

Separatförbränning av utvalda avfallsfraktioner för ökat resursutnyttjande av aska

Separate combustion of selected waste streams to increase resource recovery from ashes.

SLUTSATSER

- Återvinning av metaller ur avfallsströmmar inom energisystemet kräver förändringar i driftstrategi på anläggningarna. Den nya strategin kräver ett fokus på att designa bränslen som inte bara leder till hög energieffektivitet och tillgänglighet utan även askor med högre halter metaller som möjliggör en kostnadseffektiv återvinning av dessa.
- Återvinning av metaller ur avfallsströmmar i energisystemet har potential i framtiden. Exempelvis skulle Ekokem med befintlig övergripande bränslemix kunna återvinna ytterligare 400 ton koppar och 2000 ton zink och mangan genom ändrad driftstrategi. Detta förutsätter dock inte bara en ändrad driftstrategi utan också en utveckling av metallutvinningsmetoder ur askan.
- För kommersiella anläggningar måste en affärmodell med förändrad driftstrategi initialt tas fram. För det krävs kunskap om hur stora mängder metaller det är möjligt att utvinna, kostnader för denna återvinning samt hur de sekundära produkterna och eventuella askrester kan avsättas.
- Avgiftningseffekter på flygaskan behöver utredas vidare då dess miljöpåverkan är en viktig fråga som även innebär stora kostnader. Ökade möjligheter att omhänderta/utnyttja askresten från metallutvinningen lokalt erbjuder även bättre riskspridning för verksamheten.
- Det finns stora kunskapsluckor om innehållet av värdemetaller i avfallet, vilka avfallsfraktioner som innehåller vilka metaller och i vilka mängder dessa fraktioner finns tillgängligt.

Med stöd från:



STRATEGISKA
INNOVATIONS-
PROGRAM

Förord

Ett stort tack från projektledningen riktas till finansörerna av projektet: RE:Source, Ekokem AB, Renova AB och Stena Recycling AB.

Projektledarna vill också tacka för det stora engagemang som funnits i projektgruppen. Även om vi inte löst alla världens problem så har de många och långa diskussionerna i projektgruppen fört in nya perspektiv och fört projektet och frågeställningarna framåt på ett positivt sätt.

Titel på projektet – svenska Separatförbränning av utvalda avfallsfraktioner för ökat resursutnyttjande av aska
Titel på projektet – engelska Separate combustion of selected waste streams to increase resource recovery from ashes
Universitet/högskola/företag SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
Adress Box 857, 501 15 Borås
Namn på projektledare Inge Johansson, Johan Yngvesson
Namn på ev övriga projektdeltagare Frida Jones (SP), Hitomi Lorentsson (Stena Recycling), Thomas von Kronhelm (Ekokem), Karin Karlfeldt Fedje (Renova), Peter Lundblad (Renova)
Nyckelord: 5-7 st Separatförbränning, koppar, zink, aska, riskanalys, materialåtervinning, avfallsförbränning

Innehållsförteckning

Sammanfattning	4
Summary	5
Inledning och bakgrund	6
Genomförande	6
Resultat och diskussion.....	9
Slutsatser och nyttiggörande	11
Nästa steg	13
Resultatredovisning	14
Referenser	15
Bilagor	16

Sammanfattning

Avfall som går till förbränning innehåller olika mängder metaller beroende på vilken typ avfall det är. Idag blandas avfallet innan förbränningen för att ge en bränslemix som erbjuder hög energieffektivitet och hög tillgänglighet på anläggningen. Denna blandning av olika avfall innebär samtidigt att metallhalterna i askorna blir relativt låga, vilket gör det svårt att återvinna dem. Genom att ackumulera specifika avfallsfraktioner över tid och kampanjerna dessa ökar möjligheterna att återvinna metallerna i askorna mer kostnadseffektivt. Detta måste dock ske med bibehållen energieffektivitet och tillgänglighet, vilket kräver god kunskap om olika avfallsströmmars egenskaper vid förbränningen. För en av anläggningarna i detta projekt skulle en sådan förändring i driftstrategi kunna innebära en ökad metallåtervinning (Cu, Zn, Mn) med 2400 ton, utan några förändringar i företagets mix av mottagana avfallsströmmar (sett över helåret).

Olika avfall har olika möjligheter och utmaningar. Exempelvis kan en avfallsström ha höga metallhalter men kan samtidigt förknippas med höga underhållskostnader och driftproblem i form av ökad korrosion och beläggingsbildning i anläggningarna. Under projektet har sådana möjligheter och utmaningar beaktats för ett flertal metallrika avfall som exempelvis kretskort, däck, kompositmaterial, färgrester, returträ, slam, och SLF (en fraktion från återvinning av bilar och vitvaror). De tre sistnämnda pekades ut som extra intressanta ur branschsynpunkt då det finns stora volymer av dem tillgängliga på marknaden.

När man i projektet har diskuterat möjligheter och utmaningar så har mycket av fokus avseende utmaningarna varit kring bränsleberedning, lagring och förbränning medan möjligheterna främst varit fokuserade på den ökade metallåtervinningen och avgiftningen av askorna (samt även i viss mån de positiva effekterna som exempelvis vissa slam kan ha när de eldas tillsammans med andra avfallstyper). En viktig del för att låsa upp den potential som finns med samförbränningen är också den efterföljande metallutvinningsprocessen. En ansökan om fortsättning har därför lämnats in kring ett innovationsprojekt där fullskaliga förbränningsförsök planeras tillsammans med pilotförsök för själva metallutvinningen.

Ett tydligt resultat från projektet är att det saknas kunskap om innehållet i många avfallsströmmar, eller kanske snarare just om innehållet av värdemetaller i olika avfallsströmmar. Det finns också brister i kunskaperna kring vilka tekniska utmaningar och risker som kan förknippas med att förbränna en större andel av en särskild avfallsström. Dessa osäkerheter bidrar till trögheten i att förändra driften, då de ekonomiska konsekvenserna av oförutsedda stopp i förbränningsanläggningen kan vara mycket stora.

Summary

There is a significant amount of waste being treated in waste-to-energy (WtE) plants, both in Sweden and around the world. Depending on the source of the waste, it contains metals both in different amounts and different forms. In a business-as-usual case, these waste fractions are mixed, to achieve high energy efficiency and a high availability of the WtE-plant. This mixing generates residues (ashes) where the metals are diluted, which in turn make it harder to recover them. Another strategy would be to create a mix designed for the purpose of generating high metal content in the ashes, at the same time as the energy efficiency and availability are preserved at high levels. This would involve identifying and accumulating attractive waste fractions containing the sought after metals. When designing the fuel, aspects as heating value and potential fouling/corrosion challenges have to be taken into account (along a number of other factors). This demands an extensive knowledge both of the composition of the waste but also on the effects those waste streams have in the combustion process. When considering one of the two WtE plants in this study, it might be able to recover an additional 2400 tons of metals annually (Cu, Zn, Mn), and that is without changes in their overall waste fuel mix (referred to at a yearly basis).

Different waste fractions are associated with different possibilities as well as challenges. One fraction can have a high metal content, but at the same time also be associated with elevated maintenance costs and risk of lower availability, as a result of corrosion and fouling. Possibilities and challenges were discussed concerning a number of metal-containing waste streams. Some of these streams were: printed circuit boards, tires, composites, paint residues, refuse wood, sludge and shredder light fraction (SLF). The last three were pinpointed as high-interest, owing to the fact that there are significant volumes available on the market.

In this first project, a lot of focus has been given to the fuel preparation, the storage possibilities, and the combustion part of the process. Identified possibilities have mostly concerned the potential increase in metal recovery, and detoxification of the ashes. Some possibilities regarding fuels that can be used both as a metal carrier and an additive to decrease negative impact from other fuels, have also been considered. One very important part in the discussion about designed fuels is the metal recovery process that would have to be applied on the residues. This aspect has been included in a new research application for a continuing project, where full-scale combustion tests with a designed fuel are planned together with pilot tests of metal recovery.

