med högt klor- och alkaliinnehåll kan ge upphov till beläggningar och korrosion på ångbärande tuber. Försök i fluidbäddanläggningar har visat att sameldning med avloppsslam kan minska dessa problem. Dels minskar beläggningstillväxten och dels minskar klorhalten i beläggningarna. Ett bränsle med högt klor- och alkaliinnehåll är avfall. De flesta avfallsförbränningsanläggningar är dock inte av typen fluidbädd utan av typen rost. Rosten skiljer sig avsevärt från fluidbädden; exempelvis finns ingen kvartsbaserad bädd och omblandningen av bränslet är mindre omfattande. Frågan är om de positiva effekterna av avloppsslam även skulle bli fallet i en rostpanna. Innan fullskalförsök med sameldning av avfall och avloppsslam i en rostpanna genomförs bör befintlig information om erfarenheter från eldning av avloppsslam i rostpanna beaktas. Med de stora skillnader som finns mellan fluidbädd och rost är det också av vikt att studera de metoder som använts för att motverka beläggning och korrosion i rostpannor. Således är målet med föreliggande projekt att sammanställa erfarenheter dels av eldning av avloppsslam på rost, och dels av åtgärder, som ändrar rökgaskemin, vidtagna mot beläggningar och högttemperaturkorrosion i rostanläggningar.

Oftast är det rötat och avvattat slam som kommer i fråga för förbränning. Det håller en torrhalt på 20-25% och ett värmevärde nära noll. Detta kan sedan torkas ytterligare beroende på förbränningsprocess. Man kan skilja på mono- och samförbränning där det förra avser förbränning av enbart slam varvid ytterligare torkning behövs. Vid samförbränning utgör slammet en mindre del av bränslemixen varför torrhalten inte blir lika kritisk ur denna synpunkt. Svårigheten är oftast att blanda slammet jämnt med huvudbränslet och att transportera in det i eldstaden. För att undvika klumpar är det viktigt med 35-45% torrhalt. Då kan också slammet blandas i bränslebunkern med kranen. Detta har t.ex. gjorts i MHKW Bamberg, Tyskland. Torrare slam kan blåsas in över bränslebädden t.ex. enligt Martin GmbH:s koncept, men det kräver speciell utrustning. Hur mycket slam som kan blandas in beror på en lång rad faktorer där den viktigaste troligen är slammets fukthalt. För avvattat slam är massandelen av bränslemixen ofta 10-15%. Det finns ett antal anläggningar som har eldat slam och avfall men upphört med det p.g.a. inmatnings- eller driftproblem. I ingen anläggning eldas slam för att motverka beläggningar och korrosion. Slutsatsen är ändå att det är möjligt att samelda avfall och avloppsslam men att det är oklart hur stor den positiva effekten av slammet blir.

Med åtgärder mot beläggnings- och korrosionsproblem avses i detta projekt främst tillsats av aluminiuminnehållande ämnen och tillsats av svavel därför att slam innehåller dessa ämnen. Kaolin är en aluminiumsilikat som med framgång använts som tillsats i fluidbädd. På en rost skulle effekten troligen bli sämre p.g.a. den mindre omblandningen. Effekten av svavel i en rostpanna är svårare att säkert uttala sig om, men en större del av svavlet som går in med bränslet bör bilda SO₂. Därmed kan det, liksom en del kaolin, följa med rökgaserna och reagera med ämnen, som KCl, i gasfas. ChlorOut och svavelrecirkulation som bygger på införsel av sulfatlösning i rökgaserna ovanför bädden har önskvärd effekt.

Litteraturen visar inte på hur beläggning och korrosion kan undvikas genom tillsats i bränslet, som t.ex. avloppsslam, i en rostanläggning. Av den anledningen bör forskningsprojekt med sameldning av avloppsslam och avfall genomföras. Det är önskvärdt att kunna blanda in en massandel på ca 15 % slam; något som kan kräva att man använder sig av torkat slam.

Summary

Firing of fuels with high content of chlorine and alkali may give rise to deposits and corrosion on steam tubes. Experiments in fluidised beds have shown that co-firing with sewage sludge can counteract these problems by decreasing the deposition rate and the content of chlorine. Waste contains a relatively large fraction of chlorine. However, most waste incineration plants are not fluidised beds, but grate fired boilers. A grate differs substantially from a fluidised bed. For example, there is no quartz-based bed of sand and the mixing of the fuel is much less vigorous. The question is whether the positive effects of sewage sludge would be as strong in a grate facility as in a fluidised bed. Before full-scale experiments with co-firing of sludge and waste are carried out, prevailing information of firing of sludge in a grate boiler should be considered. It is also important to study methods aimed at counteracting deposits and corrosion in grate boilers. Hence, the objective of the present study is to collect experience of firing of sludge, and measures for changing the flue gas chemistry in order to decrease deposition in grate-fired units.

The sludge in question is usually dewatered and digested. It has a dry content of 20-25% and a heat content close to zero. It can be further dried depending on combustion process. For mono combustion, where the sludge is the sole fuel, further drying is needed. During co-firing, the sludge is only a small fraction of the fuel mix, why the dry content is not critical from this point of view. The difficulty is often to mix the sludge evenly with the main fuel and to convey it to the furnace. To avoid cladding, the sludge should have 35-45% dry content. Then the fuels can be mixed with the crane in the fuel bunker. This has been done at MHKW Bamber, Germany. Dryer sludge can be blown into the furnace, e.g. in accord with the Martin GmbH concept, but it requires special equipment. The amount of sludge that can be introduced to the furnace is dependent on a number of factors of which the moisture is the most important. In the case of dewatered sludge, the mass fraction is usually 10-15%. A number of facilities have fired sludge and waste but stopped because of feeding problems or operational problems. In no plant, sludge is fired to mitigate deposition and corrosion. The conclusion is, however, that co-firing of sludge and waste is possible, but that the positive effects are unknown.

In this project, actions against deposition and corrosion include addition of aluminium-containing substances and addition of sulphur because sludge contains these substances. Kaolin is an aluminium silicate that has been successfully used as additive in fluidised beds. On a grate, kaolin would probably be less effective due to a lower mixing rate. It is more difficult to predict the effect of sulphur on a grate. However, both sulphur, in the form of SO_2 , and kaolin can follow the flue gas and react with gaseous species such as KCl. ChlorOut and sulphur recirculation, which are based on input of a sulphate solution into the flue gas, have the desired effects.

Research projects with co-firing of sludge and waste should be carried out. It is desirable to reach a mass fraction of about 15% fraction of sludge. This may require that the tests be performed with dried sludge.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	9
1.1	PROBLEMDISKUSSION	9
1.2	PROBLEMFÖRMULERING OCH MÅL	12
1.3	AVGRÄNSNINGAR	12
2	KÄLLOR	13
3	FÖRBRÄNNING AV AVLOPPSSLAM	14
3.1	UTVECKLING ÖVER TID TILL NUTID	14
3.2	TEKNIK	14
4	ROSTELDNING	16
4.1	KARAKTÄRISTIK	16
4.2	BELÄGGNINGS OCH KORROSIONSPROBLEM	18
5	SLAMELDNING PÅ I ROSTPANNA	22
5.1	ALLMÄNNA FÖRUTSÄTTNINGAR	22
5.2	MONOFÖRBRÄNNING	22
5.3	SAMFÖRBRÄNNING MED AVFALL	23
6	SLUTSATSER	27
7	REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING	28
8	REFERENSER	29

1 Inledning

Eldning av bränslen med högt klor- och alkaliinnehåll kan ge upphov till beläggningar och korrosion på ångbärande tuber.[1][2] Försök i fluidbäddanläggningar (FB) har visat att sameldning med avloppsslam kan minska dessa problem.[3] Beläggningstillväxten, beläggningarnas klorhalt och korrosionen minskar. Ett bränsle med högt klor- och alkaliinnehåll är avfall. Av Sveriges trettioåttal avfallsförbränningsanläggningar är dock endast en fjärdedel av typen FB medan de andra är rostpannor.[4] Rosten skiljer sig avsevärt från FB; exempelvis finns ingen kvartbaserad bädd, och omblandningen av bränslet är mindre kraftig och sker vid en högre temperatur. Frågan är om de positiva effekterna av slam även skulle bli fallet i en rostpanna.

1.1 Problemdiskussion

1.1.1 Beläggings- och korrosionsproblem

Vid förbränningen av bränslet avgår vissa ämnen i gasfas. Av särskild betydelse för beläggings- och korrosionsproblematiken är alkali (kalium, K och natrium, Na) och klor. När det gäller biobränslen så är det främst de askrika bränslena som har höga halter av kalium och klor. I hushållsavfall och verksamhetsavfall förekommer mer natrium, t.ex. som natriumklorid, och klor återfinns i t.ex. PVC-plast. Ett särskilt svårt bränsle ut beläggings- och korrosionsproblem är Shredder Light Fraction (SLF, även kallat fluff), som är en lätt fraktion från återvinning av metallskrot. Det kännetecknas av hög ask- och alkalihalt och hög klorhalt. Tabell 1 visar innehållet av viktiga ämnen i några bränsletyper.

Tabell 1 Innehållet i några bränslen. Halter anges i procent av torrt bränsle.

Table 1 The contents of some fuels. Values are given in percent of dry fuel.

parameter	träpellets [5]	barkpellets [6]	halmpellets [5]	avfall [3]	SLF
aska	0,3	4,2	5,6	21	45
Cl	<0,01	0,02	0,3	0,42	1,32
S	<0,01	0,03	0,1	0,57	0,22
K	0,029	0,193	0,616	0,389	0,27
Na	0,003	0,042	0,050	0,645	0,46
Al	0,002	0,109	0,036	1,132	2,6
Si	0,012	0,462	1,680	4,200	0,41
Fe	0,003	0,050	0,012	0,580	16
Ca	0,064	0,832	0,291	3,150	2,5
Mg	0,010	0,071	0,056	0,313	0,39
P	0,004	0,042	0,078	0,109	0,11

Även om alkali delvis stannar i bottenaskan och klor delvis bildar väteklorid (HCl) så bildar de också gärna natriumklorid och kaliumklorid (KCl),[7] som p.g.a. sitt relativt höga ångtryck återfinns i gasfas vid typiska förbränningstemperaturer. I bränslet finns ofta alkali i överskott i förhållande till klor och kan då avgå till gasfas även i form av KOH.[8] Med detta innehåll av alkaliföreningar når de heta rökgaserna småningom kylda ytor; oftast i form av ståltuber med vattenånga eller vatten i. Rökgaserna kyls och ångtrycket av

alkaliföreningar kan då nå mättnadstryck och kondensera. Kondensationen kan ske genom nukleation, kondensation på partiklar i rökgasen eller direkt på stålytan. Partiklarna i rökgasen härrör från bränslets aska och är tillräckligt små för att föras med rökgasströmmen. De består av askbildande föreningar med lågt ångtryck såsom kalciumföreningar och kiselföreningar. Materialtransporten till tubytan kan ske genom diffusion, impaktion och termofores.[9] Diffusion är transport av gasformiga ämnen från hög till låg koncentration som exempelvis av KCl från rökgasen in mot tubytan. Impaktion sker när partiklar är för stora för att följa med gasströmmen då den böjer av kraftigt som exempelvis kring en tub. De kan då fortsätta rakt fram och träffa tubytan. Termofores är transport av små partiklar från högre till lägre temperatur vilket kan ske i närheten av tubytan. Partiklar som når ytan kan fastna där om tubytan eller partikelytan redan har ett lager av beläggning; särskilt om detta är flytande och därmed klabbigt, vilket kan vara fallet om blandningen av ämnen i beläggningen har fått en smältpunkt som ligger under ytans temperatur.

Det står alltså klart att om ett bränsle innehåller höga halter av alkali och klor så finns förutsättningar för att beläggningar på kylda ytor skall bildas. Beläggningar utgör i sig ett problem. Dels blir rökgaspassagen kring tuberna trängre vilket kan orsaka erosionproblem och ökar fläktarbetet för rökgasfläkten, och dels hindras värmeöverföringen till vattnet i tuberna. Allteftersom beläggningarna blir tjockare ökar också, p.g.a. minskad värmeöverföring, beläggningens temperatur så att risken för smältor ökar. Det största problemet torde dock vara att högtemperaturkorrosion gynnas av beläggningen. KCl är särskilt benäget att orsaka korrosionsproblem eftersom det innehåller både kalium och klor vilka båda ingår i mekanismer för högtemperaturkorrosion av stål.[10] Om korrosionen fortgår tillräckligt länge så måste tuberna bytas ut till stora kostnader.

1.1.2 Motmedel

För att motverka beläggningsbildningen har flera metoder prövats som har det gemensamt att de syftar till att alkali skall reagera och bilda något annat än klorid. Tillsats av elementärt svavel till eldstaden har t.ex. visat sig tränga undan klorid från alkali som istället bildar alkalisulfat,[11][5][12] som har betydligt lägre ångtryck än klorid och dessutom är mindre korrosivt. Bildningen av sulfat har visat sig ske med större effektivitet genom tillsats av ammoniumsulfat [5][13] som då sprayas in i rökgasen. Sulfat kan också tas ut i rökgasreningssteget som svavelsyra och återförs till rökgasen.[14] En annan metod är att tillsätta kaolin som är en aluminiumsilikat som binder alkali. Detta har oftast prövats för att minska agglomereringsrisken i FB-pannor men eftersom alkali binds av kaolinet så minskar även alkalikloridhalten i rökgasen.[5][13][15] En helt annan metod är att sänka bäddtemperaturen i eldstaden för att minska ångtrycket och därmed koncentrationen av alkaliklorider i rökgasen.[16]

Verkan av ovan nämnda tillsatser antyder att sameldning av ett besvärligt bränsle med ett bränsle som innehåller kaolinliknande ämnen och/eller svavel vore en tänkbar metod. Således har sameldning av kol och halmpellets prövats med framgång.[17] Kol innehåller förutom svavel, en askfraktion som till stor del består av aluminiumsilikater.[18]

Avloppsslam innehåller både svavel och aluminium och torde därför vara lämplig som sameldningsbränsle. Avloppsvattnet genomgår i reningsverket mekanisk, biologisk och kemisk rening. I den kemiska reningen ingår tillsats av en fällningskemikalie varav den

vanligaste är järnsulfat, men även järnklorid och polyaluminiumklorid används. De flesta reningsverk har efter reningsstegen en röt-kammare. I denna avgår bl.a. metan från slammet vilket gör att energinnehållet minskar men också att slammet blir mer hygieniskt vilket är en fördel ur hanteringssynpunkt. Efter rötningen sker en mekanisk avvattning till ca 25% torrhalt, och det är detta mekaniskt avvattade rötslam som kommer i fråga för förbränning. Några exempel på sammansättningen av avloppsslam ges i Tabell 2. Det framgår att halterna av svavel, fosfor och aluminium är höga. De senare är extra höga i slammet från Nohaga där en aluminiumbaserad fällningskemikalie används. Sammantaget visar analysen av slaminnehållet att man kan förvänta sig positiva egenskaper ur beläggings- och korrosionssynpunkt av sameldning med slam.

Tabell 2 Innehållet i avvattnade rötslam från några avloppsreningsverk. Halter är givna i procent av torrsubstans.[6]

Table 2 The contents of dewatered and digested sludges from some sewage treatment works. Values are given in percent of dry matter.[6]

parameter	Gryaab	Sjölunda	Himmerfjärden	Nohaga
aska	46	43	42.3	42.6
Cl	0.05	0.10	0.06	0.04
S	0.86	1.71	1.38	0.80
K	0.67	0.53	0.44	0.47
Na	0.32	0.31	0.21	0.26
Al	3.96	2.14	2.03	8.14
Si	5.66	5.33	4.44	5.28
Fe	7.18	5.55	8.04	1.99
Ca	1.95	4.00	2.51	1.71
Mg	0.48	0.55	0.42	0.32
P	2.83	3.16	3.32	2.36

Sameldning med avloppsslam och byggavfall har visat att beläggingsbildningen och mängden submikrona partiklar i rökgasen minskade.[19] På liknande sätt har slam visat sig i kraftigt minska beläggingsbildningen när det eldats tillsammans med halmpellets.[5][17] Orsakerna till slammets goda egenskaper har föreslagits vara en eller flera av följande [19]

- relativt högt svavelinnehåll
- högt innehåll av aluminiumsilikater
- en hög askhalt som ger hög koncentration av askpartiklar i rökgasen och därigenom utgör en stor yta för alkaliklorider att kondensera på
- erosiv verkan på beläggningar p.g.a. hög partikelhalt i rökgaserna

Betydelsen av slammets innehåll av aluminiumsilikater och svavel har konstaterats [5][17] men ingen av de andra tänkbara orsakerna kan uteslutas. Effekten av tillsats av slam med olika ursprung vid avfallselddning har undersökts.[6] Slam som fällt med aluminiumsalt gav inte bättre effekt på beläggningstendensen och korrosionstendensen än sådana som fällt med järnsalt. Förutom svavlets effekt framkom att fosfor sannolikt har en positiv effekt; troligen genom att binda alkali som fosfat. Till faktorerna a-d ovan kan alltså läggas

- relativt hög fosforhalt

Shredder light fraction (SLF) är en fraktion som uppstår vid hantering av metallhaltigt avfall, som exempelvis kan härstamma från bilskrotning. SLF innehåller högre halt av klor än vanligt avfall och kan därför väntas orsaka större problem med beläggningar och korrosion än vanligt avfall. För att hantera detta blandas en mindre mängd SLF med vanligt avfall och förbränns i avfallsförbränningsanläggningar. Inblandningskvoten uppgår då till 5-10%. Möjligheten att öka inblandningen har undersökts i Lidköpings Värmeverk AB:s FB-panna.[3] En inblandning av drygt 20% SLF gav ökade beläggnings- och korrosionsproblem i ett 24-timmarsförsök. Exempelvis nästan fördubblades beläggningstillväxten i vändschaktet och nedströms konvektionstråket. En slamtillsats på motsvarande 23% avvattnat slam gjorde att ökningen av problemen med SLF i stort sett eliminerades.

De ovan nämnda studierna har gjorts på FB-pannor. Tre fjärdedelar av avfallsförbränningsanläggningarna i Sverige är emellertid rostpannor.[4] Exempelvis SLF eldas i fem olika pannor i Sverige vilka alla är rostpannor. De mest uppenbara skillnaderna mellan FB och rost är själva förekomsten av en bädd och att omblandningen är kraftigare och därmed kontakten mellan bränslepartikel och förbränningsluft mycket större i FB. Temperaturen är lokalt betydligt högre på en rost än i en FB. Rostpannor är ganska okänsliga för bränslets form och fukthalt vilket gör att de är lämpade för avfallsbränslen som är heterogena i många avseenden. Förbränningen kan dock ske till priset av en större halt oförbränt i askan. Frågan är om fördelarna av sameldning av avfall och slam vore lika tydliga under rosteldning som i FB. Med de ovan beskrivna skillnaderna kan man på en rost förvänta sig att slammet lokalt, p.g.a. den sämre omblandningen, riskerar att orsaka en relativt kall zon med följdverkningar på rökgassammansättning, utbränning, verkningsgrad m.m. Det kan också vara en fördel att samelda det relativt fuktiga slammet med avfall som har högt värmevärde eftersom värmeutvecklingen då blir mer kontrollerbar. Innan man genomför fullskaleförsök är det alltså lämpligt att ta del av den information som eventuellt finns tillgänglig om erfarenheter av slameldning på rost. Eftersom slammet kan ses som ett motmedel mot beläggningsskikt och korrosion i fluidbäddar är det också lämpligt att studera detta och andra åtgärder, som är jämförbara med slamtillsats, vid rosteldning.