One result of the project is also the realization that there is a lack of knowledge on the chemical composition of different waste streams, or rather: identifying what waste streams that contain significant amounts of the sought after metals. In addition, there is a lack in experiences of the technical challenges and risks of combusting certain fuels. Hence, several components contribute to the slow development of operation adjustments, since the economic consequences of unforeseen downtime could be severe.

Inledning och bakgrund

Av det avfall som kommer in till avfallsförbränningsanläggningarna i Sverige utgör ca 20-25% av icke brännbart material som efter förbränningen blir kvar som en rest. Resterna kan delas in i två huvudsakliga fraktioner, dels flygaska som utgörs av finkorniga material, med eller utan tillsatser som används i rökgasreningen, och dels bottenaska som kan innehålla betydligt större partiklar. Den senare fraktionen tas ur nederdelen av pannan. Dessa strömmar skiljer sig åt både mängdmässigt och sammansättningsmässigt beroende på val av förbränningsteknik, rökgasrening och inkommande avfalls sammansättning.

Nuvarande energiåtervinning av avfall optimeras i stort sätt uteslutande av bränsleblandningar som skall generera en hög och stabil energiproduktion (el och fjärrvärme). Mycket lite fokus läggs i dagsläget på återvinningspotentialen av metaller i genererade askrester, främst avser detta rökgasreningsskor (flygaskor). Halten av olika värdemetaller i flygaskan varierar men är normalt i storleksordningen <4-5% (per metall) [1]. Med låga halter blir urtvättning och anrikningsprocesser mycket kostsam. En högre andel värdemetaller ökar potentialen för kostnadseffektiv återvinning, men det kräver tillägg till nuvarande bränslestrategi. Tillägget innebär att bränslen anförskaffas och blandas baserat på metallinnehållet samtidigt som energieffektivitet och tillgänglighet ska bibehållas.. Troligt är att detta tillägg till nuvarande bränslesstrategi resulterar i olika grad av kampanjledning.

Metallerna i bottenaskorna finns i olika former. De föreligger dels som metallskrot dels som olika kemiska föreningar (oxider med mera). Den större andelen metall i bottenaskan förekommer dock som metalliskt material, dvs skrot. Det kan handla om komponenter från sammansatta produkter, aluminiumfolie, bestick eller andra metallföremål som antingen hamnat i det brännbara avfallet av misstag eller för att det i dagsläget inte finns bättre sätt att omhänderta det. Det faktum att mycket av metallen finns i metallisk form gör att återvinning främst sker genom mekanisk sortering. I dag är det standard att bottenaskan eftersorterar med avseende på metaller och då både magnetiska och icke-magnetiska metaller. Under senare år har dessa resurser hamnat mer i fokus eftersom de representerar ett ekonomiskt värde. Utvecklingen har gått framåt- främst avseende icke-magnetiska metaller- där institutet ZAR i Schweiz och universitetet i Delft i Holland är framträdande aktörer [1], [2], [3]). Utvecklingen har främst handlat om att mekaniskt skilja av metallerna i finare fraktioner än tidigare men har också inneburit förändringar i hur askan har matats ut ur pannan [1]. Drivkraften har främst varit högre metallpriser men också tanken om en mer cirkulär ekonomi.

När det gäller flygaskan, så innehåller även den värdemetaller. Dessa förekommer oftast i relativt låga koncentrationer och i kemiska former med relativt lågt återvinningsvärde. Det höga innehållet av klorider i flygaskan innebär samtidigt att exponering för vätska kan leda till omfattande utlakning av metallsalter, där bland värdemetaller som Cu, Zn, Ni, Mn etc. Dessa kan i fel omgivning omvandlas

ifrån en potentiell resurs till ett miljöproblem. Det pågår försök med att återvinna resurser ur flygaskor bl.a. finns det en referensanläggning från BSH Umweltservice AG för framställning av zink ur flygaska i Schweiz [4]. Just i Schweiz finns även incitament i form av den nyligen reviderade avfallslagstiftningens utformning [5], där metallutvinning ur filteraska mer eller mindre kommer att bli obligatorisk 2021. Renova har tillsammans med Babcock Wilcox Vølund¹ framgångsrikt genomfört pilotkörningar för att utvinna zink (i form av zinkhydroxid) från flygaska [6]. Under försöken erhöles ett zinkkoncentrat innehållande ca 50 % zink och återvinningsgraden är ca 70 %. Chalmers och Högskolan i Borås bedriver också forskning inom detta område, främst med fokus på zink och koppar [7] [8].

I maj 2016 presenterade Ragn-Sells/Easy Mining ett tvättkoncept för utvinning av salter ur flygaska, det s.k. Ash2[®] Salt [9]. Metoden bygger på tvättning av askan med hjälp av vatten från deponin, men det finns väldigt lite information om de efterföljande reningsstegen av salterna. Ingen kommersiell anläggning finns ännu i drift.

Ekokem har genomfört testförbränningar av av en bränslemix optimerad avseende innehåll av Zn (bl.a. ingick alkaliska batterier). Försöken resulterade i anrikning av Zn upp till 40 % i flygaskorna och detta simultant med bibehållen energiproduktion. Anrikningsprocesser av Zn i pilotskala visade på god renhet och ett betydande ekonomisk potential.

Generellt finns det ganska lite redovisade pilotförsök i med inriktning på metallåtervinning i askor, erfarenheterna är med andra ord begränsade.

¹ Götaverken Miljö AB bytte 1 januari 2017 namn till Babcock Wilcox Vølund AB

Genomförande

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut har koordinerat projektet. Renova och Ekokem har i egenskap av anläggningsägare och avfallsbolag bidragit med expertisen kring avfallsströmmar, risker och riskhantering, kostnadsbedömningar och planering av aktiviteter i samband med fullskaleförsök. Stena har medverkat med sin expertis kring avfallsströmmar och logistik.

Projektet inleddes med att identifiera intressanta resurser att utvinna ur aska samt vilka avfallsströmmar som kan vara av intresse för att uppnå önskad resursutvinning. Detta arbete utfördes initialt på respektive företag. Underlaget kom att utgöra ett relevant underlag till riskanalyserna som samtidigt bidrog till företagens nyttiggörande av projektet.

Föreslagna avfallsströmmar riskanalyserades översiktligt avseende fullskaliga förbränningsförsök och möjligheter att återvinna metaller ur askorna. Detta arbete utfördes vid två workshops hos företagen, Ekokem och Renova. Vid workshops medverkade fler kompetenser från företagen, t.ex. deltog affärsutvecklare och underhållsansvariga för att få fler vinklar på problemställningarna. Upplägget erbjöd diskussioner kring möjligheter och risker som kunde kopplas till de olika avfallsströmmarna. Inom riskanalysen gjordes även bedömningar över avfallsströmmarnas framtida tillgång och efterfrågan, om det finns bättre alternativa återvinningstvågar samt strömmarnas karaktär och eventuella behov av samförbränning med andra bränslen. En sammanställning av riskanalyserna presenteras i forma av en tabell i Bilaga 1.

En litteraturstudie utfördes för att sammanställa metallnehåll för tre avfallsströmmar som bedömdes som extra intressanta och aktuella att testa att återvinna askor ifrån hos deltagande företag.

I den senare delen av projektet upprättades det också planer för fullskaliga förbränningsförsök tillsammans med pilotförsök för utvinning av metaller ur askorna. Planeringen omfattade resursbehov, tidplan och upplägg och inkluderande vilka parametrar som måste övervakas och utvärderas under de fullskaliga försöken.

Under denna fas diskuterades även tänkbara återvinningstekniker, för metallutvinning ur den resulterande askan, som är intressanta att undersöka.

Den avslutande rapporteringen skedde parallellt med ansökningsarbete för ett uppföljande innovationsprojekt med inriktning mot kopparutvinning.

Resultat och diskussion

Avfallsströmmar och värdemetaller

Ett antal strömmar har i projektet identifierats som intressanta för att separatförbränna för att ge öka möjlighet att utvinna metaller ur askan. Bland annat har SLF (Shredder Light Fraction), kompositmaterial, WEEE (Waste Electronic and Electrical Equipment), olika nanomaterial, returträ (RT-flis), gummi, batterier, PCB (Printed Circuit Boards), däck, färgrester och slam diskuterats.

De flesta av de ovan nämnda strömmarna finns idag och förekommer redan till viss del i förbränning, antingen tillsatta i mindre portioner, eller på grund av felaktig sortering, det vill säga oönskad inblandning i den brännbara restfraktionen. Ingen av dem eldas dock idag explicit för att återvinna materialresurser ur dem.

Beroende på vilka metaller som är mest intressanta att återvinna påverkar det vilka avfallsströmmar som är aktuella att separatförbränna. Olika förbränningsugnar kan också vara olika väl lämpade för ändamålet. I projektet blev fokus på koppar och zink som en inkörsport för att senare kanske även ha möjlighet att komplettera med andra element.

När en fortsättning på projektet diskuterades var det främst tre strömmar som ansågs extra relevanta och intressanta för branschen utifrån tillgängliga volymer och risker vid förbränningen: slam (av olika ursprung), RT-flis och SLF. Variationerna i litteraturen rapporterade värden (av zink och koppar) i de tre avfallsslagen kan ses i Tabell 1, för mer fullständigt underlag se litteraturstudien i Bilaga 2.

Tabell 1 I litteraturen rapporterat innehåll av zink och koppar för slam, RT-flis och SLF.

Innehåll rapporterat i litteraturen		
	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)
Slam*	100-49 000	84-17 000
RT-flis	260-515	17-444
SLF	1 890-30 000	5320-60 000

* Med slam avses inte bara slam från kommunala reningsverk utan även vissa industriella slammer

Risker, hinder och möjligheter

Ett optimerat avfallsbränsle gynnar materialåtervinning där delar av askorna i större utsträckning inkluderas i det cirkulära flödet, och skapar ett mervärde jämfört med nuvarande hantering av askflöden. Ökad grad av materialåtervinning innebär samtidigt en möjlig avgiftning av kvarvarande askrester, vilket öppnar för alternativa användningsområden. Utmaningarna med denna nya driftstrategi är att återvinna metallerna i en form och renhet som det finns avsättning för.

Produktionstekniskt kräver detta att anrikning av metaller sker med hög specificitet simultant med bibehållen effektivitet över tid.

För Ekokem skulle en ändrad driftstrategi kunna innebära en årlig ökad återvinning om 400 ton koppar och 2000 ton zink och mangan, och detta med avfallsbränslen som redan idag behandlas på anläggningen.

När man diskuterar möjligheter är det också viktigt att ha i åtanke att det inte bara är metallhalten i sig som spelar roll utan en rad andra parametrar.

- I vilka former finns metallen i det inkommande bränslet
- Vilken förbränningsteknik som används.
- Brännbarheten av bränslet, är värmevärdet för högt eller lågt måste det sameldas med annat bränsle för att anläggningarna tekniskt ska klara av det.
- Askhalten i bränslet, en hög askhalt ger mer utspädning när metallen senare ska utvinnas ur askan.
- Mängder av aktuella bränslen som finns att tillgå.
- Återvinningsteknik för metallerna i askan. Denna måste vara selektiv, fungera till en rimlig kostnad och dessutom kunna hantera lösliga salter.

Avfallsförbränningsanläggningarna utgör normalt sett baslast i fjärrvärmesystemen, vilket gör att tillgängligheten prioriteras väldigt högt. Verksamheterna regleras också av miljötillstånd där de i dagsläget kanske inte har tillstånd att behandla vissa av de intressanta fraktionerna. Det gör att det kan finnas en tröghet i verksamheten mot att göra för stora förändringar som innebär ökade risker.

Under riskanalyserna lyftes en rad frågeställningar kopplade till de avfallsströmmar som diskuterades i projektet (se Bilaga 1). Dessa är inte begränsade till risker utan innefattar även hinder, och i vissa fall är de anläggningsspecifika men i andra fall mer generella branschfrågor. Några av de viktigaste lyfts nedan

- En av anläggningarna är bunden att behandla ägarnas kommunala avfall, det är inte nödvändigtvis så att man har tillstånd att lagra detta avfall vilket kan utgöra ett hinder. Dessutom utgör lagringen en betydande kostnad och kräver utrymme.
- För vissa av de diskuterade bränslefraktionerna var det bara den ena medverkande anläggningen som hade tillstånd att behandla.
- Beroende på bränsleblandning kan det också vara en betydande utmaning för bränsleberedningen.
- Beroende på vilka bränsleblandningar som eldas kan det finnas risk för sämre förbränning, alternativt att rökgas- och vattenrening får ta en högre belastning. Om bränsleblandningen förutom de önskade värdemetallerna

också innehåller oönskade ämnen kan det påverka den kvarvarande askans egenskaper negativt.

- Båda medverkande anläggningar har flera parallella linjer som är integrerade på olika sätt. Det kan handla om gemensam avfallsbunker, gemensam rökgasrening eller gemensam uppsamling av askfraktionerna. För att förändra driftstrategin kan ombyggnader behöva genomföras för att möjliggöra styrning av fraktionerna till en av linjerna (och möjlighet att därifrån ta ut askströmmarna separat). En gemensam rökgasrening kan i de lägena vara positivt eftersom förändringarna i blandningen blir mindre än i rökgasen från den enskilda linjen.
- Vid separatförbränning kan det finnas risker för högre halter av ämnen som är beläggingsbildande eller korrosiva. Det finns mycket osäkerhet kring hur stora dessa effekter är och saknas verktyg att objektivt bedöma vilka risker/kostnader det kan medföra i form av risk för otillgänglighet och ökat underhåll.
- Det saknas kunskap om vad olika avfallsströmmar innehåller när det gäller värdemetaller.
- Vissa intressanta bränslen kan vara förknippade med tydliga arbetsmiljörisker, såsom smittförande (slam, rejekt från förbehandling biogas) och damning (speciellt vid bränsleberedning).

Fullskaliga försök

Baserat på de identifierade strömmarna planerades fullskaleförsök vid båda de medverkande anläggningarna. Inriktningen var på Renova att utvinna zink och på Ekokem utvinna koppar. De två fallen representerade också två olika principer där det ena representerade en mer normal bränslemix som spetsats med en större andel metallhaltigt avfall. Det andra fallet utgår mer från bränsleströmmarna i sin helhet för att få en hög metallhalt i askan, dvs ett mer renodlat designat bränsle. Planeringen ledde i slutändan fram till att en ansökan om innovationsprojekt skickades in till RE:Source utlysning 2I första steget

Slutsatser och nyttiggörande

Projektet har gett ökad kunskap om möjligheter och risker med förbränning av designade avfallsbränslen för ökan metallåtervinning från askorna.

Ökad kunskap om potentiella avfallsströmmar och dess innehåll av metaller samt förutsättningar att testas i en kommersiell anläggning.

Ökat kunskapen hos deltagarna om vilka egna behoven är och vad som behövs för att ta sig vidare. Identifierat beröringspunkter med andra aktörer på marknaden och vad som redan gjorts. Det har ökat kunskapen om varandras utvecklingsarbeten, utöver sådant som publiceras. Sådant information utgör ett värdefullt beslutsunderlag för företagen.

Resultaten av projektet visar att det krävs ett helhetsgrepp för förändrad driftstrategi inom avfallsförbränning för att man ska åstadkomma en process där metaller i askorna återvinns. Riskerna med att bereda och förbränna vissa avfallsslag måste hanteras och minimeras och logistiska hinder måste undanröjas.