1.2 Problemformulering och mål

Målet är att sammanställa erfarenheter av eldning av avloppsslam på rost med avseende på bränslehantering, inblandad mängd och driftparametrar. Målet är också att studera de mekanismer som minskar beläggnings- och korrosionsproblem vid slameldning i rostpanna. Målgruppen är ägare/blivande ägare av rostanläggningar.

1.3 Avgränsningar

Föreliggande studie begränsas till förbränning. Härvid tas endast de tekniska aspekterna upp; d.v.s. ekonomiska frågor om t.ex. lönsamheten i slamhanteringen utelämnas. Det slam som avses är rötat avloppsslam från avloppsreningsverk. Studien behandlar driftrelaterade frågor vid slamförbränning men ej konsekvens för emissioner till luft och vatten eller för innehåll i askor.

2 Källor

Den främsta källan vid litteraturstudier av föreliggande slag bör vara vetenskapliga artiklar. Dels är de granskade av sakkunniga och dels är de lätta att få tag på inte bara för författaren utan även för den läsare som vill ta del av källmaterialet. En annan fördel är att litteraturen är engelskspråkig och att man därigenom kan få en relativt stor geografisk spridning av sitt källmaterial. Frågan om eldning av avloppsslam på rost är dock sällan omskriven i sådana medier. Ett av skälen till den begränsade vetenskapliga litteraturen är troligtvis att slameldning på rost är ovanligt. Det gör att även andra källor är sparsmakade i detta ärende. Källorna inskränker sig därför till ett antal rapporter, presentationer och sammanställningar som beskriver de fåtal fall som förekommit och förekommer av eldning av slam på rost. Därtill kommer information som i skrivande stund är tillgänglig på internet; bl.a. från tillverkare av system för slameldning på rostpannor. Orsaken till att det har blivit ett visst fokus på tyska exempel och källor står främst att finna i det faktum att det verkligen förekommit eldning av slam på rostpanna där, och att den litteratur som omskriver dessa förekomster är, om inte lättläst, så åtminstone begriplig för författaren. När det gäller åtgärder vidtagna mot beläggingsbildning och korrosion finns vederbörlig litteratur att finna i vetenskapliga tidskrifter.

3 Förbränning av avloppsslam

I detta avsnitt behandlas kort förbränning av avloppsslam generellt. Dels beskrivs utvecklingen över tid och dels de tekniker för förbränning som kommer i fråga.

3.1 Utveckling över tid till nutid

I Sverige finns en uttalad önskan att sluta fosforkretsloppet. Ett sätt att verka i den riktningen är att utnyttja avloppsslammet som gödningsmedel på åkrar.[20] I föreliggande rapport betraktas slammet i Sverige inte som ett bränsle trots att det är förbränning som diskuteras. Snarare är det att betrakta som ett additiv för att förbättra förbränningsprocessen. En enkel kalkyl visar att om exempelvis all avfallsförbränning i Sverige skulle ske med slamtillskott så skulle ca 70 % av den totala slamproduktionen tas i anspråk. Det är orimligt så länge fosfor inte kan återvinnas ur askan på ett tillförlitligt sätt. Den totala produktionen av avvattat avloppsslam är ca 1 Mt vilket motsvarar ca 0.25 Mt torrsubstans. År 2008 gick drygt hälften av detta till deponitäckning, en femtedel till anläggningsjord och en femtedel till jordbruk/åker. Bland ett antal småposter finns 1% till förbränning,[21] varav en del är knutet till forskning och utveckling i FB. Det faller sig därför naturligt att erfarenheter från förbränning måste sökas i andra länder.

Behandlingen av avloppsslam dominerades i Tyskland 1987 av deponi medan ca 15% av slammet behandlades termiskt. Från slutet av 90-talet har den termiska behandlingen ökat i omfattning och står idag för mer än 50% av slambehandlingen medan deponi har upphört nästan helt.[22] Den troliga orsaken till ökningen från slutet av 1990-talet till idag är förbudet mot deponi. Förbränningen är alltså ett sätt att hantera de slammängder som produceras. Från mitten av 70-talet har den totala kapaciteten att ta emot slam till monoförbränningsanläggningar ökat stadigt och var 2008 ca 500 000 ton torrsubstans per år. Samförbränningskapaciteten har ökat kraftigt från 0 1996 till 700 000 ton torrsubstans per år 2008.[22] I Tyskland finns f.n. ca 50 anläggningar för slamförbränning. Av dessa är 16 för monoförbränning, hälften för samförbränning i kraftverk och 10 för samförbränning i cementverk.[23] Även i Nederländerna har man sett en ökning av produktionen av avloppsslam.[24]

I Tyskland och Nederländerna pågår relativt mycket slamförbränning som kan jämföras med att ca 1% av allt avloppsslam i exempelvis Tjeckien [25] och Sverige går till förbränning. Andra länder med relativt hög andel förbränning är Österrike, Storbritannien och Danmark.[25] I Schweiz förbrändes år 2002 över 70% av avloppsslammet.[26] Huvudsyftet med förbränningen tycks vara att minska slammets volym; d.v.s. att göra sig av med det.

3.2 Teknik

Tekniker som används för förbränning av avloppsslam kan indelas i monoförbränning och samförbränning. Vid monoförbränning utgör slammet det enda bränslet och måste därför torkas före förbränning. För torkning finns en mängd anläggningar.[22][23][27] Syftet är att öka värmevärdet och transporterbarheten. Avvattat slam kan eldas vid monoförbränning och samförbränning, och fulltorkat slam kan eldas i samförbränning och omvandlas med alternativa behandlingsmetoder såsom förgasning. För att torka slammet finns termiska tekniker och solstrålningsbaserade tekniker. För detta finns flera kommersiella

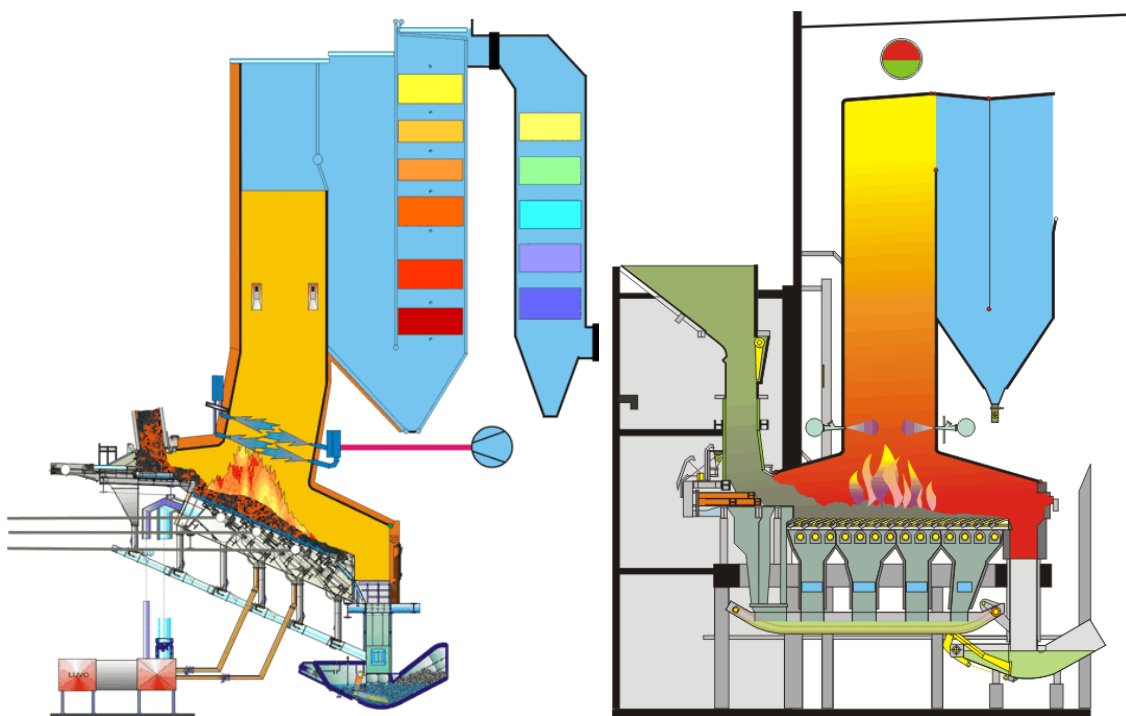
lösningar.[22][23] Monoförbränning sker oftast i FB-pannor.[22] Det finns också rostanläggningar för monoförbränning såsom i Altenstadt (Emter).[22] Även roterugnar och olika typer av smältugnar förekommer.[29] Vid samförbränning eldas slammet tillsammans med ett annat bränsle som då står för större delen av det totala värmevärdet. Härvid blir behovet av torkning mindre. Oftast samförbränns slammet med kol i vad för anläggning det råkar vara; pulvereldning, FB eller, mer ovanligt, rost. I Nederländerna förbrändes år 2002 ca 45% av allt kommunalt avloppsslam i FB.[24] Även i Japan dominerar FB-tekniken,[27] men det finns även flera rostanläggningar för samförbränning med avfall. Samförbränning av slam och avfall på rost finns/har funnits i Krefeld,[30] Hengelo (VIT) [24] och Bamberg[31].