Tillräddig kunskap saknas om vilka bränslen som finns som innehåller höga metallhalter och varifrån/hur metallerna kommer till dessa avfallsströmmar. Vilka produkter handlar det om och hur hamnar de i avfallsfraktionen? Ska de vara där eller är kvalitetshöjande åtgärder i insamlingssystemet effektivare?

Projektspecifika slutsatser var att effektlogik var ett nyttigt verktyg som tydliggjorde vilka aktiviteter och mål som behövs och som kunde genomförts tidigare i projektet.

Denna typ av projekt involverar många olika kompetenser och personer på företagen, vilket är viktigt att känna till innan start. Företagen kommer också in med olika bakgrund även om de är i samma bransch vilket både är en utmaning och en styrka. Det påverkar även tidsaspekten i projektet som inte bör vara för kort.

Resultaten från projektet har lett till en ansökan om innovationsprojekt inom Resource. I förlängningen kan detta bidra till en ökad metallåtervinning samt ökade affärsmöjligheter för de medverkade företagen.

Nästa steg

För att möjliggöra metallåtervinnig inom energisystemet behövs mer studier över vilka avfallsströmmar som innehåller intressanta metaller och från vilka produkter dessa metaller kommer. Detta har två syften, dels att kunna styra de avfallströmmar som kan leda till ökad materialutvinning dit man önskar men också att eventuellt kunna styra bort sådana strömmar som bidrar med problemsubstanser i askorna.

För att öka kunskapen om vilka metaller som är möjliga att utvinna på en specifik förbränningsanläggning behöver en kartläggning göras över vilka strömmar som bidrar med mest metaller.

För att öka kunskapen om mängden metaller som kommersiellt går att utvinna ur askorna behövs pilotförsök för metallutvinningsdelen genomföras där möjlighet till processoptimering och flexibilitet för att möjliggöra utvinning av olika metaller undersöks.

Det behövs ytterligare studier kring möjligheten att genom att återvinna några huvudmetaller också få en hävstång som gör det möjligt att samtidigt återvinna vissa värdemetaller som förekommer i lägre halter, men där inte den enskilda värdemetallen kan bära kostnaden själv.

Mer kunskap om riskerna med olika ämnen i förbränningen krävs, vilka ämnen och vilka nivåer påverkar exempelvis tillgänglighet, arbetsmiljö och underhållskostnader. Det finns en hel del inom litteraturen, detta behöver dock sammanställas på ett mer lättillgängligt sätt och kompletteras där luckor finns.

Effekterna av att förbränna avfallsblandningar designade för metallåtervinning på en kommersiell anläggning behöver utredas. Detta måste exempelvis inkludera emissioner, driftstabilitet, energiproduktion och sammansättning på de bildade askorna. Även förändringar i underhåll och risker behöver beaktas utifrån de förutsättningar som finns på en kommersiell anläggning. I förlängningen skulle ett verktyg behöva tas fram där den totala kostnaden för ett bränsle kan estimeras för att värdera det mot vinter med exempelvis ökad metallåtervinning.

Det finns frågetecken kring vilken effekt som metallåtervinningen får på sammansättning av askresten och om det påverkar möjligheterna för alternativ användning av denna (jämfört med dagens avsättning). Här behövs mer arbete och mer utveckling för att om möjligt just åstadkomma en förbättring av kvaliteten på resten så att den antingen kan deponeras lokalt men idealt kunna användas för andra ändamål.

För att öka intresset och investeringarna för konceptet behöver en affärsmodell tas fram, med underlag från resultat av fullskaliga förbränningsförsök med designade avfallsbränslen och efterföljande metallutvinning ur askorna.

Översiktlig utvärdering av miljöeffekterna av en förändring av driftstrategi.

Projektkommunikation

Projektet har genomförts i samarbete med Renova, Ekokem och Stena Recycling. De har även varit involverade i den ansökan om innovationsprojekt för pilotförsök till metallutvinning med förbränningsförsök på en fullskalig kommersiell anläggning.

Referenser

- [1] "ZAR," [Online]. Available: <https://zar-ch.ch/en/home/vision/>. [Använd 14 02 2017].
- [2] L. Muchova, E. Bakker och P. Rem, "Precious metals in municipal solid waste incineration bottom ash," *Water, Air, and Soil Pollution Focus*, vol. 9, nr 1-2, pp. 107-116, 2009.
- [3] W. de Vries och P. Rem, "ADR a classifier for fine moist material," i *Separation Pro Environment Technologies for Waste Treatment, Soil and Sediments Remediation*, 2013, pp. 43-58.
- [4] "BSH Umweltservice AG," [Online]. Available: <https://www.bsh.ch/de/verfahren-und-technologien/flurec-verfahren/>. [Använd 10 02 2017].
- [5] B. f. U. BAFU, "Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen," 04 12 2015. [Online]. Available: <https://www.admin.ch/opc/de/official-compilation/2015/5699.pdf>. [Använd 16 02 2017].
- [6] S. Andersson, K. Karlfeldt Fedje och M. Wagner, "Lakning, zinkåtervinning och termisk behandling av avfallsflygaska," Energiforsk, rapport nr 2016:330, 2016.
- [7] A. Pettersson, K. Karlfeldt Fedje, S. Andersson, O. Modin och P. Frändegård, "Metallutvinning med fokus på Zn från avfallsflygaska med hjälp av sura processvatten," Waste Refinery rapport WR58, 2013.
- [8] J. Tang och B.-M. Steenari, "Leaching optimization of municipal solid waste incineration ash for resource recovery: A case study of Cu, Zn, Pb and Cd," *Waste Management*, vol. 48, pp. 315-322, 2016.
- [9] Y. Cohen, "Ragn-Sells Framtidsdag 2016 - Ash2@Salt ny teknik för utvinning av salter ur aska," 2016. [Online]. Available: http://www.askengren.se/Filer/Material_seminarium/5.%20Yariv%20Cohen.pdf.
- [10] Y. Cohen, "Ragn-Sells Framtidsdag 2016," i *Ash2@Salt*, Bro, 2016.

Bilagor

- Bilaga 1. Förteckning över tänkbara avfallsströmmar för separatförbränning samt riskbedömning av dessa.
- Bilaga 2. Litteraturstudie över metallinnehållet i slam, RT-flis och SLF
- Bilaga 3. Administrativ bilaga till Energimyndigheten

Bilaga 1

Avfallsströmmar hos svenska avfallsförbränningsanläggningar och dess möjligheter/risiker för metallåtervinning ur förbränningsaskorna. Tabellen avspeglar kunskapen hos deltagarna under projektmötena/riskanalyserna och är ej fullständig. Tabellen pekar också på kunskapsluckor som finns hos deltagarna (och som inte kunnat hanteras inom befintligt projekt/projektbudget) och som behöver adresseras för att realisera/konkretisera befintliga potentialer.

Avfallsström	Karaktär	Varaktighet	Alternativ återvinning.	Samförbrännas med	Oönskade ämnen i askorna	Risk	Möjlighet
Röt slam från reningsverk	Blött Lågt energivärde Högt Fe, P	Stabil. Norge slam från fiskodling framtida möjlighet? Politik/opinion påverkar, men troligast just nu för ökad efterfrågan på förbränning. Speciellt om näringsämnen kan återvinnas.	Spridning på åkermark erbjuder mullbildande ämnen som är efterfrågade. Det finns ett inarbetat kvalitetssystem för detta, Revaq. Bioutlakning – möjlig konkurrerande behandling Jordtillverkning (ej möjlig behandling för alla slam) Deponitäckning – övergående samt ej återvinning	SLF, RT-flis, Hästgödsel, Fjäderavfall	I ren metallutvinning kan fosfor utgöra en kvalitetsbegränsning	Eventuell smittorisk Luktproblematik Blött Eventuell försvårad återvinning av fosfor vid samförbränning	5-7 % fosfor efter förbränning. Höga halter av järn eller ibland aluminium Askan kan användas som sorbent i annan lakningsprocess för anrikning av metaller. Kalium, mangan, järn lätt utvinna ur askan Påvisade motverkad beläggingsbildning vid samförbränning med exempelvis SLF
Slam från gruvindustri	Blött						Högre halter av metaller än röt slam. Lägre halter fosfor.
Slam från pappers & massaindusti	Blött						Högre halter av metaller än röt slam

Med stöd från:

STRATEGISKA
INNOVATIONS-
PROGRAM

Avfallsström	Karaktär	Varaktighet	Alternativ återvinning.	Samförbrännas med	Oönskade ämnen i askorna	Risk	Möjlighet
Trekammarbrunnslam	Blött Lågt energivärde Högt Fe, P	Enskilda avlopp	Biogas- /biogödselproduktion	RT-flis		Smittorisk	Höga halter av fosfor Höga halter av järn
Industriell restprodukt från vattenrening. Filterkaka.	Lågt organiska innehåll men intressant		Deponitäckning	Hästgödsel			
Rejekt från biogasproduktion i samrötningsanläggningar	Blött, luktar	Kan minska med bättre kvalitet på insamlat material och effektivare förbehandlingsteknik		ABP/slaktavfall		Svårhanterat Smittorisk Arbetsmiljö	
Batterier	Lågt energivärde Högt Fe, Mn, Zn Finkornigt dammbindande	Varaktigt men karaktären kommer ändras. Li-ack, Alkali Många batteriprojekt pågår Laddningsbara batterier förväntas öka Konstruktionsmaterial deponi ej långsiktig lösning	Producentansvar i framtiden? Smältverk Ny smart återvinning?	Kompletteras med avfall med högt energivärde och kladdighet. Trä, SLF, Slipmull, Tvättränneslam, Gummiavfall	Fosfor Sand, Si	Brinner dåligt. Många störande element. Litium ett problem om inte blandas ut med annat bränsle	Innehåller mycket zink och mangan Askan har 70-80 % metallvärde.

Avfallsström	Karaktär	Varaktighet	Alternativ återvinning.	Samförbrännas med	Oönskade ämnen i askorna	Risk	Möjlighet
		Komplext, viktigt att samverka med andra forskare/projekt					
Fisknät från bl.a.Norsk fiskeindustri	Högt Cu Lågt energiinnehåll	Tillräcklig. Kanske hittar man på andra sätt att impregnera näten? Potentiell hög goodwill att bidra till att lösa ett globalt problem med gamla nät i havet.	Finns det materialåtervinning s-metoder? Vad gör man med näten idag? Återvinning till tekoindustrin http://www.mentornewsroom.se/nyheter/tretorn-anvander-atervunna-fiskenat-i-ny-kollektion/	Cu rika avfall med höga energivärde Färg, Bark, Slipmull, Displayer, Kopparslam, Polerpasta, Småelektronik, SLF, Notvaske (slam från nätrens i Norge)		Osäkerhet kring möjligheter att bränslebereda	Innehåller mycket koppar
Impregnerat trä	Cu Högt energiinnehåll	Varaktig men karaktären förväntas förändras pga utfasning av vissa produkter.	RT flis går till konventionella värmeverk.	Andra kopparrika strömmar		Kompositprodukter etc ses som liten risk pga fördröjningseffekt	Förhållandevis okomplicerat bränsle
SLF från bildemonterin	Högt Energivärde	Hög		Samförbränning med slam har		Korrosion och beläggningar.	Zn, Cu, Fe

Avfallsström	Karaktär	Varaktighet	Alternativ återvinning.	Samförbrännas med	Oönskade ämnen i askorna	Risk	Möjlighet
g	Medel Cu, Fe, Zn Högt klorhalt Dammbindande medel askhalt PRO-fuel (Stena) Lägre Cl Pelleterat Låg askhalt			visat på goda resultat avseende beläggningar/korrosion i pannan		Klor bör vara under 50 000 mg/kg.	
Slipmull från verkstadsindustrier	Organisk slipolja. Högt Cr, Ni, Zn, Cu E-värde medel Klorhalt?	Hög					Krom Nickel
Däck	Högt värmevärde, relativt hög svavelhalt		Dörmattor, konstgräsplaner, vägkonstruktioner				Zink
Färg							Zink
Bränslekross från bränsleberedning av bygg- och rivningsavfall	Varierande sammansättning, inget enhetligt bränsle						Zink
Förorenade	Extremt hög						

Avfallsström	Karaktär	Varaktighet	Alternativ återvinning.	Samförbrännas med	Oönskade ämnen i askorna	Risk	Möjlighet
jordar	"askhalt"						
Kopparförorenad bark						Konventionellt bränsle	Koppar
Kablar och elavfall	Mycket metall, främst koppar		Elektronikåtervinning Metallåtervinning				Koppar

Halm kan vara ett mycket intressant bränsleström för att förbättra förbränningsprocessen.

Bilaga 2 Litteraturstudie över metallinnehållet i slam, RT-flis och SLF

En omvärldsbevakning genom litteratursökning² visar att det finns flera möjliga strömmar att beakta i framtida behandling av avfall med förbränning. Bland annat nämns SLF (Shredder Light Fraction, omnämns i litteraturen även som ASR, Automotive Shredder Residue eller fluff/Auto fluff), kompositmaterial, WEEE (Waste Electronic and Electrical Equipment), nanomaterial, returträ (RT-flis), gummi, batterier, PCB (Printed Circuit Boards) och slam som möjliga strömmar. Många av strömmarna finns redan idag och förekommer till viss del i förbränning, antingen tillsatta i mindre portioner, eller på grund av felaktig sortering, det vill säga oönskad inblandning i den brännbara restfraktionen.

Efter diskussioner vid riskanalysövningarna i projektet beslutades det att fokusera på de tre strömmar som projektparterna i förprojektet ser som de som närmast är av intresse för branschen: slam, RT-flis och SLF.

I förprojektet ingår att genom en litteraturstudie klargöra hur stora mängder av metaller (med störst fokus på zink och koppar) det finns tillgängligt i dessa olika materialströmmar. I en fortsättning planeras det att utvärdera hur tillgängliga strömmarna är i Sverige idag samt den potentiella möjligheten för att kunna återinföra dem i en cirkulär ekonomi.

Slam

Slam bildas i vattenreningsverk där flytande och/eller vattenbaserade avfallsmaterial som kommer från hushåll, kommersiella byggnader och industriområden [1]. I vissa anläggningar tillkommer också grund-, yt- och dagvatten [2]. I vissa fall är det lagligt möjligt att använda slam som gödningsmedel på jordbruksmark men slam kan innehålla oönskade kemikalier, så som tungmetaller, och studier visar att slam kan innehålla upp till 20 gånger mer Zn och 22 gånger mer Cu än naturlig jordbruksjord [3]. När ett slam innehåller för höga halter av Zn och Cu eller ett annat giftigt ämne begränsas användningsområdena av miljölagar och lagstiftning. Andra avsättningsmöjligheter, som till exempel deponering, regleras också av regelverk och den havsdumpning som gjordes med slam tidigare är nu förbjudet inom EU [3].

Med strikta regler för användning av slam inom jordbruket ökar intresset inom EU för att använda slam i förbränning [1], [5]. Värmevärdet i torkat avloppsslam ligger i närheten av värmevärdet för brunkol, vilket gör slam till en potentiell kandidat för energiåtervinning via förbränning [1]. Dessutom oskadliggör förbränningsprocessen organiska gifter [6], reducerar volymen upp till 96 % [7], minimerar lukter (den mikrobiella produktionen av gaser med dålig lukt) [1] och underlättar återvinningen av ämnen som till exempel fosfor [7]. Studier av

² Omvärldsbevakningen är främst gjord via den vetenskapliga databasen Scencedirect och ISWAs (International Solid Waste Association) egna databas för publikationer. Även sökningar i Värmeforsks databas samt sökningar via sökmotorn Google är inkluderade.

samförbränning med andra bränslen, som avfall, kol eller biomassa visar att, förutom de ovan nämnda fördelarna med slamförbränning, slammet i sin tur påverkar förbränningen på ett positivt sätt och minskar beläggingsbildning och korrosion i anläggningarna [8]-[16], [15]. Andra typer av slam, som till exempel slam från garveriindustrin, innehåller ofta höga halter av metaller och är därför klassificerade som farligt avfall. Sådant slam lämpar sig väl för förbränning då det inte finns andra avsättningsmöjligheter samt att reningsstegen i en förbränningsanläggning avskiljer farligt innehåll [17], [18].