En stor del av samförbränningen utgörs också av cementfabriker. Även ett antal stora energiaktörer bedriver samförbränning av slam.[22]

4 Rosteldning

4.1 Karaktäristik

En rostpanna kan delas in i primärförbränningszon och sekundärförbränningszon. I primärförbränningszonen sker torkning och den inledande omvandlingen av det fasta bränslet, vanligtvis under substökiometriska förhållanden, varefter förbränningen fullbordas i den efterföljande sekundärförbränningszonen där luft blandas med rökgasen högre upp i eldstaden. I primärförbränningszonen matas bränslet in på den så kallade rosten. Rosten har uppgifterna att transportera det fasta bränslet och den producerade askan samt att fördela primärluften längs med rosten och sidled så att luften inte smiter längs väggarna.[32][33] Rostar indelas ofta efter den mekanism som flyttar bränslet. Den vanligast förekommande rosttypen i Sverige, som därför är av störst relevans för samförbränning med avfall, är den sluttande rörliga rosten av vilken finns cirka 350 enheter $>5 \text{ MW}_{\text{th}}$. [34] Den är uppbyggd av en mängd roststavar som skjuter bränslebädden framåt. Andra exempel är sluttande fast rost (anläggningar $<5 \text{ MW}_{\text{th}}$), vibrerande rost (halm- och avfallsförbränning) och wanderrost (kolförbränning). Av vibrerande rostar finns endast ett fåtal i Sverige, men då dessa är stora förbränningsanläggningar så kan slamförbränning vara aktuellt.



Figur 1. Schematiska bilder av sluttande rost (t.v.) och horisontell rost (t.h.).[28]

Figure 1 Schematic pictures of a sloping grate (left) and a horizontal grate (right).[28]

Rostpannor föredras framför allt på grund av de låga investerings- och driftkostnaden samt den goda robustheten i drift både vid fullast och vid dellast.[29][32] Rostpannor används därför vanligtvis för förbränning av bränsle med låg och varierande kvalitet [32], som exempelvis varierande fukthalt. De används även för värmeproduktion i småskaliga enheter

där drift utan stationär personal är prioriterad. Små rostanläggningar för förbränning av förädlade och oförädlade träbränslen ($<5 \text{ MW}_{\text{th}}$) används nästan enbart för värmeproduktion eftersom elproduktion inte är lönsam. I de större rostanläggningarna, som kan vara aktuella för samförbränning med slam, är kombinerad el- och värmeproduktion förekommande. I dessa eldas vanligen fuktigt skogsavfall av ($<20 \text{ MW}_{\text{th}}$) eller avfall i form av hushållssopor eller industriavfall ($>20 \text{ MW}_{\text{th}}$).

Inom denna studie är jämförelsen mellan rostförbränning och andra förbränningstekniker begränsad till förbränning i FB, eftersom slam och eventuella samförbränningsbränslen kan eldas i båda typerna av anläggningar. En schematisk bild på en bubblande FB visas i Figur 2. Denna panntyp har beskrivits utförligt i.[3]

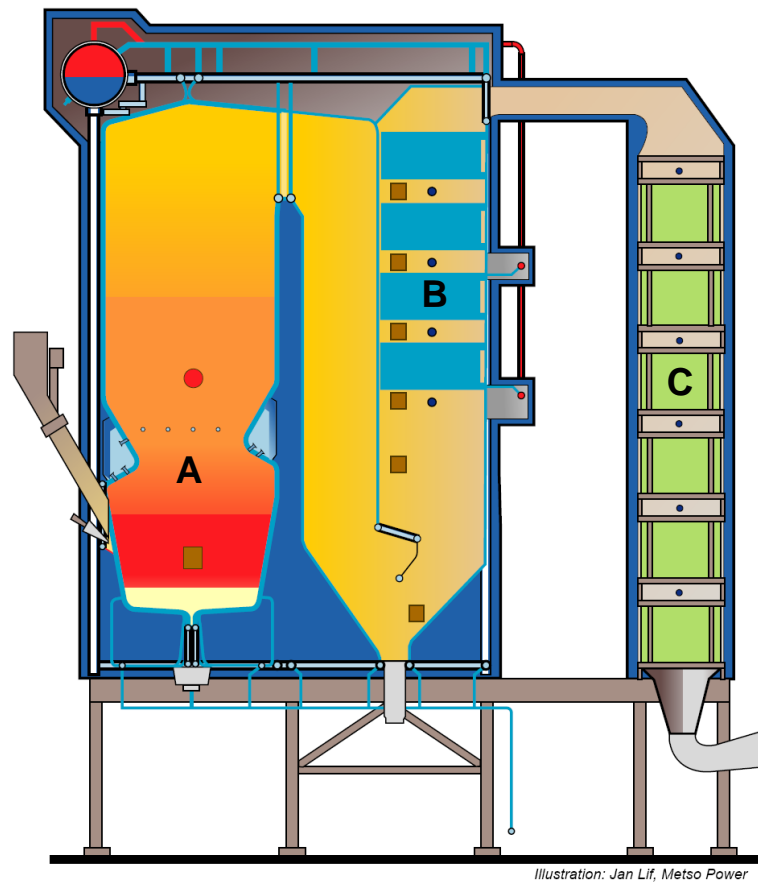


Illustration: Jan Lif, Metso Power

Figur 2. Schematisk bild av en bubblande FB. A = eldstad, B = konvektionsdel och C = ekonomiser.

Figure 2 Schematic picture of a bubbling fluidised bed. A = furnace, B = convection pass and C = economiser.

Den grundläggande skillnaden mellan förbränning på rost och i FB är att bränslet på en rost bildar en fast bädd genom vilken en omvandlingsfront vandrar, medan en FB består av en bädd av inerta partiklar (sand) i vilken bränslepartiklar blandas in. Detta medför att bränslet hettas upp betydligt långsammare på en rost än i en FB där bränslet kastas rakt in i ett sandhav vid $850\text{-}900 \text{ }^\circ\text{C}$. Bränslet förs på en rost in vid ena änden och transporteras sedan sakta framåt varvid den successivt utsätts för ökande strålning innan den antänds. På bränslebädden i en rost kan detta ses som områden med synbart olika processer samtidigt,

såsom flammor i vissa områden medan det saknas i andra.[35][33] Omvandlingsmässigt innebär detta att torkning och pyrolys sker långsammare och vid en lägre temperatur än i FB. Koksförbränningen sker däremot ofta över 1000 °C.[32][36] I både förbränning på rost och i FB är flexibiliteten god vad avser bränslefukthalt och partiklarnas form och storlek.[32] Detta beror på att det i båda fallen finns en stor mängd lagrad värme som kan utnyttjas för att stabilisera förändringar. Med tanke på avloppsslammets höga fukthalt är det viktigt att framhålla att bränsemixens totala fukthalt inte får vara så stor att förbränning svårigen kommer till stånd. Detta kan man relativt enkelt reglera med bränsleprover. En större svårighet på en rost kan vara att undvika lokala höjningar av fukthalten orsakade av dålig omblandning vilket leder till temperatursänkningar. Omblandningen av bränslet är betydligt mindre på en rost än i en FB, vilken uppvisar en kraftig omblandning p.g.a. bäddens fluidisering. Det leder i en rostanläggning till en betydligt ojämnare temperaturfördelning över bäddytan med högre temperaturtoppar, men också mindre materialslitage.[32] Rosten kan dock skadas om den friläggs för strålning [38] från eldstaden eller när låga primärluftflödes hastigheter ger upphov till höga koksförbränningstemperaturer vid rostens yta [39]. Den högre omblandningen och flödes hastigheten i en FB medför att halten av rökgasstoff är betydligt högre från en FB jämfört med en rostpanna; i koksförbränningszonen på en rost kan luftflödet hållas lågt varvid medryckning av aska minskas. Däremot är halten av oförbränt material vanligtvis större i en rostpanna. Det har i en modell av rostförbränning av stråbränsle visats bero på otillräcklig omblandning mellan rökgaser och luft i sekundärförbränningszonen.[37]

4.2 Beläggnings och korrosionsproblem

Här diskuteras beläggnings- och korrosionsproblem i rostpannor samt åtgärder som kan vidtas mot dessa. De åtgärder som är aktuella här förutom tillsats av avloppsslam är sådana som kan jämföras med slamtillsats. Det gäller exempelvis tillsatser av ämnen som förekommer i slam, men inte åtgärder som innebär förändringar av rostpannans utformning.

4.2.1 Förekomst

Biobränslen och avfall innehåller aska av varierande mängd, sammansättning och smältpunkt. Askan i bränslet kan smälta, förångas eller ryckas med av gasflödet och på så vis överförs till en yta där den, förutom att verka som ett hinder, kan medverka till korrosion. En viktig parameter för smältpunkten och därmed askans benägenhet att skapa beläggningar med eventuell korrosion är askans innehåll av alkalimetaller.