Tabell 2. Sammanställning av innehåll av Zn [19] och Cu i slam

Referens	Beteckning i referens	Zn (mg kg ⁻¹ _{DS})	Cu (mg kg ⁻¹ _{DS})
Fytili & Zabaniotou [1] (2008)	Typical amounts in dry sewage sludge	101-49000	84-17000
Werther & Ogada [3] (1999)	Average in sewage sludge	1318	330
	Sludge 1	567	829
	Sludge 2	834	487
Jiang et al. [17] (2010)	Tannery sludge	260	65
Tang et al. [18] (2008)	Tannery sludge	380	70
Font et al. [20] (2001)	Sludge 1	600	200
	Sludge 2	6800	2200
	Sludge 3	3200	2900
	Sludge 4	12000	200
	Sludge 5	800	100
	Sludge 6	7100	2800
	Sludge 7	9900	1500
Elled et al. [16] (2007)	Sewage sludge Ryaverket	652	394
	Sewage sludge Nohagaverket	385	266
Hsiau & Lo [21] (1998)	Untreated sludge	1089	202
Hartman et al. [22] (2007)	Dry sludge	1730	301
Hoffmann et al. [23] (2010)	Primary sludge	447	97
	Concentrated surplus sludge	610	212
	Surplus sludge	635	208
	Dried sludge	722	228
Lapa et al. [24] (2007)	Biogran®	1471	417
Nadziakiewicz & Koziol [25] (2003)	Sludge	2432-6100	80-800
Shrivastava & Banerjee [26] (1998)	Mixed fresh sludge	356-632	347-486
	Digested sludge	426-718	393-557
	Bed sludge	384-690	375-524
Linder [27] (2001)	Rötslam von Roll Inova	100-2000	50-500
	Rötslam experiment	494	263
Ljungdahl & Zintl [37] (2001)	Rötslam	494	447

Returträ

Returträ omnämns oftast som RT-flis och består vanligen av trämaterial från bygg- och rivningsverksamheter och från kommersiella och industriella källor

[28], [29]. Som avfallsfraktion har RT-flis problemet att det ofta är kraftigt kontaminerat av tungmetaller, däribland Zn, via färgpigment, lack, torkmedel, bindemedel och/eller konserveringsmedel [30], [31]. Krook et al. [30] visade i en studie publicerad 2006 att ytbehandlat trä står för ca 70 % av Zn-innehållet i svensk RT-flis. Andra studier visar också att trä-plastkompositer behandlas med zinkborat, vilket bidrar till Zn-innehållet [30], [32].

Inom Värmeforsk ramprogram "Träbaserade kretsloppsbränslen" som initierades 1999 har många studier bedrivits med fokus på utmaningar med förbränning av RT-flis. I förordet till samtliga fyra studier om returträflis [33]-[36] visas en sammanställning av analyser av RT-flis, där Ti är den dominerande förorenaren på grund av inblandningen av TiO₂ i färg. En sammanställning i [37] visar att förutom för Zn och Ti är även halterna av Al, Pb, Ba och Fe kraftigt förhöjda i RT-flis. Dessutom påpekas det att en förhöjd halt kisel troligen kan ha sitt ursprung i rester av murbruk. Som sammanfattning härleder [37] ursprunget för dessa enligt:

- Aluminium: Antas främst härstamma ifrån metalliskt aluminium, med sitt ursprung i olika konstruktionsdelar (fönsterramar, handtag etc.)
- Barium: Har ofta använts som vitpigment och fyllnadsmedel i färg.
- Bly: Ingår främst som vitpigment i målarfärg, t.ex. blyvita. Metalliskt bly kan dock förekomma från kapslingar av gamla elledningar.

I RT-flis finns även förhöjda halter av Cu jämfört med skogsråvara [38]. Förekomsten av Cu i RT-flis är störst när den innefattar material som konserverats genom behandling med CCA (Cr-Cu-Ar), en metod som är förbjuden i Sverige sedan 2007. En EU-harmoniserad lagstiftning innebär att CCA-impregnering inte bör ske inom EU, dock finns fortfarande impregneringsmetoder som innehåller Cu [32]. CCA-impregnerat trä klassificeras som farligt avfall och får endast förbrännas under kontrollerade former i anläggningar med särskilda tillstånd för materialet. Krook et al. [39] menar att behandlat trämaterial har en livslängd på mellan 25-35 år, föroreningsnivåerna i dagens avfall kan därav knytas till behandlingsmetoder som var vanliga förr. Enligt Avfall Sverige samlades 43 400 ton impregnerat virke in från hushållen under 2015, här inkluderas dock även kreosot-trä som är klassat som farligt avfall men inte innehåller tungmetaller, någon särskiljning finns inte [40]. Vid förbränningsanläggningen hos Vattenfall Värme i Uppsala har studier och datainsamling mellan 1993 och 2010 visat att 95 % av den Cu som kommer in i anläggningen hamnar i bottenlaggen [32]. Sörme och Karlsson visar dock i sin rapport från 2012 att mindre än 1 % av den Cu som finns i avfallsförbränningen i Sverige orsakas av CCA-trä [32].

Tabell 3. Sammanställning av innehåll av Zn och Cu i RT-flis

Referens	Beteckning i referens	Zn (mg kg ⁻¹ _{DS})	Cu (mg kg ⁻¹ _{DS})
BRÄNSLE			
Krook et al. [28] (2004)	Swedish RWW	440	59
	Imported RWW	330	26

Jermer et al. [34] (2001)	RT medelvärde	350	32
Strömberg & Herstad Svärd [42] (2012)	Returträ	303	41
	Medelvärde av 460 analyser	515	56
Burman [43] (2005)	RT-flis medel	437	17
Andersson & Högberg [35] (2001)	Bränsleanalys Högdalen P6	279	444
Lindau [44] (2003)	Returträ	350±260	32±32
Enestam et al. (2013)	Reference fuel	260	-
	Reference database Average	1800	-
ASKOR			
Berg et al. [41] (2001)	Bottenaska Rosterpanna 1	2600	-
	Bottenaska Rosterpanna 2	2700	-
	Bottenaska Rosterpanna 3	840	-
	Flygaska Rosterpanna 1	47100	-
	Flygaska Rosterpanna 2	10300	-
	Flygaska Rosterpanna 3	7680	-
Andersson & Tullin [45] (1999)	RT-flis aska (analys från en anläggning)	11600	408
	RT-flis aska (beräknat från 20 anläggningar)	15269	566
Bjurström & Wikman [46] (2005)	RT-flis 1	12539	1509
	RT-flis 2	51116	852
	Bäddaska	5740	2920
	Ecoaska	7830	955
	Filteraska	10340	1460

Shredder Light Fraction

Vid demolering av fordon töms först flytande avfall och farligt avfall, som till exempel oljor och batterier. Dessutom tas de större delar som är återvinningsbara tillvara på, detta kan vara däck, större metalldelar eller stötfångare. Den resterande delen genomgår en behandling för att utvinna metall och återstoden efter denna behandling, som består av plaster, skummaterial, textilier, gummi, glas och övrigt, kallas vanligen för Shredder Light Fraction (SLF) eller, mer vanligt internationellt, Automotive Shredder Residue (ASR) [48]. Enligt Vermeulen et al. [49] är det i genomsnitt 15-25 % SLF som återstår efter en behandling av så kallade "End-of-Life Vehicles". Inom EU är denna typ av avfall klassificerat som farligt avfall och det produceras cirka 2-2,5 miljoner ton varje år [49]-[51]. Beräkningar visar att mängden väntas öka kraftigt och nå närmare 14-17 miljoner ton per år inom EU år 2030 [52]. Sedan införandet av direktivet om deponi [54] och direktivet om "End-of-Life Vehicles" [55] (samt efterföljande direktiv om typgodkännande av motorfordon med avseende på återanvändning, materialåtervinning och återvinning [56]) har trycket på inblandade intressenter om att hitta lämpliga behandlingsmetoder ökat. Det är dock stor skillnad på olika typer av SLF (som kan delas upp i undergrupperingar på olika sätt) och därmed är avsättningen olika för olika tillverkare och det kan också skilja sig mellan kvaliteter från en och samma aktör [57].

SLF har vanligtvis ett värmevärde på 14-30 MJ/kg, vilket gör förbränning till ett bra behandlingsalternativ, men innehåller ofta höga halter av Cl samt av

tungmetaller och metaller [49], däribland Zn och Cu. Höga halter av metaller i kombination med höga halter av Cl är en utmaning i förbränningsammanhang då det skapa en korrosiv miljö i anläggningarna. Förbränningsförsök med SLF har dock visat att det är ekonomiskt och miljömässigt fördelaktigt att samförbränna SLF (med förutsättningen att BAT, Best Available Technique appliceras), med till exempel hushållsavfall, där SLF-andelen ligger på eller under 10 % [49]. Flertalet studier för olika förbränningstekniker presenteras i review-artikeln av Vermeulen et al. [49], där nämns även lyckade förbränningsförsök med upp till 31 % ASR. Det finns också svenska studier som visar att det är möjligt att minska korrosiviteten hos SLF genom samförbränning med slam [53], [58].

Tabell 4. Sammanställning av innehåll av Zn och Cu i SLF

Referens	Beteckning i referens	Zn (mg kg ⁻¹ _{DS})	Cu (mg kg ⁻¹ _{DS})
Haydary et al. [48] (2016)	ASR (based on the components)	1890 ± 70	11450 ± 590
Gyllenhammar et al. [53] (2009)	Fall 2 Fall 3	25600 22200	- -
Hjelmar et al. [59] (2009)	Norway (only ELVs)	8500-9300	14000-30000
Kameda et al. [60] (2009)	ASR composition	-	8200
Gendebien et al. [61] (2003)	ASR	8510	5320
Trouvé et al. [62] (1998)	Real ASR	12000	16000
Jalkanen [63] (2006)	ASR	5000-30000	4000-30000
Zolezzi et al. [64] (2004)	ASR This work	17370	12350
Viganò et al. [65] (2010)	ASR Range	0-15000	10000-60000
Osada et al. [66] (2008)	ASR	8750	34000

Referenser

- [1]. Fytili D, Zabaniotou A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods – A review. *Renew Sust Energ Rev* 2008;12:116-40.
- [2]. Tchobanoglous G. *Wastewater engineering, treatment, disposal and reuse*. New Delhi: Tata McGraw-Hill;1987.
- [3]. Werther J, Ogada T. Sewage sludge combustion. *Prog Energy Combust Sci* 1999;25:55-116.
- [4]. Lenntech.com, <http://www.lenntech.com/periodic/water/zinc/zinc-and-water.htm>. Accessed 9 Apr, 2013.
- [5]. Manara P, Zabaniotou A. Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion – A review. *Renew Sust Energ Rev* 2012;16:2566-82.
- [6]. Khiari B, Marias F, Zagrouba F, Vaxelaire J. Analytical study of the pyrolysis process in a wastewater treatment pilot station. *Desalination* 2004;167:39-47.
- [7]. Vesilind PA, Ramsey TB. Effect of drying temperature on the fuel value of wastewater sludge. *Waste Manage Res* 1996;14:189-96.

- [8]. Barbosa R, Lapa N, Boavida D, Lopes H, Gulyurtulu G, Mendes B. Co-combustion of coal and sewage sludge: Chemical and ecotoxicological properties of ashes. *J Hazard Mater* 2009;170:902-9.
- [9]. Cartmell E, Gostelow P, Riddell-Black D, Simms N, Oakey J, Morris J, Jeffrey P, Howsam P, Pollard SJ. Biosolids – a fuel or a waste? An integrated appraisal of five co-combustion scenarios with policy analysis. *Environ Sci Technol* 2006;40:649-58.
- [10]. Folgueras MB, Díaz RM, Xiberta J, Prieto I. Thermogravimetric analysis of the co-combustion of coal and sewage sludge. *Fuel* 2003;82:2051-55.
- [11]. Otero M, Calvo LF, Gil MV, García AI, Morán A. Co-combustion of different sewage sludge and coal: A non-isothermal thermogravimetric kinetic analysis. *Bioresour Technol* 2008;99:6311-19.
- [12]. Spliethoff H, Scheurer, W, Hein KRG. Effect of co-combustion of sewage sludge and biomass on emissions and heavy metals behavior. *Trans I Chem E* 2000;78:33-39.
- [13]. Stasta P, Boran J, Bebar L, Stehlik P, Oral J. Thermal processing of sewage sludge. *Appl Therm Eng* 2006;26:1420-26.
- [14]. Urciuolo M, Solimene R, Chrione R, Salatino P. Fluidized bed combustion and fragmentation of wet sewage sludge. *Exp Therm Fluid Sci* 2012;43:97-104.
- [15]. Yao H, Naruse I. Combustion characteristics of dried sewage sludge and control of trace-metal emission. *Energy Fuels* 2005;19:2298–2303.
- [16]. Elled AL, Åmand LE, Leckner B, Andersson BÅ. The fate of trace elements in fluidised bed combustion of sewage sludge and wood. *Fuel* 2007;86:843-52.
- [17]. Jiang X, Li C, Fei Z, Chi Y, Yan J. Combustion characteristics of tannery sludge and volatilization of heavy metals in combustion. *J Zhejiang Univ-Sc A* 2010;11:530-37.
- [18]. Tang P, Zhao Y, Xia F. Thermal behaviors and heavy metal vaporization of phosphatized tannery sludge in incineration process. *J Environ Sci* 2008;20:1146-1152.
- [19]. Jones, F, Bankiewicz, D, Hupa, M. "Occurrence and sources of zinc in fuels" *FUEL* 117 (2014) 763-775.
- [20]. Font R, Fullana A, Conesa JA, Llavador F. Analysis of the pyrolysis and combustion of different sewage sludges by TG. *J Anal Appl Pyrolysis* 2001;58-59:927-41.
- [21]. Hsiao P, Lo S. Extractabilities of heavy metals in chemically-fixed sewage sludges. *J Hazard Mater* 1998;58:73-82.
- [22]. Hartman M, Pohořelý M, Trnka o. Behaviour of Inorganic Constituents of Municipal Sewage Sludge during Fluidized-Bed Combustion. *Chem Pap* 2007;61:181-85.
- [23]. Hoffmann G, Schingnitz D, Bilitewski B. Comparing different methods of analysing sewage sludge, dewatered sewage sludge and sewage sludge ash. *Desalination* 2010;250:399-403.
- [24]. Lapa N, Barbosa R, Lopes MH, Mendes B, Abelha P, Gulyurtlu I, Olivera JS. Chemical and ecotoxicological characterization of ashes obtained from sewage sludge combustion in a fluidised-bed reactor. *J Hazard Mater* 2007;147:175-83.
- [25]. Nadziakiewicz J, Koziół M. Co-combustion of sludge with coal. *Appl Energy* 2003;75:239-48.
- [26]. Shirvastava SK, Banerjee DK. Operationally determined speciation of copper and zinc in sewage sludge. *Chem Spec Bioavailab* 1998;10:137-43.