Beläggningar i rostpannor förekommer i form av slaggning (beläggningar på rosten) och beläggningar på värmeöverförande ytor ovanför rosten. Vid förbränning av relativt askfattiga träbränslen med låg alkalihalt, såsom stamvedsflis, skogsavfall och bark, är slaggning det vanligaste problemet. Vid förbränning av bränslen med askor av högre alkalihalt, som halm, tenderar beläggningar på värmeöverförande ytor att bli problematiska.[37] Till stor del kan erfarenheter från studier kring beläggningsförekomst i FB användas som vägledning för rostpannor, men skillnaderna mellan de två teknikerna gör dock att mekanismerna för bildning av beläggningar kan se olika ut, och att metoder för att motverka beläggningar och korrosion i FB inte nödvändigtvis fungerar i en rostanläggning.[32] En uppenbar skillnad mellan rost och FB är avsaknaden av en sandbädd. I en FB kan askan reagera och bindas av den oftast kvartsbaserade bäddsand. Detta är ur beläggnings- och korrosionssynpunkt en fördel eftersom denna alkali då inte

kan bilda beläggningar men kan vara problematisk p.g.a. låg smältpunkt. Denna alkalibindning begränsas på en rost av bränslets innehåll av kiselbaserade ämnen såsom kvarts. Den låga smältpunkten kan leda till slagning på rosten med både försämrade bränsletransport och fördelning av primärluften som följd.

Beläggningar på ytor ovanför rosten bildas ur förångade askämnen eller vidhäftning av medryckta partiklar. Partiklar i rökgasen kan bildas genom fragmentering av koks i olika stadier av utbränning. När den är helt utbränd kvarstår aska, som, om den bildar tillräckligt små partiklar, kan föras med av rökgaserna och bilda flygaska. Dessa partiklar kan sedan fastna på tuber och bidra till beläggingsbildning. Partikelmängden i rökgasen är betydligt lägre i en rostpanna än i en FB [32] men ångtrycket av beläggingsbildande ämnen är högre. Det kan resultera i mer kondensation av gasformiga ämnen på överhettartuber och andra kylda ytor men mindre påbyggnad av beläggningen p.g.a. impakterande partiklar.

Beläggingsbildningen i en rostpanna eldad med stråbränsle har beskrivits i en modell, vars simuleringsresultat jämförts med experiment.[40] Studien visar att beläggningen initieras av kondensation av KCl som bildar ett inre lager. Därefter tar partikelimpaktion vid som viktigaste mekanism. Dock har det visat sig, vid studier av mogna ("mature") överhettarbeläggningar från två stråeldade danska rostpannor (Masnedö, 33MWth, och Ensted, 100 MWth), att det innersta lagret tillväxer genom kondensation av KCl trots decimetertjocka befintliga beläggningar.[41] Även i avfallseldade rostanläggningar fås beläggningar och flygaska med höga halter av kalium.[42] Ytterligare labskalexperiment för att undersöka korrosion under omständigheter motsvarande stråeldning har gjorts.[43] KCl-innehållande beläggning befanns vara mycket korrosiv. Sulfatering av KCl skedde till mindre del om KCl-beläggningen bestod av små partiklar än om den bestod av stora; möjligen p.g.a. tätare packning. CaO i beläggningen reagerade med HCl i rökgasen och bildade CaCl₂ vilket ökade korrosionshastigheten.

4.2.2 Motåtgärder

De vanligaste åtgärderna mot beläggningar och korrosion är att genomföra diverse förändring i drift eller av konstruktionsmaterial. Korrosion kan naturligtvis motverkas genom användande av beständigare material. Exempelvis har alumindbeläggning på försökstuber i en rostanläggning för avfallseldning visat sig öka korrosionsmotståndet.[44] För att minska korrosion på värmeöverförande ytor, vid eldning av svåra bränslen som avfall, kan även ångtemperaturen i ångbärande tuber sänkas; en åtgärd som tyvärr också leder till sänkt elverkningsgrad. För att minska slagning, termiskt slitage och korrosion på själva rosten är framför allt ökad kylning av denna, med samtidigt höjning av förbränningsfronten från dess yta, effektiv. Praktiskt görs detta lämpligen genom att penetrationshastigheten av luften genom rosten och in i bädden ökas, vilket kan stödjas med rökgasåterföring.[39] Rökgasåterföring genom rost vid avfallsförbränning är dock ej vanligt då det kan orsaka korrosion på rosten. Eftersom föreliggande studie fokuserar på hur sameldning med avloppsslam kan påverka beläggningar och korrosion, bortses här från ovanstående och liknande åtgärder som innebär ombyggnad av delar av pannan. Istället fokuseras på motåtgärder som tillsats av slam eller additiv som kan jämföras med slam samt andra sameldningsbränslen som i någon väsentlig mån liknar slam.

För att motverka agglomerering i FB-anläggningar har man bl.a. tillsatt kaolin. Det har även visat sig att kaolin effektivt binder alkali och därmed även verkar minskande på

beläggningar både vad avser mängd och alkaliinnehåll.[5][13][45] Det är dock inte givet att kaolin fungerar lika bra på en rost med dess mycket sämre omblandning.[32] Att blanda kaolinet med bränslet kan vara svårt men nödvändigt för bästa resultat. I den mån kaolinet är så finfördelat att det följer med rökgaserna, som har observerats i FB,[15] kan en positiv effekt bli reaktion med gasformiga ämnen såsom alkaliklorider.

Elementärt svavel har prövats som tillsats till FB. Tanken är att svavlet skall bilda SO_2 och reagera med alkaliklorider under bildning av alkalisulfat och väteklorid.[5] Huruvida motsvarande effekter skulle bli fallet vid rosteldning är oklart men sannolikt. Minskande effekt av tillsats av elementärt svavel på zinkhalten i beläggningar har rapporterats.[12] Bränslets innehåll av kalcium är viktigt för vad som händer med svavlet, och att avfall innehåller mycket kalcium framgår av Tabell 1. Därutöver påverkar bränsleomblandningen, temperaturen och distributionen/uppehållstiden i reducerande zoner. Omblandningen är långsammare på en rost än i FB, varför bindningen av svavel och kalcium till gips bör vara relativt missgynnad och leda till ökad bildning av SO_2 . Å andra sidan bör reaktionen mellan svavel och syre till SO_2 också vara missgynnad. Temperaturen på en rost är så hög att gips är mindre stabilt än i FB vilket gynnar bildningen av SO_2 . Bildningen av SO_2 respektive gips kräver syre varför dessa svårigen bildas i reducerande zoner. Istället bildar svavlet H_2S som i rökgasen kan omvandlas till SO_2 där sekundärluft tillsätts. SO_2 i rökgasen kan reagera med kalcium i fina partiklar och bilda gips. Det finns med stor sannolikhet större mängd kalciuminnehållande partiklar i FB. Sammantaget är det svårt att kvantitativt svara på hur effektiv svaveltillsats på en rost är jämfört med FB med avseende på bildning av alkalisulfat. Hursomhelst övergår en del av det svavel som tillförs via bränslet i form av elementärt svavel eller sulfat till SO_2 i gasfas, vilket ger en positiv effekt i form av sulfatering av alkaliklorider.

Svavel kan också tillsättas i form av sulfat i rökgasen. Detta görs t.ex. under namnet ChlorOut [46] och innebär att en lösning av sulfat sprutas in i rökgaserna. Även i detta fall ombildas alkalikloriderna till sulfat och frigör väteklorid. Denna typ av svaveltillförsel har visat sig effektivare än elementärt svavel i FB.[5] ChlorOut används i rostpannor för biomassa [47] respektive avfall [32] och har där minskat beläggningar och korrosion. Ett annat sätt att tillföra sulfat är genom svavelrecirkulation varigenom svavel tas från scrubbersteget i rökgasreningen och i form av svavelsyra återförs till rökgaserna ovanför bädden vilket har prövats i Renovas avfallsförbränningsanläggning i Sävenäs.[14] Det visade sig ge en minskning av partikelhalten i rökgasen och beläggningstillväxten. Korrosionen minskade för alla provade material och ändrade karaktär med mindre bildning av metallklorid i metall/oxid-gränssnittet på överhettartuberna.

Fosfor har visat sig vara korrelerat med minskad koncentration av alkaliklorider i rökgasen och minskad andel klor i beläggningen vid slamförbränning i FB.[6] Troligen bildas alkalifosfat via reaktion med alkaliklorider. Fosfor har därmed en effekt som liknar den hos svavel. Även i fallet med fosfor är kalcium en viktig komponent som minskar fosfors positiva effekt genom bildning av kalciumfosfat. Det är okänt om den positiva effekten av fosfor även skulle finnas vid eldning på rost.

Den betydligt mindre partikelmängden i rökgasen som är fallet vid rosteldning jämfört med FB gör troligt att effekten av en stor kondenseringsyta i form av partiklar för gasformig alkaliklorid är mindre. Även en eventuell effekt av erosion av beläggningar bör vara mindre.

Sameldning innebär här att ett bränsle som är besvärligt ur beläggings- och korrosionssynpunkt, såsom t.ex. avfall, blandas med ett annat bränsle som motverkar de problematiska tendenserna. Bland de föreslagna sameldningsbränslena finns kol, torv och avloppsslam.[29] Dessa bränslen kan innehålla både kaolinliknande föreningar och svavel. Sameldning i rostpanna har genomförts med strå och träflis [48] men träflis innehåller inga substantiella mängder kaolinliknande ämnen eller svavel. De få rapporterade fallen av sameldning i rostpanna har inte haft syftet att minska beläggingsproblematiken utan snarare att omvandla slammet till aska och därmed minska volymen som skall hanteras.