- [27]. Linder, K. Sameldning av rötslam och energirika avfallsbränslen eller skogsbränslen. Värmeforskrapport 2001:741.
- [28]. Krook J, Mårtensson A, Eklund M. Metal contamination in recovered waste wood used as energy source in Sweden. *Resour Conserv Recy* 2004;41:1-14.
- [29]. European Cooperation in Science and Technology (COST). COST Action E31: Management of Recovered Wood; COST: Brussels, Belgium; 2007. http://www.ctib tchn.be/coste31/frames/f_e31.htm, Accessed 6 July, 2010.
- [30]. Krook J, Mårtensson A, Eklund M. Sources of heavy metal contamination in Swedish wood waste used for combustion. *Waste Manage* 2006;26:158–66.
- [31]. Bankiewicz D, Corrosion behaviour of boiler tube materials during combustion of fuels containing Zn and Pb. Academic Dissertation, Åbo Akademi, Faculty of Chemical Engineering, Process Chemistry Centre, Åbo, Finland;2012.
- [32]. Sörme, L. Karlsson, A. Strategier för att hantera tryckimpregnerat virke som bränsle – baserat på fildöet av koppar, krom och arsenic. Avfall Sverige Rapport 2012:05. ISSN 1103-4092
- [33]. Harnevie, H., Olvstam, M_L. Regelverk för eldning av returträflis. Värmeforskrapport 2001:718.
- [34]. Jermer J, Ekvall A, Tullin C. Inventering av föroreningar i returträ. Värmeforskrapport 2001:732.
- [35]. Andersson, C., Högberg, J. Orsaker till askrelaterade driftproblem vid eldning av returträflis. Värmeforskrapport 2001:733.
- [36]. Sjöblom, R. Hypoteser och mekanismer för bildning av beläggningar innehållande zink och bly i samband med förbränning av returflis. Värmeforskrapport 2001:734
- [37]. Ljungdahl, B., Zintl, F. RT-flis och rötslam. Problemidentifiering relaterad till bäddsintring och emissioner vid eldning i FB. Värmeforskrapport 2001:753
- [38]. Tullin, C., Jermer, J., Inventering och energiutvinning av träskyddsbehandlat virke i Sverige. Värmeforskrapport 1998:653
- [39]. Krook, J. Martensson, A. Eklund, M, Libiseller, C. Swedish recovered wood waste: Linking regulation and contamination, *Waste Manage* 2008;28(3):638-648
- [40]. Avfall Sverige. Svensk Avfallshantering 2016
- [41]. Berg, M. Andersson, A. Andersson, C. von Bahr, B. Ekvall, A. Eriksson, J. Eskilsson, D. Harnevie, H. Hemström, B. Jungstedt, J. Keihäs, J. Kling, Å. Mueller, C. Sieurin, J. Tullin, C. Wikman, K. Förbränning av returträflis – Etapp 2 av ramprojekt returträflis. Värmeforskrapport 2003:820.
- [42]. Strömberg, B. Herstad Svärd S. Bränslehandboken 2012. Värmeforskrapport 2012:971.
- [43]. Burman, D. Förbränning av returträbränslen (RT-flis) med svaveladditiv. Examensarbete vid Umeå Univeristet, 2005.
- [44]. Lindau, L. Mätning av emissioner vid förbränning av RT-flis för att identifiera eventuella ombyggnadsåtgärder. Värmeforskrapport 2003:799
- [45]. Andersson, C., Tullin, C. Förbränning av returflis – kvalitetssäkring och drifterfarenheter. Värmeforskrapport 1999:668.
- [46]. Bjurström, H., Wikman, K. Askanvändning vid samförbränning av RT-flis med olika biobränslen; Försöksprogram i en 24 MWth bubblande bädd. Värmeforskrapport 2005:932.

- [47]. Enestam, S., Backman, R., Mäkelä, K., Hupa, M. Evaluation of the condensation behavior of lead and zinc in BFB combustion of recovered waste wood. *Fuel Pro Tech.* 2013;105:106-169
- [48]. Haydary, J., Susa, D., Gelinger, V., Cacho, F. Pyrolysis of automobile shredder residue in a laboratory scale screw type reactor. *J. Environ. Chem. Eng.* 2016;4:956-972
- [49]. Vermeulen, I., van Caneghem, J., Block, C., Baeyens, J., Vandecasteele, C. Automotive shredder residue (ASR): Reviewing its production from end-of-life vehicles (ELVs) and its recycling, energy or chemicals' valorisation. *J. Hazard. Mat.* 2011;190:8-27
- [50]. Zorpas, A.A., Inglezakis, V.J. Automotive industry challenges in meeting EU 2015 environmental standard, *Technol. Soc.* 2012;34:55–83
- [51]. Fiore, S., Ruffino, B., Zanetti, M.C. Automobile shredder residues in Italy: characterization and valorization opportunities, *Waste Manage.* 2012;32:1548–1559
- [52]. Andersen, F., Larsen, H., Skovgaard, M. Projection of end-of-life vehicles: development of a projection model and estimates for ELVs for 2005–2030, ETC/RWM working paper 2008/2, Copenhagen, 2008.
- [53]. Gyllenhammar, M., Victorén, A., Niemi, J., Johansson, A. Energiåtervinning av brännbar fraktion från fragmentering av metallhaltigt avfall. *Waste Refinery Rapport WR-08 2009*
- [54]. Directive 1999/31/EC <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:31999L0031> (sidan besökt 2017-01-09)
- [55]. Directive 2000/53/EC <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02000L0053-20130611&qid=1405610569066&from=EN> (sidan besökt 2017-01-09)
- [56]. Directive 2005/64/EC <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32005L0064> (sidan besökt 2017-01-09)
- [57]. Mancini, G., Tamma, R., Viotti, P. Thermal process of fluff: Preliminary tests on a full-scale treatment plant. *Waste Manage.* 2010;30:1670-1682
- [58]. Gyllenhammar, M., Davidsson, K., Jonsson, T., Pettersson, J., Victorén, A., Andersson, H., Widén, C. Energiåtervinning av brännbar fraktion från fragmentering av metallhaltigt avfall – Steg 2. *Waste Refinery Rapport WR-23 2010*
- [59]. Hjelm, O., Wahlström, M., Andersson, M.T., Laine-Ylijoki, J., Wadstein, W., Rihm, T. Treatment Methods for Waste to be Landfilled, Nordic Council of Ministers, 2009
- [60]. Kameda, T., Fukuda, Y., Park, K.-S., Grause, G., Yoshioka, T. Efficient dehalogenation of automobile shredder residue in NaOH/ethylene glycol using a ball mill. *Chemosphere* 2009;74:287-292
- [61]. Gendebien, A., Levens, A., Blackmore, K., Godley, A., Lewin, K., Whiting, K.J., Davis, R. Refuse derived fuel, current practise and perspectives, Final Report for the European Commission – Directorate General Environment 2003, Ref.Nr. CO5087-4
- [62]. Trouvé, G., Kauffmann, A., Deflosse, L. Comparative thermodynamic and experimental study of some heavy metal behaviours during automotive shredder residue incineration. *Waste Manage.* 1998;18:301-307
- [63]. Jalkanen, H. On the direct recycling of automotive shredder residue and electronic scrap in metallurgical industry. *Acta Metall. Slovaca.* 2006;12:160-166

- [64]. Zolezzi, M., Nicoletta, C., Ferrara, S., Lacobucci, C., Rovatti, M. Conventional and fast pyrolysis of automobile shredder residues (ASR). *Waste Manage.* 2004;24:691-699
- [65]. Viganò, F., Consonni, S., Grosso, M., Rigamonti, L. Material and energy recovery from Automotive Shredder Residue (ASR) via sequential gasification and combustion. *Waste Manage.* 2010;30:145-153
- [66]. Osada, M., Tanigaki, N., Takahashi, S., Sakai, S. Heteroatom-doped flame retardants and heavy metals in automobile shredder residue (ASR) and their behaviour in the melting process. *J. Mater. Cycles Waste Manage.* 2008;10:93-101