5 Slameldning på i rostpanna

5.1 Allmänna förutsättningar

Det avloppsslam som kommer i fråga för förbränning är rötat och avvattnat, vilket görs på reningsverket. Härvid uppnås en torrhalt på ca 25% och ett värmevärde nära noll. För att ytterligare öka slammets torrhalt kan torkning ske i anläggningar som utnyttjar solstrålningen varigenom uppnås 55-80% torrhalt. Med termisk torkning kan 95% torrhalt erhållas. På torrbasis ökar värmevärdet då till ca 9 MJ/kg.[49]

Man kan skilja på mono- och samförbränning. Det förra innebär att avloppsslam är det enda bränslet och det senare att slammet eldas tillsammans med ett annat bränsle, som i detta fall är avfall. Speciellt vid monoförbränning är det viktigt att ha tillräcklig torrhalt. Torrhalten påverkar också slammets konsistens. Det avvattnade slammet har i detta hänseende egenskaper som jord. Det är tungt att gräva i men är pumpbart om pumpen är tillräckligt stark. Soltorkat slam är för hårt och torrt för att pumpas medan termiskt torkat slam är dammigt. Beroende på vilken torrhalt man har på sitt slam måste man alltså använda olika metoder för att föra in det i förbränningsanläggningen. Det finns tre metoder:[31]

- inblåsning av torkat slam över bädden
- spridare fördelar slammet över bädden
- blandning av slam och avfallsbränsle före förbränning

Slammets relativt höga ask- och svavelhalt (jfr. Tabell 1 och Tabell 2) kan påverka emissionerna om inte rökgasreningssystemet kan hantera det.

5.2 Monoförbränning

Anläggningar för monoförbränning är oftast ganska små jämfört med samförbränningsanläggningar. De syftar mest till att hantera slamvolymerna i mindre tätorter även om energiutvinning också görs. Slammet som används i dessa anläggningar är torkat till minst ca 45% torrhalt.[50] Förutom torrhalten kan man vänta sig att slammets olikhet beträffande partikelstorlek, i jämförelse med traditionella bränslen, kommer att ställa krav på driften vid monoförbränning. Vid förbränning på rost är bränslebäddens täthet av betydelse,[51][52][53] vilket till viss del påverkas av partikelstorlek och dess fördelning. En kompakt bränslebädd, d.v.s. en med låg porositet och hög densitet vilket kan förväntas vid förbränning av otorkat slam, ger en annan störningsbild och förbränningskaraktäristik än en volyminös bädd med hög porositet och låg densitet. En tänkbar jämförelsemodell för erfarenhetsöverföring till monoförbränning av slam från existerande anläggningar är därför förbränning av sågspån. Sågspån från sågverk uppvisar liknande partikelstorleksfördelning och håller dessutom vanligtvis hög fukthalt på uppemot 50 %.

Anläggningar speciellt utvecklade för monoförbränning av slam finns på den tyska marknaden. Aldavia BioEnergi GmbH har utvecklat ett system kallat Awina genom vilket torrt slam kastas in över rostbädden. Ingående slam håller 25% torrhalt men torkas ytterligare med en av Aldavia utvecklad teknik. Pannor av denna typ kan göras i storlekar mellan 0.5-30 MW.[54] Systemet används bl.a. av Emter GmbH i Altenstadt, Tyskland.

Hans Huber AG har utvecklat ett system kallat sludge2energy för småskalig monoförbränning.[55] Avvattnat slam tillförs en torkare som ökar torrhalten till mer än 65% innan det förs in på bädden i eldstaden.

5.3 Samförbränning med avfall

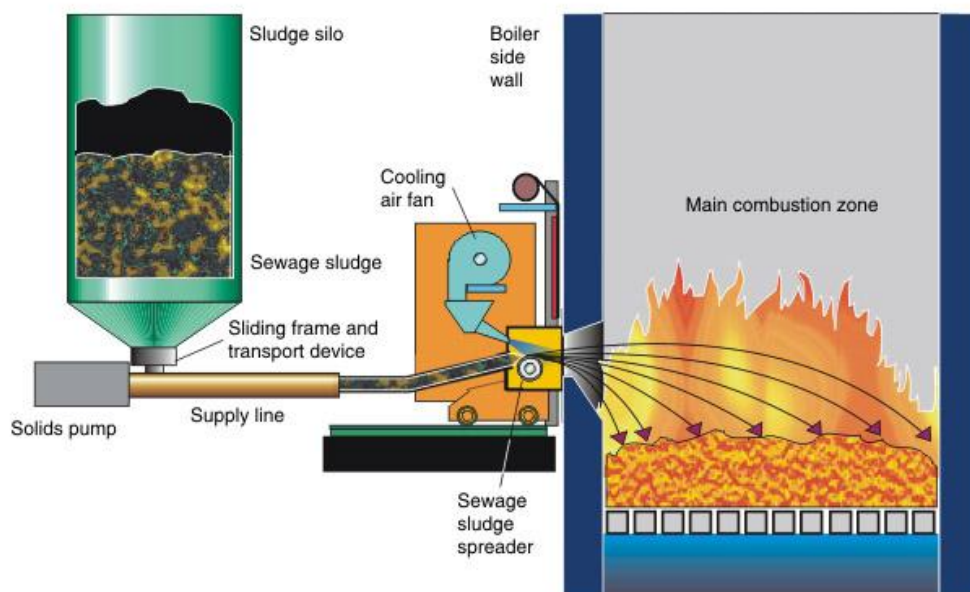
5.3.1 Förutsättningar

Mekaniskt avvattnat slam kan samförbrännas på rost tillsammans med avfall men bildning av alltför stora klumpar bör undvikas eftersom bränslet då inte fullständigt hinner brinna ut på rosten.[22][50] För att förhindra hopklumpning är det viktigt att sprida slammet jämnt i avfallsbränslet.[24] Slam och avfall kan blandas med gripklon i avfallsbunkern. Risken att slammet klumpar ihop sig ökar om dess konsistens är ofördelaktig och inblandningen för stor. Bl.a. riskerar man thixotropi som innebär att slammet får en kraftigt minskad viskositet vid rörelse. Slammet kan också sprutas in via lansar över bädden.[56] Upp till 10% inblandning är erfarenhetsmässigt möjligt.[31][50] Andelen slam bör ej överstiga 25%. Slam med högre torrhalt kan blåsas in direkt i eldstaden.[24] Stoftreningen måste vara anpassad för den ökade stoffbelastning som följer med slammet.[50]

I likhet med monoförbränning förväntas slammet även vid samförbränning inverka på bränslebäddens täthet. Om partikelstorleken hos det ursprungliga bränslet är betydligt större än slammets, kan slammet misstänkas agera som en sammanbindande matris och bidra till en kompaktare bädd. Detta är en parameter som behövs tas i åtanke vid design och drift, och även här kan tänkas att erfarenheter kan överföras från etablerad kunskap om förbränning av träbränslen – förslagsvis samförbränning av flis och sågspån.

5.3.2 Kommersiella lösningar för samförbränning

Martin GmbH har utvecklat en teknik som visas i Figur 3 för samförbränning av slam med en torrhalt på 20-45% med avfall.[31] Slammet sprids från ena sidoväggen i eldstaden med en speciell spridningsmaskin över hela rostens bredd. Den viktigaste delen i spridningsmaskinen är en rotor som kastar in slam i bitar om ca 3 cm över bädden. Slammet hamnar på detta sätt i den mest aktiva förbränningszonen på rosten och blir därigenom fullständigt utbränt. Inblandningen bör ej överstiga 25% slam. En fördel är att förbränningen kan bli lugnare än med rent avfall. Risk finns dock för att rökgaserna inte håller 850 °C i två sekunder om slammets vattenhalt varierar mycket. Kvicksilver ökar i rökgasen vid slameldning medan zink, bly och kadmium snarare minskar något jämfört med förbränning av enbart avfall. En fördel med systemet är att ingen termisk torkning behövs.



Figur 3. Schematisk bild av Martin GmbH:s system för slamförbränning på rost.[28]

Figure 3 Schematic picture of a system by Martin GmbH for firing of sewage sludge on a grate.[28]

L. & C. SteinMüller GmbH har utvecklat system för samförbränning av avvattnat slam respektive torkat slam med avfall.[31] Avvattnat slam blandas med avfallet innan det når eldstaden. Detta görs antingen direkt i avfallsbunkern och blandas då med kranen, eller i avfallstratten variblandningen med avfallet sker under transporten till rosten. I båda fallen är spridningen viktig för att undvika klumpbildning. Det torkades slammet kan föras in i eldstaden genom fallrör eller genom dysor i eldstadens sidovägg. Det senare lämpar sig bättre om slammet är finkornigt och dammigt. I båda fallen är en jämn spridning över rostbredden viktig.

5.3.3 Exempel

Halmstad Energi och Miljö AB (HEM)

HEM förbränner avfall i Kristinehedsverket som är en rostpanna på 45 MW. Den utrustades 2003 för slamförbränning som sker då avloppsreningsverket av någon orsak får för mycket slam för att det skall kunna tas om hand.[56] Hur mycket slam och hur många gånger det förbränns varierar alltså; 2010 förbrändes slam en gång. Slammets lagras i en silo på ca 25 m³ varifrån det via doserskruvar förs till en pump. Slammets pumpas sedan stötvis in i pannan strax ovanför inmatningen av det ordinarie bränslet. Slammets torrsubstanshalt skall högst vara 30% för att transportsystemet skall fungera. Vatten finns anslutet till slamledningen för att underlätta transporten. Ungefär 1.9 ton/h av slammets förbränns och det motsvarar 12% av bränsleblandningens vikt. Utrustningen har falerat ett antal gånger

varefter ledningar och pumpar har behövt bytas ut. Driftmässigt har förbränningen och ångproduktionen påverkats så att den blivit ojämn.

Renova AB

Renova AB förbränner avfall i fyra rostpannor i avfallskraftvärmeverket i Sävenäs. 73 ton avfall per timme förbränns till en effekt av ca 200 MW. Eldning av rötat avloppsslam har testats.[57] Slammet blandades direkt i avfallsbunkern med kranen. Detta visade sig fungera om slammet håller minst 30% torrhalt och utgör högst 5% av bränsleblandningens vikt. Det är också fördelaktigt om bränsleblandningen förbränns så snart som möjligt efter slaminblandning.

MHKW Würzburg [58]

Avfallsförbränningsverket i Würzburg (Müllheizkraftwerk Würzburg) utrustades från början med möjligheter att torka och föra in avloppsslam. Från 1984 har man eldat torkat slam i anläggningen.[59] Inkommande avloppsslam med en torrhalt på minst 40% blandas först med torkat slam (90% torrhalt). Heta rökgaser från förbränningen torkar blandningen varefter denna sönderdelas och via dysor sprids över rosten. En del av det torkade slammet återförs dock för att blandas med det inkommande slammet.

MHKW Göppingen [58]

Avfallsförbränningsanläggningen i Göppingen, Tyskland, togs i bruk 1975. Till denna hör en s.k. homogeniseringsanläggning som syftar till att blanda avfall och avloppsslam så att det kan förbrännas i anläggningen. Avfall och slam inkommer till en bunker varifrån det förs till en roterande torktrumma i vilken det blandas och torkas. Temperaturen på blandningen når 80 °C genom utvändigt värmning med ånga och genomströmning av trumman med varm luft. Eldning med upp till 25% slam är på detta sätt möjligt men en nackdel är att det blir en ökad erosion på överhettartuber.

MHKW Bamberg [58]

I avfallsförbränningsanläggningen i Bamberg har två metoder att förbränna slam använts. Den första innebar att avvattnat slam vid ca 25% torrhalt blandades med torrt slam och sedan fördes in i en tork där de fina delarna fördes in i eldstaden och de andra återfördes till blandningen med det avvattnade slammet. Stora problem med pannans reglersystem och framför allt slammets innehåll av främmande föremål som stoppade flödet av slam i torkprocessen gjorde att denna metod att förbränna slam kompletterades med den andra metoden. I denna avvattnas inkommande slam med en torrhalt på 2-3% till 30-35%. Kalk tillförs varigenom en kornformig slamblandning med över 40% torrhalt uppstår. Denna sprids i avfallsbunkern. Den således bildade blandningen förbränns sedan utan försämring av förbränningen eller utbränningen.

MKVA, Krefeld EGK (Entsorgungsgesellschaft Krefeld GmbH & Co. KG) [30]

I avfalls- och slamförbränningsanläggningen i Krefeld eldas avfall och torkat slam. Slammet torkas till mer än 90% torrhalt med ånga från anläggningen. Därefter förs det pneumatiskt till eldstaden var det blåses in över bädden. Förbränningstemperaturen är 850-1100 °C och uppehållstiden 30-45 min.

Nederländerna [24]

Ett antal rostpannor i Nederländerna är förberedda för slamförbränning men få tillämpar det. Avfallsförbränningen i Dordrecht (GEDUVO) har varit i drift sedan tidigt 1970-tal.

Den var från början utrustad med ingångar för slamförbränning men dessa togs bort i början av 1990-talet. V.I.T. Hengelo stängdes år 2001 efter svåra problem med att elda förtorkat slam. Avfallsförbränningsanläggningen i Duiven (AVR AVIRA) är utrustad med ett system för spridning av avloppsslam i avfallsbunkern. Systemet är inte i drift. Rostanläggningen för avfallsförbränning i Roosendaal (AVI Roosendaal, Sita ReEnergy) är utrustad med en torkanläggning för slam. Rostanläggningen för avfallsförbränning i Amsterdam (AVI Amsterdam (GDA)) är förberedd för sameldning med avloppsslam genom direkt inmatning på bädden.

6 Slutsatser

Slameldning på rost tillsammans med avfall är möjligt. Enklast är att använda torkat slam men även avvattnat slam med minst 20% torrhalt fungerar. Enklaste sättet att föra in slammet i anläggningen är att blanda det i avfallsbunkern men man måste då undvika att slammet klumpar ihop sig. Att föra in slammet direkt på bränslebädden i eldstaden kräver speciell utrustning.

Beläggingsbildningen vid eldning av svåra bränslen som avfall i rostpannor liknar den som observerats i FB-pannor. Möjligen blir det mer kondensation av gasformiga alkaliklorider i rökgasen men mindre beläggningstillväxt p.g.a. partiklar. En motåtgärd i form av slamtillsats har troligen mindre effekt på rost än i FB när det gäller de mekanismer som beror på slammets innehåll av aluminiumbaserade ämnen. Däremot bör det svavel som bildar SO₂ vid förbränningen av slammet ha en positiv effekt jämförbar med den i FB. Effekten kan bli större än i FB eftersom bindningen av svavel i form av gips bör vara mindre vid temperaturer typiska för rostförbränning.

En viktig slutsats är att ingen litteratur har hittats, vari beskrivs sameldning av slam och ett besvärligt bränsle på rost i syfte att studera beläggings- och korrosionsproblem. Huruvida slammet har en positiv effekt har alltså inte visats.

Sammanfattningsvis:

- Slameldning på rost tillsammans med avfall är möjligt.
- Slammets effekt på beläggings- och korrosionsproblem har inte visats i någon publicerad studie
- Slammets eventuella positiva effekter beror troligen mer p.g.a. dess innehåll av svavel än dess innehåll av aluminosilikater.
- Troligen sker beläggningstillväxt på ångtuber i rostpannor mer p.g.a. kondensation av gasformiga ämnen än på partikelimpaktion.

7 Rekommendationer och användning

I experimentell forskning är det grundläggande att den parameter man varierar kan kopplas till en effekt som är större än rena tillfälligheter. Vid förbränning av ett variabelt bränsle som avfall är detta ett hårt krav. Man bör därför se till att man varierar den aktuella parametern tillräckligt kraftigt. I praktiken innebär det att tillsätta tillräckligt mycket slam. Tydliga positiva resultat av en slam tillsats på drygt 10% på torr basis har erhållits i FB. Eftersom man i en rostpanna riskerar att få sämre effekt av slammet vore det önskvärt att kunna blanda in uppemot 15%; något som kan bli svårt om slammet är för fuktigt. Med ett torrare slam underlättas själva inblandningen av slammet och mer slam kan blandas in. Effekten av slam tillsats på rost förblir spekulationer intill dess man provat det. Därför rekommenderas att experimentella studier genomförs där slam tillförs avfallseldning på rost, och effekten av inblandad mängd på rökgassammansättning, partikelmängder, beläggingsbildning och korrosion undersöks.

Det rekommenderas också att man vid nybyggnation av rostpannor för avfallsförbränning överväger möjligheten att samförbränna avfallet med avloppsslam.

8 Referenser

- [1] Miles, T.R., Miles Jr., T.R., Baxter, L.L., Bryers, R.W., Jenkins, B.M., Oden, L.L. "Boiler deposits from firing biomass fuels" *Biomass and Bioenergy* 10, 1996, 125-138.
- [2] Nielsen, H.P., Frandsen, F.J., Dam-Johansen, K., Baxter, L.L. "The implications of chlorine-associated corrosion on the operation of biomass-fired boilers" *Progress in Energy and Combustion Science* 26, 2000, 283–298.
- [3] Gyllenhammar, M., Davidsson, K., Jonsson, T., Pettersson, J., Victorén, A., Andersson, H., Widén, C. "Energiåtervinning av brännbar fraktion från fraktionering av metallhaltigt avfall-steg 2" *Waste Refinery, projekt WR-23*, 2010, ISSN 1654-4706.
- [4] "Svensk avfallsförbränning bäst i världen" *Avfall Sverige AB, Prostgatan 2*, 211 25 Malmö.
- [5] Davidsson, K., Eskilsson, D., Gyllenhammar, M., Herstad Svärd, S., Kassman, H., Steenari, B.-M., Åmand, L.-E. "Åtgärder för samtidig minimering av alkalirelaterade driftproblem" *Värmeforskrapport nr. 997, projekt nr. A5-509*, 2006.
- [6] 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. "Åtgärder för samtidig minimering av alkalirelaterade driftproblem, Etapp 3" *Värmeforskrapport nr. 1167, projekt nr. A08-817*, 2011.
- [7] Baxter, L.L., Miles, T.R., Miles Jr., T.R., Jenkins, B.M., Milne, T., Dayton, D. Bryers, R.W., Oden, L.L. "The behavior of inorganic material i biomass-fired power boilers: field and laboratory experiences" *Fuel Processing Technology* 54, 1998, 47-78.
- [8] Miettinen Westberg, H., Byström, M., Leckner, B. "Distribution of potassium, chlorine and sulphur between solid and vapor phases during combustion of wood chips and coal" *Energy & Fuels* 17, 2003, 18-28.
- [9] Baxter, L.L. "Ash Deposition during Biomass and Coal Combustion: A mechanistic Approach" *Biomass and Bioenergy* 4, 1993, 85-102.
- [10] Pettersson, J., Asteman, H., Svensson, J.-E., Johansson, L.-G. "KCl induced Corrosion of a 304L-type Austenitic Stainless Steel at 600 °C; The role of Potassium", *Oxidation of Metals* 64, 2005, 23-41.
- [11] Henderson, P., Kassman, H., Andersson, C. "The use of fuel additives in wood and waste wood-fired boilers to reduce the corrosion and fouling problems" *VGB PowerTech* 84, 2004, 58-62.
- [12] Andersson, A., Andersson, C., von Bahr, B., Berg, M., Ekvall, A., Eriksson, J., Eskilsson, D., Harnevie, H., Hemström B., Ljungstedt, J., Keihäs, J., Kling, Å., Mueller, C., Sieurin, J., Tullin, C., Wikman, K. "Förbränning av returträflis; Ramprojekt returträflis" *Värmeforskrapport nr. 820, projekt nr. F9-861-865*, 2003.
- [13] Gyllenhammar, M., Herstad Svärd, S., Davidsson, K., Åmand, L.-E., Steenari, B.-M., Folkesson, N., Pettersson, J., Svensson, J.-E., Boss, A., Johansson, L. Kassman H. "Åtgärder för samtidig minimering av alkalirelaterade driftproblem, Etapp 2" *Värmeforskrapport 1037, projekt nr. A06-621*, 2007.
- [14] Andersson, S., Blomqvist, E., Bäfver, L., Claesson, F., Davidsson, K., Froitzheim, J., Karlsson, M., Pettersson, J., Steenari, B.-M. "Minskad pannkorrosion med svavelrecirkulation" *Waste Refinery, projekt nr. WR-07, ISSN 1654-4706*, 2010.

- [15] Davidsson, K.O., Steenari, B.-M., Eskilsson, D. "Kaolin addition during biomass combustion in a 35 MW circulation fluidized-bed boiler" *Energy & Fuels* 21, 2007, 1959-1966.
- [16] Niklasson, F. "Förstudie – Sänkt bäddtemperatur i FB-pannor för avfallsförbränning" *Waste Refinery*, projekt WR-13, 2009, ISSN 1654-4706
- [17] Davidsson, K. O., Åmand, L.-E., Elled, A.-L., Leckner B. "Effect of cofiring coal and biofuel with sewage sludge on alkali problems in a circulating fluidized bed boiler" *Energy & Fuels* 21, 2007, 3180-3188.
- [18] Raask, E. "The mode of occurrence and concentration of trace elements in coal" *Progress in Energy and Combustion Science* 11, 1985, 97-118.
- [19] Åmand, L.-E., Leckner, B., Eskilsson, D., Tullin, C. "Deposits on heat transfer tubes during co-combustion of biofuels and sewage sludge" *Fuel* 85, 2006, 1313-1322.
- [20] <http://www.naturvardsverket.se/sv/Toppmeny/Press-arkiv/Pressmeddelanden-2009/December/Aterfor-mer-fosfor-till-kretsloppet/>
- [21] Hellström, H. "Avsättning av energiprodukter från biologisk behandling – vilka frågeställningar kommer att bli aktuella?" *Waste Refinery*, projekt WR-30B, 2009, ISSN 1654-4706.
- [22] Lehrmann, F. "Stand und Perspektiven der thermischen Klärschlamm Entsorgung" *VDI Wissensforum*, 2010-10-27.
- [23] Jacobs, U. "Dezentrale Klärschlammverbrennung" *VKU Infotag*, 2010-11-09.
- [24] Ministry of housing, spatial planning and the environment "Dutch notes on BAT for the incineration of waste" *InfoMil*, P.O. box 30732, NL-2500 GS The Hague, The Netherlands, www.infomil.nl, ISBN 90.76323.062, 2002.
- [25] Stasta, P., Boran, J., Bebar, L., Stehlik, P., Oral, J. "Thermal processing of sewage sludge" *Applied Thermal Engineering* 26, 2006, 1420-26.
- [26] Monteil, M.B. "Klärschlamm Entsorgung in der Schweiz" *VDI Wissenforum* 2004-02-12--13.
- [27] http://www.gec.jp/JSIM_DATA/Contents/Contents_WASTE_5.html#2
- [28] <http://www.martingmbh.de/index.php>
- [29] Werther, J., Saenger, M., Hartge, E.-U., Ogada, T., Siagi, Z. "Combustion of agricultural residues" *Progress in Energy and Combustion Science* 26, 2000, 1-27.
- [30] MKVA, Krefeld EGK (Entsorgungsgesellschaft Krefeld GmbH & Co. KG) <http://www.egk.de/verbrennung.php>
- [31] Thomé-Kozmiensky, K.J. "Klärschlamm Entsorgung" *Enzyklopädie der Kreislaufwirtschaft*, TK Verlag, ISBN 3-924511-87-X, 1998.
- [32] Yin, C., Rosendal, L.A., Kær, S.K. "Grate-firing of biomass for heat and power production" *Progress in Energy and Combustion Science* 34, 2008, 725-754.
- [33] Hermansson, S. "Detecting, modelling and measuring disturbances in fixed-bed combustion" *PhD thesis*, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2010.
- [34] Svensk Fjärrvärme, pannregister 2007.
- [35] Bøjer, M., Jensen, P.A., Frandsen, F., Dam-Johansen, K., Hedegaard Madsen, O., Lundtorp, K. "Alkali/Chloride release during refuse incineration on a grate: Full-scale experimental findings" *Fuel Processing Technology* 89, 2008, 528-539.

- [36] Frey, H.-H., Peters, B., Hunsinger, H., Vehlow, J. "Characterization of municipal solid waste combustion in a grate furnace" *Waste Management* 23, 2003, 689-701.
- [37] Kær, S.K. "Numerical modelling of a straw-fired grate boiler" *Fuel* 83, 2004, 1183-1190.
- [38] Wiese, J., Führer, K., Mathias, B. "Roststabschäden am Walzenrost eines MVA-Kessels mit Gleichstromfeuerung -Ursachenfindung und Lösungsansatz" *VGB Powertech* 11, 2009, 79-83.
- [39] Hermansson, S., Thunman, H. "Measures to reduce grate material wear in fixed-bed combustion" *Energy & Fuels* 2011, in press.
- [40] Zhou, H., Jensen, P.A., Frandsen, F.J. "Dynamic mechanistic model of superheater deposit growth and shedding in a biomass fired grate boiler" *Fuel* 86, 2007, 1519-1533.
- [41] Jensen, P.A., Frandsen, F.J., Hansen H., Dam-Johansen, K., Henriksen, N., Hörlyck, S. "SEM investigation of superheater deposits from biomass-fired boilers" *Energy & Fuels* 18, 2004, 378-384.
- [42] Phongphiphat, A., Ruy, C., Finney, K.N., Sharifi, V.N., Swithenbank, J. "Ash deposit characterisation in a large-scale municipal waste-to-energy incineration plant" *Journal of Hazardous Materials* 186, 2011, 218-226.
- [43] van Lith, S.C., Frandsen, F.J., Montgomery, M., Vilhelmsen, T., Jensen, S.A. "Lab-scale investigation of deposit-induced chlorine corrosion of superheater materials under simulated biomass-firing conditions Part 1: Exposure at 560 °C" *Energy & Fuels* 23, 2009, 3457-3468.
- [44] Phongphiphat, A., Ruy, C., Yang, Y.B., Finney, K.N., Leyland, A., Sharifi, V.N., Swithenbank, "Investigation into high-temperature corrosion in a large-scale waste-to-energy plant" *Corrosion Science* 52, 2010, 3861-3874.
- [45] Davidsson, K.O., Åmand, L.-E., Steenari, B.-M., Elled, A.-L., Eskilsson, D., Leckner, B. "Countermeasures against alkali-related problems during combustion of biomass in a fluidized bed boiler" *Chemical Engineering Science* 63, 2008, 5314-5329.
- [46] ChlorOut. European Patent EP 1354167.
- [47] Dormann T., Kassman, H., Status report - ChlorOut in Germany, Presented at the 17th Meeting of the Working Panel Biomass, VGB PowerTech, Mannheim, Germany, June 2008.
- [48] Frandsen, F.J. "Utilizing biomass and waste for power production-a decade of contributing to the understanding, interpretation and analysis of deposits and corrosion products" *Fuel* 84, 2005, 1277-1294.
- [49] Arlt, A., Leible, L., Seifert, H., Nieke, E., Fürniss, B. "Processing of sewage sludge for energetic purposes-a challenge for process technology" *Bioprocessing of solid waste & sludge* 2, 2002, 19-29.
- [50] Steier, K. "KS-Mitverbrennung in kraftwerken kapazitätsabschätzung" *VDI Wissenforum*, 2004-02-12--13.
- [51] Ergun, S. "Fluid flow through packed columns" *Chem Sci Eng Prog* 48, 1952, 89-94
- [52] Yang, Y.B., Goodfellow, J., Goh, Y.R., Nasserzadeh, V., Swithenbank, J. "Investigation of channel formation due to random packing in a burning waste bed" *Process Safety and Environmental Protection* 79, 2001, 267-277.

- [53] Hermansson, S., Thunman, H. "CFD modelling of bed shrinkage and channelling in fixed-bed combustion" *Combustion and Flame* 158, 2011, 988-999.
- [54] Aldavia hemsida <http://80.243.160.76/aldavia/index.php?id=3>
- [55] Hans Huber AG hemsida <http://www.sludge2energy.eu/en/index.htm>
- [56] Mitros, V. Halmstad Energi och Miljö, skriftlig kommunikation.
- [57] Detterfelt, L. Renova AB, skriftlig kommunikation.
- [58] Reimann, D.O. "Klärschlammentsorgung" Beihefte zu Müll und Abfall nr. 28, ISBN 3 503 02794 7, 1989.
- [59] Kleppmann, F. "Zweckverband abfallwirtschaft raum Würzburg 179 bis 2009" 2009.



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